

**ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2014

№ 2 (75)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 года

Выходит один раз в квартал

Июнь 2014 года

*Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых журналов и научных изданий,
утвержденный президиумом ВАК
Министерства образования и науки РФ,
в которых публикуются основные научные
результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук*

Главный редактор
Заместитель главного редактора
Ответственный секретарь

д.и.н., профессор И.Р. Плеве
д.т.н., профессор А.А. Сытник
д.ф.-м.н., профессор В.В. Астахов

Редакционный совет: д.т.н. В.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатъев, д.т.н. В.В. Калашников, д.т.н. И.А. Новаков, д.и.н. И.Р. Плеве (председатель), д.т.н. А.Ф. Резчиков, д. социол. н. С.Б. Суоров, д.т.н. А.А. Сытник (заместитель председателя), д.ф.-м.н. Я. Аврейцевич (Польша), д.э.н. У. Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Э. Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э. де Соузе Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов

Редакционная коллегия: д.т.н. В.А. Крысько, д.ф.-м.н. В.В. Астахов, д.х.н. А.В. Гороховский, д.т.н. В.Н. Лясников, д.ф.-м.н. Л.А. Мельников, д.т.н. Р.З. Аминов, д.т.н. Ю.Г. Иващенко, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. А.А. Сытник, д.т.н. А.А. Большаков, д.филос.н. Д.В. Михель, д.биол.н. Е.И. Тихомирова, д.э.н. А.Н. Плотников, д.и.н. Г.В. Лобачева

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Н.В. Лукашовой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 99-87-39
E-mail: vestnik@sstu.ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2) 52-53-02

Подписано в печать 27.06.14
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 33,75 Уч.-изд. л. 16,85
Тираж 500 экз. Заказ 164
Отпечатано в Издательстве СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

Подписной индекс 18378
(каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2014 г.)

**VESTNIK
SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY
2014**

№ 2 (75)

*This journal is included into the list
of leading reviewed journals and scientific
publications approved by the presidium of Ministry
of Education and Sciences of Russian Federation
where major scientific thesis's results
for academic degree competition
for a doctor and a candidate of sciences*

Editor-in-chief
Editor-in-chief assistant
Executive secretary

Professor I.R. Pleve
Professor A.A. Sytnik
Professor V.V. Astakhov

Drafting committee: Prof. V.I. Volchihin, Prof. V.A. Golenkov, Prof. V.A. Dines, Prof. V. Zelensky (Poland), Prof. V.A. Ignatyev, Prof. V.V. Kalashnikov, Prof. I.A. Novakov, Prof. I.R. Pleve (Chairman), Prof. A.F. Rezchikov, Prof. A.A. Sytnik (Vice of the Chairman), Prof. S.B. Surovov, Prof. Y. Avreytsevich (Poland), Prof. U. Arnold (Germany), Prof. A. Merser (UK), Prof. E. D'Sousa Ferreira (Portugal), Prof. T. Chermak (Czech Republic), Prof. Y.V. Shlenov

Editorial board: Prof. V.A. Krysko, Prof. V.V. Astakhov, Prof. A.V. Gorokhovski, Prof. V.N. Lyasnikov, Prof. L.A. Melnikov, Prof. R.Z. Aminov, Prof. Y.G. Ivashchenko, Prof. A.S. Denisov, Prof. A.A. Sytnik, Prof. A.A. Bolshakov, Prof. D.V. Mikhel, Prof. Y.I. Tikhomirova, Prof. A.N. Plotnikov, Prof. G.V. Lobacheva

Editor L.A. Skvortsova
Computer-based page-proof N.V. Lukashova
Rendering A.H. Askarova

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054
Russia
Telephone: +8452/99-87-39
E-mail: vestnik@sstu.ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Fax: +8452/52-53-02

Signed for publishing: 27.06.14
Format 60×84 1/8 Paper offset.
Apr. tp. l. 33,75 Acc.-pbl. 16,85
Edition 500 psc. Order 164
Printed in publishing house of SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054,
Russia

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Крючков М.В. Методика определения оптимальной мощности обучающих данных в условиях ограниченности временного ряда	7
--	---

ФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Байбурин В.Б., Розов А.С. Закритический режим магнетрона в условиях переменного магнитного поля	11
Бровко А.В. Метод реконструкции параметров группы сферических включений в диэлектрическом образце с использованием искусственной нейронной сети	14
Гестрин С.Г., Щукина Е.В. Математическое моделирование взаимодействия звуковых колебаний с цепочкой дислокаций в пьезоэлектрике	19
Золотых Д.Н., Кузнецова Л.В., Роговин В.И. Методика проектирования петлевого зонда	28
Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Двухчастотный фазовый метод измерения дальности в просветных радиолокационных системах	32
Курчатов И.С., Бундюк А.В., Басиева И.Т., Кустов Д.М. Исследование материалов для ИК лазеров на основе полупроводников $A^{IV}B^{VI}$ и $A^{III}B^{V}$, легированных ионами CO^{2+}	35
Муллин В.В., Фурсаев М.А. Распределение напряжения между вакуумными дугогасительными камерами, соединенными последовательно	42
Орлова М.Д., Зоркин А.Я., Бабкова Н.И. Твердофазное соединение узлов металлокерамических спиральных замедляющих систем	46
Плотников П.К., Карамышев Н.Н., Карамышев А.Н. О влиянии включения – отключения двигателя от колёс в легковом автомобиле на величины предварительных смещений и плеч трения качения	55
Скрипаченко К.К., Кошуро В.А., Шумилин А.И., Пичхидзе С.Я. Разработка конструкции и технологии изготовления сердечного стента	60
Трегулов В.В. Измерение разрывов зон в энергетической диаграмме гетероструктуры $CdS/Si(p)$, изготовленной методом гидрохимического осаждения пленки CdS	64
Черкасова О.А. Исследование физических и биофизических характеристик поливинилхлорида в процессе горения	68

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Васильков М.Ю., Бусыгина Е.А., Никитина Л.В., Кособудский И.Д. Получение полимерных композиционных материалов, обладающих электретными свойствами, и изучение их электрических свойств	72
Гусева Е.С., Жускеев А.Р., Попова С.С. Электрохимическое поведение MnO_2 – электрода в растворах молибдатов и вольфраматов щелочных металлов	76
Корчина Л.В., Зубова Н.Г., Устинова Т.П. Исследование влияния параметров модификации ПАН-жгутика аппретирующими составами на его свойства	83
Студенцов В.Н., Пятаев И.В. Влияние электромагнитных колебаний СВЧ на структуру и свойства термопластов и реактопластов	86
Элькин П.М., Гречухина О.Н., Дормидонтов П.Г., Карташов М.В., Попов А.А., Пулин В.Ф. Моделирование адиабатических потенциалов флаванов	93
Элькин М.Д., Гречухина О.Н., Дормидонтов П.Г., Карташов М.В., Попов А.А., Пулин В.Ф. Структурно-динамические модели и спектральная идентификация флавонов	97

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Бородулина С.В., Решетников М.К. Форма субъективного пространства как геометрическая основа нелинейной перспективы	103
Карачаровский В.Ю., Решетников М.К., Рязанов С.А. Визуализационная оценка геометрических характеристик контактирующей поверхности в червячных передачах на основе применения методов 3D компьютерной графики	106
Кобзев Р.А. Многокритериальное оптимальное проектирование механизмов подъема с применением динамического программирования	108
Кобзев Р.А. Обеспечение безопасности эксплуатации козловых кранов высокого класса ответственности при проектировании	113
Кондратов Д.В., Калинина А.В. Задачи гидроупругости для трубы кольцевого профиля с упругой, геометрически нерегулярной внешней оболочкой при наличии вибрации	117
Крюков С.А., Байдакова Н.В. Системно-комплексный подход к модифицированию абразивных инструментов при их совершенствовании	122
Кутин А.А., Долгов В.А., Милькин В.А. Информационное обеспечение метода оценки производственного потенциала машиностроительного производства	126
Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю. Разработка механизмов взаимодействия между конструкторской и технологической подготовкой производства для принятия рациональных проектных решений	130

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В. Повышение энергоэффективности газотурбинных установок	138
---	-----

Семенов Б.А., Озеров Н.А. Локальный теплообмен в центре удара плоской воздушной струи, растекающейся по плоской поверхности.....	142
Злобина И.В., Коломейцев В.А., Кошура В.А., Бекренев Н.В. Исследование влияния свч – излучения на структуру мясных кулинарных рубленых изделий с добавлением муки нута.....	148
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ	
Власов А.П., Бобков С.П. К вопросу об использовании методов исследования операций в автоматизированной системе управления предприятием химического машиностроения	157
Игнатьев А.А., Мотков А.Г., Щеголев С.С. Идентификация кольца подшипника как динамической системы при импульсном воздействии.....	161
Ле Н.В. Интеллектуальная медицинская система дифференциальной диагностики на основе экспертных систем.....	167
Сибкина И.В., Квятковская И.Ю., Космачёва И.М. Оценка уровня сформированности компетенции студента вуза на примере графовой модели	179
Хиен Фам Куанг, Квятковская И.Ю. Решение задач многокритериальной оптимизации для оценки качества объектов с неоднородными признаками.....	185
Шумарова О.С., Игнатьев С.А., Самойлова Е.М. Автоматизированная обработка данных вихретокового контроля колец подшипников с применением вейвлет-преобразований	192
Щеголев С.С., Мотков А.Г., Погораздов В.В., Захарченко М.Ю. Алгоритм автоматизации ультразвукового метода дефектоскопии колец подшипников.....	196
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	
Будыльский А.В., Квятковская И.Ю. Модификация метода критической цепи при составлении расписания с учетом рисков	199
Власенко А.И. О моделях данных для медицинских информационных систем	205
Дрогайцев В.С., Ушаков В.А., Куликов Р.Е. Средства обеспечения эксплуатации электротехнических комплексов по техническому состоянию	210
Яндыбаева Н.В., Кожанова Е.Р., Кушников В.А. Разработка программного продукта для определения эффективности деятельности высшего учебного заведения	214
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	
Гусев В.А. Определение закона распределения скорости свободного движения легковых автомобилей	220
Столяров В.В. Оценка риска опережения быстроходными автомобилями тихоходных транспортных средств на шести- и восьмиполосных автомагистралях.....	225
ТРАНСПОРТ	
Мочалин С.М., Тюкина Л.В. Проблемы межорганизационного взаимодействия участников доставки грузов автомобильным транспортом в прямой цепи поставок	233
Изюмский А.А., Кирий К.А., Коновалова Т.В., Надирян С.Л. Роль инвестиций в создании и развитии региональных логистических систем	236
СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ	
Жуковский В.П., Скворцова Л.А. Ответственность руководителя образовательного учреждения: теоретический анализ проблемы.....	240
Карпов Ю.В. Образ города и перспективы развития городской застройки Саратова.....	244
Кузнецова К.А. Исследования социальной структуры, организации и управления в традициях британской социологии.....	251
Мельникова Н.И. Индекс готовности к сетевому обществу в плену у экспертных показателей.....	259
Федотова-Антонова Е.П. Детский труд: плюрализм в определении и понятия и меры социальной политики	266

CONTENTS

MATHEMATICS AND MECHANICS

Kryuchkov M.V. A method for determining optimum capacity of the training data under limited time series	7
--	---

PHYSICS, RADIOTECHNICS AND ELECTRONICS

Baiburin V.B., Rozov A.S. The magnetron supercritical regime under a variable magnetic field.....	11
Brovko A.V. A reconstruction method applied for the parameters of a of spherical inclusion group in a dielectric sample using an artificial neural network.....	14
Gestrin S.G., Schukina E.V. Mathematical modeling of acoustic vibration interaction in a piezoelectric dislocation chain	19
Zolotych D.N., Kuznetsova L.V., Rogovin V.I. A design method for the loop-probe	28
Kovalev A.N., Kovalev F.N. The dual frequency phasic method for range finding in forward-scattering radar systems	32
Kurchatov I.S., Bundyuk A.V., Basieva I.T., Kustov D.M. IR lasers using $A^{II}B^{VI}A^{III}B^V$ semiconductors with Co^{2+} IONS.....	35
Mullin V.V., Fursayev M.A. Voltage distribution among vacuum interrupters in series coupling	42
Orlova M.D., Zorkin A.Ya., Babkova N.I. Solid-phase compounds in metal-ceramic helical slow-wave structures.....	46
Plotnikov P.K., Karamyshev N.N., Karamyshev A.N. Engine start and shutoff impact in a motor vehicle by an order of preliminary displacement and rolling friction unit.....	55
Skripachenko K.K., Koshuro V.A., Shumilin A.I., Pichhidze S.Ya. Design and manufacturing technologies of cardiac stents	60
Tregulov V.V. Measurements of band offsets to the energy diagram of the CdS/Si(p) heterostructure fabricated by the hydrochemical deposition CdS film method	64
Cherkasova O.A. Research into physical and biophysical characteristics of polyvinylchloride while burning.....	68

CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES

Vasilkov M.Yu., Busygina E.A., Nikitina L.V., Kosobudsky I.D. Synthesis of polymer composite materials with electret properties, and research into their electrical properties.....	72
Guseva E.S., Zhuskeev A.R., Popova S.S. Electrochemical behavior of mno_2 – electrodes in molybdate solutions and alkali metal tungstates	77
Korchina L.V., Zubova N.G., Ustinova T.P. Using finishing agents to investigate the impact of pan flagellum modification parameters on its properties.....	83
Studentsov V.N., Pyataev I.V. Impact of electromagnetic super-high frequency oscillations on the structure and properties of thermoplastic and thermosetting materials.....	86
Elkin M.D., Grechuhina O.N., Dormidontov P.G., Kartashov M.V., Popov A.A., Pulin V.F. Modelling adiabatic potential for flavans.....	93
Elkin M.D., Grechuhina O.N., Dormidontov P.G., Kartashov M.V., Popov A.A., Pulin V.F. Structural- and-dynamic models and spectral identification of flavones	98

ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

Borodulina S.V., Resetnikov M.K. Form subjective space as the geometric basis of the nonlinear perspective	103
Karacharovskiy V.Yu., Reshetnikov M.K., Ryazanov S.A. Evaluation of geometric imaging characteristics of the contacting surfaces in worm gears on the basis of 3d computer graphics methods application	106
Kobzev R.A. Multicriteria optimum design of load-lifting winches using dynamic programming.....	109
Kobzev R.A. Design philosophy for gantry cranes: safety and reliability excellence.....	113
Kondratov D.V., Kalinina A.V. Hydroelasticity issues of the ring-type tube with elastic geometrically irregular outer shell under vibration	117
Kryukov S.A., Baydakova N.V. A comprehensive approach to modification of abrasive tools while improving their properties.....	122
Kutin A.A., Dolgov V.A., Milkin V.A. Information support for the method evaluating the production potential at mechanical engineering industries.....	126
Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Interaction mechanisms between the design and process engineering to make efficient design solutions.....	131

POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

Dolotovskiy I.V., Larin E.A., Dolotovskaya N.V. Improving the energy efficiency of gas turbine plants.....	138
Zlobina I.V., Kolomeytsev V.A., Koshuro V.A., Bekrenev N.V. Research into impact of microwave radiation on the structure of chopped meat products with added chick-pea flour.....	143
Semyonov B.A., Ozerov N.A. Local heat-transfer in the impact centre of the flat air stream spreading over the flat surface.....	148

AUTOMATION AND CONTROL

Vlasov A.P., Bobkov S.P. On research methods in automated control systems at chemical engineering companies..... 157

Ignatiev A.A., Motkov A.G., Shchegolev S.S. Identification of bearing rings using ultrasonic and acoustic methods..... 162

Le N.V. An intelligent medical differential diagnosis system based on expert systems..... 167

Sibikina I.V., Kvyatkovskaya I.Yu., Kosmacheva I.M. Assessment of the competence level of a student using the graph model 179

Pham Quang Hiep, Kvyatkovskaya I.Yu. Solving multiobjective optimization problems to evaluate the quality of objects with heterogeneous features..... 185

Shumarova O.S., Ignatyev S.A., Samoylova E.M. Automated data processing of eddy current testing for bearing rings using wavelet transforms..... 192

Shchegolev S.S., Motkov A.G., Pogorazdov V.V. An algorithm for automation of ultrasonic flaw detection of bearing rings..... 196

INFORMATION TECHNOLOGIES

Budylnskiy A.V., Kvyatkovskaya I.Yu. Modification of the critical chain method for scheduling under risks..... 199

Vlasenko A.I. Data models for medical information system..... 205

Drogaytsev V.S., Ushakov V.A., Kulikov R.E. Ensuring operation of electrotechnical complexes according to technical conditions..... 210

Yandybaeva N.V., Kozhanova E.R., Kushnikov V.A. Developing software to determine effectiveness of a higher school 214

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Shoshin E.A., Gusev V.A. Defining the distribution law for the free running speed of motor vehicles 220

Stolyarov V.V. Estimating the risk of overtaking by high-speed cars of low-speed cars on six and eight lane highways..... 225

TRANSPORT

Mochalin S.M., Tyukina L.V. Problems of inter-organizational interaction of participants providing cargo transportation in direct supply chains..... 233

Izyumsky A.A., Kiriy C.A., Konovalova T.V., Nadiryan S.L. The role of investments in the creation and development of regional logistics systems 237

SOCIOLOGY AND CULTUROLOGY

Zhukovsky V.P., Skvortsova L.A. Responsibility of the head of an educational institution: theoretical analysis of the problem..... 240

Karpov Ju.V. The image of a city and prospects for the development of city building in Saratov 244

Kuznetsova K.A. Research into the social structure, organization and management in traditions of british sociology 251

Melnikova N.I. Network readiness index in captivity of expert indicators..... 259

Fedotova-Antonova E.P. Child labor: pluralism in the definition and concepts, and measures of social policy 267

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 519.248

М.В. Крючков

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ
В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОСТИ ВРЕМЕННОГО РЯДА

Предложена методика определения длины временного ряда, достаточной для построения эффективной модели прогнозирования дальнейших его значений. В дополнение к теоретическим выкладкам проведен численный эксперимент по анализу длин доверительных интервалов частоты верных прогнозов, подтверждающий справедливость применения указанной методики.

Временной ряд, обучающая выборка, прогнозирование

M.V. Kryuchkov

A METHOD FOR DETERMINING OPTIMUM CAPACITY OF THE TRAINING DATA
UNDER LIMITED TIME SERIES

The paper proposes new methods developed to determine the length of time series adequate for the construction of an effective model used to predict its further values. In addition to theoretical statements, a numerical experiment was conducted to analyze the length of confidence intervals relating reliable estimates, which confirm the relevance of proposed methodology.

Time series, training data, forecasting

Рассмотрим систему, функционирующую в определенный дискретный промежуток времени. Для прогнозирования свойств системы необходимо определить количество наблюдений за ней, достаточное для построения эффективной прогностической модели (ЭПМ) [1]. Под эффективностью подразумевается способность осуществлять прогноз с точностью (вероятностью) не меньшей априорно заданной. Если для построения модели использовать малое количество наблюдений за объектом, то остается большой временной интервал для моделирования результатов с их последующим применением, однако возникают сложности настройки, и страдает точность прогноза. Для модели же, построенной по большой последовательности входных данных, зачастую не остается достаточного количества времени для ее применения, либо предложенные результаты не могут быть применены из-за возникающих краткосрочных рисков.

Утверждение: для построения ЭПМ, использующей в качестве входных данных l значений ограниченного временного ряда, достаточно положить $l = \left\lceil \frac{N}{e} \right\rceil$, где N – объем генеральной совокупности наблюдаемой величины ($N > 25$), $e \approx 2.7183$ – число Эйлера.

Доказательство. Обозначим события: $\{A_l\}$ – для построения ЭПМ достаточно использовать l первых значений временного ряда; $\{B_l\}$ – для построения ЭПМ таких значений требуется больше, чем l . Идея доказательства будет заключаться в том, чтобы найти такое значение l , начиная с которого для вероятностей соответствующих событий выполняется неравенство $p\{A_l\} \geq p\{B_l\}$.

Проведем серию рассуждений, необходимую для нахождения $p\{A_l\}$. Для начала заметим, что $p\{A_N\} = 1$, т.е. вероятность построить ЭПМ по всем данным ряда считаем равной 1. Выражение

$$p\{A_{N-1}\} = 1 - \frac{1}{N} = \frac{N-1}{N} \quad (1)$$

означает, что вероятность построения ЭПМ по $N-1$ значению отличается от 1 на вероятность неверно спрогнозировать 1 элемент (с номером N). Выберем (1) в качестве базы индукции для доказательства общего вида формулы $p\{A_l\}$. Далее предположим

$$p\{A_{N-s}\} = \frac{N-s}{N} \quad (2)$$

тогда $p\{A_{N-(s+1)}\}$ может быть вычислено как произведение вероятностей того, что по $N-(s+1)$ строится ЭПМ для прогнозирования $N-s$ элемента, которая в то же время является ЭПМ для всего ряда, т.е. исходя из базового утверждения и индукционного предположения может быть найдена по формуле

$$p\{A_{N-(s+1)}\} = \left(1 - \frac{1}{N-s}\right) \cdot \frac{N-s}{N} = \frac{N-(s+1)}{N}. \quad (3)$$

Таким образом, показано, что формула

$$p\{A_l\} = \frac{l}{N} \quad (4)$$

справедлива для базового случая, а из предположения ее вида для s наблюдений следует вывод о справедливости формулы для $s+1$ значений, что согласно принципам математической индукции означает ее доказанность.

Рассмотрим далее алгоритм нахождения $p\{B_l\}$. Для начала заметим, что $p\{B_N\} = 0$, т.е. вероятность того, что для построения ЭПМ требуется более N наблюдений, равна нулю. Выражение

$$p\{B_{N-1}\} = \frac{1}{N} \quad (5)$$

означает, что вероятность построить ЭПМ более чем по $N-1$ значению равна вероятности неверного прогнозирования последнего элемента. Выбираем (5) в качестве базового выражения и индуктивно предполагаем

$$p\{B_l\} = \frac{l}{N} \cdot \left(\frac{1}{N-1} + \frac{1}{N-2} + \dots + \frac{1}{l}\right). \quad (6)$$

Рассмотрим полную группу событий $\{H_1, H_2\}$: H_1 означает, что l наблюдений достаточно для построения ЭПМ, а H_2 – недостаточно, причем $p\{H_1\} = \frac{1}{l}$, а $p\{H_2\} = 1 - \frac{1}{l} = \frac{l-1}{l}$. Тогда по формуле полной вероятности имеем

$$\begin{aligned} p\{B_{l-1}\} &= p\{H_1\} \cdot p\{A_l\} + p\{H_2\} \cdot p\{B_l\} = \frac{1}{l} \cdot \frac{l}{N} + \frac{l-1}{l} \cdot \left(\frac{1}{N-1} + \frac{1}{N-2} + \dots + \frac{1}{l}\right) = \\ &= \frac{l-1}{N(l-1)} + \frac{l-1}{N} \cdot \left(\frac{1}{N-1} + \frac{1}{N-2} + \dots + \frac{1}{l}\right) = \frac{l-1}{N} \cdot \left(\frac{1}{N-1} + \frac{1}{N-2} + \dots + \frac{1}{l} + \frac{1}{l-1}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

Последнее выражение подтверждает справедливость формулы (6) на случай $l-1$, что, согласно принципам математической индукции, является ее доказательством.

Для завершения доказательства осталось решить неравенство $p\{A_l\} \geq p\{B_l\}$ относительно l . В силу положительности рассматриваемых величин запишем

$$\frac{p\{A_l\}}{p\{B_l\}} = \frac{1}{N-1} + \frac{1}{N-2} + \dots + \frac{1}{l} \geq 1. \quad (8)$$

Выражение в левой части неравенства (8) представляет собой разность частичных сумм гармонического ряда $S_{N-1} - S_{l-1} = \left(\sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{i}\right) - \left(\sum_{i=1}^{l-1} \frac{1}{i}\right)$. Воспользуемся асимптотическим разложением суммы n первых членов гармонического ряда [2], предложенным Л. Эйлером:

$$S_n = \ln(n) + \gamma + e_n, \quad (9)$$

где $\gamma = 0.5772$ – постоянная Эйлера-Маскерони, e_n – бесконечно малая величина, причем при $n > 25$ разность между асимптотическим разложением и точным значением частичной суммы не превосходит 0.5% [3]. Воспользовавшись формулой (9), пренебрегая малыми величинами, имеем

$$\ln(N) + \gamma + e_n - \ln(l) - \gamma - e_l > 1 \Rightarrow \ln\left(\frac{N}{l}\right) > 1. \tag{10}$$

Потенцируя последнее неравенство и выражая l , окончательно имеем $l < \frac{N}{e}$; **утверждение**

доказано.

Представленные выше теоретические выкладки в полной мере справедливы для случайного набора данных, но в практической деятельности, как правило, приходится иметь дело с псевдослучайными величинами либо с неизвестными законами распределения. Для нахождения оптимальной длины временного ряда, достаточной для построения ЭПМ, предложим следующую методику. Пусть состояния системы описываются булевым n -компонентным вектором $\vec{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$, $a_i \in \{0,1\}$, $i = \overline{1, N}$, каждая из которых псевдослучайна: принимает значение 1 с вероятностью p и 0 с $(1-p)$. На каждом временном шаге находим границы двустороннего доверительного интервала доли признака при известном объеме генеральной совокупности [4] при заданном уровне доверия γ по формуле

$$w - t_\gamma[N(0;1)] \cdot \sqrt{\frac{w(1-w)}{n} \cdot \frac{N-n}{N-1}} < p < w + t_\gamma[N(0;1)] \cdot \sqrt{\frac{w(1-w)}{n} \cdot \frac{N-n}{N-1}}, \tag{11}$$

где m – число появлений 1, $w = \frac{m}{n}$ – соответствующая частость, $t_\gamma[N(0;1)]$ – двусторонний квантиль уровня γ функции стандартного нормального распределения, задаваемой формулой

$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$. Критерием выбора точки останова в данном случае должны являться показатели изменения длины построенного доверительного интервала. Оценить эту величину можно двумя способами: визуально или с помощью разностного аналога [5] второй производной

$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2}$. Равенство второй производной нулю можно интерпретировать, как отсутствие скорости изменения длины интервала.

Для проведения конкретного численного эксперимента была сгенерирована псевдослучайная выборка, задающая указанный вектор \vec{a} для случая $N=500$ и $p=0,6$. По результатам численного эксперимента проводилось исследование зависимости от номера шага разности между границами доверительных интервалов (рис. 1) в условиях эмпирического становления вероятности, а также конечно-разностный аналог второй производной длины интервала (рис. 2).

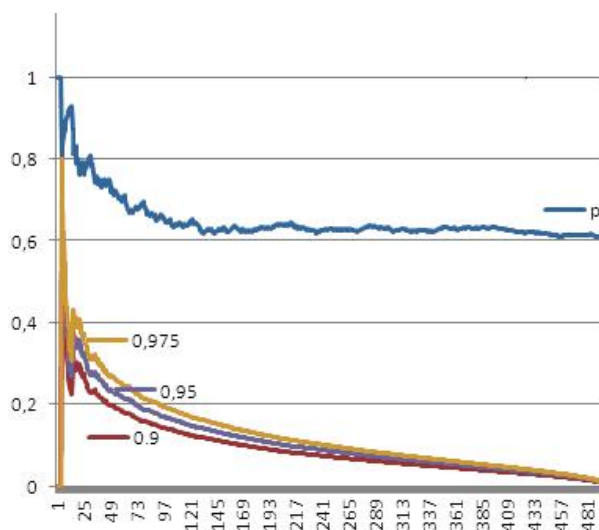


Рис. 1. Длины доверительных интервалов

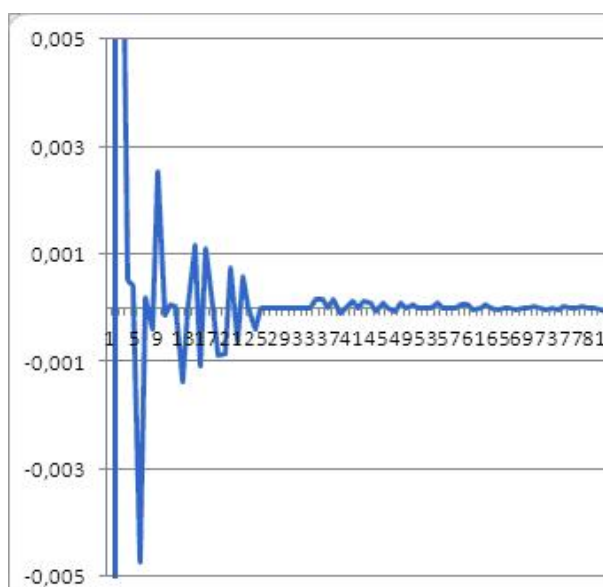


Рис. 2. Численный аналог второй производной

Из первого графика видно, что качественное изменение длины доверительного интервала прекращается на 170-190 шаге, что подтверждается графиком конечно-разностного аналога второй производной, построенного для наглядности с интервалом в 6 шагов – устойчивый выход на 0 соответствует значению аргумента примерно равного 30 (т.е. 180 шагам). Следует отметить, что для данного эксперимента $\left\lfloor \frac{N}{e} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{500}{e} \right\rfloor = 184$, что в полной мере подтверждает справедливость теоретических выводов. Для других значений N и p данные эксперимента также с большой точностью совпадали с результатами, предложенными в теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю.П. Лукашин. М.: Финансы и статистика, 2003. 451 с.
2. Математический анализ. Функции, пределы, ряды, цепные дроби / В.Л. Данилов и др. М.: Физматгиз, 1961. 439 с.
3. Гармонический ряд: теоретико-числовые свойства частичных сумм [Электронный ресурс] // Omop.su: Универсальная Энциклопедия. URL: <http://omop.su/628652.html> (дата обращения: 22.02.2014).
4. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. для вузов / Н.Ш. Кремер. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. М.: Наука, 1989. 616 с.

Крючков Михаил Викторович –
преподаватель кафедры высшей математики
Пермского филиала федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

Mikhail V. Kryuchkov –
Lecturer
Department of Higher Mathematics
National Research University
Higher School of Economics
Perm branch

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 20.06.14

ФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.86.029

В.Б. Байбурин, А.С. Розов

ЗАКРИТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МАГНЕТРОНА В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Проведён анализ поведения электрона при закритическом режиме магнетрона, авторами показано, что электрон может достичь анода при закритическом режиме работы магнетрона в условиях переменного магнитного поля.

Закритический режим, магнетрон, переменное магнитное поле

V.B. Baiburin, A.S. Rozov

THE MAGNETRON SUPERCRITICAL REGIME UNDER A VARIABLE MAGNETIC FIELD

In this paper the authors analyze the electron behavior under a supercritical operation mode of a magnetron. The authors show that an electron can reach an anode under the supercritical magnetron operation in conditions of a variable magnetic field.

Supercritical regime, magnetron, variable magnetic field

Известно, что под закритическим режимом магнетрона понимается такое соотношение статических полей: электрического и магнитного, при котором электрон не может достичь анода в отсутствие высокочастотных (ВЧ) полей [1]. В [2, 3] показано, что учёт переменного магнитного поля существенно влияет на характер электронных траекторий и явления энергообмена частицы с электромагнитным полем. В статье показано, что в отсутствие ВЧ поля в условиях переменной магнитной индукции возможно достижение электроном анода, несмотря на то, что амплитудные значения магнитной индукции соответствуют закритическим режимам. Анализ проводился применительно к схеме плоского магнетрона на рис. 1.

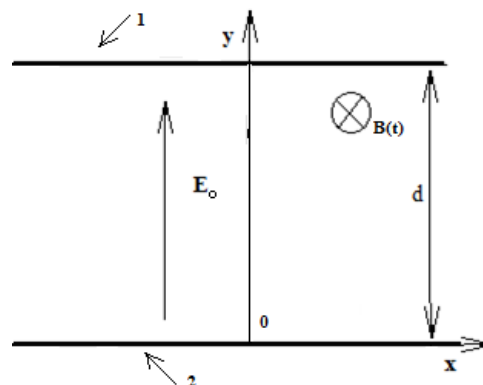


Рис. 1. Схема плоского магнетрона, на рисунке отмечены: d – расстояние анод-катод E_0 , $B(t)$ – действующие поля: E_0 – статическое электрическое поле, $B(t)$ – магнитная индукция. Цифрами отмечены: 1 – анод, 2 – катод

Уравнения движения заряда в скрещенных полях в присутствии переменной магнитной индукции с частотой ω_b (здесь и далее $\Omega_0 = \eta B_0$ – циклотронная частота, B_0 – статическая магнитная индукция, $\eta = \frac{e_0}{m_e}$ – удельный заряд электрона) имеют вид

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \eta B(t) \dot{y} \\ \ddot{y} &= \eta E_0 - \eta B(t) \dot{x} \end{aligned} \quad (1)$$

где E_0 – статическое электрическое поле:

$$E_0 = \frac{U_0}{d}, \quad (2)$$

U_0 – величина постоянного потенциала.

Рассмотрим два вида зависимости магнитной индукции от времени: в первом случае магнитная индукция определялась следующей зависимостью:

$$B(t) = B_0 + \frac{B_0}{2} \sin(\omega_B t), \quad (3)$$

во втором случае

$$B(t) = \frac{B_0}{2} \sin(\omega_B t). \quad (4)$$

Зависимость (4) имеет знакопеременный характер. B_0 – статическая составляющая магнитной индукции. Система уравнений (1) решалась численно методом Рунге – Кутты IV порядка точности [2]. Рассмотрим изменение частот ω_B в диапазоне: $0,01\Omega_0 - 10\Omega_0$.

Вначале рассмотрим результаты с учётом соотношения (3). Расчёты показали, что в диапазоне частот магнитного поля ω_B : $0,01\Omega_0 < \omega_B < 1,1\Omega_0$ имеет место достижение электронами анода, при этом чем ниже частота ω_B , тем длительнее время пролёта. Наименьшее время пролёта наблюдается при резонансе $\omega_B = \Omega_0$.

Соответствующие траектории показаны на рис. 2.

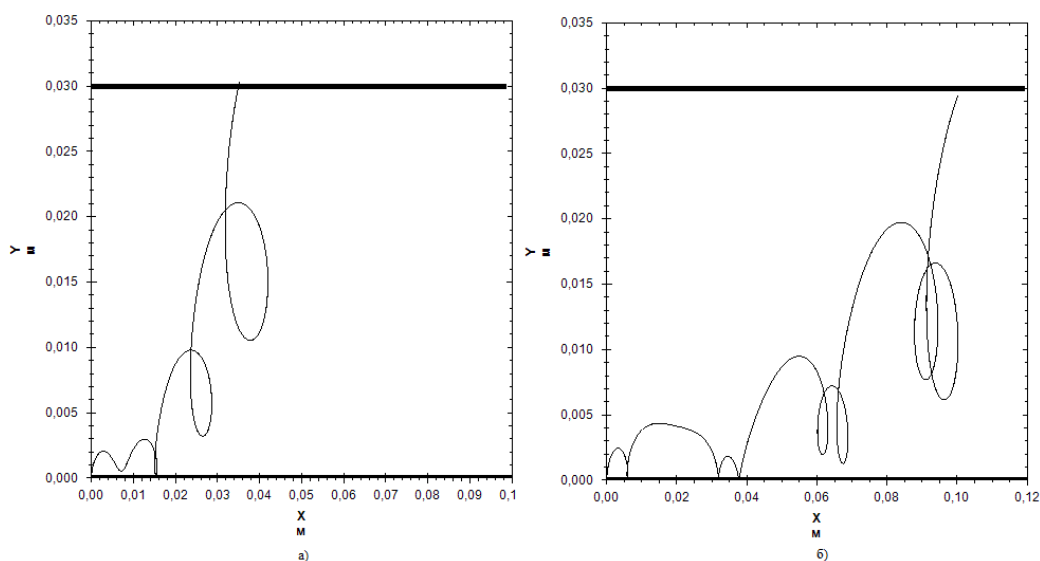


Рис. 2. Траектория электрона в следующих условиях, $U_0 = 1000$ В, $B_0 = 0,01$ Тл. На рисунке показаны различные частоты ω_B : (а) $\omega_B = \Omega_0$, (б) $\omega_B = \Omega_0/2$

На рис. 3 представлены траектории для $\omega_B > 1,1\Omega_0$, как видно на рисунке, траектории не достигают анода.

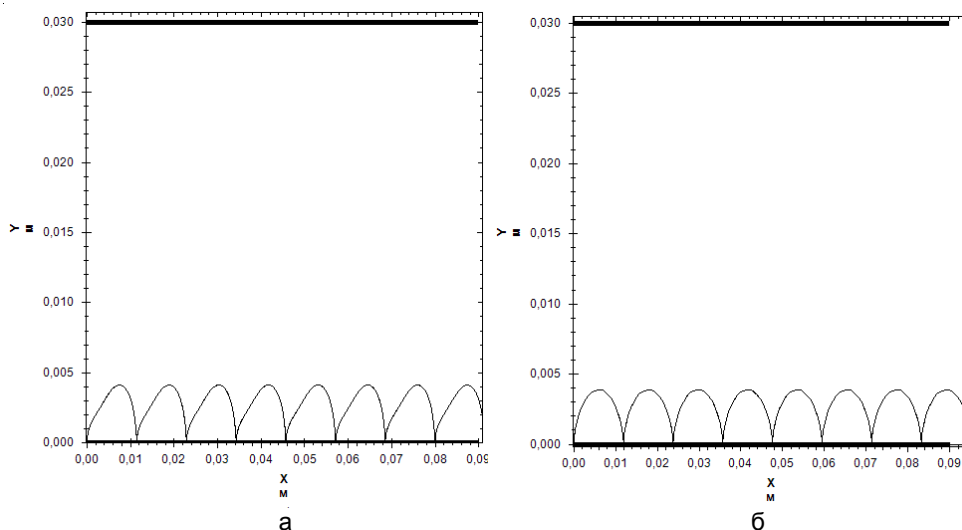


Рис. 3. Траектория электрона в следующих условиях, $U_0 = 1000$ В, $B_0 = 0,01$ Тл. На рисунке показаны различные частоты ω_B : (а) $\omega_B = 2\Omega_0$, (б) $\omega_B = 10\Omega_0$

Рассмотрим случай знакопеременной магнитной индукции (4), диапазон частот $\omega = 0.01$ – 10. Как показали расчёты, во всём рассмотренном диапазоне частот имеет место достижение электронами анода, соответствующие траектории представлены на рис. 4.

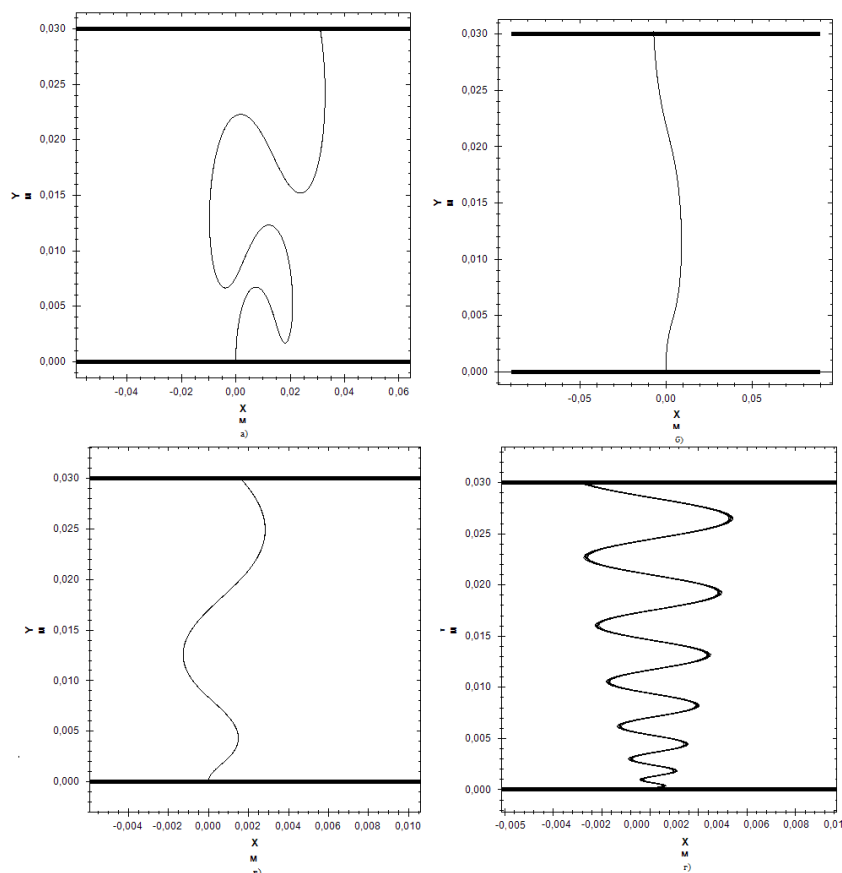


Рис. 4. Траектория электрона в следующих условиях, $U = 1000$ В, $B = 0.01$ Тл. На рисунке показаны различные частоты: (а), (б), (в), (г).

Полученные результаты могут представлять интерес при анализе закритических режимов работы магнетронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Т. 2 / И.В. Лебедев М.: Высш. шк., 1972. 376 с.
2. Розов А.С. Моделирование траекторий зарядов в цилиндрическом пучке при переменном магнитном поле / А.С. Розов, В.Б. Байбурин // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 8. С 1-4.
3. Байбурин В.Б. Численное моделирование ларморовых орбит в высокочастотном поле / В.Б. Байбурин, А.С. Розов // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Электроника и измерительная техника, радиотехника и связь. 2013. Вып. 8. № 23(126). С. 7-10.
4. Турчак П.А. Численные методы / П.А. Турчак. М.: Физматлит, 2003. 226 с.

Байбурин Вил Бариевич – доктор физико-математических наук, профессор заведующий кафедрой «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Розов Александр Станиславович – аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vil B. Baiburin – Ph. D., Professor, Head: Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander S. Rozov – Postgraduate Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

А.В. Бровко

**МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГРУППЫ СФЕРИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ
В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

Представлен новый метод определения статистических параметров группы неоднородных сферических включений в однородном диэлектрическом образце. Метод основан на использовании несложной измерительной техники, применении искусственной нейронной сети для определения статистических параметров исследуемого материала, и использовании метода конечных разностей для анализа электромагнитного поля на этапе обучения нейронной сети. Приводятся результаты численных экспериментов, демонстрирующие возможности предложенного метода.

Искусственная нейронная сеть, метод конечных разностей, алгоритм обучения нейронной сети, неразрушающий контроль материалов

A.V. Brovko

**A RECONSTRUCTION METHOD APPLIED FOR THE PARAMETERS OF
A OF SPHERICAL INCLUSION GROUP IN A DIELECTRIC SAMPLE
USING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK**

The paper presents a new method to determine statistical parameters in a group of inhomogeneous spherical inclusions applied to a homogeneous dielectric sample. The method applies simple measuring equipment, the artificial neural network used to determine statistical parameters of the tested materials, and the finite difference method used for electromagnetic field analysis while training the neural network. The results of numerical experiments demonstrate the potential of the proposed method.

Artificial neural network, finite difference method, training of the neural network algorithm, non-destructive testing of materials

Восстановление внутренней структуры диэлектрических объектов с использованием электромагнитных измерений в СВЧ диапазоне в последнее десятилетие привлекает повышенное внимание исследователей в связи с большим потенциалом практического применения во многих областях науки и техники: в медицине для визуализации распределения мягких тканей человека (СВЧ томография), в промышленности для нахождения повреждений и дефектов в конструкционных материалах и композитных панелях и др. Указанная задача относится к классу обратных задач, представляющих повышенную сложность при их решении. В последние годы теоретические основы этой технологии получили новое развитие в связи с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) [1-4].

В настоящей работе технология ИНС используется для восстановления внутренней структуры трехмерных диэлектрических объектов. Предложен метод восстановления статистических параметров группы неоднородных включений в диэлектрическом образце. Исходными данными для восстановления указанных характеристик являются результаты измерений матрицы рассеяния (S-параметры) закрытой волноводной системы, содержащей исследуемых диэлектрический образец. Математической моделью такой системы в данной работе служит ИНС, входами которой являются S-параметры, а выходами – характеристики диэлектрического образца, задающие его внутреннюю структуру. На этапе тренировки ИНС многократно решается прямая задача нахождения S-параметров системы, содержащей образец с заранее заданными характеристиками, с использованием численного конечноразностного моделирования электромагнитного поля в системе.

1. Метод восстановления параметров неоднородности

Метод восстановления параметров одиночной сферической неоднородности, основанный на использовании искусственной нейронной сети, был предложен в [1]. Метод позволяет локализовать и определить размеры одиночной неоднородности в образце, как диэлектрической, так и металлической. Однако если в образце присутствует группа неоднородностей (рис. 1), то приведенный в [1] алгоритм становится неработоспособным – восстановление параметров каждого из неоднородных

включений в группе не представляется возможным, так как измеряемой информации (коэффициентов отражения и прохождения) становится недостаточно для восстановления большого количества параметров. В ряде практических приложений, таких как обработка пищевых продуктов, создание конструкционных материалов и т.д., информация о точных позициях всех включений не является необходимой. В таких приложениях достаточно иметь информацию о статистических параметрах всей группы в целом.

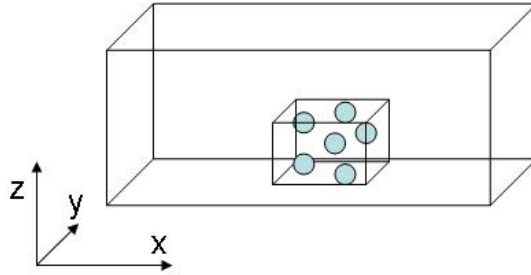


Рис. 1. Прямоугольный волновод, содержащий образец со множественными неоднородными включениями

В работе представлены результаты численного исследования возможности восстановления статистических параметров группы сферических диэлектрических неоднородностей в прямоугольном диэлектрическом образце.

Метод, используемый в настоящей работе, в основных чертах совпадает с тем, что приведен в [1] для восстановления параметров одиночного включения. Измерительная система представляет собой отрезок прямоугольного волновода WR340 с размерами $(86 \times 34 \times 250 \text{ мм})$. Частотный интервал для измерения S-параметров: $f_1 = 2 \text{ ГГц}$, $f_2 = 3 \text{ ГГц}$, и количество частотных точек $P = 21$. Исследуемый образец – прямоугольный параллелепипед с размерами $(40 \times 40 \times 40 \text{ мм})$. Материал образца – тефлон – имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 2.06$. Образец содержит множественные неоднородности, параметры которых подлежат восстановлению. Для реконструкции параметров используется искусственная нейронная сеть с радиальными базисными функциями, архитектура которой представлена на рис. 2, входной информацией для которой являются S-параметры в портах волноводной системы, однако в отличие от метода, представленного в [1], выходными параметрами сети являются не параметры каждой неоднородности в отдельности (которые определяются однозначно), а статистические параметры группы. В этом случае одному и тому же набору статистических параметров могут соответствовать различные распределения неоднородностей по объему образца, что потенциально приводит к неоднозначности определения S-параметров. Целью настоящего исследования является изучение вопроса о возможности восстановления различных статистических параметров в такой системе.

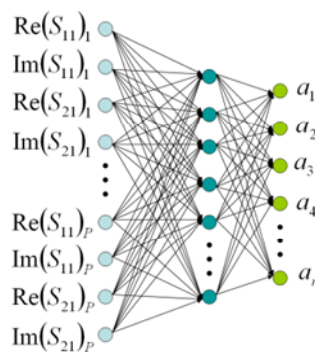


Рис. 2. Архитектура искусственной нейронной сети для реконструкции параметров группы неоднородностей

Исследование системы будем проводить путем численного моделирования с использованием программного обеспечения полноволнового трехмерного электромагнитного анализа *QuickWave-3D* [5]. Для работы алгоритма реконструкции, основанного на использовании ИНС, необходимо получить наборы входных и соответствующих им выходных параметров, которые используются для тренировки ИНС. Эти наборы будем получать путем прямого полного электромагнитного анализа системы. Для каждого прогона электромагнитного анализа задаем набор статистических параметров группы включений, затем подбираем параметры каждого включения так, чтобы параметры группы совпадали

с заданным набором. Затем проводим электромагнитное моделирование и получаем S-параметры системы в интересующем частотном диапазоне. Затем цикл повторяется для следующего набора статистических параметров. После того, как ИНС достаточно натренирована, мы пытаемся использовать ее для восстановления параметров группы включений для наборов, не участвовавших в обучении сети.

2. Численные результаты

Рассмотрим численные результаты, полученные с использованием приведенной технологии.

Первая группа результатов соответствует системе, в которой варьируемыми параметрами группы включений являются: количество включений (от 1 до 50), радиус включений (от 1 до 4.5 мм), позиции включений (случайное распределение внутри образца). Материал включений – стекло: $\varepsilon = 6.0$.

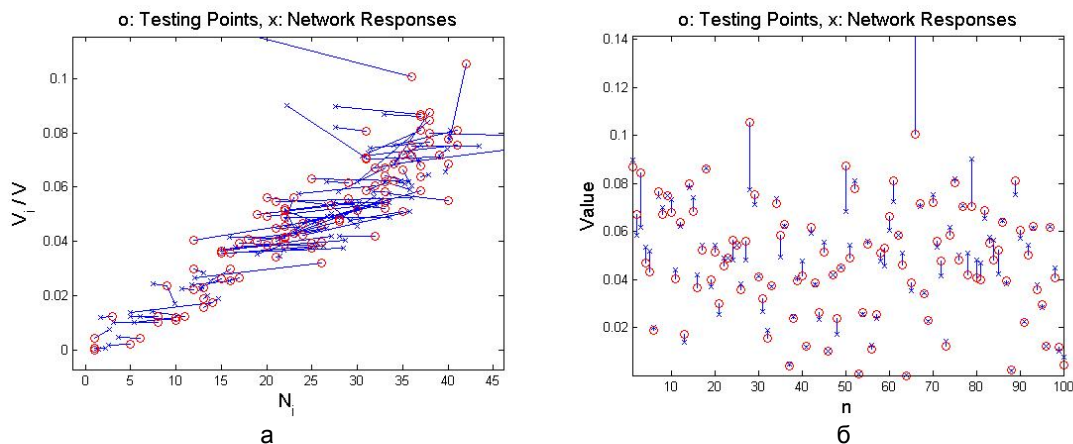


Рис. 3. Результаты реконструкции параметров группы включений (x) 100 тестовых наборов данных (o)

На рис. 3а представлены результаты реконструкции, полученные после тренировки ИНС на 1200 наборах данных, для 100 тестовых наборов. Реконструируемые параметры, отложенные по осям: N_i – количество включений в образце, V_i/V – объем материала всех включений, отнесенный к полному объему образца. Из рис. 3а видно, что линии, связывающие тестовые точки с откликами сети, в большинстве своем расположены горизонтально. Это означает, что точность восстановления относительного объема включений значительно выше точности определения количества включений в образце. Этот вывод подтверждается рис. 3б, на котором представлены только результаты по относительному объему для 100 тестовых точек. Очевидно, что для большинства тестовых точек отклик сети практически совпадает с тестовым значением.

Теперь рассмотрим результаты для системы, в которой варьируемыми параметрами являются: количество включений (от 1 до 50), диэлектрическая проницаемость материала включений (от 3 до 10), позиции включений (случайное распределение внутри образца). Радиус включений равен 3 мм. Реконструируемые параметры – относительный объем материала включений в образце и диэлектрическая проницаемость материала включений. Количество тренировочных точек равно 1500.

Из диаграммы, представленной на рис. 4а, видно, что хорошего совпадения откликов сети с тестовыми точками не получается ни по диэлектрической проницаемости включений, ни по относительному объему материала включений, что подтверждается рис. 4б. Однако на рис. 4а очевиден характерный паттерн поведения линий – большинство линий, связывающих тестовые точки и отклики сети, направлены под одинаковым углом к горизонтали. Это означает, что можно найти такое выражение, включающее в себя относительный объем и диэлектрическую проницаемость включений, которое будет реконструироваться значительно точнее, чем каждая из этих величин по отдельности.

На рис. 5 представлены результаты реконструкции различных сочетаний относительного объема включений и показателя преломления включений $n = \sqrt{\varepsilon}$. На рис. 5а представлена исходная диаграмма, а рис. 5б, в, г соответствуют реконструкции произведения относительного объема включений на показатель преломления в первой, во второй и в третьей степени. Из представленных диаграмм очевидно, что наилучшие результаты восстановления получаются для случая (в) – для произведения относительного объема включений на квадрат показателя преломления или на диэлектрическую проницаемость включений. На рис. 6 представлены результаты для этого случая. Очевидно, что для большинства тестовых точек наблюдается хорошее совпадение с реконструированными значениями.

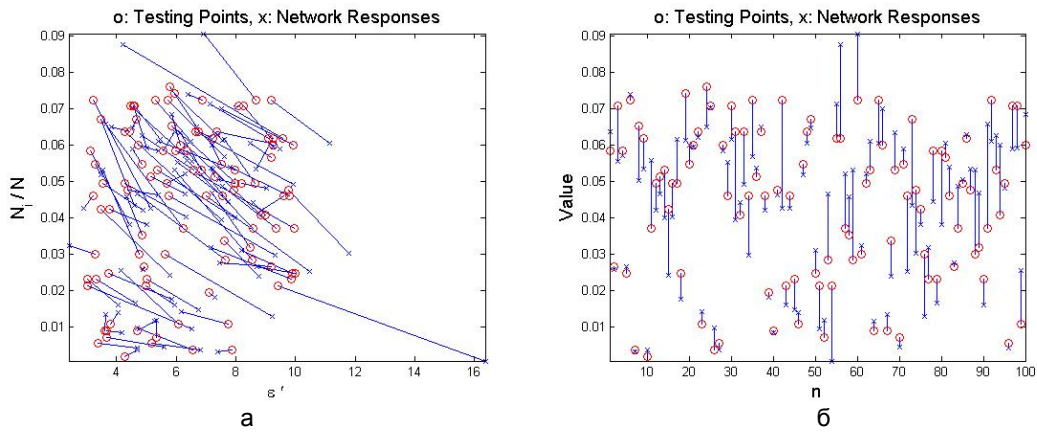


Рис. 4. Результаты реконструкции параметров группы включений (x) 100 тестовых наборов данных (o) для системы с варьируемым материалом включений

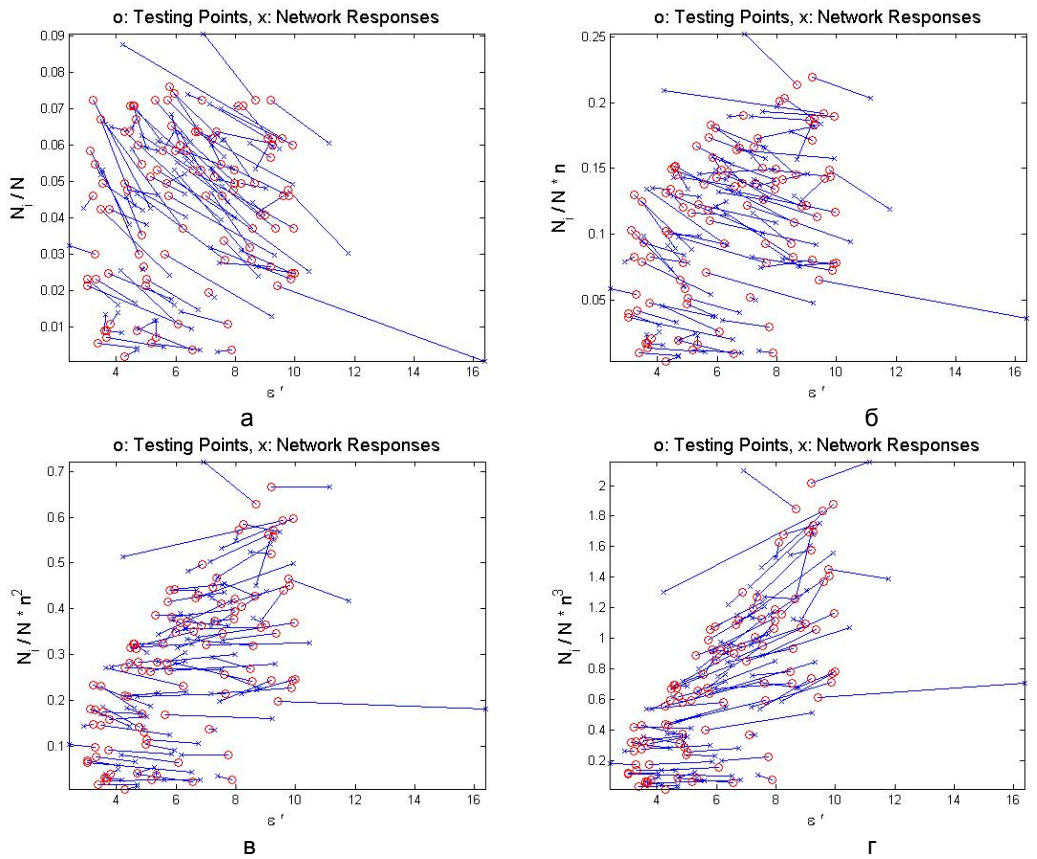


Рис. 5. Результаты реконструкции различных сочетаний параметров группы включений с варьируемым материалом включений

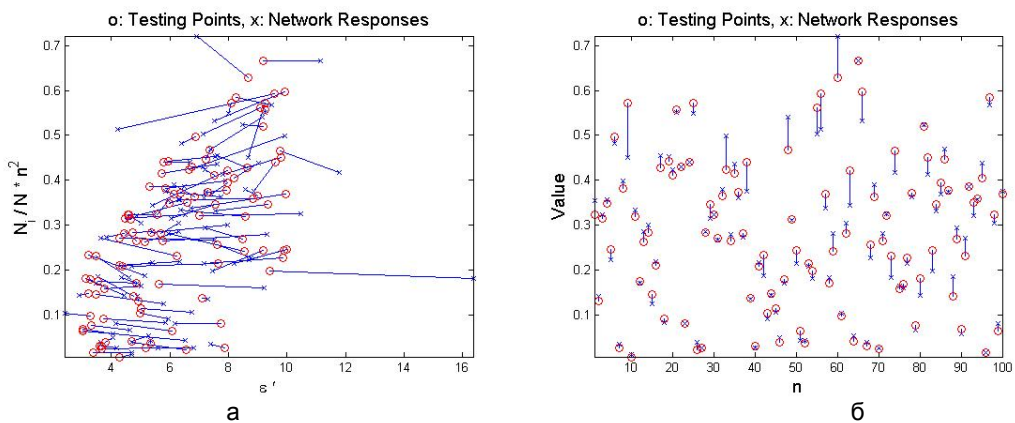


Рис. 6. Результаты реконструкции произведения относительного объема на диэлектрическую проницаемость включений для группы с варьируемым материалом включений

Теперь рассмотрим результаты реконструкции, полученные для случая варьирования и материальных параметров, и радиуса включений. Варьируемые параметры: количество включений (от 1 до 50), диэлектрическая проницаемость материала включений (от 3 до 10), позиции включений (случайное распределение внутри образца), радиус включений – случайная величина в диапазоне от 1 до 4.5 мм. Результаты моделирования показывают, что в этом случае также наиболее точно реконструируется произведение относительного объема на диэлектрическую проницаемость включений. Результаты реконструкции, полученные для количества тренировочных точек 1700, представлены на рис. 7.

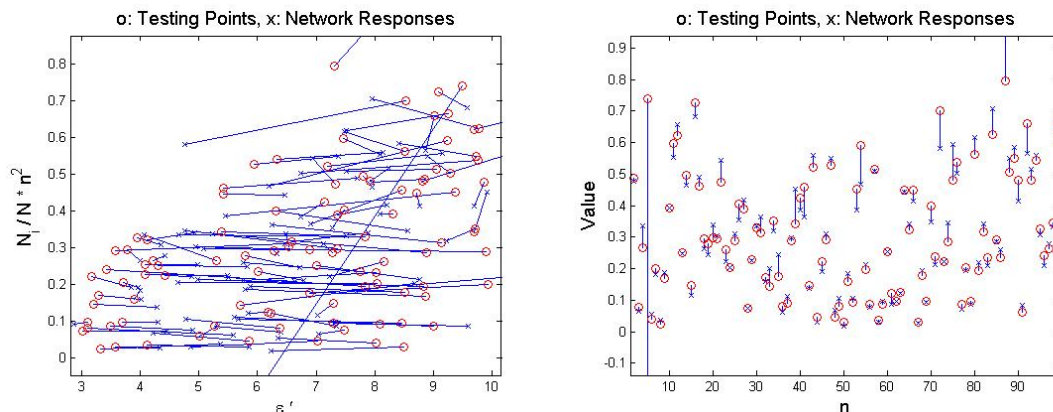


Рис. 7. Результаты реконструкции произведения относительного объема на диэлектрическую проницаемость включений для группы с варьируемым материалом включений и варьируемым радиусом

Очевидно, что точность реконструкции произведения относительного объема включений на диэлектрическую проницаемость при варьировании радиуса включений не ухудшается по сравнению со случаем постоянного радиуса.

3. Заключение

Таким образом, разработан метод восстановления статистических параметров группы диэлектрических включений в диэлектрическом образце. Метод основан на использовании искусственной нейронной сети и полного электромагнитного моделирования системы на этапе тренировки сети. Исходными данными для реконструкции параметров являются коэффициенты отражения и прохождения в портах волноводной системы. Численные результаты демонстрируют возможность достаточно точного восстановления относительного объема материала включений в случае неизменного материала, и произведения относительного объема на диэлектрическую проницаемость в случае варьируемого материала.

При использовании метода в промышленных установках может потребоваться модификация математической модели, учитывающая конструктивные особенности оборудования. Также потребуется формирование базы данных по результатам численного моделирования промышленной установки, возможно, с использованием высокопроизводительных вычислений [6]. Однако общая идеология метода, тип нейронной сети, используемой в качестве численного инвертора, и алгоритм обучения нейронной сети могут быть оставлены без изменений. Возможна также модификация алгоритма обучения нейронной сети с использованием метода конечных элементов для решения прямой задачи электромагнитного моделирования [7, 8], а также алгоритмов, учитывающих нелинейность материала диэлектрического образца [9].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Германской службы академических обменов DAAD.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brovko A.V. Waveguide microwave imaging: spherical inclusion in a dielectric sample / A.V. Brovko, E.K. Murphy, M. Rother, H.P. Schuchmann, V.V. Yakovlev // *IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett.* 2008. vol. 18, no 9. P. 647-649.
2. Mydur R. A neural-network approach to the electromagnetic imaging of elliptic conducting cylinders / R. Mydur, K.A. Michalski // *Microwave and Opt. Techn. Lett.* 2001. vol. 28, no. 5. P. 303-306.
3. Rekanos I.T. On-line inverse scattering of conducting cylinders using radial basis-function neural networks / I.T. Rekanos // *Microwave and Opt. Techn. Lett.* 2001. vol. 28, no 6. P. 378-380.
4. Rekanos I.T. Neural-network-based inverse-scattering technique for online microwave medical imaging / I.T. Rekanos // *IEEE Trans. on Magn.* 2002. vol. 38, no. 2. P. 1061-1064.

5. QuickWave-3D™, QWED Sp. z o. o., ul. Piękna 64a m 11, 00-672 Warsaw, Poland, <http://www.qwed.com.pl/>.

6. Долинина О.Н. Метод повышения эффективности обработки видеoinформации с использованием GRID-вычислений / О.Н. Долинина, А.В. Ермаков // Вестник СГТУ. 2010. №4 (50). Вып. 2. С. 131-133.

7. Клеев А.И. Численные методы расчета диэлектрических волноводов (волоконных световодов). Универсальные методики / А.И. Клеев, А.Б. Маненков, А.Г. Рожнев // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 11. С. 1938.

8. Коломейцев В.А. Моделирование нерегулярных волноведущих структур сложной конфигурации с неоднородным поглощающим заполнением / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров, С.В. Хомяков // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 12. С. 1420.

9. Petrov E.Yu. Exact axisymmetric solutions of the Maxwell equations in a nonlinear nondispersive medium / E.Yu. Petrov, A.V. Kudrin // Physical Review Letters. 2010. Т. 104. № 19. P. 190404.

Бровко Александр Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandre V. Brovko – Ph. D., Associate Professor Department of Applied Information Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 14.01.14, принята к опубликованию 20.06.14

УДК: 517.9: 538.9

С.Г. Гестрин, Е.В. Щукина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ С ЦЕПОЧКОЙ ДИСЛОКАЦИЙ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКЕ

Построена и исследована математическая модель, описывающая взаимодействие звуковых волн с цепочкой дислокаций в пьезоэлектрическом кристалле. Показано, что взаимодействие между колебаниями, локализованными на отдельных дислокациях, осуществляется преимущественно за счет длинноволновых возмущений. Получено и исследовано дисперсионное уравнение и найдена оценка для групповой скорости волн, распространяющихся вдоль цепочки, а также для ширины областей, занятых допустимыми значениями частот колебаний при различных расстояниях между дислокациями.

Пьезоэлектрики, дислокации, локализованные колебания

S.G. Gestrin, E.V. Schukina

MATHEMATICAL MODELING OF ACOUSTIC VIBRATION INTERACTION IN A PIEZOELECTRIC DISLOCATION CHAIN

The developed mathematical model describes the interaction between the sound waves and a chain of dislocations in the piezoelectric crystal. It is shown that the interaction between the vibrations localized in individual dislocations, is carried out mainly by long-wave perturbations. The dispersion equation is obtained and investigated, and an estimate is found for the group velocity of waves propagating along the chain, as well as for the width of the areas occupied by admissible values of oscillation frequencies at various distances between the dislocations.

Piezoelectric, dislocations, localized oscillations

В [1] впервые была исследована система, состоящая из двух параллельных дислокаций, находящихся в пьезоэлектрическом кристалле, на которых локализованы звуковые волны [2]. Показано, что общее решение дифференциального уравнения, описывающего волновые возмущения в такой системе, может быть представлено в виде суммы двух решений. Одно из них соответствует синфаз-

ным, а другое противофазным колебаниям, происходящим с различными частотами ω_1 и ω_2 . Были найдены частоты таких колебаний и показано, что при слабой связи между колебаниями энергию системы можно приближенно представить как сумму энергий волн, локализованных на каждой дислокации по отдельности. При этом их энергия периодически изменяется, попеременно перекачиваясь от одной дислокации к другой и обратно с частотой $\Omega \ll \omega_0$. Данное явление представляет собой внутренний резонанс, так как взаимодействие осуществляется между частями одной системы. В этой связи естественным представляется переход к более реалистичному случаю среды, содержащей большое количество дислокаций. Ниже исследованы волновые возмущения в пьезоэлектрической среде, при наличии в ней дефекта структуры в виде цепочки из N дислокаций.

Известно, что в цепочке из N связанных одинаковых осцилляторов, совершающих одномерное движение вдоль оси x , в случае выполнения циклических граничных условий $x_0 = x_N$ (x_n – смещение осциллятора с номером n) существуют волновые возмущения $x_n \sim \exp i(qn - \omega t)$, где $q = 2\pi j/N$ ($j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), при этом возможные значения частот колебаний определяются из соотношения

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 4\varepsilon^2 \sin^2 \frac{\pi j}{N}, \quad (1)$$

где ω_0 – собственная частота осциллятора при отсутствии связи между ними, параметр ε характеризует взаимодействие частиц. Вследствие периодичности зависимости (1) значения $|j| > N/2$ не соответствуют новым состояниям колеблющейся цепочки. Каждое из состояний представляет собой волну с частотой ω и волновым вектором q , бегущую вдоль цепочки. Возможные значения q в отличие от непрерывной среды ограничены неравенством $|q| < \pi$ [3].

В работе показано, что взаимодействие между звуковыми волнами [2], локализованными на отдельных дислокациях, приводит к возникновению нового вида волновых возмущений, распространяющихся вдоль цепочки (перпендикулярно к линиям дислокаций) и найден закон их дисперсии. Как будет показано ниже, в этом случае возникают полосы частот локализованных звуковых колебаний, отделенных конечной щелью от частот объемных колебаний.

Заметим, что волны, локализованные на дислокациях, существуют в кристаллах, имеющих различную физическую природу. Так, ранее в ряде работ [4-8] было указано на возможность локализации на дислокациях плазменных волн, поляритонов, экситонов Френкеля, спиновых волн. В силу сходства между дифференциальными уравнениями, описывающими локализованные волны в различных средах полученные ниже результаты, могут быть распространены также и на них.

Рассмотрим продольные волны в пьезоэлектрическом кристалле, относящиеся к классу C_{4v} (тетрагональная система), локализованные на дислокациях, ориентированных вдоль оси C_4 . Выбираем систему координат с осью z по оси C_4 и осями x и y , перпендикулярными к двум из вертикальных плоскостей симметрии. Уравнение, описывающее малые колебания $u_z(x, y, z, t) = u_{z0}(x, y, k) \exp i(kz - \omega t)$ в кристалле, содержащем дислокационную цепочку:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) u_{z0} - u_{z0} \left(\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2 \right) = -a_0^2 k^2 \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} \sum_{s=1}^N \delta(x - x_s) \delta(y) u_{z0}(x_s, 0, k). \quad (2)$$

Входящие в сумму в правой части (2) слагаемые, содержащие дельта-функции $\gamma \delta(x - x_s) \delta(y)$, описывают возмущения, создаваемые в кристалле N дислокациями, расположенными на одинаковых расстояниях d_0 друг от друга вдоль оси x , параллельно оси z , u_i – вектор деформации, ρ_0 – плотность среды, a_0 – постоянная решетки,

$$\tilde{\lambda}_1 \equiv \lambda_1 + \frac{2\pi\beta_0\beta_2}{\varepsilon_2}, \quad \tilde{\lambda}_0 \equiv \lambda_0 + \frac{4\pi\beta_0^2}{\varepsilon_2}, \quad (3)$$

$\lambda_0 \equiv \lambda_{zzzz}$ и $\lambda_1 \equiv \lambda_{zxxz}$ – компоненты тензора напряжений λ_{iklm} ; $\varepsilon_1 = \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon_{zz}$ компоненты тензора диэлектрической проницаемости ε_{ik} ; $\beta_0 \equiv \beta_{z,zz}$, и $\beta_2 \equiv \beta_{x,xz} = \beta_{y,yz}$ – компоненты тензора $\beta_{i,kl}$, характеризующего пьезоэлектрический эффект [9]:

$$D_i = D_{0i} + \varepsilon_{ik} E_k - 4\pi\beta_{i,kl} u_{kl}, \quad (4)$$

где D_i – компоненты вектора электрической индукции, E_i – компоненты вектора напряженности электрического поля. Расстояние между дислокациями d_0 существенно превосходит расстояние r_0 от дислокации, на котором амплитуда локализованных колебаний убывает в e раз.

В дальнейшем для простоты будем предполагать, что колебания, локализованные на дислокации с номером n , взаимодействуют только с колебаниями, локализованными на соседних с ней дислокациях с номерами $s-1$ и $s+1$. В этом случае (2) преобразуется к виду

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) u_{z0} - u_{z0} \left(\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2 \right) = -a_0^2 k^2 \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} \delta(y) [\delta(x - x_{s-1}) u_{z0}(x_{s-1}, 0, k) + \delta(x - x_s) u_{z0}(x_s, 0, k) + \delta(x - x_{s+1}) u_{z0}(x_{s+1}, 0, k)] \quad (5)$$

Ясно, что крайние дислокации находятся в избранном положении, т. к. имеют соседей только с одной стороны. Понятно, что при большом числе дислокаций N влияние краевых эффектов должно быть незначительным. С целью упрощения задачи ограничимся случаем циклических граничных условий:

$$u_{z01} = u_{z0N}. \quad (6)$$

Теперь все дислокации находятся в эквивалентных условиях. Решение (5) будем искать в виде $u_{z0}(x_s, 0, k) \propto \exp i q x_s$, где q – проекция волнового вектора возмущения на ось x . Тогда амплитуды колебаний вблизи соседних дислокаций связаны соотношениями

$$u_{z0}(x_{s-1}, 0, k) = u_{z0}(x_s, 0, k) e^{-iqd_0}, \quad u_{z0}(x_{s+1}, 0, k) = u_{z0}(x_s, 0, k) e^{iqd_0}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), находим

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) u_{z0s} - u_{z0s} \left(\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2 \right) = -a_0^2 k^2 \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} \delta(y) [\delta(x - x_{s-1}) u_{z0}(x_s, 0, k) e^{-iqd_0} + \delta(x - x_s) u_{z0}(x_s, 0, k) + \delta(x - x_{s+1}) u_{z0}(x_s, 0, k) e^{iqd_0}] \quad (8)$$

Из (8)

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) u_{z0s} - u_{z0s} \left(\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2 \right) = -a_0^2 k^2 \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} \delta(y) u_{z0}(x_s, 0, k) [\delta(x - x_{s-1}) e^{-iqd_0} + \delta(x - x_s) + \delta(x - x_{s+1}) e^{iqd_0}] \quad (9)$$

Воспользуемся далее интегральным представлением дельта-функции

$$\delta(x - x_{s-1}) \delta(y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \exp i(\kappa_x(x - x_{s-1}) + \kappa_y y) d^2 \vec{\kappa} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \exp i(\kappa_x x + \kappa_y y) d^2 \vec{\kappa} \exp(-i\kappa_x x_{s-1}). \quad (10)$$

Решение уравнения (9) будем искать в виде

$$u_{z0s}(x, y, k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \tilde{\chi}(\vec{\kappa}, k) \exp(i\vec{\kappa} \vec{\rho}_s) d^2 \vec{\kappa} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \tilde{\chi}(\vec{\kappa}, k) \exp[i(\kappa_x(x - x_s) + \kappa_y y)] d^2 \vec{\kappa}, \quad (11)$$

где $\vec{\rho}_s = (x - x_s, y)$, $\vec{\kappa} = (\kappa_x, \kappa_y)$.

Подставляя (10) и (11) в (9), находим

$$\left(\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2 \right) \tilde{\chi}(\vec{\kappa}, k) \exp(-i\kappa_x x_s) = a_0^2 k^2 \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} u_{z0}(x_s, 0, k) \left(\exp(-i\kappa_x x_{s-1}) e^{-iqd_0} + \exp(-i\kappa_x x_s) + \exp(-i\kappa_x x_{s+1}) e^{iqd_0} \right) \quad (12)$$

Координаты соседних дислокаций связаны соотношениями

$$x_{s-1} = x_s - d_0, \quad x_{s+1} = x_s + d_0. \quad (13)$$

Из (12) и (13) находим

$$\left(\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2 \right) \tilde{\chi}(\vec{k}, k) = a_0^2 k^2 \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} u_{z_0}(x_n, 0, k) (\exp[i(\kappa_x - q)d_0] + 1 + \exp[-i(\kappa_x - q)d_0]), \quad (14)$$

откуда следует

$$\tilde{\chi}(\vec{k}, k) = a_0^2 k^2 \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} u_{z_0}(x_s, 0, k) \frac{1 + 2 \cos(\kappa_x - q)d_0}{\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (11), имеем

$$u_{z_0s}(x, y, k) = \frac{a_0^2 k^2}{(2\pi)^2} \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} u_{z_0}(x_s, 0, k) \int \frac{1 + 2 \cos(\kappa_x - q)d_0}{\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2} \exp(i\vec{k}\vec{\rho}_s) d^2 \vec{k}, \quad (16)$$

Представим (16) в виде суммы двух слагаемых:

$$u_{z_0s} = \hat{u}_{z_0s} + \check{u}_{z_0s}, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{u}_{z_0s}(x, y, k) &= \frac{a_0^2 k^2}{(2\pi)^2} \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} u_{z_0}(x_s, 0, k) \int \frac{\exp(i\vec{k}\vec{\rho}_s)}{\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2} d^2 \vec{k} = \\ &= \frac{a_0^2 k^2}{2\pi} \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} u_{z_0}(x_s, 0, k) K_0 \left(\chi \sqrt{(x - x_s)^2 + y^2} \right), \quad \chi \equiv \sqrt{\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Интеграл (18) представляет собой интегральное представление функции Макдональда нулевого порядка $K_0(x)$, а \hat{u}_{z_0s} – амплитуда колебаний, локализованных на изолированной дислокации с номером s . При больших ($x \gg 1$) значениях аргумента $K_0(x) \approx \sqrt{\pi/2x} \cdot \exp(-x)$. Таким образом, вдали от дислокации амплитуда колебаний обладает характерным экспоненциальным убыванием, что подтверждает их локализацию вблизи дислокации. Вблизи дислокации ($x \ll 1$) $K_0(x) \approx -\ln(x/2)$ амплитуда колебаний имеет логарифмическую особенность, что связано с модельным предположением о δ – образном характере возмущения, создаваемом дислокацией в кристалле (2). Из (18) находим

$$\begin{aligned} \hat{u}_{z_0s}(\rho_s, k) &= \\ &= \frac{a_0^2 k^2 \gamma u_{z_0}(x_s, 0, k)}{(2\pi)^2 \tilde{\lambda}_1} \int_0^{\kappa_0} \int_0^{2\pi} \frac{\kappa \cos(\kappa \rho_s \cos \varphi) d\varphi d\kappa}{\kappa^2 + \chi^2} = \frac{a_0^2 k^2 \gamma u_{z_0}(x_s, 0, k)}{(2\pi)^2 \tilde{\lambda}_1} \int_0^{2\pi} \frac{\theta \cos\left(\theta \frac{\rho_s}{a_0} \cos \varphi\right) d\varphi d\theta}{\theta^2 + \chi^2 a_0^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

В (19) $\rho_s = \sqrt{(x - x_s)^2 + y^2}$; верхний бесконечный предел интегрирования заменен на конечный $\kappa_0 \sim 1/a_0$, что позволяет исключить из рассмотрения, не имеющие физического смысла коротковолновые возмущения, и тем самым устранить логарифмическую особенность.

Также выполнен переход к безразмерной переменной $\theta = \kappa a_0$. График функции $p(\rho_s) \equiv \hat{u}_{z_0s}(\rho_s, k) / \hat{u}_{z_0}(x_s, 0, k)$ при $\chi a_0 = 0,1$; $a_0 k = 0,74$; $\gamma / \tilde{\lambda}_1 = 5$, построенный в MATHCAD, представлен на рис. 1а, ρ выражено в постоянных решетки.

Слагаемое

$$\check{u}_{z_0s}(\rho_s, k) = \frac{a_0^2 k^2}{(2\pi)^2} \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} u_{z_0}(x_s, 0, k) \int \frac{2 \cos(\kappa_x - q)d_0}{\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2} \exp(i\vec{k}\vec{\rho}_s) d^2 \vec{k} \quad (20)$$

описывает воздействие на дислокацию с номером s со стороны колебаний, локализованных на двух соседних дислокациях с номерами $s - 1$ и $s + 1$.

Из циклического граничного условия (6) получим, что $1 = \exp(iqNd_0)$, откуда

$$\cos(qNd_0) = 1 \Rightarrow q_j Nd_0 = 2\pi j \Rightarrow q_j = 2\pi j / Nd_0, \quad j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (21)$$

В качестве примера на рис. 1б приведем $h(\rho_s) \equiv \check{u}_{z0s}(\rho_s, k) / \check{u}_{z0s}(x_s, 0, k)$ для $N = 100$; $j = 50$; $a_0 k = 0,74$; $\chi a = 0,1$; $d_0 = 10a_0$. При этом длина волны возмущения, распространяющегося вдоль дислокационной цепочки $\lambda_j = 2d_0 = 20a_0$. На рис. 1в приведен график $u(\rho) = p(\rho) + h(\rho)$ вблизи дислокации с номером s .

Положив в (16) $\vec{\rho}_n = 0$, находим дисперсионное уравнение для звуковых волн, взаимодействующих с цепочкой дислокаций:

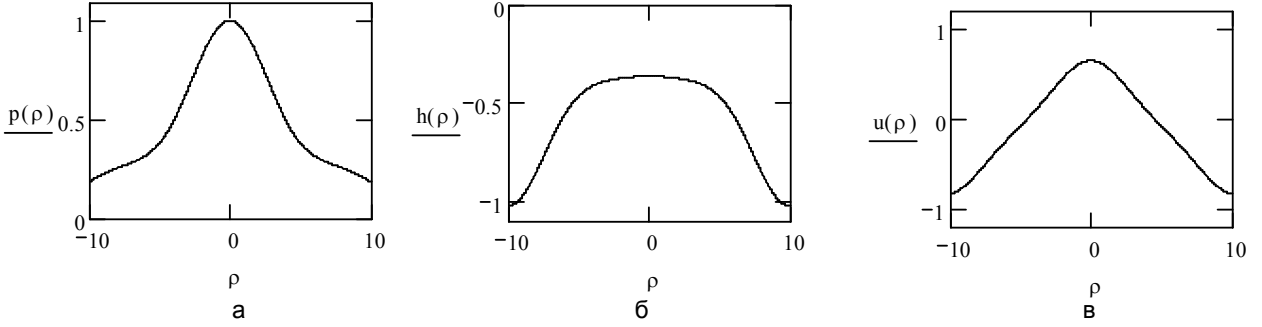


Рис. 1

$$1 = \frac{a_0^2 k^2}{(2\pi)^2} \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} \int \frac{1 + 2 \cos(\kappa_x - q_j) d_0}{\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)} d^2 \vec{\kappa}. \quad (22)$$

Представим далее (22) в виде

$$1 = \frac{a_0^2 k^2}{(2\pi)^2} \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} \left[\int \frac{d^2 \vec{\kappa}}{\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)} + \right. \\ \left. + 2 \left(\cos q_j d_0 \int \frac{\cos \kappa_x d_0}{\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)} d^2 \vec{\kappa} + \sin q_j d_0 \int \frac{\sin \kappa_x d_0}{\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)} d^2 \vec{\kappa} \right) \right]. \quad (23)$$

Для вычисления интегралов, входящих в (23), воспользуемся методом стационарной фазы, согласно которому

$$\int_a^b f(x) \exp[i\lambda S(x)] dx \approx \frac{1}{i\lambda} \{f(b) \exp[i\lambda S(b)] - f(a) \exp[i\lambda S(a)]\} + O(\lambda^{-2}), \quad (24)$$

если точки, в которых $S'(x) = 0$ отсутствуют.

С помощью (24) находим

$$\int_{-\bar{\kappa}_0}^{\bar{\kappa}_0} f(\kappa_x) \exp(i\kappa_x d_0) d\kappa_x \approx \frac{1}{id_0} \{f(\bar{\kappa}_0) \exp(i\bar{\kappa}_0 d_0) - f(-\bar{\kappa}_0) \exp(-i\bar{\kappa}_0 d_0)\}, \quad (25)$$

где введено обозначение

$$f(\kappa_x) = \frac{1}{\kappa_x^2 + \kappa_y^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)}. \quad (26)$$

Из (25) и (26)

$$\int_{-\bar{\kappa}_0}^{\bar{\kappa}_0} f(\kappa_x) \cos(\kappa_x d_0) d\kappa_x \approx \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{id_0} [f(\bar{\kappa}_0)(\cos(\bar{\kappa}_0 d_0) + i \sin(\bar{\kappa}_0 d_0)) - f(-\bar{\kappa}_0)(\cos(\bar{\kappa}_0 d_0) - i \sin(\bar{\kappa}_0 d_0))] \right\} = (f(\bar{\kappa}_0) + f(-\bar{\kappa}_0)) \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{d_0} = 2f(\bar{\kappa}_0) \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{d_0}, \quad (27)$$

$$\int_{-\bar{\kappa}_0}^{\bar{\kappa}_0} f(\kappa_x) \sin(\kappa_x d_0) d\kappa_x \approx \operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{id_0} [f(\bar{\kappa}_0)(\cos(\bar{\kappa}_0 d_0) + i \sin(\bar{\kappa}_0 d_0)) - f(-\bar{\kappa}_0)(\cos(\bar{\kappa}_0 d_0) - i \sin(\bar{\kappa}_0 d_0))] \right\} = (f(-\bar{\kappa}_0) - f(\bar{\kappa}_0)) \frac{\cos(\bar{\kappa}_0 d_0)}{d_0} = 0. \quad (28)$$

Поскольку $f(-\bar{\kappa}_0) = f(\bar{\kappa}_0)$ интеграл (28) обращается в 0.

При вычислении интегралов (25) и (27), (28) по κ_x бесконечные пределы интегрирования заменены на конечные, где $\bar{\kappa}_0 \sim 1/d_0$. Таким образом, мы предполагаем, что взаимодействие между колебаниями, локализованными на дислокациях, осуществляется преимущественно за счет длинноволновых возмущений с $|\kappa_x| < \bar{\kappa}_0 \sim 1/d_0$. Для проверки этого предположения разобьем $p(\rho_s)$ на длинноволновую $p1(\rho_s)$ и коротковолновую составляющие $p2(\rho_s)$. Из (19) находим

$$p(\rho_s) = p1(\rho_s) + p2(\rho_s) =$$

$$= \frac{a_0^2 k^2 \gamma}{(2\pi)^2 \tilde{\lambda}_1} \int_0^{\bar{\kappa}_0 a_0} \int_0^{2\pi} \frac{\theta \cos\left(\theta \frac{\rho_s}{a_0} \cos \varphi\right) d\varphi d\theta}{\theta^2 + \chi^2 a_0^2} + \frac{a_0^2 k^2 \gamma}{(2\pi)^2 \tilde{\lambda}_1} \int_{\bar{\kappa}_0 a_0}^1 \int_0^{2\pi} \frac{\theta \cos\left(\theta \frac{\rho_s}{a_0} \cos \varphi\right) d\varphi d\theta}{\theta^2 + \chi^2 a_0^2}. \quad (29)$$

Пусть $a_0 k = 0,628$, $\chi a_0 = 0,041$, $\gamma/\tilde{\lambda}_1 = 5$. Функции $p(\rho)$, $p1(\rho)$ и $p2(\rho)$ для $d_0 = 50a_0$, $\bar{\kappa}_0 = 1,06/d_0$ приведены на рис. 2.

Видно, что при соответствующем выборе $\bar{\kappa}_0$ функция $p1(\rho_s)$ близка к $p(\rho_s)$ в том месте, где находится соседняя дислокация $s + 1$, в то время как высокочастотная составляющая $p2(\rho_s)$ в этой области незначительна.

Возвращаясь далее к вычислению интеграла в (23), находим

$$\int_{-\kappa_0}^{\kappa_0} \int_{-\bar{\kappa}_0}^{\bar{\kappa}_0} \frac{\cos(\kappa_x d_0) d\kappa_x d\kappa_y}{\left(\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)\right)} \approx 2 \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{d_0} \int_0^{\kappa_0} \frac{d\kappa_y}{\left(\kappa_y^2 + \bar{\kappa}_0^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega_0^2\right)}$$

$$\approx 2 \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{d_0} \int_{-\kappa_0}^{\kappa_0} \frac{d\kappa_y}{\kappa_y^2 + \kappa_0^2 \exp\left(-\frac{4\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right)} = 4 \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0 d_0} \exp\left(\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right) \operatorname{arctg} \left[\exp\left(\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right) \right] \approx$$

$$\approx 2\pi \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0 d_0} \exp\left(\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right). \quad (30)$$

При вычислении интеграла (30) частоты $\omega(j)$ были приближенно заменены на частоту ω_0 локализованных колебаний, имеющих место при наличии в кристалле лишь одной дислокации

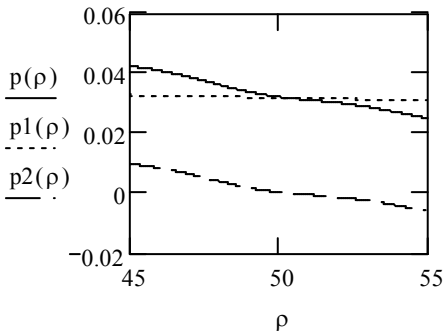


Рис. 2

$$\omega_0^2 \approx \frac{\tilde{\lambda}_0}{\rho_0} k^2 - \frac{\tilde{\lambda}_1}{\rho_0} \kappa_0^2 \exp\left(-\frac{4\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right), \quad (31)$$

а также предполагалось выполнение условия $\kappa_0^2 \exp(-4\pi\tilde{\lambda}_1/a_0^2 k^2 \gamma) \gg \bar{\kappa}_0^2$. Из данного неравенства для характерных значений параметров кристалла: $\rho_0 = 5 \text{ з/см}^3$, $\tilde{\lambda}_0 = 6 \cdot 10^{12} \text{ дин/см}^2$, $\tilde{\lambda}_1 = 10^{12} \text{ дин/см}^2$, $\gamma = 5 \cdot 10^{12} \text{ дин/см}^2$, $a_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, $k = 1,26 \cdot 10^7 \text{ см}^{-1}$ находим $d_0 \geq 24a_0$, также из (31) $\omega_0 \approx 1,38 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$.

Подставляя далее (30) в (23), находим

$$1 = \frac{a_0^2 k^2}{(2\pi)^2} \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} \left[\int \frac{d^2 \bar{\kappa}}{\kappa^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)} + 4\pi \cos q_j d_0 \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0 d_0} \exp\left(\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right) \right]. \quad (32)$$

Выполняя интегрирование в (32), получим

$$1 = \frac{a_0^2 k^2 \gamma}{4\pi\tilde{\lambda}_1} \ln \frac{\kappa_0^2 + \frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)}{\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)} + \frac{a_0^2 k^2 \gamma}{\pi\tilde{\lambda}_1} \cos(q_j d_0) \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0 d_0} \exp\left(\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right). \quad (33)$$

Предполагая, что

$$\frac{\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega^2(j)}{\kappa_0^2} \ll 1, \quad (34)$$

из (33) находим выражение для частоты колебаний

$$\omega^2(j) \approx \frac{\tilde{\lambda}_0}{\rho_0} k^2 - \frac{\tilde{\lambda}_1}{\rho_0} \kappa_0^2 \exp\left(-\frac{4\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right) \exp\left(4 \cos(q_j d_0) \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0 d_0} \exp\left(\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right)\right), \quad (35)$$

где q_j определяется согласно (21). В силу периодичности зависимости (35) значения $|j| > N/2$ не дают новых состояний колеблющейся цепочки. Каждое из состояний представляет собой волну, бегущую вдоль цепочки: $\omega(j)$ – частота волны, q_j – волновой вектор. Однако в отличие от непрерывной среды возможные независимые значения q ограничены $|q| \leq \pi/d_0$. Поэтому общее число различных независимых значений q , равное числу независимых состояний колеблющейся цепочки, равно N .

Решение, соответствующее звуковым колебаниям в неограниченном пьезоэлектрическом кристалле, содержащем дислокационную цепочку, имеет вид

$$u_z(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{s=1}^N \frac{a_0^2 k^2}{(2\pi)^2} \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} u_{z0j}(k) K_0 \left(\sqrt{\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega_0^2} \sqrt{(x-x_s)^2 + y^2} \right) \times \\ \times \exp\left(kz + \frac{2\pi}{N} js - \omega(j)t \right) dk. \quad (36)$$

Здесь $K_0(x)$ – функция Макдональда нулевого порядка. Выражение (36) описывает согласованные между собой звуковые волны, локализованные на дислокациях.

Если кристалл представляет собой пластинку, ограниченную плоскостями $z = 0$ и $z = L$, то модуль волнового вектора k принимает значения

$$k_n = \frac{\pi n}{L}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (37)$$

и локализованные на дислокациях колебания представляют собой стоячие волны. Тогда вместо (35) находим

$$\omega^2(n, j) \approx \Omega^2(n) - \frac{\tilde{\lambda}_1}{\rho_0} \kappa_0^2 \exp\left(-\frac{4\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right) \exp\left(4 \cos\left(\frac{2\pi j}{N}\right) \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0 d_0} \exp\left(\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k^2 \gamma}\right)\right),$$

$$\Omega(n) = \sqrt{\frac{\tilde{\lambda}_0}{\rho_0}} k_n, \quad (38)$$

где $\Omega(n)$ – частота объемных колебаний. Заметим, что при $j = N/4$ частота $\omega(n, j)$ совпадает с частотой колебаний, локализованных на одной дислокации $\omega_0(n)$.

Формула (38) определяет возможные значения частот локализованных колебаний в пьезоэлектрическом кристалле, содержащем дислокационную цепочку. Как видно из (38), взаимодействие между колебаниями, локализованными на отдельных дислокациях, приводит к расщеплению каждой из частот дискретного спектра, зависящих от числа n , на ряд близких частот, характеризующихся различными значениями числа j , определяемого (21) и формированию дислокационных зон:

$$\omega(n, j) \approx \sqrt{\frac{\tilde{\lambda}_0}{\rho_0}} k_n - \frac{1}{2} \frac{\tilde{\lambda}_1}{\sqrt{\rho_0 \tilde{\lambda}_0}} \frac{\kappa_0^2}{k_n} \exp\left(-\frac{4\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k_n^2 \gamma}\right) \exp\left(4 \cos\left(\frac{2\pi j}{N}\right) \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0 d_0} \exp\left(\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k_n^2 \gamma}\right)\right). \quad (39)$$

Для того чтобы оценить ширину областей, занятых допустимыми частотами, воспользуемся следующими значениями параметров пьезоэлектрика: $\rho_0 = 5 \text{ г/см}^3$, $\tilde{\lambda}_0 = 6 \cdot 10^{12} \text{ дин/см}^2$, $\tilde{\lambda}_1 = 10^{12} \text{ дин/см}^2$, $\gamma = 5 \cdot 10^{12} \text{ дин/см}^2$, $a_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ см}$. Рассмотрим пленку толщиной $L = 10a_0$, тогда возможные значения числа n находятся в пределах от $n_{\min} = 1$ до $n_{\max} = 10$. Значениям $n > n_{\max}$ соответствуют длины волн меньше, чем $2a_0$ и их рассмотрение не имеет физического смысла. Будем предполагать, что цепочка содержит $N = 100$ дислокаций. Из (39), например, при $n = 2$ находим $\lambda_2 = 10 \cdot a_0$, $k_2 = 1,257 \cdot 10^7 \text{ см}^{-1}$, частота объемных колебаний $\Omega(n) \approx 1,377 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$. Частота колебаний, локализованных на дислокации, в отсутствие взаимодействия между ними, $\omega(n, 25) \approx 1,3765 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$. Результаты расчетов, проведенных с использованием MATHCAD для $d_0 = 50a_0$ между дислокациями, представлены на рис. 3.

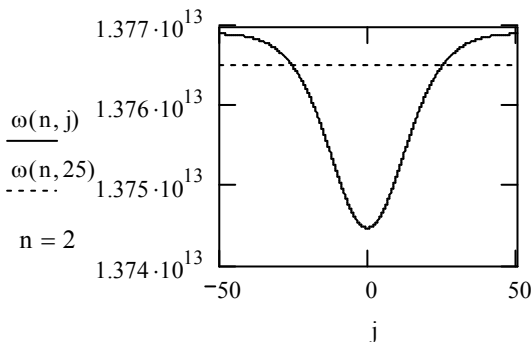


Рис. 3. $d_0 = 50a_0$

ответствуют длины волн меньше, чем $2a_0$ и их рассмотрение не имеет физического смысла. Будем предполагать, что цепочка содержит $N = 100$ дислокаций. Из (39), например, при $n = 2$ находим $\lambda_2 = 10 \cdot a_0$, $k_2 = 1,257 \cdot 10^7 \text{ см}^{-1}$, частота объемных колебаний $\Omega(n) \approx 1,377 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$. Частота колебаний, локализованных на дислокации, в отсутствие взаимодействия между ними, $\omega(n, 25) \approx 1,3765 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$. Результаты расчетов, проведенных с использованием MATHCAD для $d_0 = 50a_0$ между дислокациями, представлены на рис. 3.

Видно, что с уменьшением расстояния между дислокациями и, следовательно, усилением взаимодействия между локализованными на них колебаниями ширина дислокационной зоны увеличивается.

Оценим ширину области, занятой допустимыми частотами. Из (39) находим

$$\Delta\omega(n) = 4 \frac{\tilde{\lambda}_1}{\rho_0} \frac{\kappa_0^2}{\Omega(n)} \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0 d_0} \exp\left(-\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k_n^2 \gamma}\right). \quad (40)$$

С ростом числа n ширина области сначала возрастает, достигая максимума при $n = 5$, затем несколько уменьшается.

Для кристаллической пластины вместо (39) получим

$$u_z(x, y, z, t) = \sum_n \sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{s=1}^N \frac{a_0^2 k_n^2 \gamma}{2\pi \tilde{\lambda}_1} u_{z0nj} K_0 \left(\sqrt{\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k_n^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega_0^2} \sqrt{(x-x_s)^2 + y^2} \right) \times \cos(k_n z) \cdot \exp i \left(\frac{2\pi}{N} js - \omega(n, j)t \right). \quad (41)$$

Волновое возмущение распространяется вдоль цепочки с групповой скоростью $v(j) = d\omega/dk$:

$$v(j) = 2 \frac{\tilde{\lambda}_1}{\sqrt{\rho_0 \tilde{\lambda}_0}} \frac{\kappa_0^2}{k_n} \exp\left(-\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k_n^2 \gamma}\right) \exp\left(4 \cos\left(\frac{2\pi j}{N}\right) \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0 d_0} \exp\left(\frac{2\pi\tilde{\lambda}_1}{a_0^2 k_n^2 \gamma}\right)\right) \sin(q_j d_0) \frac{\sin(\bar{\kappa}_0 d_0)}{\kappa_0}. \quad (42)$$

Зависимость $v(j)$ для $d_0 = 50a_0$ представлена на рис. 4.

Заметив, что у границ первой зоны Бриллюэна $q_{\max} = \pm\pi/d_0$, из (41) находим

$$u_{zlj} \sim \exp(\pm is\pi)\exp(-i\omega(n, j)t) = (-1)^s \exp(-i\omega(n, j)t), \quad (43)$$

что представляет собой уравнение стоячей волны. Колебания вблизи соседних дислокаций в цепочке происходят в противофазе, так как $\cos s\pi = \pm 1$ в зависимости от того, является ли s четным или нечетным целым числом. Бегущая волна не может распространяться в цепочке. Как видно из рис. 4, групповая скорость при $q = q_{\max}$ обращается в ноль.

Максимальная групповая скорость волн, распространяющихся вдоль цепочки $\sim 5 \cdot 10^4$ см/с при $d_0 = 50a_0$ (рис. 4), что существенно меньше, чем скорость объемных колебаний $\sqrt{\tilde{\lambda}_0/\rho_0} \approx 10^6$ см/с.

При фиксированном значении n двум отличающимся знаком значениям j , как видно из рис. 3, отвечает одна и та же частота ω , поэтому наряду с бегущими перпендикулярно к дислокациям возмущениями $\sim \exp i(q_j s d_0)$ в цепочке может существовать стоячая волна

$$u_z(x, y, z, t) = \sum_n \sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{s=1}^N \frac{a_0^2 k_n^2}{2\pi} \frac{\gamma}{\tilde{\lambda}_1} \tilde{u}_{z0nj} K_0 \left(\sqrt{\frac{\tilde{\lambda}_0}{\tilde{\lambda}_1} k_n^2 - \frac{\rho_0}{\tilde{\lambda}_1} \omega_0^2} \sqrt{(x-x_s)^2 + y^2} \right) \times \\ \times \cos(k_n z) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N} js\right) \cos(\omega(n, j)t). \quad (44)$$

Таким образом, в работе исследованы звуковые колебания в пьезоэлектрическом кристалле, содержащем дислокационную цепочку. Показано, что взаимодействие между колебаниями, локализованными на отдельных дислокациях, приводит к возникновению волн, распространяющихся вдоль цепочки с групповой скоростью, существенно меньшей, чем скорость объемных колебаний. Число различных независимых значений волнового вектора при этом равно числу независимых состояний колеблющейся дислокационной цепочки и совпадает с числом содержащихся в ней дислокаций. Получены оценки для ширины областей занятых допустимыми частотами локализованных колебаний при различных значениях параметров, характеризующих пьезоэлектрическую среду и дислокационную цепочку. Области допустимых частот отделены как друг от друга, так и от спектра объемных колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гестрин С.Г. Математическое моделирование связанных колебаний, локализованных на двух дислокациях в пьезоэлектрике / С.Г. Гестрин, Е.В. Щукина // Вестник СГТУ. 2013. (72). Вып. 1. С. 35-39.
2. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки / А.М. Косевич. М.: Наука, 1972. 280 с.
3. Косевич А.М., Введение в нелинейную физическую механику/ А.М. Косевич, А.С. Ковалев. Киев: Наукова Думка, 1989. 299 с.
4. Гестрин С.Г. Локализация поляритонов вблизи дислокаций в ионных кристаллах / С.Г. Гестрин // Изв. вузов. Физика. 1996. № 10. С. 45-50.
5. Гестрин С.Г. Локализация плазменных колебаний вблизи заряженных дислокаций и дислокационных стенок в полупроводниках / С.Г. Гестрин // Изв. вузов. Физика. 1998. № 2. С.92-95.
6. Гестрин С.Г. Винтовые колебания, локализованные на заряженных дислокациях в полупроводниковых кристаллах / С.Г. Гестрин, А.Н. Сальников, Е.В. Щукина // Изв. вузов. Физика. 2006. № 10. С. 66-69.
7. Гестрин С.Г. Локализация экситонов Френкеля на дислокациях/ С.Г. Гестрин, А.Н. Сальников // Изв. вузов. Физика. 2005. №7. С. 23-25.
8. Гестрин С.Г. Спиновые волны, локализованные на дислокациях в ферродиэлектриках / С.Г. Гестрин, Е.А. Сальникова // Изв. вузов. Физика. 2011. №11. С. 3-9.
9. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // Теоретическая физика. Т. VIII. М.: Наука, 1982.

доктор физико-математических наук, профессор
кафедры «Физика» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dr. Sc., Professor
Department of Physics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Щукина Елена Вячеславовна –
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Elena V. Schukina –
Ph. D., Associate Professor
Department of Physics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.03.14, принята к опубликованию 20.06.14

УДК 621.385.6

Д.Н. Золотых, Л.В. Кузнецова, В.И. Роговин

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕТЛЕВОГО ЗОНДА

Приводится методика расчёта петлевого зонда для резонансных устройств СВЧ. Методика основана на модели фиктивного магнитного тока. Определение магнитного тока основывается на соотношениях теории элементарного магнитного диполя. Такой подход позволяет значительно сократить временные и машинные ресурсы при проектировании зонда. По результатам расчёта был изготовлен петлевой зонд К-диапазона. Проведённые испытания показали хорошее соответствие экспериментальных и расчётных данных.

Петлевой зонд, фиктивный магнитный ток, магнитный диполь

D.N. Zolotykh, L.V. Kuznetsova, V.I. Rogovin

A DESIGN METHOD FOR THE LOOP-PROBE

The article provides a method for calculating the loop-probe of resonant microwave devices. The method is based on a model of fictitious magnetic current. Determination of the magnetic current is based on the theory of the elementary magnetic dipole. The given approach significantly reduces the time and CPU resources when designing a loop-probe. The loop-probe of K-band was designed in accordance with the calculation results. The tests showed that the calculated data agree with those found by experiment.

Loop-probe, fictitious magnetic current, magnetic dipole

Уровень развития современной измерительной СВЧ техники весьма высок. Однако зачастую перед разработчиками СВЧ устройств встаёт необходимость настройки нестандартных электродинамических узлов и контроля их характеристик. Это приводит к тому, что приходится разрабатывать различные переходные конструкции для подключения к стандартизированной измерительной технике, а также разрабатывать собственные СВЧ элементы связи и зонды. Также зондовые методы могут использоваться при проектировании различных волноведущих систем с неоднородностями [1], [2] для определения распределения силовых линий электромагнитного поля. Подобные проблемы характерны для разработчиков электродинамических систем СВЧ усилителей клистронного типа. В статье рассматриваются особенности проектирования петлевого зонда для обеспечения возможности измерения таких электродинамических характеристик резонаторов как собственная добротность, нагруженная добротность и резонансная частота.

Петлевые зонды, применяемые для указанных целей, как правило, имеют весьма малые размеры в сравнении с линейными размерами резонатора. Это объясняется стремлением уменьшить возмущения, вносимые зондом. Поэтому петля выполняется из тонкой проволоки и имеет весьма малую площадь. С практической точки зрения расчёт петлевого зонда сводится к определению входного сопротивления резонатора, приведённого к зажимам проводника, образующего петлю. Зная это сопротивление, нетрудно разработать согласующий переход для подключения зонда к стандартной измерительной аппаратуре.

В настоящее время широко используется специализированное программное обеспечение HFSS, позволяющее получать различные электродинамические характеристики СВЧ устройств. Применение данного программного обеспечения теоретически позволяет вычислить входное сопротивление петлевого зонда, расположенного в резонаторе. Однако на практике возникают некоторые сложности. Основная из них – это несоизмеримые величины размеров зонда и исследуемого резонансного устройства. Зачастую толщина проводника, образующего петлю, на несколько порядков меньше линейных размеров резонатора. Такое соотношение размеров говорит о необходимости значительно сгущать сетку конечных элементов вокруг петли для обеспечения приемлемой точности расчёта. Данное действие требует значительных машинных и временных ресурсов, особенно в случае оптимизации конструкции петлевого зонда. Поэтому для задач оптимизации удобно рассматривать различные приближённые модели. Здесь предлагается моделировать петлевой зонд на основе модели эквивалентного фиктивного магнитного тока.

Введем понятие фиктивного магнитного тока, хорошо применимого для рассматриваемой задачи. Для этого рассмотрим физически реализуемый элементарный магнитный диполь, представляющий собой виток с электрическим током I_E . Данный элементарный диполь создаёт магнитное поле \vec{H} и имеет \vec{P}_M^P – магнитный момент рамки с током. Поставим в соответствие данному диполю систему из двух фиктивных магнитных зарядов, расположенных на расстоянии l_M друг от друга. Такой магнитный диполь будет обладать магнитным моментом

$$\vec{P}_M^D = q_M \vec{l}_M, \quad (1)$$

где $\vec{l}_M = |l_M| \vec{n}_0$, \vec{n}_0 – единичный вектор, направленный от q_M^+ к q_M^- .

Известно, что магнитный момент элементарной рамки с током может быть вычислен по формуле [3]

$$\vec{P}_M^P = \mu \mu_0 I_E \vec{S}. \quad (2)$$

где I_E – электрический ток, текущий по проводнику, образующему рамку, \vec{S} – произведение площади поверхности, охваченной проводником с током, на единичный вектор \vec{n}_0 нормали к этой поверхности. В силу предполагаемой эквивалентности $\vec{P}_M^D = \vec{P}_M^P$, что означает

$$q_M \vec{l}_M = \mu \mu_0 I_E \vec{S}. \quad (3)$$

Пусть далее ток I_E меняется по гармоническому закону $I_E = I_E^0 e^{j\omega t}$. Подставим данную зависимость в выражение (3) и проведём дифференцирование по времени:

$$\frac{dq_M}{dt} \vec{l}_M = j\omega \mu \mu_0 I_E \vec{S}. \quad (4)$$

Производная фиктивного магнитного заряда по времени есть фиктивный магнитный ток I_M . Поэтому (4) можно записать в виде

$$I_M \vec{l}_M = j\omega \mu \mu_0 I_E \vec{S}. \quad (5)$$

Из выражения (5) можно выразить неизвестные величины магнитного тока I_M и расстояние l_M . Однако для корректного определения этих величин с точки зрения размерности необходимо умножить и разделить правую часть (5) на $|l_M|$. Тогда величины I_M и l_M легко разделяются, и в результате имеем

$$|\vec{l}_M|^2 \vec{n}_0 = |\vec{S}| \vec{n}_0, \quad (6a)$$

$$I_M = j\omega \mu \mu_0 I_E |\vec{l}_M|. \quad (6b)$$

Система уравнений (6) определяет переход от рамки с электрическим током (элементарный магнитный диполь) к фиктивному зарядовому магнитному штыревому диполю с идентичным магнитным моментом посредством введения фиктивной длины диполя l_M и фиктивного магнитного тока I_M .

Решим задачу о возбуждении резонатора произвольной формы фиктивным магнитным штыревым диполем длиной l_M с амплитудой возбуждающего магнитного тока I_M . При этом будем считать, что размеры магнитного диполя существенно меньше размеров резонатора, а амплитуда магнитного тока достаточно мала. В этом случае будем считать, что диполь не вносит существенных изменений в распределение невозмущенного электромагнитного поля (ЭМП) в резонаторе. Определить распределение ЭМП можно достаточно точно с применением современного программного обеспечения. Одним из наиболее распространённых программ подобного типа является HFSS. Однако с помощью

HFSS не представляется возможным решить напрямую задачу возбуждения резонатора бесконечно тонким магнитным током. Но, зная диапазон частот, в котором предполагается работа магнитного штыря, можно с помощью HFSS определить невозможное поле.

В общем случае при использовании программы HFSS в режиме поиска собственных колебаний резонатора решением являются поля E и H , амплитуда которых зависит от настроек программы. Данное решение в случае одномодового режима с достаточной степенью точности можно представить в виде $E=a_0*E_0$ и $H=b_0*H_0$ где a_0, b_0 – амплитудные коэффициенты поля, E_0, H_0 – собственные функции резонатора, соответствующие возбуждаемому типу колебания. Предполагая, что в резонаторе отсутствуют диэлектрические потери и принимая во внимание выражения для средних энергий электрического и магнитного полей W_E и W_H , а также условие ортонормированности собственных колебаний резонатора [4], определим значения a_0 и b_0 :

$$|a_0|^2 = 4W_E \quad |b_0|^2 = 4W_H. \quad (7)$$

Предположим, что данное поле H создаётся в резонаторе гипотетическим бесконечно тонким магнитным током длиной l_M и амплитудой I_M^0 . При этом длина l_M достаточно мала в сравнении с размерами резонатора, что, при условии возбуждения резонатора на основной моде, позволяет принять распределение тока I_M^0 линейным вдоль длины l_M . В [5] приведены соотношения, определяющие амплитудные коэффициенты в случае возбуждения резонатора сторонним электрическим током, однако, используя общие представления для интегралов возбуждения, можно определить амплитуду магнитного тока, возбуждающего известные поля E и H в резонаторе в случае идеально проводящих стенок:

$$I_M^0 = \frac{i2|b_0|^2 \mu(\omega^2 - \omega_0^2)}{\omega|\mu| \int_{l_M} H^* dl}.$$

В случае, если стенки резонатора имеют конечную проводимость, вблизи резонансной частоты выражение (8) может быть записано в виде

$$I_M^0 = \frac{2|b_0|^2 \mu\omega_0(i\xi_0 + 1)}{|\mu|Q_0 \int_{l_M} H^* dl}. \quad (9)$$

где Q_0 – собственная добротность резонатора, $\xi_0=Q_0(\omega/\omega_0-\omega_0/\omega)$ – обобщенная расстройка.

Определим входной импеданс петлевого зонда, помещённого в резонатор, в котором отсутствуют диэлектрические и магнитные потери. Для этого, воспользовавшись соотношениями (6), определим параметры эквивалентного штыревого зонда, представляющего собой бесконечно тонкий магнитный ток амплитуды I_M^1 и длины l_M . Используя HFSS, определим собственные поля E и H в отсутствии источников. Далее по соотношениям (7)-(9) определим соответствующий магнитный ток I_M^0 , возбуждающий поля E и H . Магнитный ток I_M^1 , будучи помещённым в резонатор, возбудит в нём поля E^1 и H^1 , причём амплитуды этих полей будут пропорциональны известным полям E и H с коэффициентом пропорциональности, равным отношению возбуждающих магнитных токов. Входной импеданс будем определять по формуле

$$Z_{in} = \frac{2P}{I_e^2} = \frac{2 \int J_M^1 H^{1*} dV}{I_e^2} \quad (10)$$

где J_M^1 – плотность стороннего гипотетического магнитного тока, I_e – электрический ток магнитной рамки. Воспользовавшись вышесказанными предположениями и соотношениями (6)-(8), можно при отсутствии потерь в стенках привести (10) к виду

$$Z_{in} = \frac{i(\int_{l_m} H^* dl)^2 \omega^3 \mu^2 \mu_0^2 l_m^2}{2|b_0|^2 (\omega^2 - \omega_0^2)}. \quad (11)$$

Если стенки резонатора имеют конечную проводимость, то, применяя (9), запишем выражение для входного импеданса:

$$Z_{in} = \frac{-Q_0 (\int_{l_m} H^* dl)^2 \omega^2 \mu^2 \mu_0^2 l_m^2}{2|b_0|^2 \omega_0 (i\xi_0 + 1)} \quad (12)$$

На основе предложенного алгоритма был спроектирован и изготовлен петлевой зонд (рис. 1) для измерений и настройки электродинамических характеристик резонаторов 19-лучевого клистрона К-диапазона [6].

При этом площадь петли, отнесённая к площади широкой стенки резонатора, составила 0.85%.

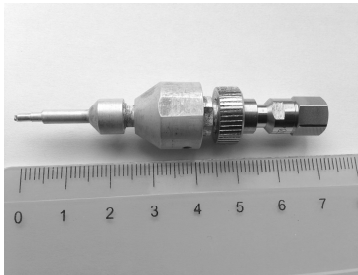


Рис. 1. Внешний вид петлевого зонда

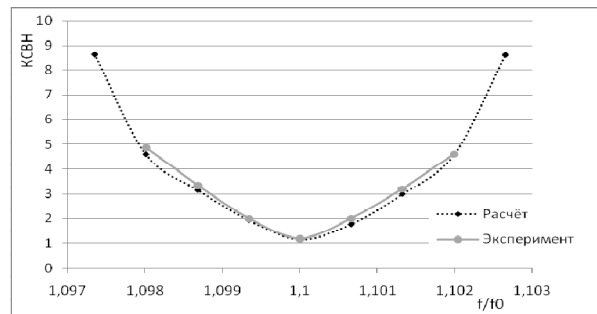


Рис. 2. Зависимость КСВН петлевого зонда, помещённого в резонатор

Длина эквивалентного магнитного тока составила 8% по отношению к длине образующей резонатора. Коаксиально-волноводный переход, согласующий сопротивление петли зонда с входным сопротивлением измерительного оборудования, был изготовлен с возможностью подключения к анализатору цепей Agilent, имеющим стандартное значение волнового сопротивления, равного 50 Ом. На основе соотношения (12) была рассчитана зависимость модуля полного сопротивления петлевого зонда от частоты в рабочем диапазоне клистрона. Далее эта зависимость была пересчитана в значения КСВН. Также был проведен эксперимент по определению резонансной кривой промежуточных резонаторов клистрона. Расчётная и экспериментальная зависимости КСВН от частоты приведены на рис. 2.

По приведённой на рис. 2 зависимости по методике [7] были определены значения собственной и нагруженной добротностей резонатора. При этом отличие полученных значений добротностей от рассчитанных по программе HFSS составило не более 12%.

Проведённые исследования показали, что результаты расчётов по предложенным в данной статье соотношениям обеспечивают отличие не более чем на 10% от экспериментально определённых значений КСВН. При этом вносимое петлевым зондом возмущение резонансной частоты собственных колебаний резонатора составляет не более 0.3%. Таким образом, предложенная методика расчёта и проектирования петлевого зонда на основе фиктивного линейного магнитного тока обеспечивает приемлемую точность и может с успехом применяться для создания зондовых СВЧ-устройств. Дальнейшим развитием методики может стать проектирование зонда для определения характеристик высших типов колебаний [8] резонаторов, находящих всё более широкое применение в многолучевых клистронных усилителях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дрогайцева О.В. Исследование диапазонных свойств согласующих переходов между стандартными волноводами и волноводами сложных сечений / О.В. Дрогайцева, В.А. Коломейцев, В.А. Лойко // Вестник СГТУ. 2011. Вып. 1. № 2 (55). С. 21-27.
2. Скворцов А.А. Особенности приближённо-аналитического расчёта коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений СВЧ-устройств на двугребневом волноводе с элементами связи сложных сечений / А.А. Скворцов, Г.И. Сидоров // Вестник СГТУ. 2010. №1 (44). С. 168-174.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 496 с.
4. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов. М.: Сов. радио, 1956. 640 с.
5. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ / А.Д. Григорьев. М.: Высш. шк., 1990. 336 с.
6. Разработка 19-лучевого клистрона Ку-диапазона / Д.Н. Золотых, Л.В. Кузнецова, М.А. Манжосин и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2013. Ч. 1. №3 (518). С. 107-109.
7. Гинзтон Э.Л. Измерения на сантиметровых волнах / Э.Л. Гинзтон. М.: Иностран. лит., 1960. 620 с.
8. Ding Y. Research Progress on X-band Multi-Beam Klystron / Y. Ding, B. Shen, J. Cao and oth. // Materials of IEEE IVEC. 2008. P. 421-422.

Золотых Дмитрий Николаевич – аспирант кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry N. Zolotykh – Postgraduate at the Department Electrical Engineering and Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Кузнецова Людмила Владимировна – ведущий инженер отдела 112 НПЦ «Электронные системы» ОАО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Ludmila V. Kuznetsova – Leading Engineer at NPP Almaz, Saratov

Роговин Владимир Игоревич – кандидат физико-математических наук, заместитель директора НПЦ «Электронные системы» ОАО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Vladimir I. Rogovin – Ph.D., Deputy Director at NPP Almaz, Saratov

Статья поступила в редакцию 13.03.14, принята к опубликованию 16.06.14

УДК 621.396.96

А.Н. Ковалев, Ф.Н. Ковалев

ДВУХЧАСТОТНЫЙ ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ В ПРОСВЕТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Рассматривается фазовый метод измерения суммы расстояний от передатчика до цели и от цели до приемника в просветных радиолокационных системах. Метод основан на излучении двух гармонических колебаний и сравнении фаз сигналов доплеровских частот. Предложен способ устранения неоднозначности измерений.

Двухчастотный фазовый метод измерения дальности, просветная радиолокация, бистатическая радиолокационная система, доплеровская частота, устранение неоднозначности измерений

A.N. Kovalev, F.N. Kovalev

THE DUAL FREQUENCY PHASIC METHOD FOR RANGE FINDING IN FORWARD-SCATTERING RADAR SYSTEMS

The phasic method for finding the sum of distances between the transmitter and target, and the target and receiver in forward-scattering radar systems is considered. The method is based on utilization of two harmonic oscillations, and measurement of the phase differences to the signals of the Doppler frequencies. A method to overcome the measurement ambiguity is considered.

Phasic method of range finding using two harmonic oscillations, forward-scattering radar, bistatic radar system, Doppler frequency, overcome the ambiguity of measurements

В просветных радиолокационных системах (РЛС) используется явление увеличения интенсивности рассеянного излучения, наблюдаемое при нахождении цели между передатчиком и приемником. Такие РЛС способны успешно обнаруживать объекты, выполненные по технологии Stealth, и малоразмерные низколетящие цели [1-3].

Для измерения суммы расстояний от передатчика до цели и от цели до приемника в просветной РЛС предлагается использовать фазовый метод, основанный на излучении двух гармонических колебаний и сравнении фаз сигналов доплеровских частот, выделяемых в приемнике [4, 5].

Схема просветной двухкоординатной РЛС показана на рис. 1. Передатчик (П) и приемник (Пр) расположены в горизонтальной плоскости и удалены друг от друга на расстояние a , называемое базой. Цель движется со скоростью \vec{v} в горизонтальной плоскости, пересекая линию базы; $r_{\text{П}}$ – дальность цели до передатчика, $r_{\text{Пр}}$ – дальность цели до приемника.

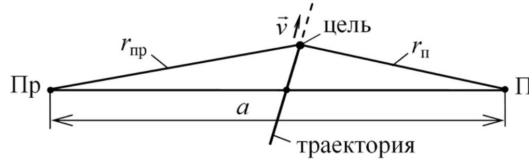


Рис. 1. Схема просветной РЛС на плоскости

Передатчик излучает два монохроматических колебания с близкими частотами [5]:

$$u_{п1}(t) = U_{п1} \cos(2\pi f_{п1}t - \theta_{п1}), \quad (1)$$

$$u_{п2}(t) = U_{п2} \cos(2\pi f_{п2}t - \theta_{п2}), \quad (2)$$

где $U_{п1}$, $U_{п2}$ – амплитуды излученных колебаний; $f_{п1}$, $f_{п2}$ и $\theta_{п1}$, $\theta_{п2}$ – частоты и начальные фазы колебаний, t – время.

На вход приемника одновременно с прямыми колебаниями передатчика

$$u_{пр1}(t) = U_{пр1} \cos(2\pi f_{п1}t - \theta_{п1} - k_1 a), \quad (3)$$

$$u_{пр2}(t) = U_{пр2} \cos(2\pi f_{п2}t - \theta_{п2} - k_2 a), \quad (4)$$

поступают рассеянные на цели сигналы

$$\begin{aligned} u_{с1}(t) &= U_{с1} \cos(2\pi f_{п1}t - \theta_{п1} - k_1 l(t) - \theta_{ц1}) = \\ &= U_{с1} \cos \left(2\pi f_{п1}t - \theta_{п1} - k_1 l(t_{н}) + 2\pi \int_{t_{н}}^t f_{д1}(t) dt - \theta_{ц1} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_{с2}(t) &= U_{с2} \cos(2\pi f_{п2}t - \theta_{п2} - k_2 l(t) - \theta_{ц2}) = \\ &= U_{с2} \cos \left(2\pi f_{п2}t - \theta_{п2} - k_2 l(t_{н}) + 2\pi \int_{t_{н}}^t f_{д2}(t) dt - \theta_{ц2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $l(t) = r_{п}(t) + r_{пр}(t)$ – суммарная дальность, $l(t_{н})$ – ее значение в момент $t_{н}$ начала наблюдения за целью; $\theta_{ц1}$, $\theta_{ц2}$ – сдвиги фаз при рассеянии (с учетом близости частот $f_{п1}$, $f_{п2}$ можно принять $\theta_{ц1} \approx \theta_{ц2}$); $U_{пр1}$, $U_{пр2}$, $U_{с1}$, $U_{с2}$ – амплитуды колебаний; $k_{1,2} = 2\pi/\lambda_{1,2}$, $\lambda_{1,2} = c/f_{п1,2}$ – длина волны, c – скорость распространения радиоволн,

$$k_{1,2} l(t) = k_{1,2} l(t_{н}) - 2\pi \int_{t_{н}}^t f_{д1,2}(t) dt, \quad (7)$$

$f_{д1}(t)$, $f_{д2}(t)$ – доплеровские частоты рассеянных сигналов,

$$f_{д1,2}(t) = -\frac{1}{\lambda_{1,2}} \frac{dl(t)}{dt}. \quad (8)$$

В приемнике сигналы (3), (5) отфильтровываются от сигналов (4), (6). После этого выделение сигналов доплеровских частот производится амплитудным детектированием колебаний на выходах фильтров [6-8]. Поскольку прямой сигнал от передатчика существенно мощнее рассеянного на цели сигнала, фазы θ_1 и θ_2 продетектированных колебаний определяются разностями фаз прямых и рассеянных сигналов [4]:

$$\begin{aligned} \theta_1(t) &= 2\pi f_{п1}t - \theta_{п1} - k_1 a - \left(2\pi f_{п1}t - \theta_{п1} - k_1 l(t_{н}) + 2\pi \int_{t_{н}}^t f_{д1}(t) dt - \theta_{ц1} \right) = \\ &= k_1 l(t_{н}) - 2\pi \int_{t_{н}}^t f_{д1}(t) dt - k_1 a + \theta_{ц1}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \theta_2(t) &= 2\pi f_{п2}t - \theta_{п2} - k_2 a - \left(2\pi f_{п2}t - \theta_{п2} - k_2 l(t_H) + 2\pi \int_{t_H}^t f_{д2}(t) dt - \theta_{ц2} \right) = \\ &= k_2 l(t_H) - 2\pi \int_{t_H}^t f_{д2}(t) dt - k_2 a + \theta_{ц2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответственно разность фаз протектированных колебаний с учетом (7) и $\theta_{ц1} \approx \theta_{ц2}$ будет равна

$$\Delta\theta(t) = \theta_2(t) - \theta_1(t) = k_2(l(t) - a) - k_1(l(t) - a) = 2\pi(l(t) - a)(f_{п2} - f_{п1})/c, \quad (11)$$

откуда следует, что разность $(l(t) - a)$ пропорциональна разности фаз протектированных колебаний:

$$l(t) - a = \frac{c}{2\pi(f_{п2} - f_{п1})} \Delta\theta(t), \quad (12)$$

или

$$l(t) = \frac{c}{2\pi(f_{п2} - f_{п1})} \Delta\theta(t) + a. \quad (13)$$

Для устранения неоднозначности измерений дальности l в пределах всей зоны действия просветной РЛС можно определять момент τ пересечения целью линии базы по измерениям доплеровских частот $f_{д1}(t)$ и $f_{д2}(t)$, исходя из условия [6, 8, 9]

$$f_{д1}(\tau) = 0 \quad \text{или} \quad f_{д2}(\tau) = 0. \quad (14)$$

После этого однозначность измерений обеспечивается непрерывным наблюдением за изменением разности фаз (11) и подсчетом целого числа циклов изменения разности фаз.

Для контроля за однозначностью измерений суммарной дальности по разности фаз (11) можно использовать также оценку дальности, определяемую по (8) интегрированием доплеровских частот от момента τ , в который дальность l равна базе a , до текущего времени t [6-8]:

$$l(t) = a - \lambda_{1,2} \int_{\tau}^t f_{д1,2}(t) dt. \quad (15)$$

Возможность однозначного определения суммарной дальности имеется и до пересечения целью линии базы, если цель движется равномерно и прямолинейно почти ортогонально линии базы. В этом случае зависимости доплеровских частот от времени – квазилинейные, и начальную оценку суммарной дальности также можно найти из (15) путем экстраполяции измеренных зависимостей $f_{д1}(t)$ или $f_{д2}(t)$ от текущего момента t на момент τ пересечения целью линии базы [7].

Рассмотренный фазовый метод измерения дальности и способ устранения неоднозначности измерений наряду с особенностями построения фазовых пеленгаторов [9] существенно расширяют представления о методах просветной локации подвижных объектов и одновременно с этим позволяют упростить конструкцию перспективных просветных радиолокаторов. Фазовые устройства измерения углов и измерения дальностей удобно строить на основе приемников с амплитудным детектированием суммарного колебания, образуемого в результате интерференции радиоволны, рассеянной на цели, и более мощной прямой радиоволны от передатчика. Возникающую в результате детектирования неоднозначность в определении знака доплеровской частоты [5] нетрудно устранить по приращению частоты протектированного колебания, а неоднозначность в определении знака угла – по приращению разности фаз сигналов на выходе детекторов в пространственно разнесенных приемниках [7].

Считаем своим приятным долгом поблагодарить члена-корреспондента РАН В.В. Кондратьева за поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уфимцев П.Я. Основы физической теории дифракции / П.Я. Уфимцев. М.: БИНОМ, 2011. 351 с.
2. Бляхман А.Б. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации «на просвет» / А.Б. Бляхман, И.А. Рунова // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 4. С. 424-432.
3. Ковалев А.Н. Формулы расчета параметров траектории цели в просветных бистатических радиолокаторах / А.Н. Ковалев, Ф.Н. Ковалев // Вестник СГТУ. 2013. № 4 (73). С. 45-48.
4. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970. 560 с.

5. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации / М.И. Финкельштейн. М.: Сов. радио, 1973. 496 с.
6. Ковалев А.Н. Определение направления на цель по измерениям доплеровских частот в системах радиолокации на просвет / А.Н. Ковалев, Ф.Н. Ковалев // Вестник СГТУ. 2013. № 3 (72). С. 40-42.
7. Ковалев Ф.Н. Определение координат движущихся целей по измерениям доплеровской частоты в радиолокационных системах с обнаружением «на просвет» / Ф.Н. Ковалев // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 331-339.
8. Радиолокационный способ определения параметров движения объекта: пат. 2133480 Рос. Федерация: МПК⁶ G01S3/72, G01S7/42 / Бляхман А.Б., Самарин А.В.; заявитель и патентообладатель Нижегород. науч.-исслед. ин-т радиотехники. № 98101955/09; заявл. 02.02.98; опубл. 20.07.99.
9. Ковалев Ф.Н. Фазовая пеленгация в системах радиолокации на просвет / Ф.Н. Ковалев, В.В. Кондратьев // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 4. С. 401-403.

Ковалев Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета

Alexander N. Kovalev – Ph. D., associate professor Nizhny Novgorod State Technical University

Ковалев Федор Николаевич – кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета

Fedor N. Kovalev – Ph. D., associate professor. Nizhny Novgorod State Technical University

Статья поступила в редакцию 19.04.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 538.915

И.С. Курчатов, А.В. Бундюк, И.Т. Басиева, Д.М. Кустов

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИК ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ А^{II}В^{VI} И А^{III}В^V, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ СО²⁺

Исследованы спектральные закономерности энергетической структуры иона Co²⁺ в полупроводниковых материалах ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe и соотношения этих структур с шириной запрещенной зоны. Оцениваются возможности получения лазерного эффекта на этих материалах в диапазоне 1.5-3 микрона.

Полупроводниковые лазеры, ионы группы железа, энергетическая структура, интенсивности переходов

I.S. Kurchatov, A.V. Bundyuk, I.T. Basieva, D.M. Kustov

IR LASERS USING A^{II}B^{VI} A^{III}B^V SEMICONDUCTORS WITH Co²⁺ IONS

The paper presents the research into the spectral properties of Co²⁺ ion energy structure in semiconductor materials ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe, and the ratio of these structures provided with bandgap related materials. A possibility to obtain the laser action for the given materials ranging between 1.–3 microns is estimated.

Semiconductor lasers, ions of the iron group, energy structure, intensity of transitions

Введение

Исследование спектральных закономерностей ионов группы железа Co²⁺, Fe²⁺, Ni²⁺ приобретает большое значение в связи с тем, что молекулярные структуры с этими ионами имеют ИК люминесценцию и лазерную генерацию в диапазоне прозрачности оптических волокон 1,5-3 микрона. Кроме этого, перенастраиваемые в широком диапазоне твердотельные лазеры востребованы для научных, технологических и медицинских целей.

Важнейшими физическими явлениями в твердотельных лазерах являются поглощение и излучение света активными ионами. Эти явления подразумевают переход электронов из основного со-

стояния в возбужденное и последующую их релаксацию. Очевидно, для описания и изучения этих процессов и свойств вначале необходимо обладать информацией о расположении энергетических уровней системы.

Указанная задача решается в два этапа: вначале рассчитываются значения энергетических уровней для свободного иона, а затем решается подзадача расчета изменений энергетической структуры иона при его нахождении в поле окружения лигандов материала лазера определенной симметрии. Общая теория лигандной структуры окружения ионов группы железа разработана в [1, 2].

Для твердотельных лазеров наиболее «полезными» и представляющими интерес в качестве активных ионов являются ион переходной группы железа и редкоземельные ионы [3]. В целом ряде работ [4-7] изучаются оптические свойства ионов переходной группы металлов, введенных в полупроводники $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$.

В частности, $A^{II}B^{VI}$ – полупроводники, легированные ионами переходных металлов, такими как Cr, Co и Fe, являются предметом большого интереса ввиду возможного конструирования средне-инфракрасных лазеров, перенастраиваемых в широком диапазоне [8, 9]. Ионы группы переходных металлов обладают широкими линиями спектров поглощения и испускания, что также представляет интерес для перенастраиваемых средне-инфракрасных лазеров [10].

В [11] для иона Co^{2+} в ZnSe и ZnS представлены оптические спектры и определены параметры Рака. Учитывая связь между параметрами Рака (B, C) и параметрами Слейтера (F_2, F_4) [12] и используя полную энергетическую матрицу взаимодействий [13, 14], можно определить расположение энергетических уровней Co^{2+} в кристаллах соединений $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$. В [15] приведены результаты некоторых расчетов для Co^{2+} в ZnO и CdS. В настоящей работе приведены результаты расчетов также для материалов ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdSe, CdTe.

Определение параметра Dq

Параметр Dq в ионной модели диэлектрических кристаллов определяется следующим образом:

$$Dq = k \frac{Z_L r_{3d}^4}{R_{AL}^5}, \quad (1)$$

где Z_L – заряд лигандов B, r_{3d}^4 – радиус 3d оболочки иона Co^{2+} , R_{AL} – расстояние между атомами A и L=B в кристаллической решетке $A^{II}B^{VI}$ или $A^{III}B^V$, k – координационное число окружения иона, для Co^{2+} $k=4$. Значения параметров Dq от межатомного расстояния R_{AL} в кристаллах $A^{II}B^{VI}$: A=Zn, Cd; L=O, S, Se, Te даны в табл. 1 и представлены на рис. 1.

В ионной модели Dq должно зависеть от межионного R_{AL} расстояния как $1/R^5$. Однако эта зависимость, как видно из рис. 1, определяется как $1/R$. Такое отклонение от ионной модели для полупроводниковых кристаллов можно объяснить изменением заряда лигандов Z_L . В полупроводниковых кристаллах ионно-ковалентного типа заряд лигандов может сильно отличаться от ионных зарядов для чисто ионной химической связи. Поэтому имеет смысл определить значения этих зарядов по величинам параметра Dq и следующей формулой: $Z_L = \frac{R_{AL}^5}{k r_{3d}^4} Dq$.

Рабочая формула определения зарядового числа лигандов в атомной системе единиц будет выглядеть так: $Z_L = \frac{R_{AL}^5}{k a_0 r_{3d}^4} \frac{a_0 Dq}{8065 \cdot 27.2}$. В атомных единицах эта формула будет иметь следующий

вид:

$$Z_L = p R_{AL}^5 Dq, \quad (2)$$

где $p = \frac{1}{8065 \cdot 27.2 k a_0 r_{3d}^4}$ и a_0 боровский радиус $a_0=52.9$ Пм, $r_{3d}(Co^{2+})=65$ Пм.

Параметр электростатического взаимодействия B в ряду кристаллов незначительно уменьшается с увеличением межионного расстояния, поэтому в ряду кристаллов $A^{II}B^{VI}$ это уменьшение можно учесть введя феноменологический коэффициент, который постоянен в этом ряду. Второй параметр электростатического взаимодействия $C=4.5 \times B$, как это следует из расчетов для свободного иона [16].

Параметр Dq, в соответствии с формулой (2) должен быть пропорционален R_{AL}^{-5} . Отклонение от этой зависимости может означать, что заряд лигандов не является постоянной величиной и меняется в соответствии с изменением химической связи между ионом Co^{2+} и лигандами, перекрытием волновых функций и примесью ковалентной связи. Доля ковалентной связи зависит от разности электроотрицательности иона кобальта и атомов лигандов. При уменьшении этой разности увеличи-

вается доля ковалентной связи и результирующий заряд лигандов уменьшается. Заряды лигандов, полученные из анализа рис. 1, представлены в табл. 1, показаны на рис. 2.

Таблица 1

Спектроскопические параметры иона Co^{2+} в полупроводниковых кристаллах ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe*, приведенные в [11] и в ее ссылках

L (ligand)	R_{AL}^I (Zn-L) Пм	R_{AL} (Cd-L) Пм	Dq (ZnL ₄) см ⁻¹	Dq (CdL ₄) см ⁻¹	B (ZnL ₄) см ⁻¹	B (CdL ₄) см ⁻¹	C (ZnL ₄) см ⁻¹	C (CdL ₄) см ⁻¹	Z _L (ZnL)	Z _L (CdL)
O	204		363		735		3306		0.155	
S	233		347		611		2751		0.287	
Se	247		323		584		2627		0.358	
Te	266		298		445		2003		0.479	
O		221		335		796		3581		0,213
S		250		290		665		2994		0,342
Se		264		282		598		2693		0,437
Te		283		274		472		2123		0,600

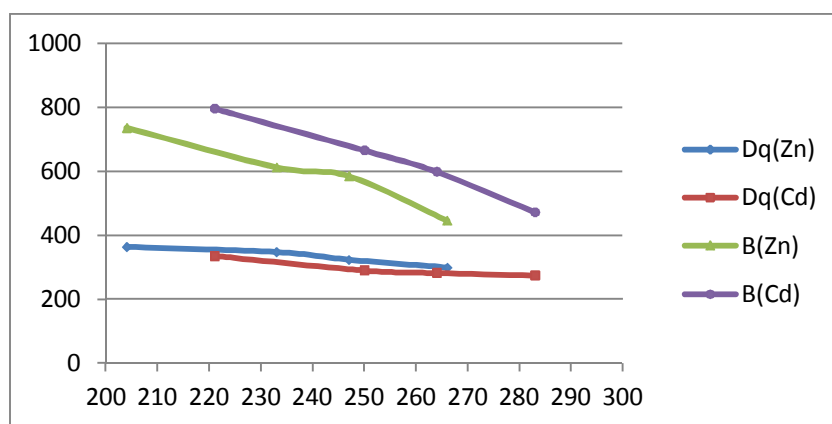


Рис. 1. Зависимость параметров Dq и B от межатомного расстояния R_{AL} в кристаллах $A^{II}B^{VI}$, где A=Zn, Cd; L=O, S, Se, Te

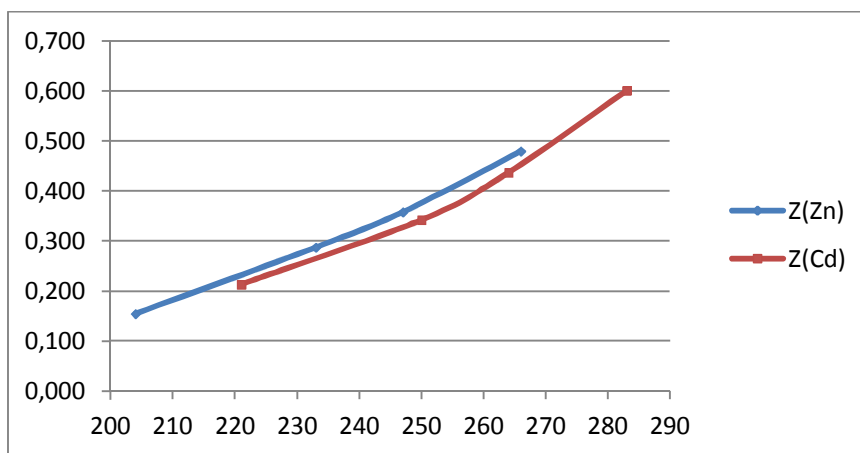


Рис. 2. Зависимость заряда лигандов L от межатомного R_{AL} расстояния в кристаллах $A^{II}L^{VI}$, где A=Zn, Cd, L=O, S, Se, Te

Используя эти значения зарядов по всему ряду кристаллов $A^{II}B^{VI}$, и по формуле (1) можно определить значения параметра Dq и рассчитать спектральные характеристики иона кобальта в этих кристаллах.

¹ $R(Zn-L)$, $R(Cd-L)$ – сумма ковалентных радиусов цинка, кадмия и атомов лигандов L, $Dq(ZnL)$, $Dq(CdL)$ – параметр потенциала кристаллического поля кубической симметрии (см⁻¹); $B(ZnL)$, $B(CdL)$, $C(ZnL)$, $C(CdL)$ – параметры электростатического взаимодействия атома кобальта в соответствующих кристаллах; $Z_L(Zn)$, $Z_L(Cd)$ – числа лигандных зарядов.

При расчете мы использовали матрицу всех взаимодействий электронной конфигурации d^7 120×120 , с параметризацией B, C, Dq и 13 параметров кристаллического поля низкой симметрии [13, 14]. В приводимых расчетах симметрия окружения иона кобальта в кристаллах $A^{II}B^{VI}$ тетраэдрическая, значит значения этих 13 параметров равны нулю.

Таблица 2

Ширина запрещенной зоны Eg (Gap) и параметры кристаллической решетки кристаллов $A^{II}B^{VI}$

Материал (w – вюрцит, s – сфалерит)	Eg		a (нм)
	эВ	см ⁻¹	
CdO(s)	2,16	17422	
CdS (w)	2,52	19515	413,6; 671,3
CdSe(w)	1,74	14087	
CdTe (s)	1,5	11693	648
ZnO (w)	3,35	27176	325; 591
ZnS (s)	3,54	28708	541
ZnSe(s)	2,7	21773	566,8
ZnTe(s)	2,1	18305	610,4

Энергетические уровни Co^{2+} в кристаллах соединений $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$

Были вычислены энергия уровней и сила осцилляторов переходов с $(^4F)^4A_2$ уровней иона Co^{2+} в CdO, CdS, CdSe, CdTe и ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe. Результаты этих расчетов приведены на рис. 3. Кроме этого, рассчитаны силы осцилляторов переходов спектра люминесценции для каждого из этих материалов. В табл. 3 в качестве иллюстрации показаны силы осцилляторов переходов при переходах из основного состояния $(^4F)^4A_2$ иона Co^{2+} на все остальные для в CdO, CdS, CdSe, CdTe. Важно, что рассчитываются не только энергии 120 уровней, но и силы осцилляторов переходов электродипольного типа, индуцированные нечетным потенциалом кристаллического поля.

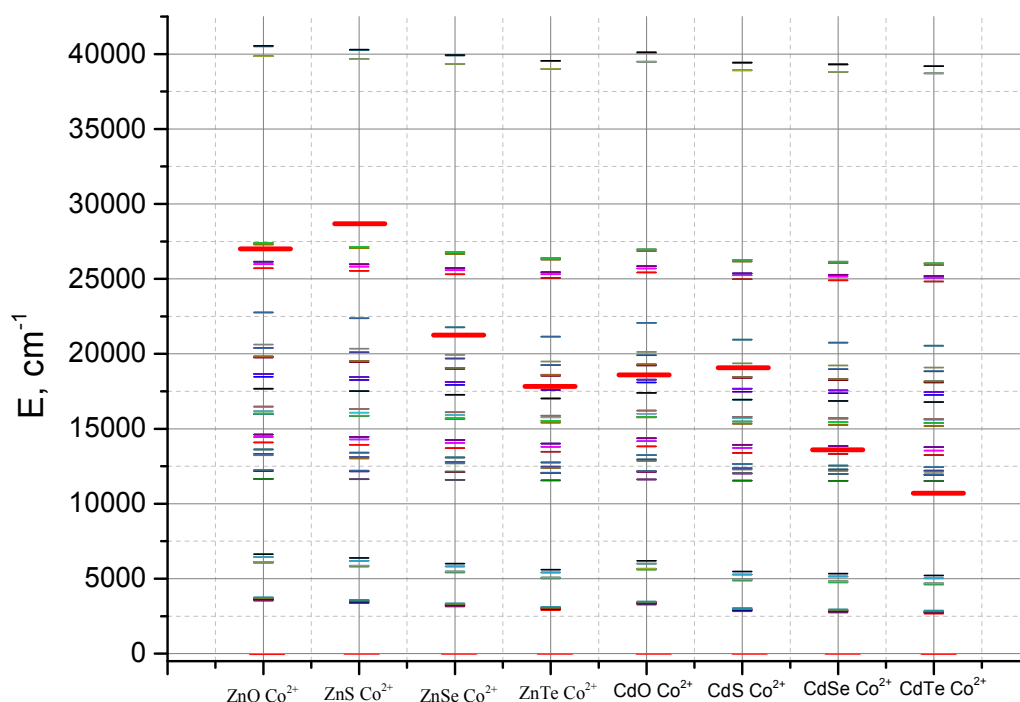


Рис. 3. Энергетические уровни $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ соединений, легированных ионами Co^{2+} , на примере ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe и CdTe, данные по ZnO и CdS ранее были опубликованы в [15]

Таблица 3

Энергия уровней и сила осцилляторов переходов с $(^4F)^4A_2$ уровней иона Co^{2+} в CdO, CdS, CdSe, CdTe

Состав		CdO		CdS		CdSe		CdTe		
№	Уровни	E, см ⁻¹	f(10 ⁻⁷)	E, см ⁻¹	f(10 ⁻⁷)	E, см ⁻¹	f(10 ⁻⁷)	E, см ⁻¹	f(10 ⁻⁷)	
1-4	$^4F^4A_2$	0	-	0	-	0	-	0	-	
5	$^4F^4T_2$	3261	12,987	2818	5,598	2738	5,682	2660	14,239	
6			4,0994		15,11		14,75		5,5158	
7		3335	77,229	2890	22,1	2810	99,46	2730	9,3101	
8			31,948		64,68		46,75		124,32	
9			36,408		93,59		88,45		131,34	
10			56,065		141,3		104,7		96,003	
11		3412	35,942	2966	34,6	2886	130,1	2808	187,28	
12			129,77		81,97		54,41		77,481	
13			170,04		215,5	2887	160,7		160,4	
14			53,794		141,3		158,2		113,86	
15		3475	30,006	3033	44,09	2953	20,45	2876	22,245	
16			13,697		16,63		46,13		43,977	
17		$^4F^4T_1$	5611	1022,3	4879	1188	4747	423,4	4615	1307,5
18				330,93		453,4		1227		454,96
19			5673	1295	4950	315,9	4820	478,6	4691	1014,7
20				258,93		1536		3000		3241,5
21	6005		363,68	5283	1266,9	5153	1086	5024	483,08	
22			1896,7		1548,1		336,8		309,16	
23			121,72		372,8		336,5		191,43	
24			245,51		205,3		324,4		231,56	
25			167,65		191,45		132		272,72	
26			175,14		144,2		190,8		321,47	
27	6197		141,51	5475	289,5	5344	309,5	5215	178,15	
28			183,92		172,3		190,6		351,39	
29	$^2G^2E$		11619	10,383	11550	25,59	11535	60,18	11521	55,593
30				0,8879		36,79		85,77		59,16
31				13,17		51,88		27,86		69,567
32				17,356		27,32		16,49		78,495
33	$^2G^2F_1$	12141	511	12025	2865	11989	7798	11929	13406	
34			362,54		2189		6926		12904	
35			183,49		2830		3286		4841,6	
36		140,25	1099	7355	5753,5					
37		12183	360,84	12036	4514	11993	3222	11953	5950,1	
38			386,99		4495		1832		8370,2	
39	$^4P^4T_1$	12856	12918	12288	14904	12204	12990	12135	9904,1	
40			12230		15490		13899		10010	
41		12956	9652,1	12383	8371	12292	7583	12210	6569,7	
42			11189		8465		6373		6343,6	
43		13247	5602,6	12651	16962	12546	20936	12442	16833	
44			14372		19134		17520		17201	
45			4684,3		6392		17574		18494	
46			5830,1		12247		6866		12859	
47		5935,5	8395	10309	11322					
48		6783,7	12724	5314	8678					
49		13250	11354	10849	12444	10158				
50		13250	7200,3	9354	14876	7184,3				
51		$^2G^2A_1$	13821	40,885	13392	29,19	13316	16,98	13241	14,092
52				48,702		26,01		35,99		32,5
53		$^2G^2T_2$	14179	24,764	13721	41,86	13636	32,05	13552	24,989
54				39,371		23,92		33,96		41,72
55	14364		16,582	13935	24,44	13854	27,18	13774	2,196	
56			1,284		17,64		2,597		20,587	
57			2,9038		6,241		8,183		5,3363	
58			24,726		2,435		16,97		25,941	
59	15758		74,245	15335	113,5	15260	111,8	15187	114,44	
60			83,848		102,2		118,4		128,52	
61		1,9646	9,623		4,975		5,4779			
62		5,7004	0,238		0,049		10,129			
63	15785	0,409	15485	6,687	15432	5,204	15381	7,5738		
64		8,1463		6,051		13,92		3,1883		

Состав		CdO		CdS		CdSe		CdTe					
№	Уровни	E, см ⁻¹	f(10 ⁻⁷)	E, см ⁻¹	f(10 ⁻⁷)	E, см ⁻¹	f(10 ⁻⁷)	E, см ⁻¹	f(10 ⁻⁷)				
65	² H ² T ₁	16003	11,576	15718	16,49	15667	15,28	15617	15,032				
66							12,4		10,966				
67				113,87		231,1		81,13		243,31			
68				230,19	15800			107,2	15655		370,74		
69				126,81			134,4			330,3		166,77	
70				67,839			295			249,3		31,722	
71				30,593			48,29			26,49	16782		40,354
72			7,8524	16944			11,95		27,313				
73			11,81			17,41		4,205		14,193			
74			21,006			13,17		52,05		16,601			
75	² P ² T ₂	18093	39,964		17481	63,65	17370	68	17260	71,579			
76				39,088				59,85			67,18		75,647
77				22,392		42,64		74,6	17451		173,26		
78				120,51	17672			122,4			133,59		
79			38,942			165,7		124,7			49,66		
80			93,355			157		118,6		114,91			
81	² H ² T ₁	19224	0,9916	18391	1,810	18244	2,045	18098	1,0036				
82					0,5235				0,888		0,636		2,0825
83				9,3209	18463	20,51		15,85	18166		13,104		
84				8,6827			11,57			11,8		9,844	
85				7,3407			8,516			21,48		31,347	
86				2,7107			17,84			18,57		24,462	
87	² D ² T ₂	19900	0,9781	19113	9,168	18973	2,419	18835	6,8435				
88					1,2889				7,570		2,771		2,2868
89					6,398				2,605		17,84		14,928
90				4,2759		3,06		2,166		3,2155			
91			20132	5,3227	19358	9,105	19221	9,914	19085	4,6224			
92				2,1902				3,778			4,320		11,273
93	² D ² E	22069	3,6566	20949	5,997	20750	0,872	20552	7,8556				
94					0,5023				10,9		11,5		6,6184
95					5,9589				0,500		2,016		7,5506
96					2,298				1,887		7,112		1,5238
97	² F ² A ₂	25425	0,0724	24982	0,327	24903	0,121	24825	0,3441				
98					0,1587				0,109		0,301		0,1348
99	² F ² T ₂	25698	1,8773	25242	0,88054	25160	0,97	25079	1,2007				
100					0,6901				2,803		3,064		3,1517
101				1,4204	25362	0,603		3,174	25188		0,5802		
102				0,1594			3,037			1,429		3,4057	
103				1,8417			0,627			0,503		2,4156	
104				0,2641			1,475			1,048		0,1687	
105	² F ² T ₁	26855	3,5792	26164	5,815	26042	6,408	25922	6,8546				
106					3,5851				5,585		6,097		6,6723
107				10,035	26272	10,85	26150	11,86	26030	12,953			
108				7,0139				24,82			25,56		25,494
109			10,678			18,44				23,15		30,13	
110			18,181		18,14		18,79		17,11				
111	² D ² E	39492	0,5182	38913	6,181	38811	2,824	38710	1,9509				
112					2,78				3,028		1,132		3,2418
113					2,106				3,826		3,373		3,5281
114			39493		2,0513				1,353		7,037		6,7127
115	² D ² T ₂	40086	25,534	39423	8,025	39306	40,52	39191	44,874				
116					43,654				146,6		60,96		72,033
117					42,539				52,97		62,34		57,564
118					35,841				52,18		125,8		112,05
119			40115	46,076	39433	55,62	39313	28,05	39194	171,09			
120			63,482			90,32				128,6		31,164	

Основной интерес и значение проведенного аппроксимационного исследования заключаются в идентификации ИК переходов и определении их энергии. Используя энергию уровней при переходах с (4F) 4A_2 уровня иона Co^{2+} , были вычислены длины волн ИК генерации в диапазоне энергий от 0 до 7000 см^{-1} .

Длины волн лазерной ИК генерации различных соединений цинка и кадмия, легированных ионами кобальта, приведены на рис. 4.

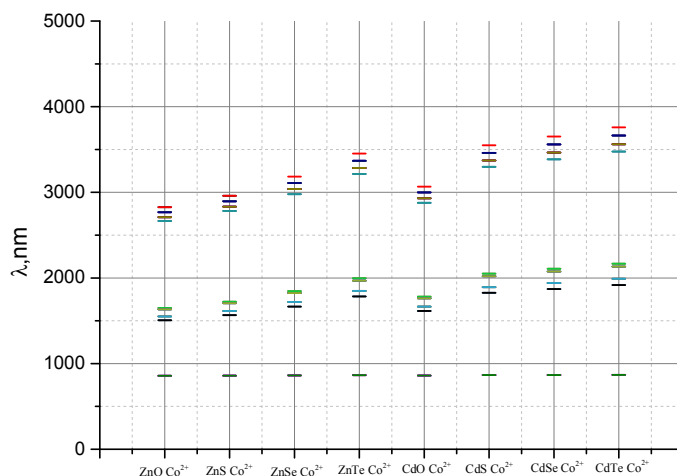


Рис. 4. Длины волн лазерной ИК генерации для ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe, легированных ионами Co^{2+}

Заключение

Выполненными расчетами определены длины волн лазерной ИК генерации для ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe, легированных ионами Co^{2+} , а также силы осцилляторов и времена жизни для каждого из этих переходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кустов Е.Ф. Орбитальная система структур наноразмерной дисперсности / Е.Ф. Кустов // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. 2013/ № 1/ С. 92-124.
2. Kustov E.F. Orbital Structure of Vibrations of Nanoparticles, Clusters, and Coordination / E.F. Kustov, V.M. Novotortsev, M.E. Kustov // Polyhedra: Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2013. Vol. 58. No. 14. P. 1624-1646.
3. Powell R.C. Physics of Solid-State Laser Materials / R.C. Powell. N.Y.: Springer-Verlag, 1998. 423 p.
4. Baranowski J.M. Crystal-field spectra of $3d^n$ impurities in II-VI and III-V compound semiconductors / J.M. Baranowski, J.W. Allen, G.L. Pearson // Physical Review. 1967. Vol. 160. P. 627-632.
5. Pappalardo R. Absorption spectra of transition ions in CdS crystals / R. Pappalardo, R.E. Dietz // Phys. Rev. 1961. Vol. 123. P. 1188-1203.
6. Weakliem H.A. Optical Spectra of Ni^{2+} , Co^{2+} , and Cu^{2+} in Tetrahedral Sites in Crystals / H.A. Weakliem // J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36. P. 2117-2140.
7. Loescher D. H. The application of crystal field theory to the electrical properties of Co impurities in GaP / D. H. Loescher, J. W. Allen, G.L. Pearson // J. Phys. Soc. Japan Suppl. 1966. Vol. 21. P. 239-243.
8. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy and laser demonstration of a new class of gain media / L.D. DeLoach, R.H. Page, G.D. Wilke, S.A. Payne, W.F. Krupke // IEEE J. Quantum Electron. 1996. Vol. 32. P. 885-895.
9. Cr^{2+} -Doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers / R.H. Page, K.I. Schaffers, L.D. DeLoach, G.D. Wilke, F.D. Patel, J.B. Tassano, S.A. Payne, W.F. Krupke, K.T. Chen, A. Burger // IEEE J. Quantum Electron. 1997. Vol. 33/ № 4. P. 609-617.
10. Wray E. M. W. Crystal field spectra of $3d^n$ impurities in zinc selenide / E. M. Wray, J. W. Allen // J. phys. Ci Solid St. Phys. 1971. Vol. 4. P. 512-516.
11. Dreyhsig J. Nature of optical transitions in the charge-transfer region of ZnS:Co and ZnSe:Co / J. Dreyhsig, B. Litzenger // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54. P. 10516-10524.
12. Griffith J.S. The Theory of Transition Metal Ions / J.S. Griffith. Cambridge: Cambridge University Press, 1961. 468 p.

13. Матрицы энергии и сил осцилляторов электродипольных переходов в ионах $3d^n$ ($n=2,3,4,6,7,8$) конфигураций (Cr^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+}) в кристаллических полях любой симметрии / Е.Ф. Кустов, И.Т. Басиева // Реестр базы данных №2012621086 от 19.10.2012.

14. Расчет оптических спектров ионов Cr^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{4+} , Co^{2+} , Co^{3+} , Fe^{2+} , Ni^{2+}) в полупроводниках $A^{II}B^{VI}$, $A^{III}B^V$ / Е.Ф. Кустов, И.Т. Басиева // Реестр программ для ЭВМ №2012619507 от 19.10.2012.

15. ИК лазеры на полупроводниках $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ с ионами Co^{2+} / Д.М. Кустов, А.В. Бундюк, Е.О. Гончаров, И.С. Курчатова // Изв Академии инженерных наук им. Прохорова, №2-2014, С. 49-52.

16. Кустов Е.Ф. Магнетохимия молекулярных структур / Е.Ф. Кустов, В.М. Новоторцев. URSS Crosand, М., 2014.

Курчатова Илья Сергеевич –
аспирант национального исследовательского,
университета «МЭИ», г. Москва

Iliya S. Kurchatov –
Postgraduate
National Research University Moscow Power
Engineering Institute, Moscow

Бундюк Алексей Владимирович –
национальный исследовательский, университета
«МЭИ», г. Москва

Aleksey V. Bundyuk –
National Research University Moscow Power
Engineering Institute, Moscow

Басиева Ирина Тасолтановна –
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Научного центра
лазерных материалов и технологий, Института
общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
г. Москва

Irina T. Basieva –
Ph. D., Senior Researcher
Research Center for Laser Materials
and Technologies,
A.M. Prokhorov Institute of General Physics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Кустов Даниил Максимович –
Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва

Daniil M. Kustov –
National Research University Moscow Power
Engineering Institute, Moscow

Статья поступила в редакцию 14.03.14, принята к опубликованию 16.06.14

УДК 621.316

В.В. Муллин, М.А. Фурсаев

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ МЕЖДУ ВАКУУМНЫМИ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫМИ КАМЕРАМИ, СОЕДИНЕННЫМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО

Предложена методика определения степени отличия величин напряжения, приложенного к последовательно соединенным вакуумным дугогасительным камерам в выключателе при обеспечении ими разрыва электрической цепи. Показана зависимость степени отличия этих напряжений от величины и характера нагрузки на выходе выключателя. Показана возможность использования этой методики при определении емкости конденсаторов, шунтирующих камеры, с целью выравнивания распределения напряжений между камерами при их последовательном соединении.

Вакуумная дугогасительная камера, выключатель, последовательное соединение, распределение напряжения, шунтирующий конденсатор

V.V. Mullin, M.A. Fursayev

VOLTAGE DISTRIBUTION AMONG VACUUM INTERRUPTERS IN SERIES COUPLING

The paper presents a method for detecting an uneven voltage distribution among the vacuum interrupters connected in series to the circuit breaker performing opening

operation. It was shown that the voltage distribution depends on the type and value of the breaker output load. The given method is shown to be an instrument for evaluation of shunt capacitors used to achieve a more even voltage distribution among the vacuum interrupters connected in series.

Vacuum interrupter, circuit breaker, series connection, voltage distribution, shunt capacitor

В выключателях электрических цепей переменного тока с напряжением более 100 кВ в качестве коммутационных элементов используются вакуумные дугогасительные камеры (ВДК), которые соединены последовательно [1, 2]. При последовательном соединении ВДК функционируют при уменьшенном напряжении. Это позволяет уменьшить расстояние между контактами ВДК, что способствует упрощению решения ряда вопросов разработки и эксплуатации высоковольтных выключателей, в частности обеспечения их электрической прочности при отключенной нагрузке, когда контакты ВДК разомкнуты, а также уменьшения мощности привода, осуществляющего перемещения контактов ВДК.

В составе выключателя последовательное соединение ВДК осуществляется посредством шины, с чем связано появление емкости «шина-земля». В результате распределение напряжений между ВДК при разомкнутых контактах становится неравномерным [3]. Ниже рассматривается методика, позволяющая определить неравномерность распределения напряжения между последовательно соединенными ВДК с разомкнутыми контактами.

В основу методики положена эквивалентная схема, приведенная на рис. 1, где ВДК с разомкнутыми контактами представлены в виде емкостей $C_{ВДК1}$ и $C_{ВДК2}$, а емкость $C_{Ш}$ отражает наличие емкости «шина-земля». Индекс «2» относится к ВДК, ближайшей к нагрузке с сопротивлением $Z_{Н} = R_{Н} + jX_{Н}$. Следует отметить, что из эквивалентной схемы на рис. 1 следует условность применения термина «последовательное соединение ВДК», которое нашло широкое распространение и поэтому он используется в настоящей работе.

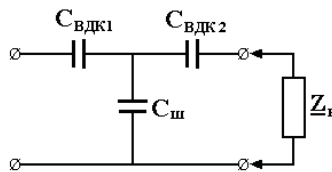


Рис. 1. Эквивалентная схема для определения отношения токов, протекающих в последовательно соединенных ВДК с разомкнутыми контактами

Отношение напряжений на ВДК может быть записано как

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{X_{ВДК1}}{X_{ВДК2}} \cdot \frac{I_1}{I_2}, \quad (1)$$

где $X_{ВДК1}$ и $X_{ВДК2}$ – сопротивления емкостей ВДК с разомкнутыми контактами, I_1 и I_2 – протекающие по ним токи. Отношение токов, протекающих через ВДК, можно рассматривать как коэффициент передачи по току Т-образного четырехполюсника, нагруженного на сопротивление $Z_{Н}$. Величина такого коэффициента определяется по соотношению [4]

$$K_I = (\underline{A}_{21}Z_{Н} + \underline{A}_{22})^{-1}, \quad (2)$$

где $\underline{A}_{21} = 1/X_{Ш}$ и $\underline{A}_{22} = 1 + X_{ВДК2}/X_{Ш}$ – элементы матрицы передачи Т-образного четырехполюсника, $X_{Ш}$ – сопротивление емкости шина-земля, откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \left[\left(1 + \frac{X_{ВДК2}}{X_{Ш}} \pm \frac{X_{Н}}{X_{Ш}} \right)^2 + \left(\frac{R_{Н}}{X_{Ш}} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (3)$$

где знак «минус» соответствует индуктивной компоненте сопротивления нагрузки, а знак «плюс» – емкостному. Из этого соотношения следует, что от величины емкости ВДК, ближайшей к нагрузке, зависит распределение токов между ВДК полюса.

Отношение напряжений, приложенных к последовательно соединенным ВДК с разомкнутыми контактами, определяется с использованием соотношений (1) и (3). Если величины емкостей ВДК

одинаковы, то с учетом реальных величин сопротивления нагрузки (величины волновых сопротивлений линий передач составляют несколько сотен Ом) напряжение на той, которая ближе расположена к нагрузке, всегда меньше. При уменьшении емкости «шина – земля» уменьшается различие между напряжениями, которые приложены к ВДК, что иллюстрируется данными расчета, приведенными на рис. 2а. Из этого рисунка также видно, что различие между напряжениями ВДК увеличивается при увеличении активной составляющей сопротивления нагрузки и емкости ВДК.

При увеличении емкостной компоненты сопротивления нагрузки увеличивается различие между напряжениями, приложенными к ВДК, а при увеличении индуктивной компоненты сопротивления нагрузки это различие сокращается. Такие зависимости иллюстрируются рис. 2б. При наличии индуктивной составляющей сопротивления нагрузки в ряде случаев возможно превышение напряжения, приложенного к ВДК, ближайшей к нагрузке, над напряжением, приложенным к другой ВДК.

Для проверки применимости рассматриваемой методики использовались результаты, полученные при исследовании трехфазного выключателя на напряжение 110 кВ, в котором две ВДК соединены последовательно [5].

Согласно измерениям, усредненная величина емкости ВДК с разомкнутыми контактами равна $16,5 \mu\text{Ф}$, усредненная величина емкости «шина-земля» равна $24,1 \mu\text{Ф}$. На ВДК, ближайшей к источнику напряжения, падает 68-75% подводимого напряжения, а на ВДК, ближайшей к нагрузке, – 25-32%.

С учетом реальных величин сопротивления нагрузки отношения $R_n/X_{ш}$ и $X_n/X_{ш}$ близки к нулю. Отношение емкостных сопротивлений $X_{вдк}/X_{ш} = 0,68$, а величина сопротивления $X_{ш} = 132 \text{ кОм}$. При таких значениях параметров расчетные величины напряжения ВДК, ближайшей к нагрузке, и ВДК, ближайшей к источнику напряжения, составляли соответственно 35 и 65% от подводимого напряжения. Как видно, данные расчета и эксперимента весьма близки.

Для выравнивания напряжений между последовательно соединенными ВДК используется шунтирование каждой из них конденсаторами. Однако при этом увеличиваются токи переходного процесса при выполнении операции отключения, что отражается на отключающей способности выключателя [2]. Поэтому при разработке и эксплуатации высоковольтных выключателей должна решаться задача определения распределения напряжения между ВДК с учетом их шунтирования конденсаторами. Эквивалентная схема рис. 1 и полученные на ее базе соотношения позволяют решить эту задачу. При ее решении в соотношениях вместо величины $X_{вдк}$ используется величина X_c , сопротивление суммарной емкости ВДК и шунтирующего его конденсатора.

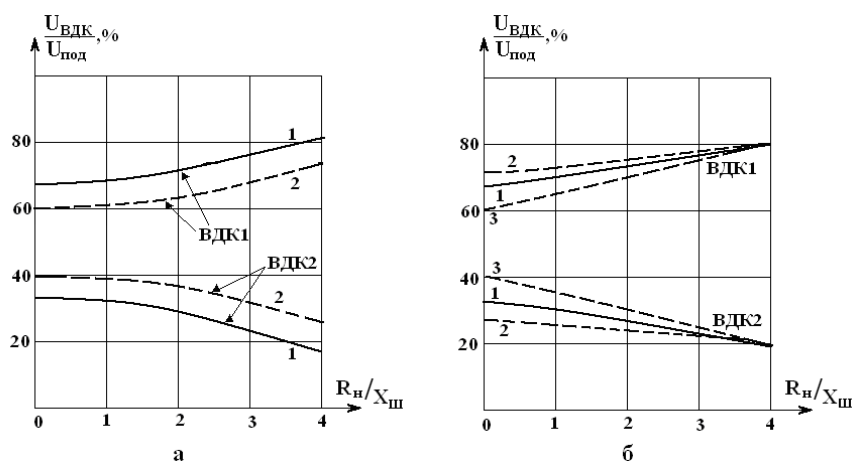


Рис. 2. Зависимости величин напряжения, приложенного к ВДК с разомкнутыми контактами, соединенными последовательно, от отношения $R_n/X_{вдк}$

а – для двух значений отношения $X_{вдк}/X_{ш}$ при $X_n = 0$; (1 - $X_{вдк}/X_{ш} = 1$; 2 - $X_{вдк}/X_{ш} = 0,5$);
б – для трех значений отношения $X_n/X_{ш}$ при $X_{вдк}/X_{ш} = 1$ (1 - $X_{вдк}/X_{ш} = 0$; 2 - $X_{вдк}/X_{ш} = -0,5$; 3 - $X_{вдк}/X_{ш} = +0,5$)

На рис. 3 приведены данные расчета распределения напряжения между последовательно соединенными ВДК в зависимости от отношения $X_c/X_{ш}$ при их шунтировании конденсаторами для трех значений активной компоненты сопротивления нагрузки. При этом полагалось, что величины суммарной емкости ВДК с разомкнутыми контактами и шунтирующего ее конденсатора для двух

ВДК одинаковы. Видно, что увеличение емкости шунтирующих конденсаторов, т.е. уменьшение их реактивного сопротивления, уменьшает различие между напряжениями, приложенными к ВДК.

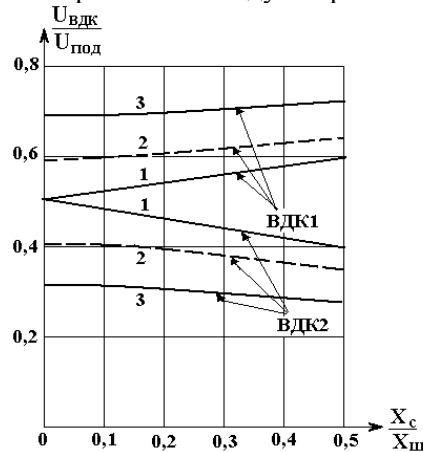


Рис. 3. Зависимости распределения напряжений, приложенных к последовательно соединенным ВДК с разомкнутыми контактами и шунтируемыми конденсаторами, от отношения $X_c/X_{ш}$ для трех значений отношения $R_n/X_{ш}$ и при $X_n/X_{ш} = 0$ (1 – $R_n/X_{ш} = 0$; 2 – $R_n/X_{ш} = 1$; 3 – $R_n/X_{ш} = 2$)

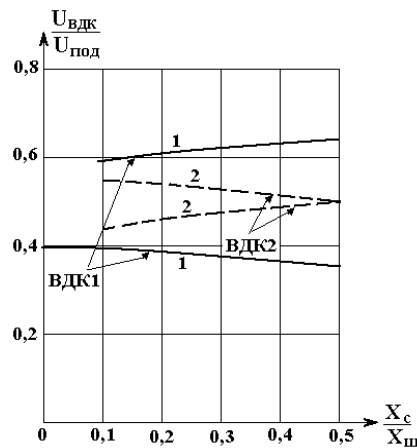


Рис. 4. Зависимости распределения напряжений, приложенных к последовательно соединенным ВДК с разомкнутыми контактами и шунтируемыми конденсаторами с различной величиной емкости, от отношения $X_c/X_{ш}$ при $R_n/X_{ш} = 0$ и $X_n/X_{ш} = 0$ (1 – $X_{c1}/X_{c2} = 1$; 2 – $X_{c1}/X_{c2} = 1,4$)

Однако данный эффект существенно проявляется лишь при малых величинах активной компоненты сопротивления нагрузки. При больших величинах этого сопротивления различие между напряжениями, приложенными к ВДК, можно уменьшить, если использовать при шунтировании конденсаторы с различной величиной емкости. Очевидно, что величина сопротивления конденсатора, шунтирующего ВДК, ближайшей к нагрузке, должна быть больше. Такая возможность иллюстрируется данными расчета, приведенными на рис. 4, для двух значений отношения емкостных сопротивлений X_{c2}/X_{c1} . Вдоль оси абсцисс отложена величина сопротивления суммарной емкости ВДК, ближайшей к нагрузке, и емкости шунтирующего ее конденсатора, отнесенной к сопротивлению емкости «шина-земля».

Таким образом, предложенная в настоящей работе методика позволяет прогнозировать распределение напряжения, которое приложено к последовательно соединенным ВДК в выключателе при отключенной нагрузке. Как показал проведенный анализ, степень отличия напряжений этих ВДК зависит от величины и характера сопротивления нагрузки. Предложенную методику также можно использовать в случае шунтирования конденсаторами ВДК с целью выравнивания распределения напряжения между ними.

Полагается, что предложенная методика найдет применение при решении вопросов повышения электрической прочности вакуумных высоковольтных выключателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Slade P.G. The Vacuum Interrupter. Theory, Design and Application / P.G. Slade // CPC Press. 2008. 510 p.

2. Fugel T. Switching and Transient Phenomena a Series Design of Two Vacuum Circuit Breakers / T. Fugel // XXI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Yalta, Crimea, 2004. P. 399-402.

3. Shiba Y.A Withstand Voltage Characteristics of Two Series of a Vacuum Interrupter / Y. Shiba, H. Fujmori, N. Ide, S. Yanabu // XXIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Vol. 1. Japan, 2006. P. 196-199.

4. Атабеков Г.И. Основы теории цепей / Г.И. Атабеков. Краснодар: Лань, 2009. 432 с.

5. Муллин В.В. Трехфазный выключатель на напряжение 110 кВ / В.В. Муллин, Г.В. Крылов // Электротехника. 2013. № 7. С. 25-29.

Муллин Виктор Валентинович –
кандидат технических наук,
Председатель Союза производителей
и работодателей Саратовской области

Victor V. Mullin–
Ph. D.,
Chairman: Manufacturers
and Employers Association in Saratov region

Фурсаев Михаил Александрович –
доктор технических наук,
профессор кафедры «Электротехника
и электроника» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail A. Fursaev –
Dr. Sc., Professor
Department of Electrical Engineering and
Electronics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.03.14, принята к опубликованию 16.06.14

УДК 621.7

М.Д. Орлова, А.Я Зоркин, Н.И. Бабкова

ТВЕРДОФАЗНОЕ СОЕДИНЕНИЕ УЗЛОВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СПИРАЛЬНЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Исследован процесс образования сложных оксидов, карбидов и нитридов бериллия при взаимодействии керамики на основе оксида бериллия с медью при изготовлении высокочастотного пакета замедляющей системы для ламп бегущей волны диапазона. Определены параметры получения твердофазного соединения опорных стержней из керамики на основе оксида бериллия и медным покрытием на молибденовой спирали, обеспечивающие необходимую прочность соединения.

Замедляющие системы, лампы бегущей волны, термосопротивление, керамика, спираль, твердофазное соединение

M.D. Orlova, A.Ya. Zorkin, N.I. Babkova

SOLID-PHASE COMPOUNDS IN METAL-CERAMIC HELICAL SLOW-WAVE STRUCTURES

The research is made into formation of complex oxides, carbides and beryllium nitrides in the interaction of ceramics on the basis of oxide beryllium with copper when manufacturing high-frequency packages of slow-wave systems for traveling wave tubes. Parameters were identified for solid phase compounds to be obtained in support rods made of ceramics on the basis of oxide beryllium and copper coating on the molybdenum helix.

Slow-wave system, traveling wave tubes, thermal resistance, ceramics, helix, solid phase compound

Введение

При разработке ламп бегущей волны одним из основных требований является увеличение теплорассеивающей способности спиральных замедляющих систем и увеличение коэффициента полез-

ного действия. В настоящее время наиболее распространенными способами закрепления спирали с опорными стержнями в оболочке являются термообжатие и триангуляция (сборка с натягом). При этих способах крепления образуется недостаточно высокий тепловой контакт спирали и опорных керамических стержней, что приводит к ограничению мощности ламп бегущей волны. Улучшения теплоотвода можно достичь применением высокотеплопроводных и электропроводных материалов и пайкой контактов спирали со стержнями и стержней к оболочке. Основным недостатком применения пайки – образование галтелей припоя в результате взаимодействия расплавленного припоя с керамикой и необходимость химического травления спирали с припаянными опорными стержнями для удаления следов припоя с поверхности спирали.

Обеспечить высокий теплоотвод от спирали возможно, создав надежный контакт спирали с опорами из керамики, равномерный по всей длине и не оказывающий отрицательного влияния на параметры прибора. Такой контакт можно создать, используя способ твердофазного соединения спирали с опорными стержнями. Поэтому представляют большой интерес исследование механизма твердофазного взаимодействия и разработка технологии изготовления высокочастотных пакетов замедляющих систем для ламп бегущей волны методом твердофазного соединения спирали и опорных стержней.

В настоящее время проводятся интенсивные исследования различных аспектов процессов взаимодействия металлооксидных систем.

В [1] согласование интерфейсов при взаимодействии оксидов $ZrO_2 - Al_2O_3$ изучается методами молекулярной динамики. Многие физические свойства интерфейсов регулируются большими пространственными и временными масштабами. Это требует очень больших атомистических ансамблей или очень длинных траекторий по моделированию, которые неразрешимы обычными методами и средствами. Необходимо сочетание многомасштабного моделирования и схем Монте-Карло.

Пределы растворения оксидов металлов в [2] были рассчитаны в зависимости от их энергии дефектообразования и положения уровня Ферми методами квазихимической термодинамики. Три фактора ограничивают способность легирования оксидов: отсутствие примеси растворимости, уровень легирующей примеси лежит слишком глубоко или присадка компенсируется собственными дефектами. Основным ограничением является компенсация по собственным дефектам. Требуется независимое определение энергии образования собственных дефектов различных оксидов.

Влияние симметрии и нестехиометрии как возможных причин ферромагнетизма наноразмерных оксидов исследуется в [3]. Дальний магнитный порядок возникает из совместного действия симметрии кристалла и нестехиометрии, что возможно исключительно в наноразмерных системах, также дается разумное объяснение беспрецедентных ферромагнитных особенностей, наблюдаемых обычно в наноразмерных оксидах.

В [4] рассматриваются механизмы сглаживания при росте сложных металлооксидных тонких пленок. Эти результаты имеют важное значение для оптимальных условий при изготовлении наноразмерных устройств. Нетепловой рост при импульсном лазерном осаждении и распылении являются наиболее перспективными методами. Качественные пленки растут в условиях, далеких от теплового равновесия. Для моделирования используются методы молекулярной динамики и методом Монте-Карло. В работе сообщается о возможном механизме 2D роста в сложных металлооксидных тонких пленках с участием индуцированных воздействий.

Расчеты методом зонной теории из первых принципов теории функционала плотности плохо предсказывают свойства ряда металлооксидных систем (ZnO , In_2O_3 и SnO_2) [5]. Зависимость энергии Ферми, концентрации дефектов и носителей заряда от температуры и давления кислорода рассчитывается с помощью термодинамического моделирования из условия термодинамической устойчивости. Учитывается температурная зависимость ширины запрещенной зоны. Показано, что собственные дефекты не вызывают электронную проводимость в условиях равновесия. Нестехиометрия с дефицитом кислорода достигает 1%.

Рассмотрены относительная стабильность различных типов 2D полярных и неполярных MgO островков, эффекты с переносом заряда, роль координации атомов, дается описание их электронной структуры с учетом влияния окружающей среды [6]. Анализируется эффективность различных механизмов компенсации полярности 2D структур и трехмерных объектов, например поверхности пленок и кластеров. Рост оксидных пленок вдоль полярной ориентации может представлять собой новый и эффективный способ для синтеза оксидных пленок с необычной кристаллографической структурой и свойствами, сильно зависящими от их толщины.

Исследование влияние допинга на энергии образования и концентрации кислородных вакансий на поверхности металл-оксид MgO (100) представлено в [7]. Используется теория функционала

плотности. Показано, что концентрация кислородных вакансий в легированной оксидом поверхности в значительной степени определяет формирование расширенной области пространственного заряда.

Проведено теоретическое исследование механизма образования дефектов и нестехиометрии в гидроксипатитах [8]. Электронные и атомные структуры вакансий и протонов в гидроксипатите (ГАП) анализируют с помощью первых принципов и методов химической термодинамики. Рассчитаны энергии изолированных и связанных дефектов с помощью кластерной модели и выявлены характерные электронные структуры дефектов и возможные дефектные реакции.

Термодинамическая модель взаимодействия оксида бериллия с медью

Схема взаимодействия бериллиевой керамики (BeO) с медью при изготовлении замедляющих систем представлена на рис. 1б.

Замедляющая система (рис. 1а) состоит из спирали 1, изготовленной из тугоплавкого материала (молибден), на поверхность которой нанесен слой меди 2 и стержней из бериллиевой керамики 3. При твердофазном соединении керамических стержней с медным покрытием спирали под действием температуры и давления медь диффундирует в бериллиевую керамику, в зоне взаимодействия толщиной δ образуется новая фаза BeCuO_2 . Степень превращения определяется скоростью образования зародышей новой фазы и линейной скоростью их роста.

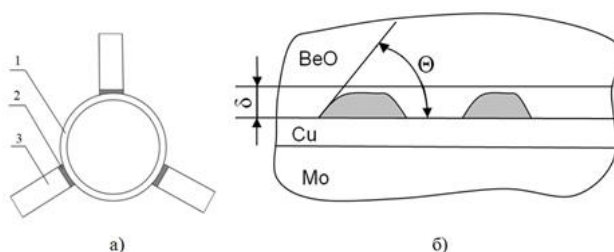
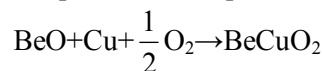


Рис. 1. Схема взаимодействия керамики с медью
1 – спираль, 2 – медь, 3 – стержень из керамики на основе оксида бериллия

Рассмотрим взаимодействие бериллиевой керамики с медью по следующей реакции:



Степень превращения определяется по формуле [1]

$$\varepsilon_{k0} = 1 - \exp(-b_B \frac{1}{3} \cdot f_B), \text{ где} \quad (1)$$

$$b_B = \frac{T_s}{8 \cdot \delta^{-3} \cdot v} \quad (2)$$

$$f_B = a_B \cdot \int_0^1 1 - \exp(-\frac{\pi}{3} \cdot a_B^3 \cdot (1 - 3 \cdot x^2 + 2 \cdot x^3)) dx \quad (3)$$

$$a_B = (I_s \cdot (v^2)^{\frac{1}{3}} \cdot t) \quad (4)$$

$$I_s = \delta \cdot I_v - \text{поверхностная скорость роста зародышей, м}^2 \quad (5)$$

$$I_v = \frac{n_s}{\delta} \cdot v - \exp(-\frac{\Delta G_B + E_{az}}{R \cdot T}) - \text{объемная скорость роста зародыша, м}^3 \quad (6)$$

$$v = \delta \cdot v \cdot \exp(\frac{E_{av}}{R \cdot T}) \cdot (1 - \exp(-\frac{A_{r1}}{R \cdot T})) - \text{линейная скорость роста зародыша, м/с} \quad (7)$$

$$A_{r1} = R \cdot T \cdot \ln(K_{r1} \cdot a_0) - \text{химическое сродство реакции,} \quad (8)$$

$$\Delta G_B = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{\sigma_n^3 \cdot v^2}{A_{r1}^2} \cdot F - \text{работа образования зародыша,} \quad (9)$$

где δ – толщина зоны взаимодействия, м; T – температура, К; Θ – угол смачивания фазы BeCuO_2 с BeO; E_{av} – энергия активации образования зародышей, кДж/моль; E_{az} – энергия активации скорости

роста; n – порядковый номер металла, взаимодействующего с оксидом бериллия; t – время взаимодействия, с. Значение химического сродства реакции A_{r1} рассчитано по справочным данным [10].

Зависимость степени превращения от времени при $\delta = 18 \cdot 10^{-6}$ м, $T = 1250$ К и $T = 1300$ К показаны на рис. 2. Значения параметров энергии активации образования зародышей и энергии активации роста новой фазы: $E_{az} = 390000$ кДж/моль, $E_{av} = 410000$ кДж/моль получены регрессионным анализом экспериментальных данных.

Образование хрупких карбидов и нитридов в зоне соединения ухудшает его качество. Рассмотрим влияние состава газовой фазы на образование соединения при взаимодействии оксида бериллия и меди.

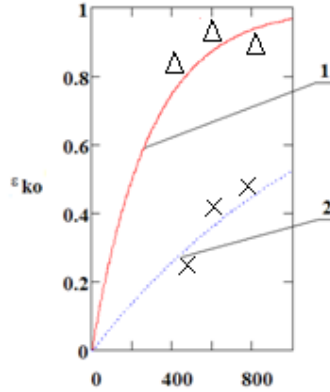


Рис. 2. Зависимость степени превращения от времени:
1 – при температуре 1000 °С, 2 – при температуре 950 °С.
Δ – теоретические данные; × – экспериментальные точки

Взаимодействие бериллиевой керамики, углерода, меди и азота с образованием бериллия, карбида бериллия, интерметаллида и нитрида бериллия происходит по следующим реакциям:



Химическое сродство реакций определяется как алгебраическая сумма химических потенциалов исходных веществ и продуктов реакций с соответствующими стехиометрическими коэффициентами. Для реакций (1p)-(3p) сродство равно

$$A_1 = R \cdot T \cdot \ln \frac{K_1}{a_{CO}} \tag{10}$$

$$A_2 = R \cdot T \cdot \ln \frac{K_2}{a_{CO}} \tag{11}$$

$$A_3 = R \cdot T \cdot \ln \frac{K_3}{a_{CO}} \tag{12}$$

где $K_1 = \frac{K_{CO}}{K_{BeO}}$; $K_2 = K_1 \cdot \sqrt{K_{Be_2C}}$; $K_3 = K_{Be_2Cu_2} \cdot K_1$; где K_{CO} , K_{BeO} , K_{Be_2C} , K_{BeCu_2} – константы равновесия

образования соответствующих соединений из простых веществ; a_{CO} – активность CO в газовой фазе, равной парциальному давлению CO в атмосферах. Данные для расчета констант равновесия брались из справочников [10, 11].

Для реакции (p4) сродство равно

$$A_4 = R \cdot T \cdot \ln \frac{K_4}{a_O^3 \cdot a_N^{-2}} \tag{13}$$

где $K_4 = \frac{K_{Be_3N_2}}{K_{BeO}^3}$ – константа равновесия (р4); a_O, a_N – активности кислорода и азота, равные по определению квадратному корню из парциального давления (атм.) молекулярного кислорода и азота.

Если активность кислорода определяется влажностью $a_O = \frac{F_H}{K_{H_2O}}$ и $a_{CO} = a_C \cdot a_O \cdot K_{CO}$, т.е.

выполняются условия равновесия реакций $H_2+0.5O_2=H_2O$ и $C+0.5O_2=CO$, то, подставляя эти выражения, а также значения констант K_1, K_2, K_3 и K_4 в выражения (10)-(13), получим предельные значения влажности, ниже которых сродство реакций (1р)-(4р) положительное, т.е. реакции идут слева направо (рис. 3).

$$F_{1H} = K_{1H}; \tag{14}$$

$$F_{2H} = K_{2H} \cdot a_C^{\frac{1}{2}}; \tag{15}$$

$$F_{3H} = K_{3H}; \tag{16}$$

$$F_{4H} = K_{4H} \cdot a_N^{\frac{2}{3}}, \tag{17}$$

где $K_{1H} = \frac{K_{H_2O}}{K_{BeO}}$; $K_{2H} = K_{1H} \cdot K_{Be_2C}^{\frac{1}{2}}$; $K_{3H} = K_{1H} \cdot K_{Be_2Cu}$; $K_{4H} = K_{1H} \cdot K_{Be_2N_3}^{\frac{1}{3}}$.

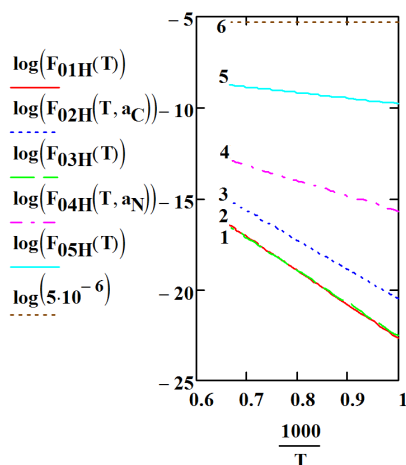


Рис. 3. Зависимости от температуры предельных значений влажности для реакции (р1)-(р6) идут слева направо.
1 – реакция 1; 2 – реакция 3; 3 – реакция 2; 4 – реакция р4; 5 – реакция 5; 6 – влажность, соответствующая точке росы -70 °С

Разложение BeO и образование карбида, интерметаллида и нитрида по реакциям (1р)-(4р) возможны при очень низкой активности кислорода. Такие активности кислорода создаются титановыми и бариевыми геттерами. Практически в высоком вакууме возможно образование только нитрида бериллия.

Рассмотрим образование сложного оксида по реакциям:



Сродство этих реакций при равновесии $H_2+0.5O_2=H_2O$ и $C+0.5O_2=CO$ равно

$$A_5 = A_6 = R \cdot T \cdot \ln(a_O K_6),$$

где $K_5 = K_6 = K_{r5} \cdot K_{CO}$ – константа равновесия реакции (5р), (6р) K_{r5} – константа равновесия реакции $BeO + Cu + O = BeCuO_2$.

Если активность кислорода определяется влажностью $a_O = \frac{F_H}{K_{H_2O}}$, то сродство реакций (5р) и

(6р) положительное, если влажность выше значения $F_{5H} = \frac{K_{H_2O}}{K_{r5}}$.

Активности кислорода, металла, CO и CO₂ определяются по формулам:

$$a_{CO} = a_C \cdot a_O \cdot K_{CO};$$

$$a_{CO_2} = a_C \cdot a_O^2 \cdot K_{CO_2};$$

$$a_O = \frac{F_H}{K_{H_2O}};$$

$$a_M = (a_O \cdot K_{BeO})^{-1}$$

Давления газов равны: $P_{O_2} = a_O$; $P_M = a_M \cdot K_{eg}$; $P_{CO} = a_{CO}$; $P_{CO_2} = a_{CO_2}$; $P_{BeO} = a_M \cdot a_O \cdot K_{og}$, где K_{eg} и K_{og} константы равновесия образования паров оксида бериллия и бериллия из простых веществ, т.е. по реакциям $Be(s)=Be(g)$ и $Be(s) + \frac{1}{2}O_2 = BeO(g)$ (индекс s – твердая фаза, индекс g – газовая фаза). На рис. 4 показаны зависимости от температуры предельных значений давлений газов и активности металла для реакции (4p) при $a_C=1$ и $a_N=1$, т.е. при наличии пленки углерода, азота при атмосферном давлении и при предельной влажности.

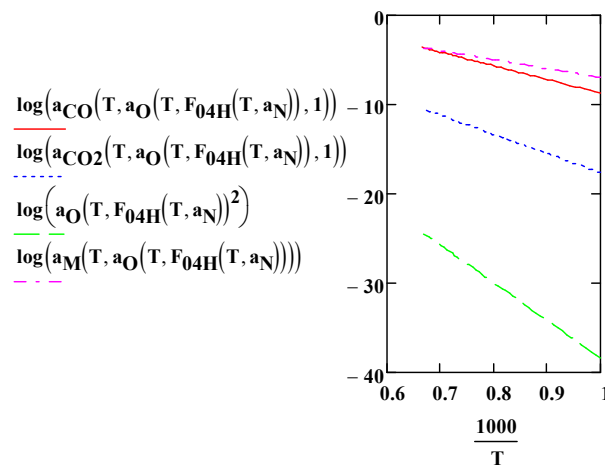


Рис. 4. Зависимости от температуры предельных значений давлений газов и активности металла

Давление паров бериллия и оксида бериллия очень низкое, т.е. испарение бериллиевой керамики при $T < 1500$ °K незначительно.

Экспериментальные исследования

Усилие сжатия при твердофазном соединении обеспечивается за счет разницы термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) элементов оправки. За основу данной оправки была взята оправка для термообжата замедляющих систем в оболочке.

Оправка для обеспечения давления состоит из молибденовых вкладышей (рис. 5а), в которые помещаются керамические опорные стержни, конических стержней из нержавеющей стали (рис. 5б и молибденовых колец (рис. 5в).

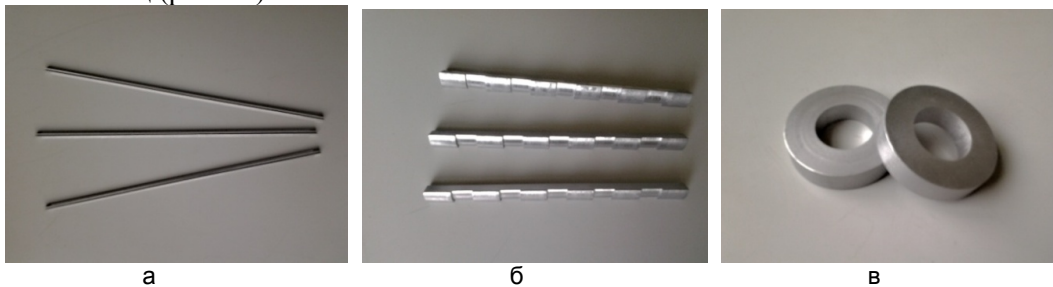


Рис. 5. Элементы оправки для создания твердофазного соединения спирали с опорными стержнями из керамики. а – молибденовые вкладыши; б – конические стержни из нержавеющей стали; в – молибденовые кольца

Особенность данной оправки заключается в том, что ее конструкция позволяет обеспечивать необходимую величину давления на керамические стержни, которые расположены под углом 120° относительно друг друга.

Внешний вид зоны взаимодействия показан на рис. 6. На рис. 6б видна новая фаза в виде шаровидных включений.

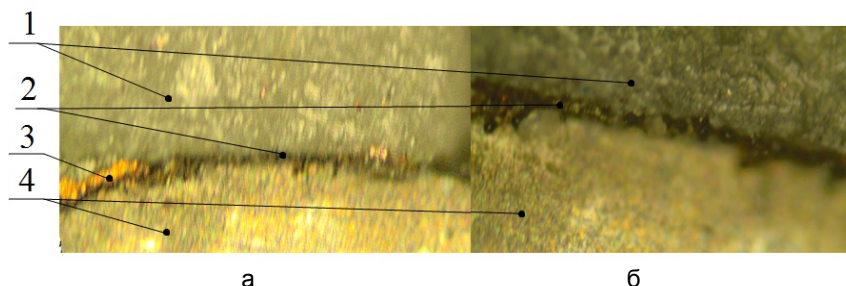


Рис. 6. Зона взаимодействия бериллиевой керамики с медью. а – увеличение $500\times$, б – увеличение $1000\times$
1 – бериллиевая керамика, 2 – новая фаза BeCuO_2 , 3 – медь, 4 – молибденовая спираль

При замере зоны взаимодействия получили $\delta_e=18$ мкм. Линейная скорость роста $v_e=\delta_e/t_e$, где t_e – время выдержки, т.е. $v_e=2\cdot 10^{-8}$ м/с.

Химический анализ зоны соединения: в точках 3 и 10 медь и оксид бериллия (рис. 7), в точке 9, помимо меди и оксида бериллия, обнаружены следы молибдена. В зоне 17, указанной на рис. 7, также, помимо бериллия, меди и кислорода, присутствует молибден, из чего можно сделать вывод, что при проведении эксперимента образовалась более сложная фаза.

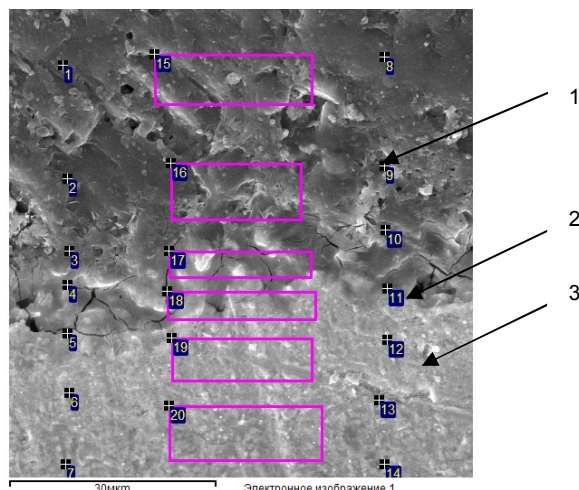


Рис. 7. электронное изображение зоны твердофазного соединения
1 – BeO , 2 – зона соединения, 3 – молибден

Структура переходной зоны, в которой начинается рост новой фазы, представлена на рис. 8.

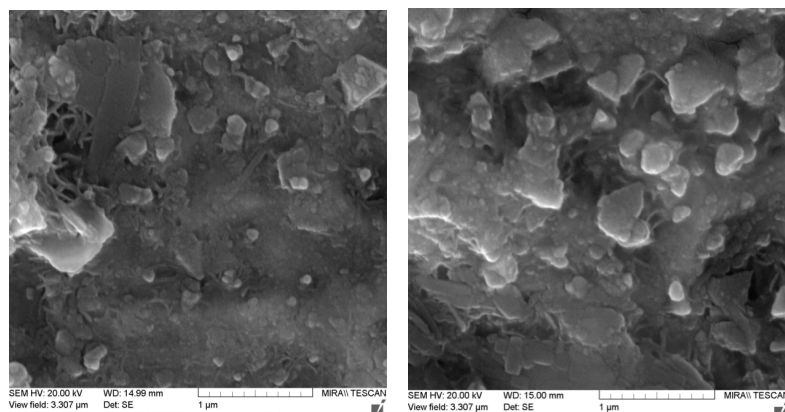


Рис. 8. Электронное изображение поверхностной структуры зоны роста новой фазы

Виден рост нитевидных кристаллов (структур) в зоне 1 и 2, а также включения 3, 4, 5, 7, напоминающие по своей структуре керамику на основе оксида бериллия (рис. 9).

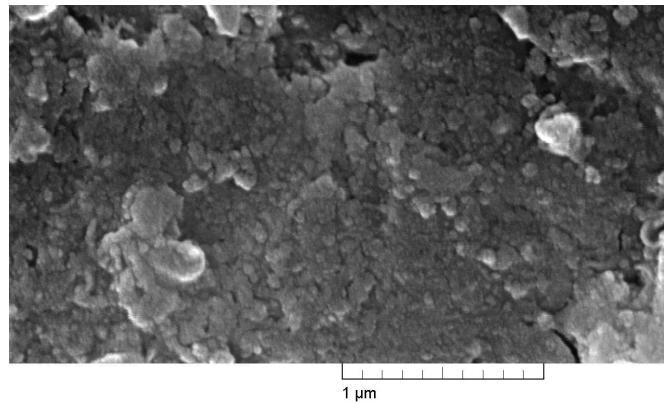


Рис. 9. Электронное изображение керамики на основе оксида бериллия

Результаты измерений термического сопротивления замедляющих систем, изготовленных тремя способами (измерения проводились для каждой из 3 замедляющих систем), приведены на рис. 10:

– термообжатие в оболочку керамических стержней и спирали из молибдена, результат измерений на рис. 10а.

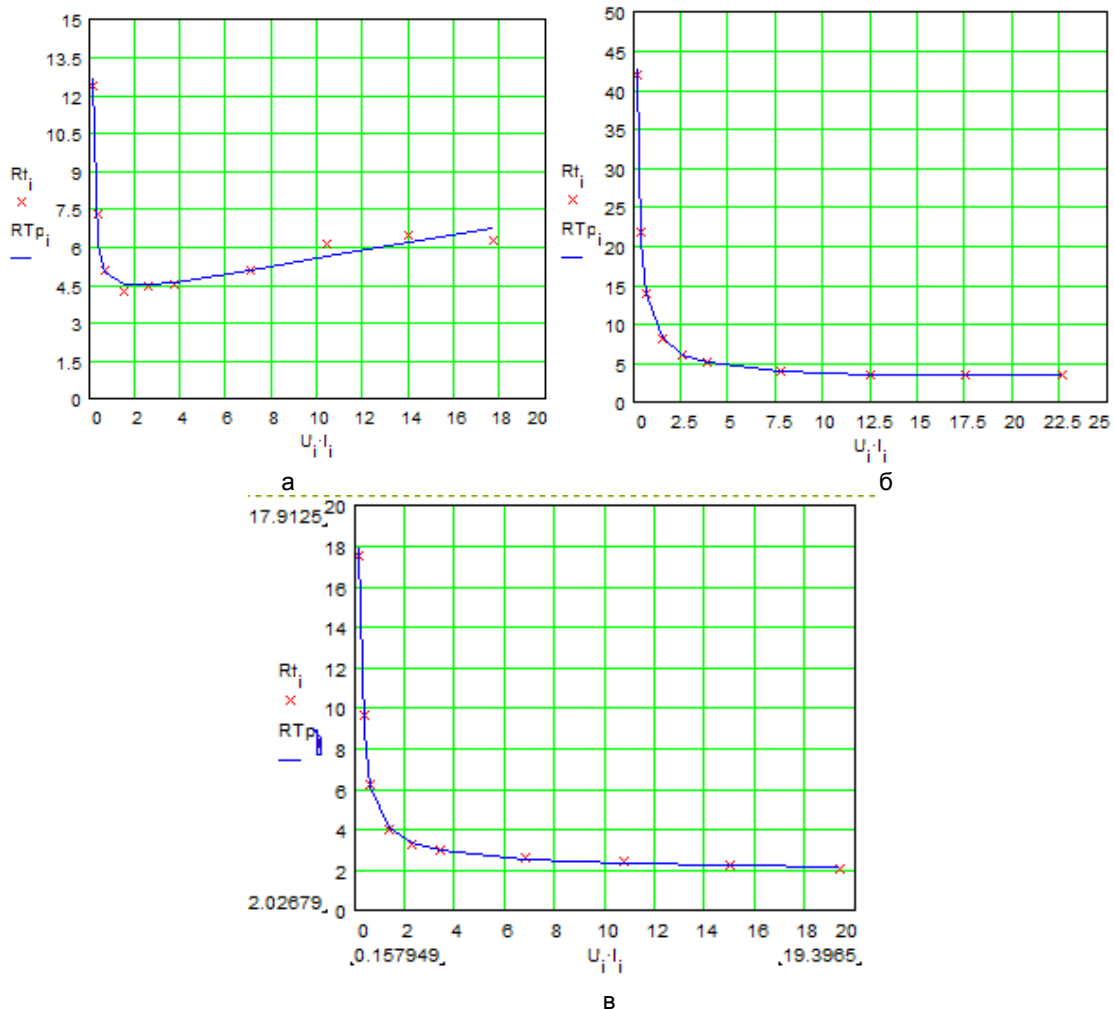


Рис. 10. Зависимость величины термического сопротивления от мощности

– термообжатие в оболочку керамических стержней и спирали из молибдена, на поверхность которой нанесено медное покрытие, результат измерений на рис. 10б.

– твердофазное соединение керамических опор с медным покрытием, полученным на спирали, перед термообжатием в оболочку, результат измерений на рис. 10в.

В результате проведенных измерений установлено, что наиболее низкое термическое сопротивление у макета, изготовленного при твердофазном соединении спирали с опорными керамическими стержнями.

Выводы

1. Образование сложных оксидов, карбидов и нитридов бериллия, ухудшающих качество твердофазного соединения, при взаимодействии бериллиевой керамики с медью в среде водорода и азота возможно при влажности технологических газов не превышающей точку росы $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. При взаимодействии бериллиевой керамики с медью сродство реакции образования соединений не зависит от активности углерода и водорода.

3. Качественное твердофазное соединение опорных керамических стержней из керамики на основе оксида бериллия с молибденовой спиралью с медным покрытием обеспечивается при выдержке 10 ± 2 мин, температуре $950\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и степени превращения в зоне соединения не более 0,4.

4. Термическое сопротивление высокочастотного пакета замедляющей системы, изготовленного при примененном твердофазном соединении спирали с медным покрытием с опорными стержнями, снизилось в 3 раза по сравнению с высокочастотным пакетом, изготовленным методом термообжата.

ЛИТЕРАТУРА

1. First-principles characterization of a heteroceramic interface: ZrO_2 .001. deposited an $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3(11\bar{0}2)$ / A. Christensen, and Emily A. Carter // Physical review letters. В 62, 16968. Published 15 December 2000.

2. Limitsto doping in oxides / J. Robertson and S. J. Clark // Physical review letters. В 83; 075205. Published 28 February 2011.

3. Symmetry and nonstoichiometry as possible origins of ferromagnetism in nanoscale oxides / Uchino Takashi and Yoko Toshinobu // Physical review letters. В 85,012407. Published 25 January 2012.

4. Energetic Surface Smoothing of Complex Metal-Oxide Thin Films / P.R. Willmott, R. Herger, C.M. Schlepuetz, D. Martocchia, B.D. Patterson // Physical Review Letters. В 96(17); 176102-176102.4 Published 5 May 2006;

5. Dopability, Intrinsic Conductivity, and Nonstoichiometry of Transparent Conducting Oxides / Stephan Lany and Alex Zunger // Physical Review Letters В 98, 045501. Published 23 January 2007.

6. Polarity compensation in low-dimensional oxide nanostructures: The case of metal-supported MgO nanoribbons / J. Goniakowski, L. Giordano, and C. Noguera // Physical Review Letters. В 87, 035405. Published 8 January 2013.

7. Concentration of Vacancies at Metal-Oxide Surfaces: Case Study of $\text{MgO}(100)$ / Norina A. Richter, Sabrina Sicolo, Sergey V. Levchenko, Joachim Sauer, Matthias Scheffler // Physical review letters. 111, 045502. Published 26 July 2013.

8. Theoretical investigation of the defect formation mechanism relevant to nonstoichiometry in Hydroxapatite / Katsuyuki Matsunaga // Physical review letters. В 77, 104106 published 10 March 2008.

9. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. Ч. 1. Термодинамика и общая кинетическая теория / Дж. Кристиан. М.: Мир, 1978.

10. Смитлз К.Дж. Металлы: справочник / К. Дж. Смитлз. М.: Металлургия, 1980.

11. Зоркин А.Я. Откачка электронных приборов: учеб. пособие / А. Я. Зоркин. Саратов: СГТУ, 2006. 284 с.

Орлова Марина Дмитриевна – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Marina D. Orlova – Postgraduate Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Зоркин Александр Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr Ya. Zorkin – Dr. Sc., Professor Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бабкова Нина Ильинична – главный технолог НПЦ «Электронные системы» ОАО «НПП»Алмаз», г. Саратов

Nina I. Babkova– Chief Technologist at NPTs Electronic systems of NPP Almaz, Saratov

Статья поступила в редакцию 12.03.14, принята к опубликованию 20.06.14

П.К. Плотников, Н.Н. Карамышев, А.Н. Карамышев

О ВЛИЯНИИ ВКЛЮЧЕНИЯ-ОТКЛЮЧЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ОТ КОЛЁС В ЛЕГКОВОМ АВТОМОБИЛЕ НА ВЕЛИЧИНЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ И ПЛЕЧ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Приведены методика и результаты экспериментального определения предварительных (в статике) и кинематических (в движении) смещений, а также плеч трения пневматиков легковых автомобилей. Указанные смещения и плечи трения зафиксированы в зонах и окрестностях контактов пневматиков с асфальтовым основанием с помощью видеокамеры и обработаны в компьютере. Показано, что при отключении кинематической связи колёс с двигателем зоны смещений достигали величин более 10 см (свободное качение автомобиля) и на порядок превосходили величины плеч трения. При подключенном двигателе смещения оказались примерно на порядок меньше, чем в первом случае, и близки к величинам плеч трения.

Трение, предварительное смещение, контакт, автомобиль, редуктор, двигатель, шина, поверхность

P.K. Plotnikov, N.N. Karamyshev, A.N. Karamyshev

ENGINE START AND SHUTOFF IMPACT IN A MOTOR VEHICLE BY AN ORDER OF PRELIMINARY DISPLACEMENT AND ROLLING FRICTION UNIT

The paper provides a methodology and experimental data to determine the preliminary (static) and kinematic (on the run) displacements, as well as friction units in motor vehicle tyres. The specified displacements and friction units were recorded in the zones and surrounding areas of contact tires with the asphalt substrate using video cameras and computer data. It is shown that when disabling the kinematic connection of the wheels with the engine, the zone offsets reached the values by more than 10 cm (free rolling of the vehicle) and significantly exceeded the friction value. When connected to the engine, the displacement was less than in the first case, and closer to the values relating the shoulder friction.

Friction, pre-shift, contact, vehicle, gear, engine, tire, surface

Состояние вопроса и постановка задачи. В формуле для момента M_K силы трения качения

$$M_K = f \cdot P,$$

где P – сила нормального давления (вес тела), коэффициент трения качения f имеет размерность длины. Физически этот коэффициент трактуется как плечо момента силы трения качения. Оно представляет собой горизонтальную проекцию части поверхности контакта упругого тела качения и упругого основания, заключённую между линиями действия веса и нормальной упругой реакции основания. Поверхности контактного взаимодействия указанных тел представляются либо в виде цилиндра [1-3] (в [2] возможна сферическая поверхность), либо в виде плоской площадки [4, 5], либо в виде части сферы [6], либо в виде более сложной фигуры [3, 7, 8]. В [2, 9] приведены результаты экспериментального исследования явления предварительного смещения (ЯПС) в цилиндрической и других парах трения. В последнее время опубликованы труды с соответствующими во многом опытам физико-математические модели, в которых трение описывается с учётом зоны предварительного смещения (ЗПС) и плечом момента силы трения качения [10-18]. Это относится не только к статическому режиму, то есть к ЗПС, но и к режимам движения, т.е. кинематическому смещению, когда тело качения перемещается на произвольные расстояния с произвольно изменяющейся малой скоростью по основанию (полупространству).

Таким образом, в научной литературе представлен ряд физических моделей контактного взаимодействия тел качения и полупространства, а также даны описания процессов трения качения, не полностью отражающие важные компоненты трения качения. В частности, неполно представлено

описание перехода от статического трения, соответствующего ЯПС, к динамическому и наоборот. Не дано разграничение понятий ЗПС и плеча момента силы трения качения (плеча трения), их взаимосвязи и механики их возникновения.

В [17-19] решаются задачи (в т.ч. экспериментальным путём) уточнения физических предпосылок построения моделей и развития представлений о процессах трения качения, в частности, о переходе статического трения в динамическое, с учетом ЗПС, о взаимосвязи с ней плеча момента силы трения и о его изменениях в различных режимах движения, и наоборот. Развивается также задача непрерывного экспериментального определения характера изменения коэффициента трения качения (плеча трения) как для статического, так и для кинематического режимов с малыми, но произвольно меняющимися скоростями для всех стадий движения тела качения. Объекты исследования – пневмошины (пневматики) двух типов автомобилей, поролоновые колеса стального валика, стальной каток с двумя цилиндрическими опорными поверхностями. Считается, что плечом момента силы трения качения (далее: плечом трения) является величина предварительного смещения. Однако опыты, описанные в данной статье и в [19], показали, что это не всегда так – имеются и другие соотношения между ними.

В данной работе ставится задача экспериментальным путём определить, при каких условиях зона предварительного смещения (ЗПС) в легковых автомобилях равна, а при каких больше плеча трения качения. Для решения этой задачи вначале задаются реверсные движения двум автомобилям по асфальту, когда вращения их колёс осуществляются через муфты сцеплений и коробки передач от двигателей. Затем посредством муфт сцепления и коробок передач отключают приводы колёс от двигателей и путём приложения внешних тангенциальных сил, измеряемых динамометром, задают реверсные движения автомобилям. В обоих случаях видеокамерой снимают процессы взаимодействия пневматика с основанием. Полученные видеосъёмки с помощью компьютера обрабатывают, оценивают полученные деформации пневматиков и строят графики процессов. Методика экспериментов во многом отражена в [19-20]. Отметим, что эффективность моделей трения с учётом ЯПС применительно к прецизионным устройствам продемонстрирована в [21] и других работах.

Решение задачи. На рис. 1, 2 представлены графики движений автомобилей «Рено» и «Тойота», вызванные действием внешних тангенциальных сил при отключенных двигателях. На рис. 1 представлены графики y_1 и y_2 перемещений центра подвеса правого заднего колеса автомобиля «Рено» при двух сериях приложения фиксированных сил, возростающих с дискретностью 50 Н*м. В том же масштабе представлены соответствующие им графики плеч моментов сил трения качения – это расстояния между линиями приложения веса колеса и линией приложения нормальной упругой реакции основания, проходящей через центр хорды площадки контакта. Значения прикладывавшихся тангенциальных сил отражены на графиках, где первый график y_1 соответствует движению автомобиля в ЗПС. Видно, что, достигнув экстремального значения предварительного смещения -11.6 см, автомобиль после снятия внешней силы путём отката возвращается в исходное положение. По графику 1 для плеча трения также видно, что, достигнув экстремального значения -0.6 см, оно затем снижается до нуля. Данное явление свидетельствует о том, что при движениях автомобиля в ЗПС в трении качения отсутствует зона застоя. Подобное свойство прослеживается и по [3]. При второй серии приложения сил автомобиль по координате y_2 смещается на экстремальную величину -8,2 см и, откатываясь в обратную сторону, не доходит до исходного положения на величину 1.6 см* (скорее всего, это объясняется уклоном асфальта). На этом участке плечо трения качения изменилось подобно первому случаю, но до несколько меньшего значения. При приложении новой серии внешних сил перемещение автомобиля превысило ЗПС и достигло 16 см. После снятия силы автомобиль откатился назад, но не дошёл до исходного положения на 8 см. Плечо момента силы трения качения при этом не реверсировалось, пройдя через значения, близкие к нулю, которые тоже можно объяснить уклоном асфальта. Эксперимент свидетельствует, что величина предварительного смещения (11.6 см) более чем на порядок превосходит величину плеча трения. Момент силы трения качения автомобиля есть произведение плеча трения на его вес [1, 2, 4]. Учитывая, что вес равен 10000 Н, а плечо трения не превышает 0.01 м, получаем, что момент трения качения автомобиля в эксперименте изменялся в пределах 100 Н*м, а сила трения качения при радиусе колеса 0.33 м – в пределах 330 Н.

Аналогичная картина наблюдается в характеристиках предварительного смещения и плеча момента силы трения для автомобиля «Тойота». На рис. 2 представлены графики колебаний в ЗПС. Нетрудно видеть, что в основном величина предварительного смещения в 6-10 раз больше величины плеча трения качения.

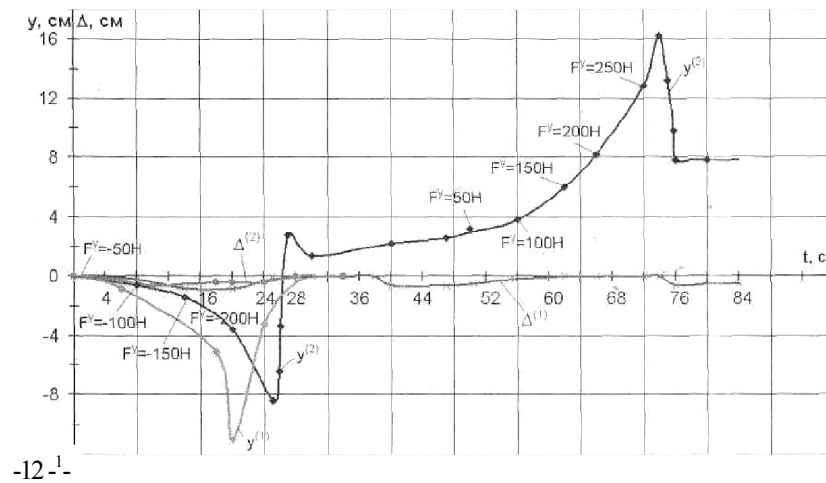


Рис. 1

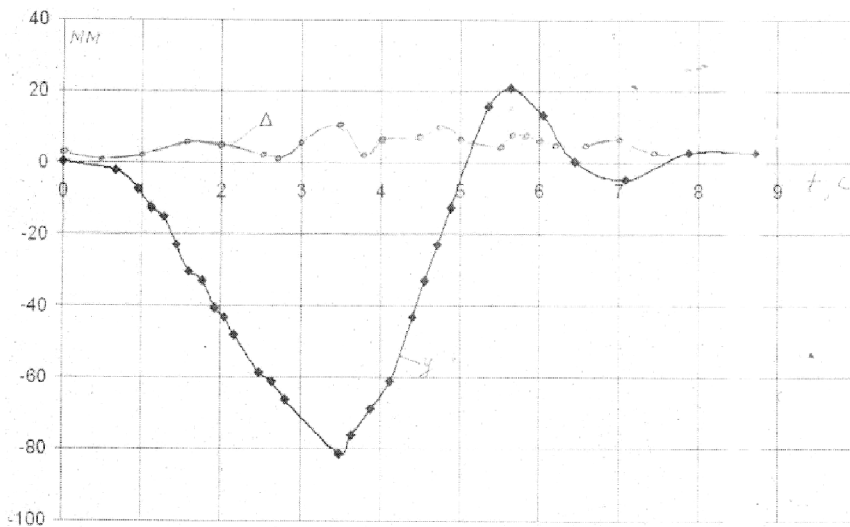


Рис. 2

Другая картина соотношений этих переменных имеет место для этих же автомобилей при передвижениях их от двигателей через посредство коробки передач, причём оно справедливо для любой ступени передач с 1 по 4. Это отображается графиками рис. 3-5. На рис. 3 представлен график 1 изменения плеча момента силы трения в зависимости от дистанции автомобиля «Рено». Линией 2 обозначена скорость автомобиля. Линией 3 показано плечо трения качения для случайно проезжавшего автомобиля «Лада-11». Анализируя графики рис. 3, убеждаемся, что на них предварительные и кинематические (в движении) смещения автомобилей совпадают с величинами плеч моментов сил трения качения, при этом указанные величины лежат в пределах 1,5 см.

Можно для этого случая сосчитать моменты сил трения качения по формуле $M_k = f_k P$ [4]; в [1] и в данной работе показано, что при включённом двигателе $f_k = D$. Здесь D это и есть классический коэффициент трения качения [2]. Отметим, что в экспериментах на гладком асфальте контактная площадка является плоской. Для рис. 3 (автомобиль «Рено») скорость движения менялась от $-0,8$ до $0,8$ м/с. В зоне съёмки на рис. 3 на длине более 3 м (+75...-244 см) максимальные значения предварительного смещения составили величины 12-15 мм. На этом же рис. 3 имеются пунктирные участки графиков между двумя парами вертикальных штрихпунктирных линий. Это позволило уменьшить длину графиков без потери информации, так как на этих участках линии являются непрерывными.

Участки на кривой А для рис. 4 расположены позади трёх пиковых значений – это характеристики указанных $A=A(y)$ для движущегося автомобиля, когда дистанция непрерывно менялась с малой скоростью < 0.2 м/с, что подтверждается кривой dy/dt . Отметим, что графики рис. 3-5 сняты при включенных через муфты сцепления и коробки передач двигателях, благодаря чему движение каждого автомобиля происходило за счёт тяги работающего двигателя.

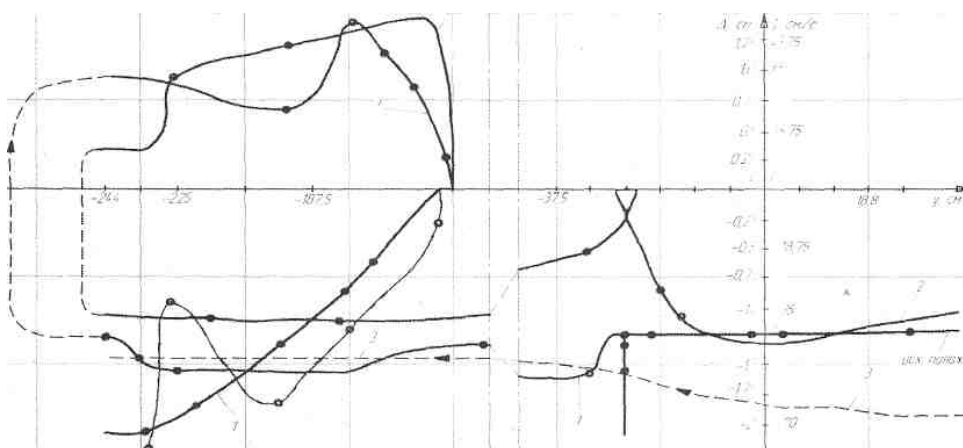


Рис. 3

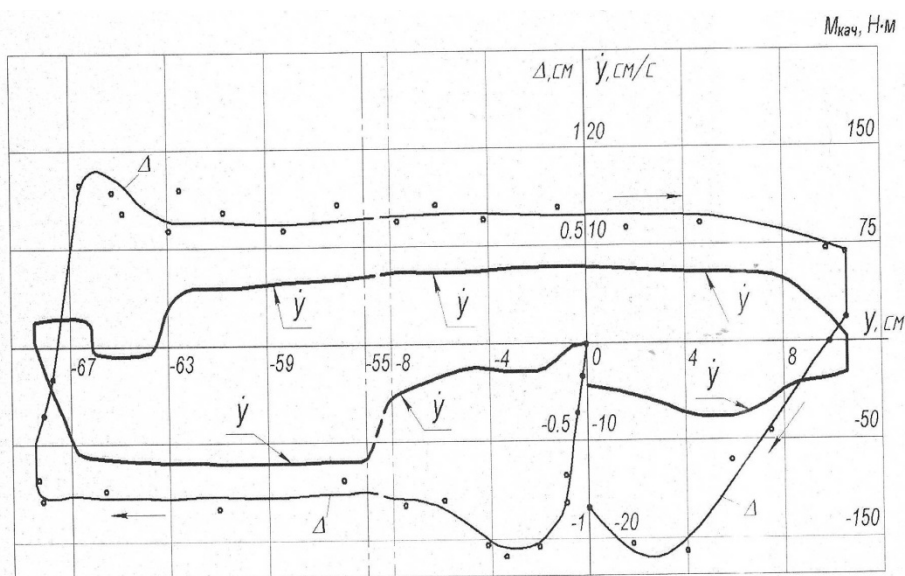


Рис. 4

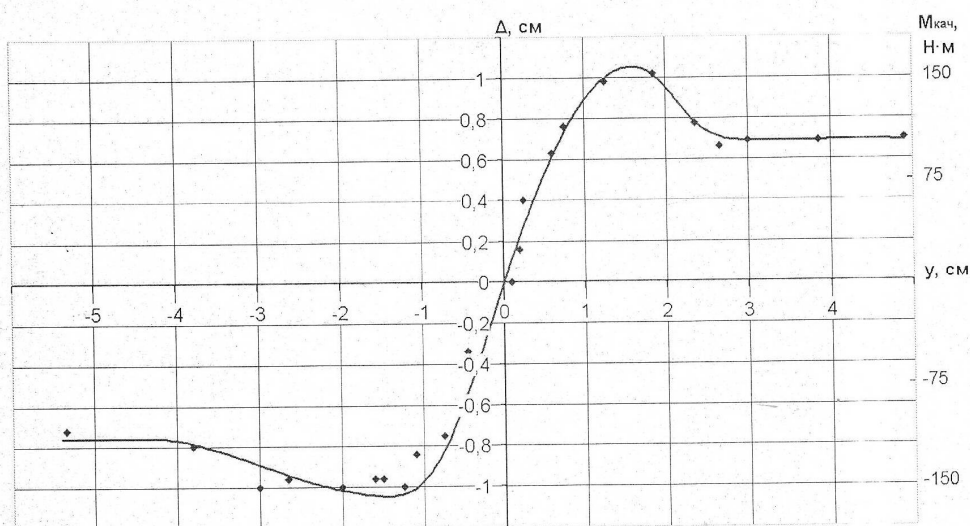


Рис. 5

На рис. 5 изображён график предварительного смещения или, что то же самое, плеча трения качения в зоне и вблизи зоны предварительного смещения автомобиля «Тойота». Предварительное смещение составило величину 1,5 см; ЗПС – вдвое больше – 3 см.

Заключение

В работе показано, что в случае, когда автомобилю обеспечены условия практически свободного качения – двигатель разъединён с колёсами – максимальная величина предварительного смещения на порядок превосходит величину плеча трения и достигает 8-11 см. Тот и другой параметры имеют зоны линейностей, плавно переходящие в зоны насыщения.

В случае, когда двигатель соединён с помощью редуктора с колёсами автомобиля, зона предварительного смещения практически совпадает с зоной плеча момента силы трения и достигает значений 2,5-3 см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики / Н.Н. Бухгольц. Ч. 1. М.: ГИТТЛ, 1933. 336 с.
2. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. М.: Машиностроение, 1977. 527 с.
3. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. М.: Наука, 2001. 475 с.
4. Журавлев В.Ф. О модели сухого трения в задаче качения твердых тел / В.Ф. Журавлев // Прикладная математика и механика. 1998. Т. 62. Вып. 5. С. 762-767.
5. Журавлев В.Ф. Теория явления шимми / В.Ф. Журавлев, Д.М. Климов // Изв. РАН. МТТ. 2010. № 3. С. 22-29.
6. Карапетян А.В. Двухпараметрическая модель трения / А.В. Карапетян // Прикладная математика и механика. 2009. Т. 73. Вып. 4. С. 515-519.
7. Пинегин С.В. Трение качения в машинах и приборах / С.В. Пинегин. М.: Машиностроение, 1976. 258 с.
8. Пономарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев и др. Т. II. М.: Машиностроение, 1958. 975 с.
9. Верховский А.В. Явление предварительного смещения при трогании с места катка / Верховский А.В., Авраамов В.М. // Известия Томского политехнического института. 1947. Т.61, вып. 1. С. 53-54.
10. Danl P. A solid friction model. Aerospace Corp., El. Segundo. CA, Tech. Rep. TOR – 0158 (3107-18) – 1, 1968.
11. Захаров Ю.А., Плотников П.К. Модель силы трения и ее приложение к решению некоторых задач механики // Изв. РАН. МТТ, 1992. №6. С. 56-65.
12. Bliman P.A., Sorine M. Easy – to – use realistic control / of the 3 rd European Control Conference, Roma, Italy, 5-8 Sept. 1995., p. 1-7.
13. A New Model for Control of Systems with Friction / Canudas de Wit C.a.l. // IEEE Transactions on Automatic Control. 1995. V.40. №3. P. 419-424.
14. Olsson, H., Åström, K.J., Canudas deWit, C., Gäfvert, M., Lischinsky, P.: Friction Models and Friction Compensation. European Journal of Control 4(3), 176-195 (1998).
15. Bliman P.A. Modèles de frottements secs pour les applications embarquées. Applications on contact pneu / sol. / P.A. Bliman, M. Sorine // Actes des Journées Européennes de Frottement JEE'95, Villeneuve d'Astq (France), 12– 13.12.1995.
16. Плотников П.К. Модели сил трения одномерных кинематических пар и свойства движений твердых тел / П.К. Плотников // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2003. № 4. С. 66-80.
17. Андронов В.В. Сухое трение в задачах механики / В.В. Андронов, В.Ф. Журавлев; Институт компьютерных исследований. М. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 84 с.
18. Плотников П.К. Модель сил трения шара с предварительным смещением качения по шероховатой поверхности // ДАН. 2010. Т. 432. №4. С. 481-485.
19. Плотников П.К. О физической интерпретации коэффициента трения качения. Деп. в ВИНТИ, № 203 - В 2012, СГТУ им. Гагарина Ю.А., 03.05.2012. 22 с.
20. Пат. № 2467308 РФ, МПК G01N 19/02. Способ определения коэффициентов трения качения и сопротивления качению // П.К.Плотников; заявл. 26.07.2011; опубл. 20.11.2012.-7 с.
21. Влияние моделей трения на динамические и статические характеристики калибровочного гироскопического стенда / П.К. Плотников, Ю.А. Захаров и др. // Вестник СГТУ. 2006. № 4 (17). Вып. 2 С. 53-65.

Плотников Пётр Колестратович – доктор технических наук, профессор кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pyotr K. Plotnikov – Dr. Sc., Professor
Department of Instrument Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Карамышев Николай Николаевич – заместитель директора «ЛТД «Дедал», Саратов

Nikolay N. Karamyshev – Deputy Director
LTD Dedal, Saratov

Карамышев Артем Николаевич – студент Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

Artyom N. Karamyshev – Undergraduate
Chernyshevsky Saratov State University

Статья поступила в редакцию 15.01.14, принята к опубликованию 16.06.14

УДК 685.314.33

К.К. Скрипаченко, В.А. Кошуро, А.И. Шумилин, С.Я. Пичхидзе

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕРДЕЧНОГО СТЕНТА

Содержатся результаты разработки конструкции сердечного стента с механизированным клапаном сердца и технология сополимеризации материалов искусственного сосуда и клапана.

Стент, сердечный клапан, фторсодержащая резина, политетрафторэтилен (ПТФЭ)

K.K. Skripachenko, V.A. Koshuro, A.I. Shumilin, S.Ya. Pichhidze

DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF CARDIAC STENTS

The article presents the research data relating the construction of a cardiac stent provided with a mechanized valve, and the bonding materials technology for artificial vessels and valves.

Stent, cardiac valve, fluorine rubber, polytetrafluoroethylene (PTFE)

Введение

В настоящее время значительному количеству больных в России требуется радикальная коррекция клапанных пороков сердца, возникающих в результате различных болезней или вследствие возрастных изменений. Лечение осуществляется кардиохирургическими методами, в том числе установкой протезов клапана сердца (ПКС), среди которых самой востребованной и распространенной является корпусная конструкция с поворотными створками.

В ряде случаев протезирование клапана сердца невозможно в силу неудовлетворительного состояния сердечных сосудов. В связи с этим предлагается устанавливать ПКС, совмещенный с искусственным сердечным сосудом [1].

Целью работы является разработка конструкции ПКС, совмещенного с сердечным стентом, и технологии их соединения.

Методика эксперимента

Для проведения исследований использовались стандартные образцы из фторсодержащей резины 420-264В/5 на основе СКФ-264В/5 перекисной вулканизации и политетрафторэтилена (ПТФЭ), представляющие собой пластины размерами 50×50×2 мм и 90×90×1 мм. Перед нанесением покрытия образцы подвергались очистке в ультразвуковой ванне УЗВ2-0,16/37:

- в водном растворе ПАВ при температуре от 35 до 40 °С в течение 3 минут;
- в водном 40% растворе этилового спирта при комнатной температуре в течение 2 мин;
- в дистиллированной воде при комнатной температуре в течение 1 мин.

Алюминий на образцы резины и ПТФЭ наносился с помощью магнетронно-распылительной системы (МРС) на основе вакуумного универсального поста ВУП-4. В качестве ионообразующего газа применялся высоко-

кочистый аргон. Магнетронное распыление (МР) алюминия проводилось при давлении газа порядка 10-12 Па, разности потенциалов между катодом и анодом 150-200 В. Скорость роста пленки металла составляла 1-2 нм/с.

Соединение образцов ПТФЭ и фторсодержащей резины осуществлялось путем совулканизации при 165-170 °С, в течение 5-6 минут. Структуры распыленного алюминия и совулканизированного соединения исследовались на шлифах с использованием металлографического микроскопа МИМ 8. Оценка толщины нанесенного на ПТФЭ и резину слоя алюминия произведена на анализаторе геометрических параметров микрообъектов АГПМ6М с использованием программы графической обработки изображений «Металлограф». Адгезионная прочность соединений контрольных образцов из фторсодержащей резины 420-264В/5 и ПТФЭ, а также с нанесенным на поверхность слоем алюминия определялась методом межслоевого расслаивания [3] на универсальной испытательной машине ИР 5082-100.

Результаты исследований

При изготовлении ПКС применяются следующие биосовместимые материалы: углесталлы, фторполимеры (ФП), титан и его сплавы, коррозионостойкие стали. Наиболее широко в конструкциях ПКС используются фторполимеры, обладающие высокими характеристиками по прочности, эластичности, каркасности, изгибоустойчивости, а также обладающие низкой набухаемостью в углеводородах, растительных маслах, спиртах, кислотах.

Конструкция ПКС должна иметь следующие характеристики [1]:

- 1) полностью исключать выпадение створок за счет выполнения ограничителей (жесткого крепления створок в корпусе);
- 2) обеспечивать высокую эффективность проходного сечения клапана, практически не оказывая сопротивления потоку крови в открытом положении створок;
- 3) исключать образование застойных зон крови.

С учетом приведенных требований была спроектирована конструкция ПКС, совмещенного с искусственным сосудом (рис. 1).

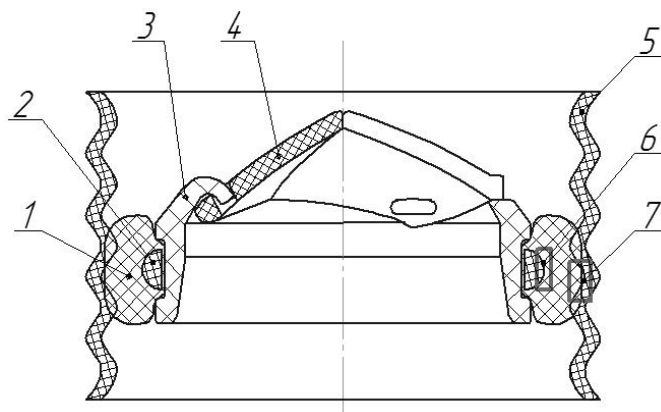


Рис. 1. Схема предлагаемого решения конструкции сердечного стента: 1 – манжета ПКС из волокон ПТФЭ, 2 – фиксирующее кольцо (жгут) из фторсодержащей резины, 3 – корпус ПКС из пироуглерода, 4 – створки клапана из пироуглерода, 5 – трубка из ПТФЭ, 6 – область совулканизации кольца (жгута) фторсодержащей резины и волокна ПТФЭ, 7 – область сополимеризации волокна и трубки из ПТФЭ

Применение биосовместимых материалов в конструкции ПКС позволит:

- 1) увеличить срок службы за счет использования износостойких и коррозионостойких материалов;
- 2) снизить риск тромбообразования за счет использования пироуглерода и ПТФЭ.

Наличие гибкой манжеты, выполненной из медицинского фетра на основе ПТФЭ, выполняющей роль демпфера, позволит уменьшить циклические напряжения, возникающие в структуре основы ПКС, изготовленной из пироуглерода. Высокая прочность соединения манжеты клапана со стенками трубки достигается при их сополимеризации.

ФП, в частности ПТФЭ, вследствие особенностей химического строения инертны, имеют высокую термостабильность, обладают низкой адгезией к большинству материалов. Для повышения адгезионных характеристик ПТФЭ используются химические и физические методы обработки поверхности ПТФЭ [2]. Предлагается для повышения адгезионных характеристик использовать МР металла (алюминия) на поверхность изделий из ФП.

Для нанесения слоя металла на манжету ПКС использовалась следующая схема процесса, представленная на рис. 2.

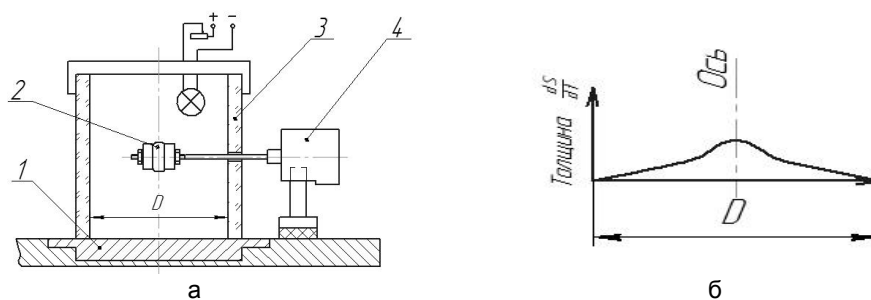


Рис. 2. Схема процесса магнетронного распыления алюминия: а - схема блока напыления на ПКС (1 – Al мишень, 2 – ПКС в сборе, 3 – стакан кварцевый, 4 – двигатель шаговый); б – распределение скорости осаждения металла

Слой алюминия толщиной 0,25-0,4 мкм, нанесенного на основу из ПТФЭ, повторяет рельеф основы и имеет равномерную структуру (рис. 3).

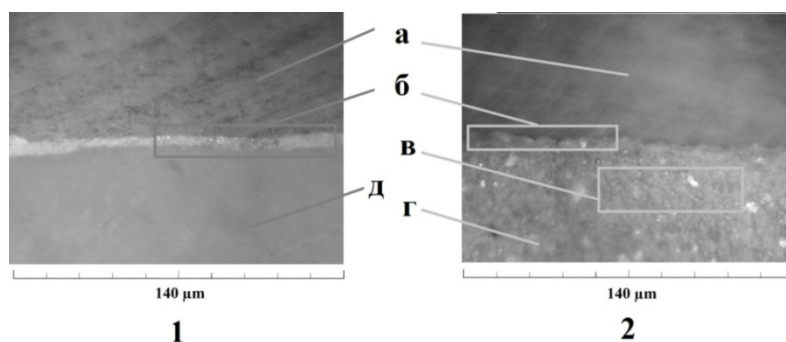


Рис. 3. Фотографии микрошлифов образцов из ПТФЭ (1) резины 420-264В/5 (2) с покрытием алюминия: а – эпоксидная смола; б – нанесенный алюминий; в – область резины с измененной структурой; г – резина 420-264В/5; д – ПТФЭ

В процессе МР алюминия происходит видимое изменение цвета поверхностного слоя основы из ПТФЭ, увеличивается уровень серости в зависимости от времени напыления. После МР металла на подложку из резины 420-264В/5 наблюдается изменение структуры в поверхностных областях материала (рис. 3). Предположительно, изменение структуры связано: с термическим воздействием, оказываемым на резину и ПТФЭ плазмой разряда МРС, а также с реакциями дегидрофторирования и дефторирования полимерной цепи фторполимеров (СКФ-264В/5 и ПТФЭ). При изучении ИК-спектров образцов с модифицированной алюминием поверхностью ФП выявлены полосы поглощения при 713, 881 и 1181 см^{-1} , соответствующие аморфному фториду алюминия. Рентгенофазовый анализ фиксирует наличие пиков, характерных для кристаллической фазы фторида алюминия [4].

Соединение образцов из ПТФЭ и резины с алюминием методом совулканизации позволяет получить равномерную область контакта (рис. 4).

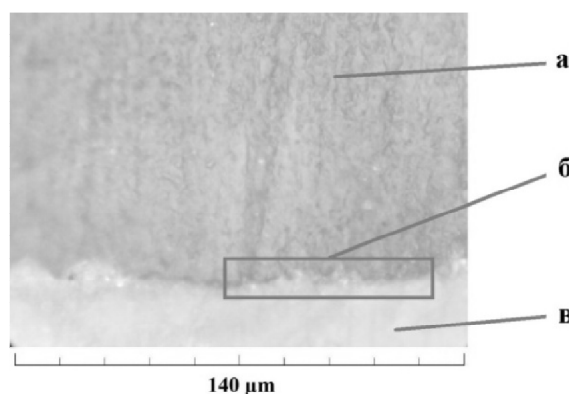


Рис. 4. Фотография микрошлифа соединения ПТФЭ с резиной 420-264В/5 с магнетронным нанесением алюминия, а – резина 420-264В/5; б – область соединения ПТФЭ и резины; в – ПТФЭ

В таблице приведены данные по определению адгезионной прочности при расслоении фторсодержащей резины и ПТФЭ.

Прочность при расслоении соединения «резина – ПТФЭ»

Резина 420 -264В/5	Прочность при расслоении, Н/см	
	ПТФЭ	
	Немодифицированная поверхность	Поверхность, модифицированная алюминием
Немодифицированная поверхность	менее 1	2, 5
Поверхность, модифицированная алюминием	2,3	4, 1

Согласно результатам исследований, приведенным в таблице, адгезионная прочность соединения ФП увеличивается при использовании поверхностно модифицированных алюминием ПТФЭ и резины, предположительно за счет дефторирования и дегидрофторирования поверхности фторопласта и резины.

Вывод

Разработанная конструкция протеза клапана сердца является высокотехнологичной и простой в установке.

Согласно проведенным исследованиям, адгезионную прочность соединений ФП, полученных путем сополимеризации, можно повысить за счет модификации поверхности соединяемых основ при распылении алюминия. Модификация ФП происходит за счет дефторирования и дегидрофторирования поверхностных слоев ФП в процессе магнетронного распыления алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по кардиологии: учеб. пос. в 3т. / под ред. Г.И. Сторожакова, А.А. Горбаченкова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. Т. 2. 512 с.
2. Нудельман З.Н. Фторкаучуки: основы, переработка, применение / З.Н. Нудельман. М.: ПИФ-РИАС. 2006. 384 с.
3. ГОСТ 6768-75. Резина и прорезиненная ткань. Метод определения прочности связи между слоями при расслоении. М.: Изд-во стандартов, 1975. 6 с.
4. Шумилин А.И. Адгезионная прочность при расслоении фторсодержащей резины и политетрафторэтилена / А.И. Шумилин, В.С. Гринёв, Е.Е. Фёдоров, В.А. Таганова, С.В. Телегин, С.Я. Пичхидзе // Пластические массы. 2014 (в печати).

Скрипаченко Ксения Константиновна – студентка 4 курса кафедры «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Kseniya K. Skripachenko – Undergraduate Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Кошуро Владимир Александрович – аспирант, ассистент кафедры «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir A Koshuro – Postgraduate, Assistant to the Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Шумилин Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksander I. Shumilin – Ph.D., Associate Professor Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Пичхидзе Сергей Яковлевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergei Ya. Pichhidze – D.Sc., Professor Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.04.14, принята к опубликованию 20.06.14

В.В. Трегулов

**ИЗМЕРЕНИЕ РАЗРЫВОВ ЗОН В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЕ
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ CdS/Si(p), ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ
ГИДРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНКИ CdS**

Для гетероструктуры CdS/Si(p), изготовленной с помощью гидрохимического осаждения пленки CdS на поверхности монокристаллической подложки, определены величины разрывов зоны проводимости и валентной зоны. Использовалась методика, основанная на измерении высокочастотной вольт-фарадной характеристики гетероструктуры.

Гетероструктура, гидрохимическое осаждение, вольт-фарадная характеристика, зонная диаграмма, фотоэлектрический преобразователь

V.V. Tregulov

**MEASUREMENTS OF BAND OFFSETS TO THE ENERGY DIAGRAM OF THE CdS/Si(p)
HETEROSTRUCTURE FABRICATED BY THE HYDROCHEMICAL
DEPOSITION CdS FILM METHOD**

The offset values of the conduction and valence bands are defined for the CdS/Si(p) heterostructure fabricated using hydrochemical deposition of the CdS film on the surface of the monocrystalline substrate. To conduct the measurements the author used the technique based on high-frequency capacitance-voltage characteristics of the heterostructure.

Heterostructure, hydrochemical deposition, capacitance-voltage characteristics, the band diagram, a photoelectric converter

Перспективным направлением применения гетероструктуры CdS/Si(p) является солнечная энергетика. На ее основе может быть изготовлен фотоэлектрический преобразователь солнечной энергии с эффективностью до 26% [1]. Технология изготовления этих приборов должна обеспечивать возможность формирования полупроводниковых структур с большой площадью поверхности, низкую себестоимость изделий при условии достижения высокой эффективности преобразования солнечной энергии. Этим требованиям отвечает метод гидрохимического осаждения полупроводниковых пленок. В то же время полупроводниковые пленки, сформированные гидрохимическим осаждением, отличаются большей дефектностью по сравнению с пленками, изготовленными с помощью традиционных эпитаксиальных технологий современной микроэлектроники [2]. Таким образом, исследование электрофизических характеристик гетероструктур, изготовленных методом гидрохимического осаждения, является актуальной задачей.

Целью данной работы является определение значений разрывов зоны проводимости ΔE_C и валентной зоны ΔE_V гетероструктуры CdS/Si(p), изготовленной методом гидрохимического осаждения. Как известно, ΔE_C и ΔE_V являются важнейшими параметрами энергетической зонной диаграммы гетероперехода и определяют физические процессы в гетероструктурах [1, 3].

Исследуемые гетероструктуры были изготовлены на пластинах монокристаллического кремния *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом·см и ориентацией поверхности (100). Предварительно подложки подвергались текстурирующему травлению в водном растворе KOH с целью снижения отражательной способности.

Пленка CdS выращивалась методом гидрохимического осаждения из водных растворов хлорида кадмия CdCl₂ и тиомочевины N₂H₄CS с использованием раствора аммиака NH₄OH в качестве комплексообразователя для ионов кадмия.

Более подробно технология изготовления исследуемых образцов описана в [4], где была проведена оптимизация процесса гидрохимического осаждения пленки CdS с точки зрения эффективности преобразования солнечной энергии гетероструктурой CdS/Si(p).

В данной работе представлены результаты исследования гетероструктуры CdS/Si(p), изготовленной в оптимальных условиях с точки зрения [4]. Пленка CdS исследуемого образца имела *n*-тип

проводимости и толщину 2,5 мкм. Для проведения измерений омические контакты к кремниевой подложке и пленке CdS формировались посредством пайки индия с последующей формовкой электрическим импульсом.

Гетероструктура CdS/Si(p) относится к II типу [1], ее зонная диаграмма показана на рис. 1.

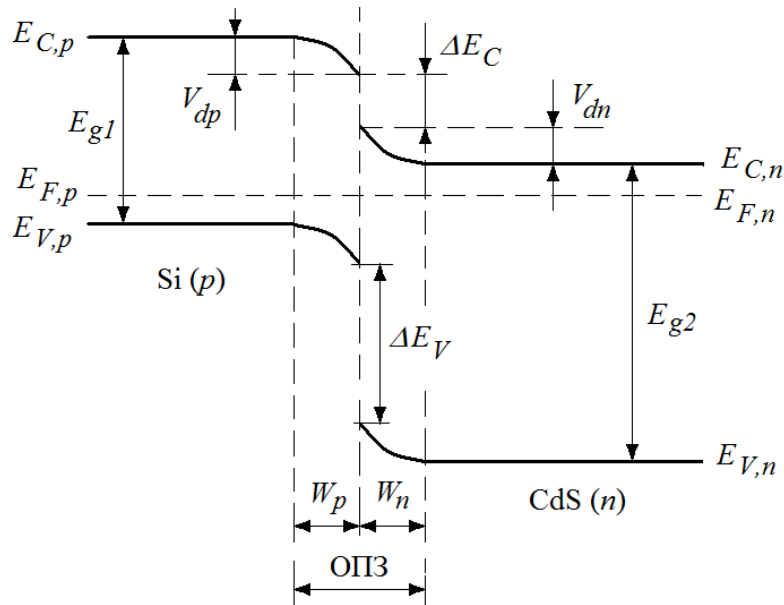


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероструктуры CdS/Si(p)

Пленка CdS играет роль оптического окна. Кванты света с энергиями, находящимися в интервале значений ширины запрещенных зон CdS и Si, проходят через широкозонный слой CdS и поглощаются в области пространственного заряда (ОПЗ) гетероперехода, а также в квазинейтральной области кремниевой подложки. Носители заряда, генерируемые солнечным светом в CdS, не вносят существенного вклада в общий фототок [1].

Электронно-дырочные пары, генерированные светом в ОПЗ или вблизи него, разделяются полем гетероперехода. Дырки (рис. 1) выводятся из ОПЗ в квазинейтральную область кремния. В CdS дырки не попадают вследствие потенциального барьера ΔE_V на гетерогранице. Электроны переходят через гетерограницу в CdS [1]. При наличии поверхностных состояний на гетерогранице имеет место захват и рекомбинация носителей заряда в ОПЗ.

Величины ΔE_C и ΔE_V для исследуемой гетероструктуры CdS/Si(p) определялись по методике, представленной в [5], которая основана на исследовании высокочастотной вольт-фарадной характеристики (ВЧ ВФХ). Используемая методика базируется на модели Андерсона, которая, в свою очередь, использует следующие представления:

- 1) величины ΔE_C и ΔE_V определяются разностью ширины запрещенных зон контактирующих полупроводников;
- 2) величины ΔE_C и ΔE_V не зависят от уровня легирования контактирующих полупроводников;
- 3) на значения ΔE_C и ΔE_V не оказывают влияния поверхностные состояния на гетерогранице;
- 4) концентрация легирующей примеси в контактирующих полупроводниках определяет величину диффузионного потенциала V_{bi} , характеризующего изгиб зон на энергетической диаграмме [6].

Согласно [5], величина ΔE_C связана с основными параметрами зонной диаграммы гетероструктуры CdS/Si(p) на рис. 1, следующим образом:

$$eV_{bi} = \Delta E_C + (E_{C,p} - E_{F,p}) - (E_{C,n} - E_{F,n}), \quad (1)$$

где e – заряд электрона, $(E_{C,p} - E_{F,p})$ – расстояние между дном зоны проводимости и уровнем Ферми для полупроводника p -типа (Si), $(E_{C,n} - E_{F,n})$ – аналогичное расстояние для полупроводника n -типа (CdS). Как следует из рис. 1, величина V_{bi} определяется суммой потенциалов V_{dp} и V_{dn} , характеризующих изгибов зон в p - и n -области, соответственно [1]:

$$V_{bi} = V_{dp} + V_{dn}. \quad (2)$$

Величина V_{bi} определяется по ВЧ ВФХ исследуемой гетероструктуры. При этом значение V_{bi} зависит только от разрывов зон и не связано с влиянием поверхностных состояний на гетерогранице [7].

Для определения ΔE_C использовалось выражение, полученное автором [5] на основе (1):

$$\Delta E_C = eV_{bi} - kT \ln \left[\left(\frac{N_{C,p}}{N_{C,N}} \right) \cdot \left(\frac{n_{n,0}}{n_{p,0}} \right) \right], \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $N_{C,p}$ и $N_{C,N}$ – эффективные плотности состояний в зонах проводимости полупроводников p - и n -типа, соответственно; $n_{n,0}$ и $n_{p,0}$ – равновесные концентрации электронов в полупроводниках n - и p -типа, соответственно. Концентрация неосновных носителей заряда $n_{p,0}$ в кремниевой области гетероструктуры вычисляется следующим образом:

$$n_{p,0} = \frac{n_i^2}{p_{p,0}}, \quad (4)$$

где n_i – собственная концентрация для кремния, $p_{p,0}$ – концентрация основных носителей заряда в p -области гетероструктуры [3].

Значение ΔE_V определялось из выражения

$$\Delta E_V = E_{g2} - E_{g1} - \Delta E_C, \quad (5)$$

где E_{g1} и E_{g2} – значения ширины запрещенной зоны для полупроводников, образующих гетероструктуру (рис. 1) [5].

Измерение ВЧ ВФХ гетероструктуры CdS/Si(p) проводились с помощью цифрового измерителя иммитанса E7-20. Частота измерительного сигнала составляла 1 МГц, температура образца – 300 К. Полученная ВЧ ВФХ представлена на рис. 2 в координатах $C^{-2} = f(V)$. Знак постоянного напряжения смещения V на рис. 2 соответствует знаку напряжения, приложенного к пленке CdS. Таким образом, положительные значения V на рис. 2 соответствуют обратному смещению гетероперехода CdS/Si(p). Из рис. 2 видно, что ВЧ ВФХ образована двумя отрезками прямых линий с небольшим различием наклона в области $V \approx 2$ В. Следовательно, исследуемый гетеропереход CdS/Si(p) можно считать резким в области напряжений обратного смещения от 0 до 2 В.

Величина V_{bi} , определенная по ВЧ ВФХ (рис. 2), составила 0,67 В. Концентрация носителей заряда, определенная по наклону ВЧ ВФХ (рис. 2) в области V от 0 до 2 В, составила $1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Это значение практически совпадает с концентрацией акцепторной примеси (N_a) в базовой области n^+p -диодов, изготовленных диффузией фосфора на кремниевых пластинах p -типа, полностью аналогичных использованным в гетероструктуре CdS/Si(p). Таким образом, величина $p_{p,0}$ в p -области гетероструктуры CdS/Si(p) принимается равной $1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

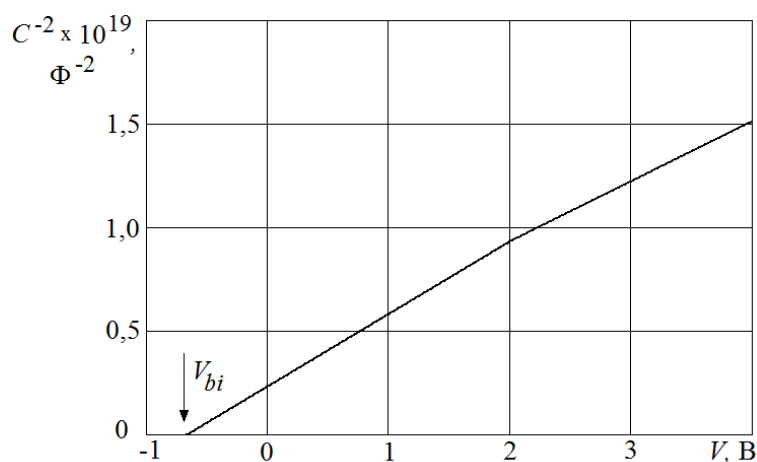


Рис. 2. Экспериментальная высокочастотная вольт-фарадная характеристика гетероструктуры CdS/Si(p)

Согласно многочисленным литературным данным, например [2, 8, 9], для пленок CdS, изготовленных в условиях, аналогичных рассматриваемым в данной работе, концентрация электронов $n_{n,0}$ составляет величину $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Пленка CdS, изготовленная методом гидрохимического осаждения, содержит дефекты донорного и акцепторного типа, создающие в запрещенной зоне мелкие и глубокие энергетические уровни, поэтому она представляет собой частично компенсированный полупроводник [9]. Удельное сопротивление пленки CdS определяется концентрацией $n_{n,0}$, в то время как ширина ОПЗ в ней (W_n на рис. 1) и изгиб зон (V_{dn} на рис. 1) зависит от концентрации некомпенсированных доноров N'_d [9], [3].

Концентрации $n_{n,0}$ и N'_d совпадают, если электропроводность материала определяется донором, создающим в запрещенной зоне CdS мелкий уровень с энергией ионизации $(E_{C,n} - E_{F,n}) < kT$. В противном случае, концентрация электронов $n_{n,0}$ при постоянной степени компенсации, может изменяться на несколько порядков в зависимости от положения энергетического уровня компенсированной примеси. При этом концентрация N'_d в CdS будет на несколько порядков превышать $n_{n,0}$ [9].

Таким образом, исследуемая гетероструктура CdS/Si(p) является резкой и несимметричной, ОПЗ практически полностью находится в кремниевой области ($W_p \gg W_n$ на рис. 1), изгибом зон в CdS можно пренебречь ($V_{dp} \gg V_{dn}$ на рис. 1). Измеренная величина V_{bi} определяется изгибом зон в кремниевой области гетероструктуры CdS/Si(p).

На основе полученных результатов по формулам (4), (3) и (5) были рассчитаны значения ΔE_C и ΔE_V для разных концентраций $n_{n,0}$ в пленке CdS. Эти значения представлены в таблице.

С другой стороны, согласно модели Андерсона, величина ΔE_C для гетероструктуры CdS/Si(p) может быть определена как разность энергий электронного сродства

$$\Delta E_C = \chi_{Si} - \chi_{CdS}, \quad (6)$$

где χ_{Si} и χ_{CdS} – значения энергий электронного сродства для Si и CdS, соответственно [6].

В [6] для монокристаллических образцов Si и CdS достаточно высокого качества приведены следующие данные: $\chi_{Si} = 3,99$ эВ, $\chi_{CdS} = 4,70$ эВ. Полученные в результате расчета по (6) и (5) для указанных величин χ_{Si} и χ_{CdS} значения ΔE_C и ΔE_V приведены в таблице.

Сравнение разных оценок величин ΔE_C и ΔE_V для гетероструктуры CdS/Si(p)

Разрыв зон	Экспериментальная гетероструктура CdS/Si(p)		Расчет по (6) и (5)
	$n_{n,0} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$n_{n,0} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$	
ΔE_C , эВ	0,08	0,14	0,71
ΔE_V , эВ	1,21	1,15	2,02

Из таблицы видно, что величины ΔE_C и ΔE_V для экспериментальной гетероструктуры CdS/Si(p), исследуемой в данной работе, и рассчитанные по формулам (6) и (5), заметно различаются. Это можно объяснить, прежде всего, более высокой дефектностью пленки CdS, сформированной гидрохимическим методом, по сравнению с монокристаллическим образцом [6]. В то же время, согласно [7], для достижения высокой эффективности преобразования солнечной энергии величина ΔE_C для гетероструктуры с зонной диаграммой II-го типа и поглощающим слоем p-типа проводимости должна быть как можно меньше. Как следует из таблицы, технология гидрохимического формирования гетероструктуры CdS/Si(p) может обеспечить указанное требование.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлены величины разрывов энергетических зон гетероструктуры CdS/Si(p), изготовленной методом гидрохимического осаждения. На основе полученных данных можно утверждать, что такие гетероструктуры могут обеспечить высокую эффективность преобразования солнечной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарма Б.Л. Полупроводниковые гетеропереходы / Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. М.: Сов. радио, 1979. 232 с.
2. Чопра К. Тонкопленочные солнечные элементы / К. Чопра, С. Дас. М.: Мир, 1986. 435 с.
3. Зи. С. Физика полупроводниковых приборов. т. 1 / С. Зи. М.: Мир, 1984. 456 с.
4. Трегулов В.В. Оптимизация технологии изготовления гетероструктур CdS/Si(p) / В.В. Трегулов // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 31-34.
5. Palmer D.W. Characterization of semiconductor heterostructures by capacitance methods / D.W. Palmer // Microelectronics Journal. 1999. No 30. P. 665-672.
6. Бехштедт Ф. Поверхности и границы раздела полупроводников / Ф. Бехштедт, Р. Эндерлайн. М.: Мир, 1990. 448 с.
7. Фаренбух А. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / А. Фаренбух, Р. Бьюб. М.: Энергоатомиздат, 1987. 280 с.
8. Durose K. Materials aspects of CdTe/CdS solar cells / K. Durose, P.R. Edwards, P.D. Halliday // Journal of Crystal Growth. 1999. № 197. P. 733-742.

9. Косяченко Л.А. Напряжение холостого хода, фактор заполнения и коэффициент полезного действия CdS/CdTe-солнечного элемента / Л.А. Косяченко, Е.В. Грушко // Физика и техника полупроводников. 2010. т.44. вып. 10. С. 1422-1429.

Трегулов Вадим Викторович –
кандидат технических наук, доцент кафедры
общей и теоретической физики
и МПФ Рязанского государственного
университета имени С.А. Есенина

Vadim V. Tregulov –
Ph. D., Associate Professor
Department of General and Theoretical Physics,
and Teaching Methods,
S.A. Esenin State University of Ryazan

Статья поступила в редакцию 20.03.14, принята к опубликованию 16.06.14

УДК 614.841.411

О.А. Черкасова

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И БИОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ

Рассмотрены изделия из поливинилхлорида, используемые для отделочных и облицовочных работ, а также их способность к возгоранию и распространению пламенного горения. Экспериментально установлены время возгорания и его зависимость от структуры образцов. Найдена скорость распространения пламени и способность к коксообразованию. Установлено наличие хлористого водорода в продуктах пиролиза.

ПВХ, скорость выгорания, коксообразование

O.A. Cherkasova

RESEARCH INTO PHYSICAL AND BIOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF POLYVINYLCHLORIDE WHILE BURNING

The paper considers polyvinylchloride products used in the finishing and lining works, and their capacity for ignition and distribution of flame combustion. Ignition time and its dependence on the pattern structure are experimentally determined. Flame propagation and coke formation capacity are measured. Existence of hydrogen chloride in pyrolyzed species is established.

PVC, burning speed, coke production

Введение

Опыт эксплуатации зданий и сооружений показывает, что обеспечение пожарной безопасности несущих конструкций в большей степени зависит от выбора строительных или отделочных материалов, обладающих достаточной стойкостью, надежностью и долговечностью в конкретных условиях эксплуатации [1, 2]. Для правильного выбора необходимо учитывать всю информацию по используемым материалам и изделиям, особое внимание при этом уделить перечню контролируемых свойств и их показателям. Ведь пожарная безопасность строительных отделочных конструкций будет определяться в результате возможного возгорания или взрыва [3]. Однако нужно помнить, что отделочные конструкции – это своеобразная функциональная система с приемлемой надежностью. Отсюда следует, что предупреждение аварии этой системы возможно только при постоянном контроле ее состояния и режима работы, как в нормальных условиях, так и при создавшейся аварийной ситуации. Особое внимание уделяется поведению данной конструкции в экстремальных условиях. Данная проблема не нова, однако она не теряет до сих пор своей актуальности.

С учетом того, что скорость распространения пламени во время пожара очень велика и градиент температуры все время повышается, для увеличения огнестойкости отделочных изделий необходимо учитывать ряд физических параметров: горючесть, скорость распространения, а также биофи-

зических: дымообразование, токсичность. Практика обследования зданий и оценка их состояния показывают, что во многих случаях несущие конструкции подлежат гидро- и теплоизоляции, в качестве которых используются различные полимерные изделия.

В течение длительного времени считалось, что там, где требуется повышенная пожаробезопасность, необходимо использовать композиции на основе поливинилхлорида (ПВХ), которые по своей природе обладают меньшей горючестью по сравнению с композициями на основе полиэтилена [1]. Известно, что способность полимерных композиций образовывать прочный кокс является одной из наиболее значимых характеристик пожаробезопасности. Наличие такого коксового остатка способствует уменьшению горючести, снижению выделения дыма и токсичного оксида углерода. Выгорают в основном органические материалы, коксовый же остаток содержит исключительно неорганические. В составе распространенных ПВХ присутствует всего 10% неорганических веществ, которые и составляют коксовый остаток от горения. Известно [1], что при горении ПВХ основными токсическими компонентами являются оксид углерода и хлористый водород, в случае же пластифицированного ПВХ – оксиды пластификатора. Образующийся при пиролизе и горении хлористый водород оказывает вредное воздействие не только на организм человека, но и на металлические части оборудования, корродирует бетонные и железобетонные конструкции. Поэтому в последние десятилетия, помимо требований снижения горючести, остро стоят вопросы и по другим аспектам проблемы: токсичности летучих продуктов горения, их коррозионной активности, дымообразующей способности в условиях пожара.

Учитывая, что токсичность является основным опасным фактором, в особенности при горении полимерных изделий, необходимо правильно подходить к выбору того или иного отделочного материала.

Целью настоящей работы является оценка физических и биофизических параметров изделий из ПВХ при их горении.

Материалы и методы исследования

Экспериментально-теоретические разработки проблемы проводились применительно к декоративно-отделочным и облицовочным материалам стен, полов и потолков, теплоизоляционным материалам строительных конструкций. Для проверки пожарной опасности в качестве образцов для исследования были выбраны отделочные строительные материалы из ПВХ: плинтус; подоконник; вагонка; стеновая панель; сэндвич-панель. Объекты испытания были выбраны исходя из потребности рынка и частого их использования.

Образцы изделий из ПВХ имели одинаковую длину (l) и ширину (b), толщина (h) образца зависела от его профиля (s). Геометрические размеры образцов представлены в таблице. Замер линейных размеров производился с помощью штангенциркулей ШЦ-II-250-0,1 и ШЦ-II-125-0,1 ГОСТ 166.

Геометрические размеры объекта исследования

Материал	Номер образца	Размеры		
		l , мм	b , мм	h (s), мм
Плинтус ПВХ	1	190	25	10 (2,5)
Подоконник ПВХ	2	200	20	20 (2)
Вагонка ПВХ	3	200	20	10
Стеновая панель	4	200	20	7
Сэндвич-пакет	5	200	20	8

Экспериментальная установка (рис. 1) была собрана из лабораторного штатива-крепёжа 2, защитного короба 5 с дымоходом 4 и горелки 3. В качестве источника зажигания и поддержания горения была использована газовая горелка Rocket MSR мощностью 2,4 кВт. Защитный короб с дымоходом представлял собой металлический ящик, внутрь которого помещались горелка и штатив с образцами 1.

Повреждением образцов после эксперимента считались выгорание и обугливание, а также способность к коксообразованию. Время воздействия открытого пламени варьировалось до 3 мин, его фиксировали с помощью секундомера.

Биофизический параметр – токсичность, определяли с помощью синей лакмусовой бумаги. Изменение ее цвета будет говорить о наличии хлористого водорода в продуктах пиролиза. Испытание каждого последующего образца проводилось после охлаждения держателя до комнатной температуры.

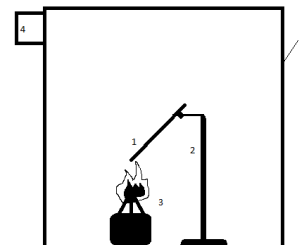


Рис. 1. Экспериментальная установка

Результаты исследования

В ходе эксперимента было измерено время возгорания образцов ($t_{вз}$) (рис. 2а), а также продолжительность горения (t_r) равных его участков (рис. 2б). Анализируя полученные данные, было установлено, что возгорание напрямую зависит от структуры образцов. Сэндвич-пакет (образец 5, рис. 2) состоит из двух листов с полимерным покрытием, между которыми располагается пенополистироловый уплотнитель, вспыхивает быстрее всех (2 с) и при наличии открытого пламени сгорает очень быстро, что объясняется его гигроскопичностью и хорошей воздухопроницаемостью. К тому же при горении пенополистирола увеличивается температурный градиент и происходит интенсивное дымообразование. На втором месте по возгоранию стоят подоконник (4 с) и вагонка (5 с), у подоконника многокамерная полая конструкция, что позволяет увеличить скорость разогрева образца. Вагонка представляет собой объемную сотовую структуру, что тоже дает увеличение в скорости прогрева. По результатам исследования было установлено, что стеновая панель воспламеняется и горит хуже всех. Причина заключается в том, что, несмотря на конструктивное сходство с сэндвич-панелью, в качестве уплотнителя использовалась ламинированная минеральная вата.

В качестве основных физических характеристик для последующего анализа были выбраны линейная и объемная скорости горения. Для подсчета линейной скорости распространения пламени воспользуемся формулой (1):

$$v_{\text{лин}} = \frac{l}{t_r}, \quad (1)$$

где l – путь пройденный огнем по поверхности при горении образца, мм, t_r – время горения, мин.

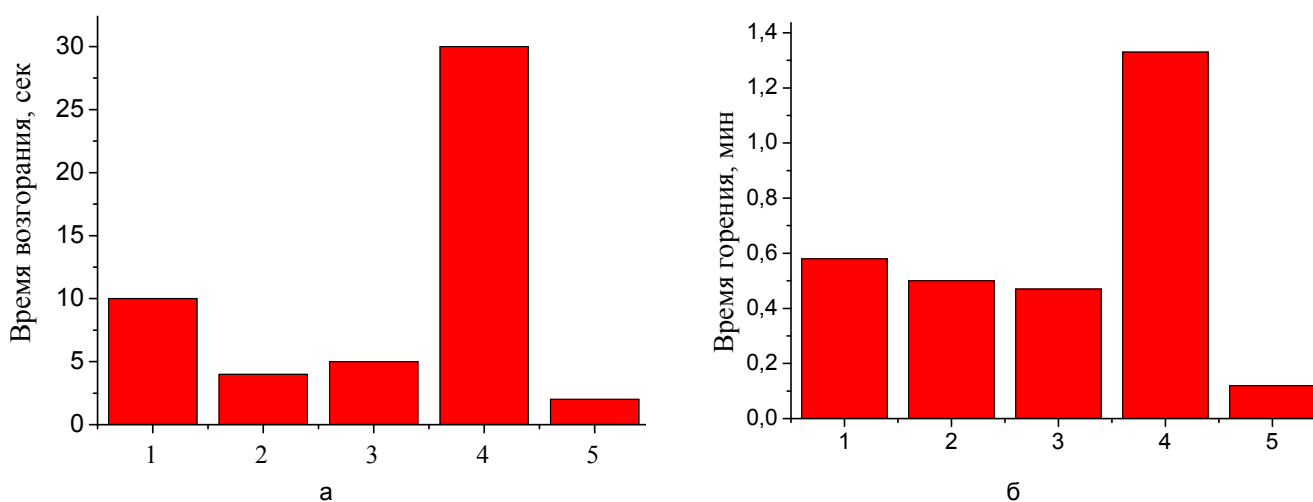


Рис. 2. Время возгорания и горения исследуемых образцов

Для подсчета объемной скорости выгорания воспользуемся формулой (2):

$$v_{\text{об}} = \frac{V}{S \cdot t_r}, \quad (2)$$

где V – объем материала, м^3 ; S – поверхностная площадь горения, м^2 ; t_r – время горения, мин.

Результаты исследования представлены на рис. 3. При сравнении линейной и объемной скорости горения видим, что самая высокая скорость горения наблюдается у сэндвич-пакета и вагонки ПВХ. С учетом того, что для всех образцов участок пройденный огнем был одинаков (10 см), время горения различно. Хуже всех горение (тление) проходило на стеновой панели, все показатели очень низкие. Кроме того, в результате эксперимента были выявлены основные изменения, произошедшие во время горения с образцами: было установлено, что они подлежат короблению, оплавлению, вспучиванию и коксообразованию (рис. 4).

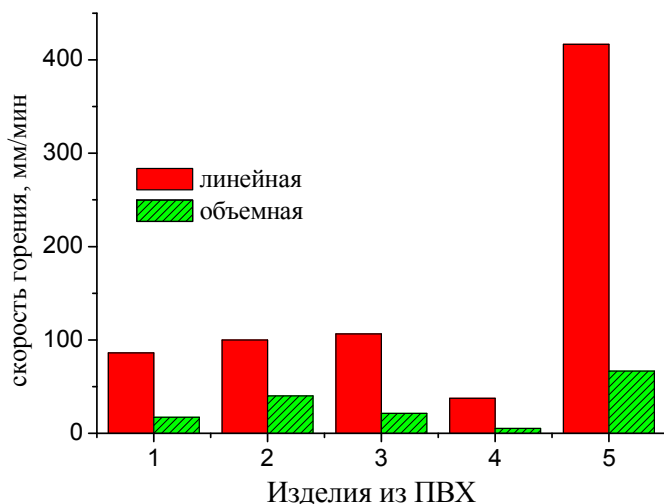


Рис. 3. Скорость горения исследуемых образцов

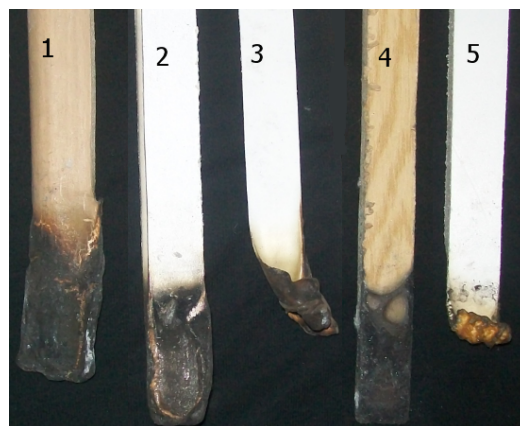


Рис. 4. Состояние образцов после испытания на горение

Как говорилось выше, наличие коксового остатка способствует уменьшению горючести, снижению дыма и токсического оксида углерода и хлористого водорода. Из рис. 4 видно, что образцы 3 и 5 имеют малый коксовый остаток, следовательно данные изделия при пожаре будут вносить основной вклад в дымообразование и выделение токсических веществ. Известно, что в условиях пожара дымообразование наблюдается именно в условиях тления. Таким образом, представление о безусловном преимуществе безгалогенных композиций по сравнению с ПВХ-пластикатами в плане дымообразования представляется неверным: и те и другие вносят свой вклад в образования дыма. Если посмотреть на стеновую панель, то видим (рис. 4, образец 4), что данный образец практически не изменился, т.е. сохранил свой первоначальный размер (коксовый остаток имеет первоначальную форму образца), не наблюдается коробление или вспучивание, следовательно, это единственный образец, который препятствовал принудительному горению и дымообразованию. При контакте горячего коксового остатка образцов с лакмусовой бумагой происходило ее покраснение, что говорит о наличии хлористого водорода. Степень покраснения у первых 4 образцов приблизительно одинаковая, у 5 образца на пол тона светлее.

Выводы

Таким образом, при оценке характеристик отделочных СМ из ПВХ предпочтение можно отдать стеновым панелям, т.к. они меньше подлежат тлению и горению, и во время пожара будут представлять наименьшую угрозу для человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пожарная опасность строительных материалов / А.Н. Баратов, Р.А. Андрианов, А.Я. Корольченко, Д.С. Михайлов, В.А. Ушков, Л.Г. Филин. М.: Стройиздат, 1988. 380 с.
2. Черкасова О.А. Экология строительных материалов / О.А. Черкасова, О.А. Мацелис, В.З. Угланова // Материалы международной научной конференции по аналитической химии и экологии, посвященной 110-летию со дня рождения академика М.Т. Козловского / под ред. М.К. Наурызбаева. Алматы: Казак университеті, 2013. С. 28-31.
3. Смирнов Н.В. Прогнозирование пожарной опасности строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Н.В. Смирнов. М., 2002. 273 с.

Черкасова Ольга Алексеевна – кандидат физико-математических наук, доцент базовой кафедры компьютерной физики и метаматериалов физического факультета Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

Olga A. Cherkasova – Ph. D., Associate Professor
Department of Computer Physics and Metamaterials,
Chernyshevsky Saratov State University

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 16.06.14

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.319.2

М.Ю. Васильков, Е.А. Бусыгина, Л.В. Никитина, И.Д. Кособудский

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЛАДАЮЩИХ ЭЛЕКТРЕТНЫМИ СВОЙСТВАМИ, И ИЗУЧЕНИЕ ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В последнее десятилетие наблюдается значительное расширение области применения полимерных электретов, однако чистые полимеры как основной материал для создания электретов во многих случаях не обладают необходимыми механическими, теплофизическими и другими свойствами, необходимыми для их практического применения. В то же время современные технологии, в том числе и медицина, требуют материалов с принципиально новыми свойствами. Вследствие этого данная работа была посвящена получению композиционных электретных материалов с заданными свойствами, состоящих из полимерного связующего и дисперсного наполнителя, и изучению их электрических свойств.

Композиционный материал, полимер, модификация, электрет

M.Yu. Vasilkov, E.A. Busygina, L.V. Nikitina, I.D. Kosobudsky

SYNTHESIS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS WITH ELECTRET PROPERTIES, AND RESEARCH INTO THEIR ELECTRICAL PROPERTIES

Rapid growth of polymer electrets utilization is observed in recent decades. However, pure polymers as the main materials for creating electrets in many cases do not possess the mechanical, thermal or other properties needed to be applied for practical purposes. At the same time, modern technologies and medicine require materials having advanced properties. The given paper is devoted to obtaining composite electret materials with demanded properties, and consisting of polymeric binding and particulate fillers, and analysis of their electrical properties.

Composite material, polymer, modification, electret

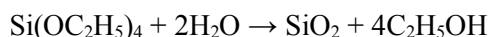
Интерес в изучении полимерных электретных материалов сосредоточен не на чистых полимерах, а на композитах на основе полимеров с различным содержанием нанодисперсного наполнителя. Использование наполнителя в коллоидном виде позволяет не только значительно увеличить напряженность поля, создаваемого элементами из таких материалов, но и существенно увеличить время жизни электретов: в последние годы удалось получить электретные материалы с временами релаксации в несколько десятков лет [1].

Широкое применение полимерные электреты нашли как в современном быту человека (электретные микрофоны, датчики, преобразователи и др.) [2], так и в различных областях медицины. В ряде публикаций уделяется значительное внимание изучению электретного эффекта в объектах биологического происхождения. Отмечается положительное влияние локальных электростатических полей, создаваемых изделиями из электретных материалов, на процессы жизнедеятельности человеческого организма [3]. Композитные пленки, нанесенные поверх различных имплантатов, обладают антибактериальным, тканезаживляющим, тромбогенным действием. Поле электрета, действуя на клеточном уровне, служит катализатором появления здоровых новообразований в живых тканях организма [4, 5]. Несмотря на значительный успех в изучении влияния электретного эффекта на биологические процессы, многие механизмы его действия и их физические закономерности до конца не выявлены, требуют дополнительных исследований.

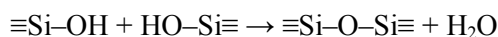
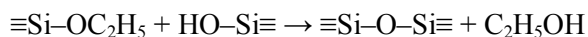
Напомним, что электреты, созданные на основе чистых полимерных материалов, обладают далеко не лучшими электрическими свойствами. Существенно улучшить электретные свойства помогает введение в исходный полимер дисперсного полярного наполнителя: при этом происходит возникновение новых структурных элементов, способных служить ловушками носителей зарядов [6, 7].

В качестве такого модифицирующего наполнителя мы использовали диоксид кремния в виде спиртового золя. SiO_2 обладает рядом практически полезных свойств: абсолютно безвреден, при термическом разложении композита не претерпевает никаких изменений, связанных с образованием летучих ядовитых соединений, обладает загущающим эффектом; за счет наличия на поверхности его микроразмерных частиц силанольных связей происходит прочное их связывание системой водородных связей. Помимо этого, частицы наполнителя способны адсорбировать на своей поверхности присутствующие в полимере молекулы воды, что приводит к существенному снижению его электропроводности и увеличению стабильности сохраняемого заряда. В качестве полимерной матрицы был выбран изотактический полипропилен американской фирмы ALDRICH.

Золи диоксида кремния были получены путем гидролиза тетраэтоксисилана (ТЭОС) (производства ЗАО Экос-1, осч.) в присутствии в качестве катализатора уксусной кислоты в среде этилового спирта:



Сразу же после гидролиза происходит реакция химической конденсации. Гидроксильная группа промежуточного соединения $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_{4-x}(\text{OH})_x$ реагирует либо с гидроксильной группой другой молекулы тетраэтоксисилана, либо с гидроксильной группой другого продукта гидролиза, формируя мостики $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$. Обе реакции конденсации могут быть представлены в следующем виде:



Молярное соотношение компонентов для приготовления выбранного нами 10 масс.% золя SiO_2 соответственно было равно: 8,5% ТЭОС : 17,0% H_2O : 66% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$: 8,5% CH_3COOH .

Получение композита происходило по методике, аналогичной [10].

После добавления всего необходимого объема раствора наполнителя реакционная смесь продолжала перемешиваться и нагреваться еще в течение 10 минут. После охлаждения образованная вязкая масса композита экстрагировалась от масла n-гексаном в приборе Сокслета в течение 3-4 часов, а затем сушилась на воздухе. Была получена серия образцов композиционных материалов с концентрацией 10%-го SiO_2 1, 2, 3, 4, 5 и 6 масс.%.

По полученным ранее результатам исследования механических свойств нанокompозитов (прочность при сжатии, твердость материала, суточное водопоглощение, удельное объемное электрическое сопротивление, разрушающее напряжение), образцом с лучшими показателями является образец с концентрацией наполнителя 3 масс.%. Его подвергли дальнейшему исследованию методами ИК-спектроскопии и ДТА.

На ИК-спектре чистого полипропилена (рис. 2) наблюдаем полосы поглощения при 968 и 998 cm^{-1} , которые отвечают конформациям «спираль» 1·3/1 и «плоский зигзаг» соответственно, причем полосы имеют одинаковую интенсивность, что свидетельствует об сравнимых количествах обеих конформаций.

На рис. 2 для модифицированного полипропилена видны полосы поглощения, которые характерны для аморфного гидроксильрованного кремнезема. В ближней ИК-области спектра наблюдаются интенсивные полосы валентных колебаний связи $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ при 1105 и 810 cm^{-1} ; при 940 cm^{-1} происходят деформационные колебания силанольных связей $\text{Si}-\text{OH}$, которые присутствуют на поверхности частиц наполнителя. В дальней области спектра при 1640 и 3450 cm^{-1} наблюдаются деформационные колебания адсорбционных и координационных связей молекул воды.

При сравнении результатов ИК-спектроскопии чистого и наполненного ПП в дальней области спектра наблюдается дублет около 3690 cm^{-1} , который соответствует колебаниям гидроксильной группы силанольной связи и свидетельствует об активной адсорбции молекул воды частицами диоксида кремния. В результате активной адсорбции молекул воды на поверхности частиц наполнителя образуется гидратная оболочка. Таким образом, из данных, полученных методом ИК-спектроскопии, можно сделать вывод, что частицы наполнителя, введенные в полимер, способствуют активной адсорбции молекул воды, присутствующих в растворе золя диоксида кремния, тем самым уменьшая удельную электропроводность полученного нанокompозита и увеличивая время сохранности электрического заряда, появляющегося после проведения электризации.

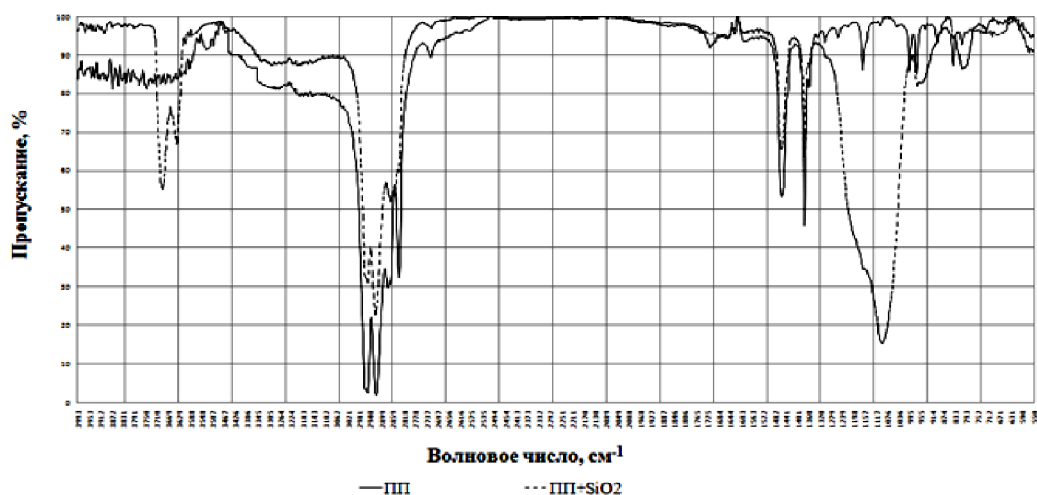


Рис. 2. ИК-спектроскопия чистого и модифицированного полипропилена (3 масс.% SiO₂)

Для изучения термостабильности композитов были проведены измерения на приборе «Дериватограф ОД-103». Дериватограммы снимались при следующих условиях: ДТА – 1/10, ДТГ – 1/10, нагревание происходило от комнатной температуры до 1000⁰С со скоростью 10 град/мин. Масса навески составляла 200 мг. Измерение температуры осуществляли платино-платинородиевой термопарой.

Результаты исследования образца с 3 масс.% наполнителя представлены на рис. 3.

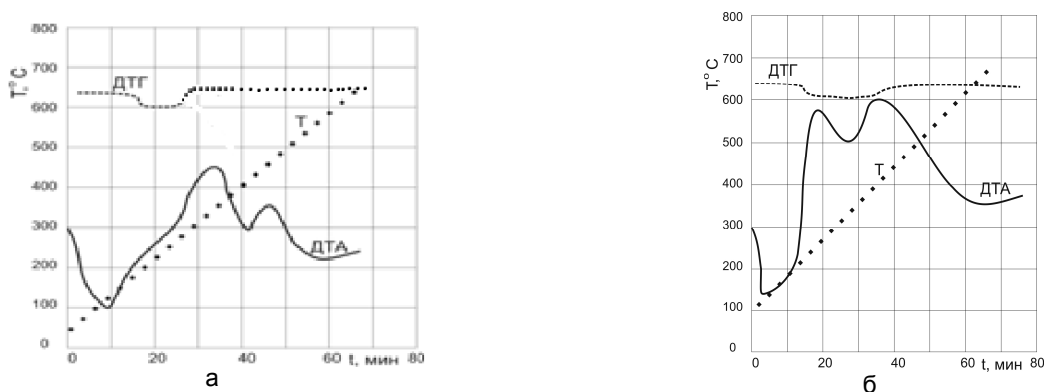


Рис. 3. Дериватограммы чистого ПП (а) и ПП с концентрацией наполнителя 3 масс.% (б)

Температура плавления модифицированного ПП понизилась относительно температуры плавления чистого полимера на 20⁰С и составила 120⁰С. Экзотермические пики, свидетельствующие о протекании процессов деструкции, окисления и изменения структуры (конформационные изменения) композита, тоже смещены в область более низких температур: 350⁰С→260⁰С, 460⁰С→400⁰С. Несмотря на снижение температур плавления и окисления композита по сравнению с чистым полимером, наблюдается увеличение его термостабильности на 40⁰С с 580 до 620⁰С.

Из анализа кривых ДТГ следует, что скорость деструкции чистого ПП выше, чем композита. Начало убыли массы, связанное с потерей адсорбированной частицами наполнителя воды, для модифицированного ПП наблюдается при 200⁰С, в то время как для исходного полимера это происходит при 180⁰С.

Затем из композитов методом прессования согласно ГОСТ 12019-66 изготавливались диски толщиной 0,5 мм, которые подвергались электризации. Электризация происходила путем термоэлектретирования постоянным электрическим полем напряжением 2кВ в течение 60 мин при 100⁰С. Схематическое изображение процесса зарядки дисков представлено на рис. 4.

В результате нагрева образца происходит образование пар носителей заряда (электрон – дырка, положительный ион – отрицательный ион), которые разводятся в разные стороны прикладываемым электрическим полем и накапливаются у границ диэлектрика, на границе раздела фаз, неоднородностях и т.п.

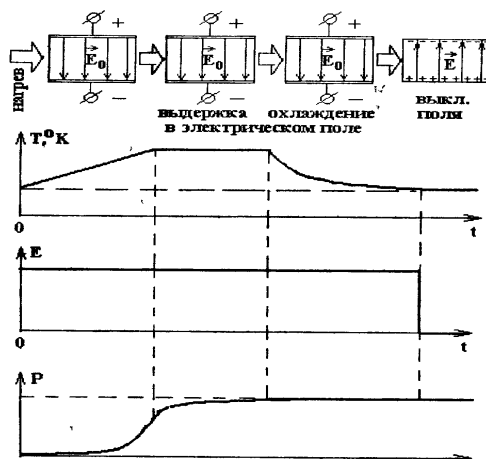


Рис. 4. Схема проведения процесса термоэлектретирования полученных композитных дисков

Часть из них захватывается ловушками – электрически активными дефектами материала (неоднородностями структуры полимера и наполнителя), способными захватывать и удерживать носитель заряда, что способствует образованию объемно-зарядовой поляризации. Помимо этого, частицы полярного наполнителя ориентируются в матрице по внешнему полю и после снятия напряжения «вмерзают» в полимер, что приводит к появлению дипольной поляризации.

Измерение электрических параметров проводили компенсационным методом с использованием динамического конденсатора по ГОСТ 25209-82 на трех участках поверхности дисков [8]. Полученные экспериментальные данные усреднялись. На рис. 5 в виде диаграммы представлены результаты эксперимента по определению поверхностного потенциала электретных дисков.

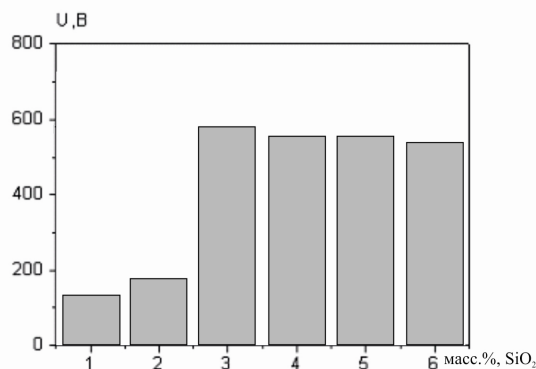


Рис. 5. Зависимость величины поверхностного потенциала композитных дисков в зависимости от концентрации дисперсного наполнителя (SiO₂)

Необходимо заметить, что чистый полипропилен проявляет слабые электретные свойства с небольшим временем релаксации (несколько часов) и величиной поверхностного потенциала около 0,15 кВ [9].

Из анализа диаграммы видно, что даже незначительное введение наполнителя способствует существенному увеличению электретных свойств исходного материала. Наибольшее влияние наполнителя наблюдается при его концентрации 3 масс. %.

Таким образом, проведенное исследование показало, что введение в изотактический полипропилен нанодисперсного диоксида кремния в небольших количествах существенно увеличивает термостабильность и электретные свойства получаемых композитов, причем наилучший результат наблюдается при 3 масс.% содержании дисперсного наполнителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang D. PVDF/SiO₂ hybrid composite electret films and effects / D. Yang, W. Bai, Z. Wu et al. // 9th International Symposium on Electrets (ISE 9) Proceedings. 1996. P. 33-41.
2. Ni H. Desalination by electret technology / H. Ni, R. Amme, Y. Jin // Desalination. 2005. V.174. P. 237-245.

3. Щербаченко Л.А. Электретный эффект и процессы электропереноса в дисперсных системах органического и неорганического происхождения / Л.А. Щербаченко, В.С. Борисов, Е.С. Барышников и др. // Журнал Технической физики. 2009. Т. 79. вып. 9. С. 129-136.
4. Макаревич А.В. Электрические поля и электроактивные материалы в биологии и медицине / А.В. Макаревич, Л.С. Пинчук, В.А. Гольдаде. Гомель: ИММС НАНБ, 1998. 106 с.
5. Кулин Е.Т. Биоэлектретный эффект / Е.Т. Кулин. Минск: Наука и техника, 1980. 216 с.
6. Гороховатский Ю.А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков / Ю.А. Гороховатский, Г.А. Бордовский. М.: Наука, 1991. 248 с.
7. Гороховский А.В. Получение синтетического серпентинита. Оптические и трибологические характеристики олеофильных дисперсий / А.В. Гороховский, О.А. Смирнова, А.С. Азаров, В.В. Сафонов, Е.В. Третьяченко, В.Г. Гоффман, А.А. Шиндров, Т.Н. Колбасина // Вестник СГТУ. 2012. № 4. С. 85-90.
8. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей) / Г.И. Сканави. М.: Гостехиздат, 1949. 500 с.
9. Темнов Д.Э. Стабильность электретного состояния пленок полипропилена в зависимости от содержания дисперсного наполнителя (аэросил) / Д.Э. Темнов, Е.Е. Фомичева // Научные и научно-педагогические кадры инновационной России. 2010. С. 93-98.
10. Кособудский И.Д. Исследование фазового состава и некоторых свойств наноразмерных частиц железа в матрице п-парафина (докозана) / И.Д. Кособудский, В.В. Севостьянов, Г.Ю. Юрков // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2000. № 1. С. 135-139.

Васильков Михаил Юрьевич – аспирант кафедры «Химия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail Yu. Vasilkov – Postgraduate Department of Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бусыгина Елена Андреевна – магистр кафедры «Химия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena A. Busygina – Master Programme Student Department of Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Никитина Людмила Владимировна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ludmila V. Nikitina – Ph. D., Associate Professor Department of Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Кособудский Игорь Донатович – доктор химических наук, профессор кафедры «Химия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor D. Kosobudsky – Dr. Sc., Professor Department of Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.03.14, принята к опубликованию 20.06.14

УДК 541.13

Е.С. Гусева, А.Р. Жускеев, С.С. Попова

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ MnO_2 -ЭЛЕКТРОДА В РАСТВОРАХ МОЛИБДАТОВ И ВОЛЬФРАМАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Работа посвящена исследованию электрохимического наноструктурирования полимерных слоев гетероядерных гидроксосоединений молибдена и вольфрама на MnO_2 -электроде при катодной обработке в водных растворах молибдатов и вольфраматов щелочных металлов. Установлено протекание на MnO_2 -электроде в растворах в растворах Na_2MoO_4 и Li_2WO_4 двух процессов электрохимического интеркалирования, которым предшествует электрохимическая адсорбция полиядер-

ных комплексов молибдат- $\text{NaMo}_7\text{O}_{24}^{5-}$ и вольфрамат-ионов $\text{LiW}_7\text{O}_{24}^{5-}$. Результаты электрохимических измерений согласуются с результатами измерения бестокового потенциала рентгенофлуоресцентного анализа и оптической микроскопии.

Диоксидмарганцевый электрод, водные растворы молибдатов и вольфраматов щелочных металлов, интеркалирование, структурирование

E.S. Guseva, A.R. Zhuskeev, S.S. Popova

ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF MnO_2 – ELECTRODES IN MOLYBDATE SOLUTIONS AND ALKALI METAL TUNGSTATES

The paper presents the research into electrochemical nanostructuring of polymer layers in hetero-nuclear hydroxycompounds of molybdenum and tungsten on the MnO_2 -electrode under the cathode treatment in aqueous solutions of alkali metal molybdates and tungstates. The focus is made on two electrochemical intercalation processes on the MnO_2 -electrode in Na_2MoO_4 and Li_2WO_4 solutions after electrochemical adsorption of molybdate- $\text{NaMo}_7\text{O}_{24}^{5-}$ and tungstate-ions $\text{LiW}_7\text{O}_{24}^{5-}$ polynuclear complexes. The results of electrochemical measurements were confirmed by the data of the currentless potential measurements, the X-ray fluorescence analysis, and optical microscopy.

Dioxide manganese electrode, aqueous solutions of alkali metals molybdates and tungstates, intercalation, structuring

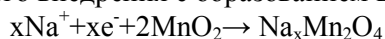
Введение

В последние годы резко повысился интерес к созданию наноматериалов и нанотехнологий. Переход в наноразмерное состояние сопровождается изменением фундаментальных свойств вещества. При достижении размера частиц до $10^3 \dots 10^4$ нм изменяются коэффициент диффузии и электропроводность, снижение температуры плавления можно обнаружить при размере частиц 10-100 нм. Размерные эффекты становятся предметом самого пристального внимания всех, кто работает в области материаловедения, в связи с возможностью изменять физические и химические свойства твердых веществ. В результате целенаправленного воздействия на поверхность электродов путем механической, химической, электрохимической обработки удается изменять их электродные свойства.

Целью настоящей работы было исследование возможности электрохимического модифицирования MnO_2 – электрода путем катодной обработки в водных растворах вольфраматов и молибдатов щелочных металлов. Объектами исследования служили: электроды из диоксида марганца (MnO_2 – 90%, углерод технический печной электропроводный П 267 ГУ 38.11574-86 – 5%, фторопластовая суспензия марки Ф-4Д – 5%), в виде пластин с площадью рабочей поверхности $2,0 \text{ см}^2$ до и после модифицирования их путем катодной обработки в водных растворах вольфрамата лития (0,001 моль/л), и молибдата натрия (0,01; 0,005; 0,0025 моль/л). Поверхность MnO_2 -электрода перед каждым опытом очищали этиловым спиртом и сушили на воздухе в течение 5 минут. В качестве вспомогательного электрода ($S = 4 \text{ см}^2$) использовали титановую пластину, поверхность которой обрабатывали аналогично. Во всех случаях до и после опыта регистрировали бестоковый потенциал Еб/т, устанавливающийся на электроде при разомкнутой цепи. Измерение потенциала осуществляли относительно хлор-серебряного электрода сравнения. Модифицирование MnO_2 -электрода в водном растворе Li_2WO_4 при потенциалах от -2,7 до +0,2 В и соответственно в растворах Na_2MoO_4 от -3,0 до -2,5 В осуществляли путем катодной обработки в потенциостатическом режиме (относительно ХСЭ). Время обработки составляло 30 мин. При потенциале -2,7 В модифицирование проводили в растворах Na_2MoO_4 различных концентраций в течение 1,3 и 5 часов. Графическим методом определяли диффузионную характеристику процесса \sqrt{t} и плотность тока в момент включения поляризации $i(0)$, характеризующую скорость стадии переноса заряда. Кроме того, в заданном интервале потенциалов (от бестокового потенциала до -3,0 В и обратно) снимали потенциодинамические кривые при последовательно возрастающей скорости развертки потенциала $10 \rightarrow 20 \rightarrow 40 \rightarrow 80$ мВ/с. Все исследования по электрохимическому модифицированию MnO_2 -электрода были проведены с помощью потенциостата П-5848. Регистрацию тока и потенциала осуществляли на диаграммную ленту (скорость протяжки ленты 54000 мм/ч) с помощью самопишущего потенциометра КСП-4. Для анализа модифицированных MnO_2 -электродов на содержание молибдена использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр Niton xBT GOEBB.

Экспериментальные данные

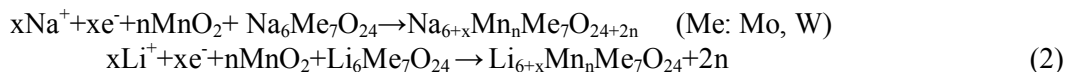
Обработка электродов в циклическом потенциодинамическом режиме в диапазоне потенциалов от бестокового $E_{б/т}$ до $-3,0$ В и обратно с возрастающей скоростью развертки $10 \rightarrow 20 \rightarrow 40 \rightarrow 80$ мВ/с, как показали результаты оптической микроскопии (рис. 1), приводит к образованию двухслойной структуры, в которой нижний слой состоит из строго ориентированных друг относительно друга волокон, на которых формируется второй слой из супрамолекул в виде гексагональной сетки. Если предварительно выдержать электрод в рабочем растворе в течение 1 часа и более при $E_k = -2,7$ В, то степень насыщения верхнего слоя продуктами твердофазных взаимодействий возрастает. Электрическое сопротивление образцов снижается с 36 до 29 и соответственно 23 Ом. Согласно данным рентгенофлуоресцентной спектрометрии, содержание молибдена в составе MnO_2 -электрода после обработки составляет 0,06-0,08 ат.%. Бестоковый потенциал (табл. 1, 2) смещается от $+(0,38 \pm 0,02)$ до $-(0,27 \pm 0,03)$ В. Соответственно при обработке в растворе Li_2WO_4 (табл. 3) от $+(0,47 \pm 0,01)$ до $-(0,09 \pm 0,01)$ В. Известно, что вольфрамат- и молибдат-ионы в водных растворах в области концентраций $0,2 \dots 0,002$ моль/л склонны к полимеризации с образованием полиядерных комплексов типа $[Me_nO_{3n+3}]^{6-}$ или $[HMe_nO_{3n+3}]^{5-}$, где $n = 7$, концентрация которых может достигать 99% (область pH 2-6). Это позволяет объяснить результаты исследований с позиций преобладающего влияния электрохимической адсорбции и последующих твердофазных превращений с образованием в адсорбированном слое оксидных соединений промежуточной валентности: $Me(VI) \rightarrow Me(IV) \rightarrow Me(II)$, имеющих каркасную структуру, по каналам которой свободно движутся катионы щелочных металлов [2, 3]. В поверхностном слое, таким образом, накапливается большое количество свободных катионов щелочного металла (натрия, лития), которые за счет градиента концентрации перемещаются в глубь электрода к границе с исходным MnO_2 , где разряжаются по механизму катодного внедрения с образованием шпинели $Na_xMn_2O_4$:



или соответственно



Протекание на MnO_2 -электроде в растворе Na_2MeO_4 (Li_xMeO_4) двух различных процессов, которым предшествует электрохимическая адсорбция полиядерных комплексов $NaMe_7O_{24}^{5-}$ ($LiMe_7O_{24}^{5-}$), подтверждается результатами измерения бестокового потенциала и рентгенофлуоресцентного анализа. Предполагаемый механизм второго процесса, связанного с электрохимической адсорбцией полиядерных комплексов молибдена или вольфрамата с диоксидом марганца можно представить следующим уравнением:



На кривых $i-t$ MnO_2 -электрода в растворе $0,001$ М Li_2WO_4 (рис 2) при потенциалах $E = -2,7 \dots +0,4$ В и в растворе $0,01$ М Na_2MoO_4 (рис 4) в области потенциалов $-3,0 \dots -2,5$ В можно выделить участки спада тока (I), характеризующие процесс диффузии ионов из раствора в поверхностный слой MnO_2 , и участки подъема тока (II), связанные с образованием и ростом слоя продукта внедрения полиметаллат-ионов в структуру MnO_2 . Область минимума (III) отвечает состоянию насыщения поверхностного слоя MnO_2 внедряющимися полианионами.

На стадии I диффузионного спада тока и на стадии II подъема тока, связанного с процессом формирования слоя зародышей новой фазы, а также в области минимума (III) можно наблюдать снижение плотности тока по мере смещения катодного потенциала в область менее отрицательных значений. Анализ зависимости $i(t)$ в координатах $i-\sqrt{t}$ (рис 3, 5) показывает, что она имеет вид прямых с изломом. Экстраполяция $i-\sqrt{t}$ прямых на ось i , таким образом, дает два значения плотности тока при $t = 0$ (табл. 4-6), что указывает на протекание двух электрохимических стадий. Это могут быть реакции внедрения катионов щелочного металла (лития, натрия) и соответственно адсорбции металлат-ионов с последующим образованием в адсорбированном слое оксидных соединений промежуточной валентности: $Me(VI) \rightarrow Me(IV) \rightarrow Me(II)$ [2, 3] в соответствии с уравнениями (1), (2). Диффузионно-кинетические характеристики процессов приведены в табл. 4-6. Как следует из сопоставления данных по величинам $i(t = 0)$, скорости обоих процессов интеркалирования в области потенциалов отрицательнее $-2,5$ В мало различаются по величине и определяющую роль играет диффузия, скорость которой в случае протекания реакции по механизму (1) значительно выше, чем для механизма (2). Это согласуется с высказанным выше положением о преобладающем влиянии диффузии ионов щелочного металла по структуре каналов адсорбированных полиметаллат-ионов.

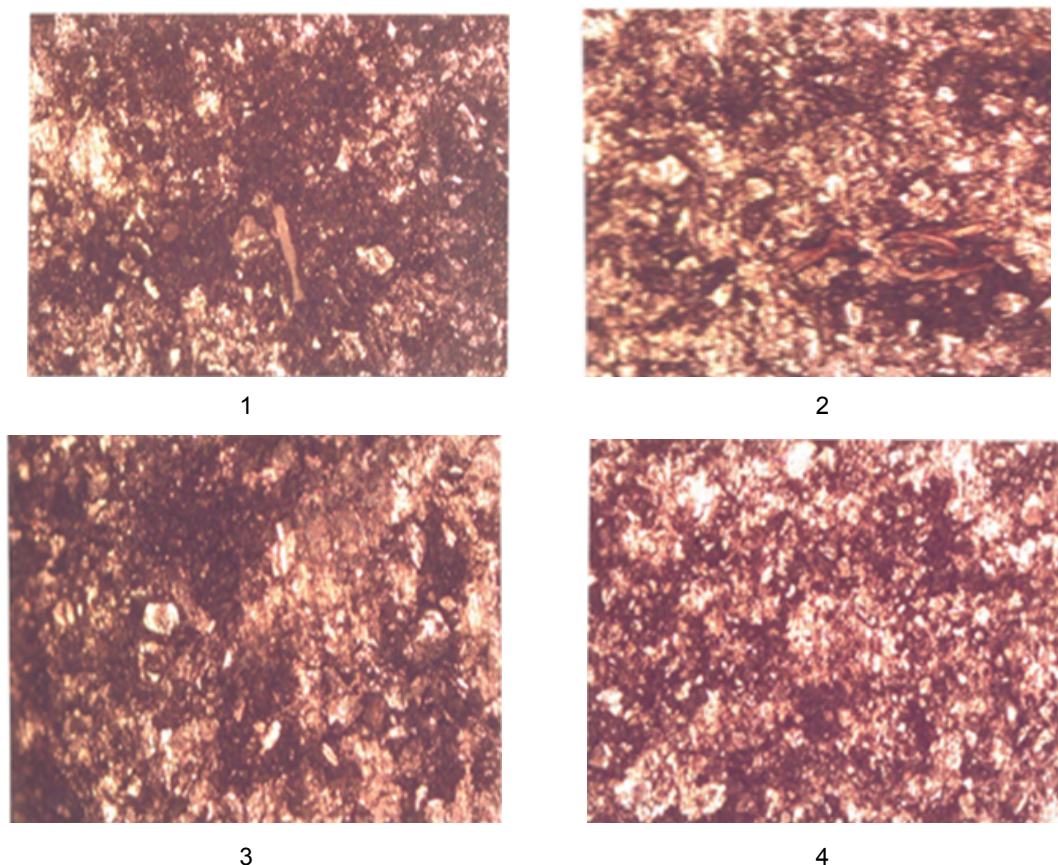


Рис. 1. Микрофотографии поверхности MnO_2 -электрода: 1 – исходного; 2 – после катодной обработки в циклическом потенциодинамическом режиме (с последовательно возрастающей скоростью развертки потенциала $10 \rightarrow 20 \rightarrow 40 \rightarrow 80$ мВ/с в диапазоне от $E_{\text{бт}}$ до -3В и обратно); 3, 4 – дополнительно с предварительной обработкой при потенциале $-2,7\text{В}$ в течение 1 и соответственно 5 часов

Таблица 1

Влияние потенциала катодной обработки $E_{\text{к}}$ на бестоковый потенциал модифицированного MnO_2 -электрода после электрохимической обработки в растворе Na_2MoO_4 0,01 моль/л

Потенциал обработки $E_{\text{к}}$, В	Исходный $E_{\text{бт}}$, В (в момент погружения электрода в раствор)	$E_{\text{бт}}$ после обработки	
		в потенциостатическом режиме ($t_{\text{к}}=30$ мин)	и последующей обработки в потенциодинамическом режиме с возрастающей скоростью развертки потенциала $10 \rightarrow 20 \rightarrow 40 \rightarrow 80$ мВ/с и обратно
-2,5	+0,29	-0,25	-0,28
-2,6	+0,37	-0,32	-0,29
-2,7	+0,33	-0,26	-0,27
-2,8	+0,38	-0,26	-0,30
-2,9	+0,40	-0,22	-0,25
-3,0	+0,39	-0,15	-0,18

Таблица 2

Зависимость бестокового потенциала модифицированного MnO_2 -электрода от концентрации молибдата натрия и времени электрохимической обработки

Время выдержки при $E = -2,7V$, мин	Концентрация Na_2MoO_4 , моль/л	Исходный бестоковый потенциал, $E_{б/т}$, В	$E_{б/т}$ после обработки в потенциостатическом режиме при $E = -2,7 V$; $t = 30$ мин	
			до	И после дополнительной обработки в <u>потенциодинамическом</u> режиме с последовательно возрастающей скоростью развертки потенциала $10 \rightarrow 20 \rightarrow 40 \rightarrow 80$ мВ/с и обратно
0	0,01	+0,4	+0,18	-0,18
60	0,01	+0,36	-0,18	-0,20
40	0,01	+0,38	-0,27	-0,30
30	0,01	+0,33	-0,26	-0,27
30	0,005	+0,38	-0,20	-0,21
30	0,0025	+0,35	-0,23	-0,23

Таблица 3

Зависимость бестоковых потенциалов $E_{б/т}$ модифицированного MnO_2 электрода до и после электрохимической обработки в растворе вольфрамата лития 0,001 моль/л.

$E_{зп}$, В	Исходный бестоковый потенциал, В	Бестоковый потенциал $E_{б/т}$, В после электрохимической обработки	
		при заданном $E_{зп}$ ($t_{зп}=30$ мин)	и последующей обработки в циклическом <u>потенциодинамическом</u> режиме (с последовательно возрастающей скоростью развертки потенциала $10 \rightarrow 20 \rightarrow 40 \rightarrow 80$ мВ/с и обратно) в диапазоне от $E_{б/т}$ до -4 В
-2,7	+0,47	+0,06	-0,18
-0,8	+0,46	+0,22	-0,09
-0,6	+0,48	+0,30	-0,08
-0,4	+0,48	+0,30	-0,08
-0,2	+0,48	+0,32	-0,08
0	+0,48	+0,34	-0,11
+0,4	+0,45	+0,44	-0,11

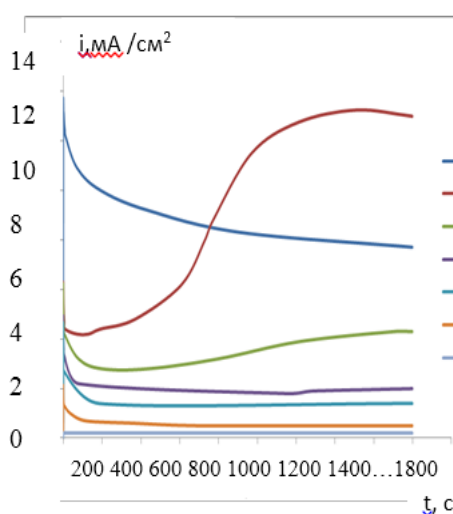


Рис. 2. Влияние потенциала на ход кривых $i-t$ MnO_2 -электрода в растворе вольфрамата лития (0,001 моль/л)

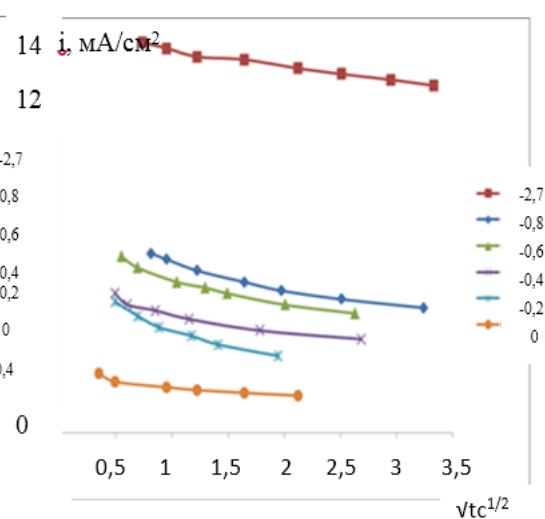


Рис. 3. Участки спада кривых $i-t$ (рис. 1), перестроенные в координатах $i-\sqrt{t}$

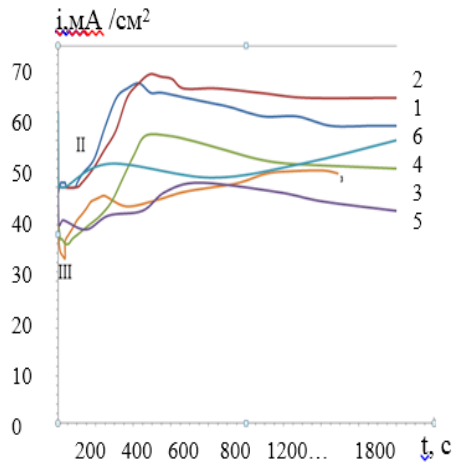


Рис. 4. Кривые $i-t$ катодной обработки MnO_2 электрода в $0,01M Na_2MoO_4$ при $-E, В$: 1 -2,5; 2 -2,6; 3-2,7; 4 -2,8; 5 – 2,9; 6 -3,0

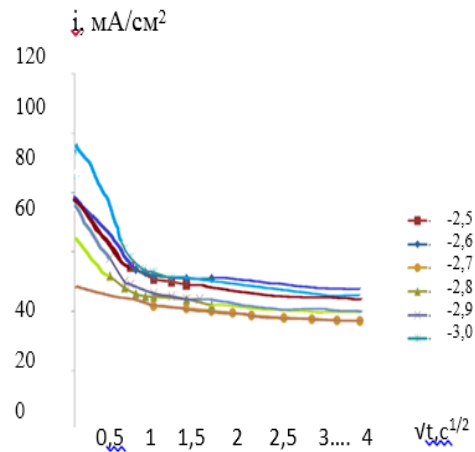


Рис. 5. Зависимость $i-\sqrt{t}$ для MnO_2 электрода в $0,01 M$ растворе Na_2MoO_4 при потенциалах $-2,5 \dots -3,0 В$.

Таблица №4

Влияние величины потенциала обработки на диффузионно-кинетические характеристики процесса внедрения вольфрамата лития в структуру MnO_2 - электрода

Потенциал предварительной обработки $E, В$	$I_{01}, mA/cm^2$	$I_{02}, mA/cm^2$	$\Delta i/\Delta(\sqrt{t})_1$	$\Delta i/\Delta(\sqrt{t})_2$
-2,7	15,5	14	1,03	0,53
-0,8	7,7	6,2	1,46	0,56
-0,6	8	6	2,76	0,69
-0,4	7	4,8	3,60	0,55
-0,2	6	4,5	2,28	0,91
0	3	2	2,10	0,31

Таблица 5

Влияние потенциала обработки на диффузионно-кинетические характеристики MnO_2 электрода в $0,01 M$ растворе Na_2MoO_4

Потенциал катодной обработки $E, В$	$I_{01}, mA/cm^2$	$I_{02}, mA/cm^2$	$\Delta i/\Delta(\sqrt{t})_1$ $mA/cm^2 \cdot c^{1/2}$	$\Delta i/\Delta(\sqrt{t})_2$ $mA/cm^2 \cdot c^{1/2}$
-3,0	86	60	37,6	$4,38 \pm 0,02$
-2,9	76	52	34,6	$5,73 \pm 0,02$
-2,8	60	50	12,5	$4,11 \pm 0,01$
-2,7	45	42	$6,21 \pm 0,03$	$1,14 \pm 0,02$
-2,6	66	56	$13,58 \pm 0,02$	$1,36 \pm 0,02$
-2,5	66	54	$3,41 \pm 0,02$	$4,87 \pm 0,02$

Влияние концентрации раствора Na_2MoO_4 на диффузионно-кинетические характеристики MnO электрода (при $E_k = -2.7\text{В}$, $t_{kp} = 30$ мин)

Концентрация, моль/л		I_{01} , мА/см ²	I_{02} , мА/см ²	$\Delta j/\Delta(\sqrt{t})_1$ мА/ см ² ·с ^{1/2}	$\Delta j/\Delta(\sqrt{t})_2$ мА/ см ² ·с ^{1/2}
Li_2WO_4	Na_2MoO_4				
0,001	-	15±2	14,5±2	1,03±0,02	0,53±0,03
-	0,0025	25±2	13±2	0,34±0,02	0,10±0,03
-	0,005	42±2	37±2	2,23±0,01	0,29±0,03
-	0,010	45±3	40±2	6,21±0,04	1,14±0,04

По мере заполнения поверхности адсорбированными полиметаллат-анионами начинается процесс формирования гетероядерных полимерных образований (рис. 1), накопление ионов $\text{Li}^+(\text{Na}^+)$ на межфазной границе и увеличение скорости их деинтеркалирования при реверсе потенциала.

Заключение

Таким образом, установленные закономерности позволяют объяснить электрохимическое поведение MnO_2 -электрода в растворах вольфраматов и молибдатов щелочных металлов с позиций преобладающего влияния электрохимической адсорбции полиметаллат-ионов на MnO_2 -электроде в соответствии с уравнением $\text{MnO}_2 + \text{Me}'_6(\text{Me}_7\text{O}_{24}) \rightarrow \text{Me}'_x\text{MnO}_2[\text{Me}'_{6-x}(\text{Me}_7\text{O}_{24})]$, где Me' : Li, Na; Me: W, Mo, на твердофазную диффузию катионов щелочных металлов и на скорость последующих твердофазных превращений по механизму интеркалирование – деинтеркалирование с образованием в адсорбционном слое оксидных соединений промежуточной валентности, имеющих каркасную структуру, по каналам которой свободно движутся катионы щелочного металла. Накапливаясь в поверхностном слое, катионы за счет возникающего градиента концентрации перемещаются в глубь электрода к границе с исходным MnO_2 , где интеркалируют в MnO_2 с образованием шпинели $\text{Me}'_x\text{Mn}_2\text{O}_4$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Францев Р.К. Электрохимическое интеркалирование MnO_2 -электрода в апротонных органических растворах солей редкоземельных элементов / Р.К. Францев, С.С. Попова, Е.К. Гусева // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2011. Т. 54. Вып. 5. С. 138-139.
2. Модифицирование марганцем анодных слоев, содержащих оксиды вольфрама / И.В. Лукиничук, В.С. Руднев, В.С. Панин, Т.А. Кайдалова, П.С. Гордиенко // ЖПХ. 2003. Т. 76. Вып. 10. С. 1639-1641.
3. Краснов Ю.С. Кинетика окрашивания электрохромных пленок оксида вольфрама, полученных катодным электроосаждением / Ю.С. Краснов, Г.Я. Колбасов, В.Н. Зайченко // ЖПХ. 2006. Т. 79. Вып. 2. С. 251-256.
4. Бурков К.А. Гидролитическая полимеризация ионов металлов в растворах / К.А. Бурков // Термодинамика и структура гидроксокомплексов в растворах: материалы III Всесоюз. совещания. Ленинград: ЛГУ, 1983. С. 18-35.
5. Спицын В.И. О роли воды в реакциях комплексообразования / В.И. Спицын // Проблемы сольватации и комплексообразования: межвуз. сб. Иваново: ИХТИ, 1978. С. 3-12.

Гусева Екатерина Станиславовна – кандидат химических наук, научный сотрудник кафедры «Технология электрохимических производств» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina S. Guseva – Ph. D., Researcher
Department of Electrochemical Production Technologies,
Engels Technological Institute:
Part of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Жускеев Артем Романович – аспирант кафедры «Технология электрохимических производств» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Artem R. Zhuskeev – Postgraduate
Department of Electrochemical Production Technologies,
Engels Technological Institute:
Part of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Попова Светлана Степановна – доктор химических наук, профессор кафедры «Технология электрохимических производств» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana S. Popova – Dr. Sc., Professor
Department of Electrochemical Production Technologies,
Engels Technological Institute:
Part of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.03.14, принята к опубликованию 20.06.14

УДК 677.4;678.84

Л.В. Корчина, Н.Г. Зубова, Т.П. Устинова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДИФИКАЦИИ ПАН-ЖГУТИКА АППРЕТИРУЮЩИМИ СОСТАВАМИ НА ЕГО СВОЙСТВА

Исследованы механические и адгезионные свойства модифицированного полиакрилонитрильного технического жгутика аппретирующими составами. Анализ приведенных данных свидетельствует о повышении прочностных характеристик модифицированных волокон по сравнению с исходным ПАН-жгутиком. Определены оптимальные параметры модификации волокон.

Модификаторы, полиакрилонитрильный технический жгут, параметры модификации, механические свойства, смачиваемость

L.V. Korchina, N.G. Zubova, T.P. Ustinova

USING FINISHING AGENTS TO INVESTIGATE THE IMPACT OF PAN FLAGELLUM MODIFICATION PARAMETERS ON ITS PROPERTIES

Mechanical and adhesive properties of the modified poly-acrylonitrile technical flagellum are investigated by means of finishing agents. Analysis of the provided data testifies the increase of strength characteristics of modified fibers compared to initial PAN-fibers. Optimum parameters for fiber modifications are determined.

Modifiers, poly-acrylonitrile technical fibers, modification parameters, mechanical properties, wettability

Инновационное развитие отечественной экономики ставит задачи широкого использования химических волокон технического назначения для получения полимерматричных композиционных материалов. Однако данная область их применения требует не только высоких прочностных свойств армирующих волокнистых материалов, но и обеспечения адгезионного взаимодействия в системе матрица-наполнитель, что может быть достигнуто модификацией волокна-наполнителя [1].

В связи с этим целью работы являлось изучение влияния различных модификаторов на прочностные и адгезионные свойства полиакрилонитрильного технического жгутика (ПАН-ТЖ), используемого для армирования эпоксидной матрицы [2, 3].

В работе объектами исследования являлись: 1) полиакрилонитрильный технический жгут (ТУ 6-06-С253-87); 2) модификаторы: Дугон OS 3151(смесь гликолевых эфиров жирных кислот); АГМ-9 (3-аминопропилтриэтоксисилан) (ТУ 6-02-724-77).

Модификацию проводили путем обработки ПАН-ТЖ авиважной ванной, содержащей модифицирующую добавку. На первом этапе эксперимента оценивалось влияние состава модифицирующей ванны и параметров модификации на изменение массы и прочностных характеристик волокна. В связи с этим обработку ПАН-ТЖ аппретирующими добавками проводили при концентрации раствора 2, 5 и 10% и времени обработки 30, 60 и 90 с. После завершения процесса пропитки и сушки образцов ($T_{\text{суш}}=50^{\circ}\text{C}$), их подвергали дополнительной термообработке при температуре 100°C в течение 15 мин.

Анализ полученных экспериментальных данных по изучению эффективности проведенной модификации свидетельствует о том, что в одних и тех же условиях обработки ПАН-ТЖ в значительно большей степени сорбирует компоненты модифицирующей ванны, содержащей Dugon OS 3151, по сравнению с растворами АГМ-9, что подтверждается данными по изменению массы образцов волокна (рис. 1).

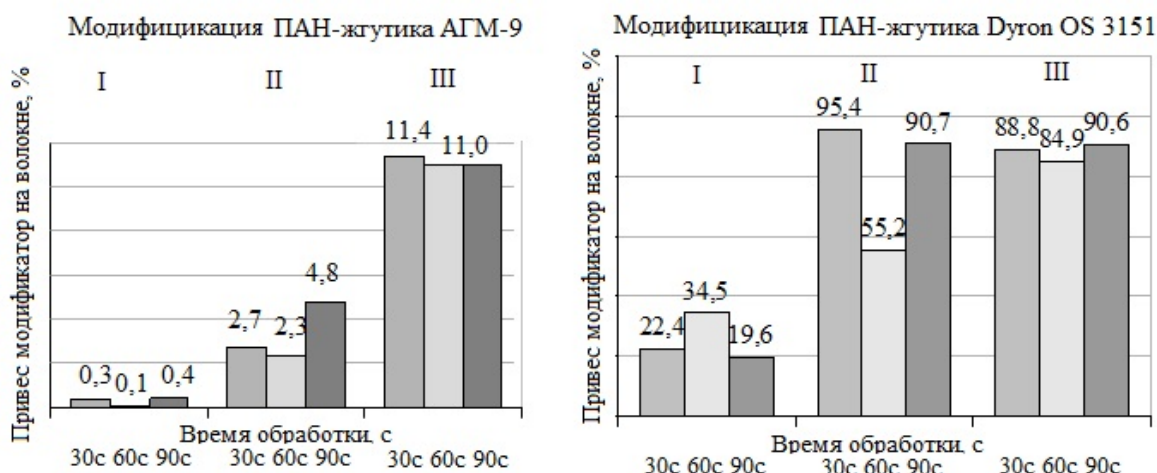


Рис. 1. Изменение массы образцов ПАН-жгутика при концентрации модификаторов в ванне: I – 2%; II – 5%; III – 10%

Данные по оценке прочностных свойств модифицированных нитей (таблица) показывают, что обработка ПАН-жгутика как Dugon OS 3151, так и АГМ-9 способствует повышению его прочностных свойств по сравнению с исходным ПАН-ТЖ, что, очевидно, связано с образованием в процессе модификации пленочного покрытия на поверхности волокна, которое «залечивает» дефекты и микротрещины волокнистого наполнителя.

Зависимость механических свойств модифицированного ПАН-ТЖ от параметров модификации

Время модификации, с	Относительная разрывная нагрузка, сН/текс	Относительное разрывное удлинение, %
Концентрация ванны 2%		
30	<u>55</u>	<u>22</u>
	-	-
	54	20
60	47	17
	<u>55</u>	<u>21</u>
90	-	-
Концентрация ванны 5%		
30	<u>64</u>	<u>24</u>
	52	16
60	64	23
	60	16
90	<u>74</u>	<u>23</u>
	47	18
Концентрация ванны 10%		
30	<u>47</u>	<u>18</u>
	45	19
60	59	23
	50	18
90	<u>59</u>	<u>29</u>
	46	10
Исходный ПАН-жгут	43	16

Примечание: числитель – модификация Dugon OS 3151, знаменатель – модификация АГМ-9.

Из приведенных в таблице данных видно, что наибольшие значения увеличения относительной разрывной нагрузки ПАН-жгутика достигаются при содержании аппрета в пропиточной ванне 5% для обоих модификаторов. Однако при обработке ПАН-ТЖ ванной, содержащей Dugon OS 3151, упрочняющий эффект проявляется в большей степени, что коррелирует с данными по изменению массы образцов волокна (рис. 1). Так, при использовании в качестве модификатора Dugon OS 3151 увеличение относительной разрывной нагрузки достигает 50-70% при изменении массы образцов на 55-90%. При модификации ПАН-жгутика АГМ-9 это изменение не превышает 15-40%, но и масса образцов изменяется только на 2,3-4,8%. Таким образом, из полученных экспериментальных данных следует, что более эффективным аппретирующим компонентом для модификации технического ПАН-жгутика является модификатор Dugon OS 3151.

Выбор продолжительности обработки ПАН-ТЖ модифицирующей ванной, содержащей 5% Dugon OS 3151, определялся, с одной стороны, технологическими требованиями, с другой – необходимостью полноты завершения протекающих при модификации процессов сорбции и диффузии аппрета в объем волокна, и, как следствие, уровнем достигаемых прочностных характеристик и его адгезионными свойствами.

Анализ кинетических кривых смачивания, используемых для косвенной оценки адгезионных свойств в системе эпоксидное связующее/ПАН-жгутик (рис. 2), показывает, что обработка волокнистого наполнителя модифицирующей ванной, содержащей Dugon OS 3151, снижает его смачиваемость раствором эпоксидного олигомера. Однако при содержании аппрета в ванне – 5% и продолжительности обработки 60 с это снижение минимально: если у исходного ПАН-ТЖ максимальная высота поднятия жидкости составляет 53,7 мм, то у модифицированного Dugon OS 3151 в указанных условиях волокна она равна 49,0 мм.

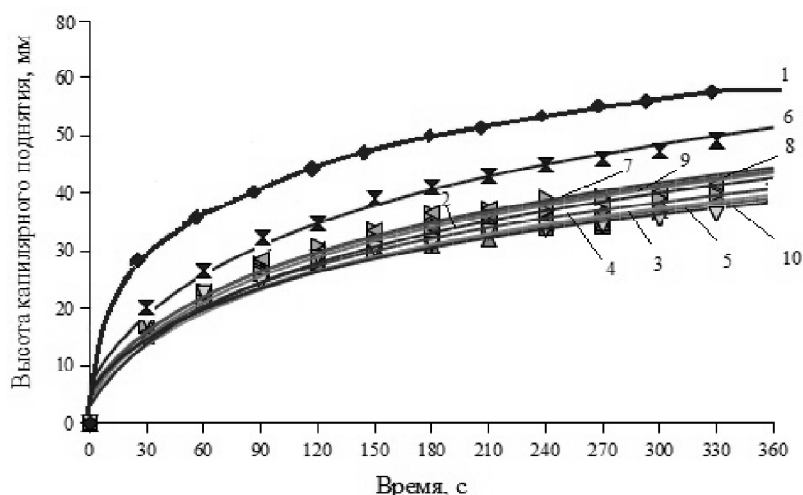


Рис. 2. Кинетические кривые смачивания раствором эпоксидного олигомера модифицированного при различных концентрациях Dugon OS 3151 и продолжительности обработки ПАН-жгутика: 1 – без обработки (53,7 мм); 2 – 2%, 30 с (38,8 мм); 3 – 2%, 60 с (34,3 мм); 4 – 2%, 90 с (34,6 мм); 5 – 5%, 30 с (35,8 мм); 6 – 5%, 60 с (49,0 мм); 7 – 5%, 90 с (39,8 мм); 8 – 10%, 30 с (41,6 мм); 9 – 10%, 60 с (39,1 мм); 10 – 10%, 90 с (35,5 мм)

В результате, учитывая, что увеличение времени модификации до 90 с затрудняет проведение процесса по непрерывной технологии, а его снижение до 30 с является недостаточным для достижения модифицирующего эффекта, обработку ПАН-ТЖ аппретирующими составами предложено проводить в течение 60 с.

Таким образом, проведенный анализ влияния состава модифицирующей ванны и продолжительности обработки волокна на его физико-механические и адгезионные свойства позволил определить оптимальные параметры модификации исследуемыми аппретами технического ПАН-жгутика, используемого для армирования эпоксидной матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Функциональные наполнители для пластмасс / под ред. М. Ксантоса; пер. с англ. под ред. В.Н. Кулезнева. СПб.: Научные основы и технологии. 2010. 462 с.
2. Зубова Н.Г. Оценка структурных особенностей и эксплуатационных свойств эпоксидных композитов на основе химических волокон / Н.Г. Зубова, Т.П. Устинова, С.Г. Кононенко // Пластические массы. 2012. № 1. С. 46-48.

3. Зубова Н.Г. Изучение свойств модифицированных ПАН-волокон и эпоксипластов на их основе / Н.Г.Зубова, Т.П.Устинова, Л.В. Корчина // Современные проблемы науки о полимерах: материалы VII Санкт-Петербургской конференции молодых ученых с международным участием. СПб.: ИВС РАН, 2011. С. 64.

Корчина Лилия Венеровна – аспирант кафедры «Химическая технология» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Liliya V. Korchina – Postgraduate
Department of Electrochemical Production Technologies,
Engels Technological Institute:
Part of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Зубова Наталья Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nataliya G. Zubova – Ph. D., Associate Professor
Department of Processes and Devices for Chemical Technologies,
Balakovo Institute of Engineering, Technologies and Management,
Part of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Устинова Татьяна Петровна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая технология» Энгельсского технологического института (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatiana P. Ustinova – Dr. Sc., Professor
Head: Department of Electrochemical Production Technologies,
Engels Technological Institute:
Part of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.04.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 678. 5/6 : 677.4:538.12

В.Н. Студенцов, И.В. Пятаев

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ СВЧ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТЕРМОПЛАСТОВ И РЕАКТОПЛАСТОВ

Дана оценка линейных скоростей и частот колебаний олигомерных молекул и структурных элементов макроцепей полимеров. Экспериментально показано, что кратковременная предварительная обработка материала колебательным воздействием с частотой, близкой к частоте собственных колебаний структурных элементов, обеспечивает повышение прочностных характеристик образцов, полученных из обработанных материалов.

Физическая модификация, СВЧ, термопласты

V.N. Studentsov, I.V. Pyataev

IMPACT OF ELECTROMAGNETIC SUPER-HIGH FREQUENCY OSCILLATIONS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THERMOPLASTIC AND THERMOSETTING MATERIALS

The presented assessment data relate for the linear speeds and frequencies of fluctuations to oligomeric molecules and structural elements of polymer macrochains. Experiments showed that preliminary short-term treatment of materials affected by oscillations with the

frequency near its own frequency of structural elements fluctuations, provides an increase in strength characteristics of the samples fabricated from processed materials.

Physical modification, microwave, thermolayers

Известно влияние кратковременной предварительной обработки препрега электромагнитным излучением СВЧ на кинетику отверждения связующего [1]. Кратковременную предварительную обработку исходного термопласта электромагнитным излучением СВЧ можно применять также для предварительного нагрева исходного материала и для регулирования характеристик изделий в технологии изделий из термопластов [2, 3]. В принципе, такая обработка является экономичным приемом для нагрева исходных материалов и для регулирования свойств получаемых изделий.

Обработка электромагнитными колебаниями СВЧ относится к физическим методам модификации полимерных композиционных материалов (ПКМ). Применение излучений СВЧ в электротехнологических процессах (микроволновые технологии) и для модификации материалов является одним из основных направлений современной технологии [4].

Под влиянием физических колебательных воздействий, как и при нагревании, повышается подвижность структурных элементов полимера то есть по существу такие воздействия эквивалентны повышению температуры.

Наибольшего эффекта от применения колебательных воздействий следует ожидать при совпадении частоты внешнего воздействия с частотой собственных колебаний структурных элементов макроцепей.

Собственные колебания структурных единиц макроцепей

Теоретически частоту собственных колебаний частиц при абсолютной температуре T можно оценить как

$$\nu_{\text{св}} = kT/h, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка [5].

Если полную энергию kT частиц (структурных элементов) считать механической кинетической энергией, то можно оценить их максимальные линейные скорости движения при свободных колебаниях.

При температурах от нескольких десятков до двухсот $^{\circ}\text{C}$ собственные частоты $\nu_{\text{св}}$ являются величинами порядка 10^{11} – 10^{12} Гц (табл. 1). Однако в конденсированной среде полимеров частоты собственных колебаний сильно зависят от массы частиц и их взаимодействий друг с другом. Снижение частоты колебаний в реальных полимерах можно учесть введением экспоненты, содержащей эффективную энергию активации диффузионных процессов, которая составляет около 10-20 кДж/моль. Ограниченные таким образом частоты колебаний снижаются до величин 10^5 – 10^{10} Гц (табл. 2).

Таблица 1

Частоты собственных свободных колебаний $\nu_{\text{своб}}$ и максимальные линейные скорости движения свободных колебаний $u_{\text{своб}}$ структурных элементов полимерных макроцепей при различных температурах

Формула	Масса, УЕМ*	Масса, кг	T, К	$\nu_{\text{своб}} \text{ C}^{-1}$ кТ/h	$h\nu = kT$, Дж/частица	$2h\nu/m$ M^2/c^2	$u_{\text{своб}}$, м/с
Метильная группа в составе сложной эфирной группы O=C-O-CH ₃	15	$2,5 \cdot 10^{-26}$	6	$1,3 \cdot 10^{11}$	$8,3 \cdot 10^{-23}$	$2,58 \cdot 10^3$	51
$(\text{CH}_2)_3$ в ПЭ ^{2*} , ПКА ^{3*}	42	$7 \cdot 10^{-26}$	153	$3,2 \cdot 10^{12}$	$2,1 \cdot 10^{-21}$	$6,0 \cdot 10^4$	245
-OCH ₂ -CH ₂ O- в ПЭТФ ^{4*}	60	10^{-25}	233	$4,9 \cdot 10^{12}$	$3,2 \cdot 10^{-21}$	$6,4 \cdot 10^4$	253
 O=C-O-CH ₃	59	$9,8 \cdot 10^{-26}$	293	$6,2 \cdot 10^{12}$	$4,0 \cdot 10^{-21}$	$8,0 \cdot 10^4$	280
OC-C ₆ H ₅ -COOC ₂ H ₄ O	192	$3,2 \cdot 10^{-25}$	353	$7,4 \cdot 10^{12}$	$4,9 \cdot 10^{-21}$	$3,0 \cdot 10^4$	175
-CH ₂ -C-CH ₃ COOCH ₃	100	$1,7 \cdot 10^{-26}$	373	$7,8 \cdot 10^{12}$	$5,2 \cdot 10^{-21}$	$6,2 \cdot 10^4$	250

УЕМ – углеродная единица массы; ^{2}ПЭ – полиэтилен; ^{3*}ПКА – поликапроамид; ^{4*}ПЭТФ – полиэтилентерефталат

Поглощение подводимой извне энергии максимально при совпадении собственной частоты молекул с частотой внешнего воздействия

$$\nu = kT / h. \quad (2)$$

Например, если образец полимерного материала подвергать переменной механической нагрузке с определённой частотой при различных температурах, то максимальные потери механической энергии (максимальный угол сдвига фаз между усилием и деформацией) наблюдаются при такой температуре, при которой период релаксации совпадает с продолжительностью действия силы, то есть когда внешняя сила наиболее эффективно расходуется на принудительное перемещение сегментов в направлении действующей силы (рис. 1).

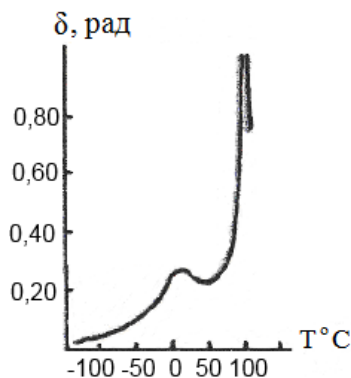


Рис. 1. Зависимость угла механических потерь δ от температуры при воздействии на образец полиметилметакрилата переменной деформирующей силы

Так как в полимерах существует спектр времён релаксации, соответствующий различным релаксационным процессам, наряду с главным максимумом потерь могут появиться другие максимумы. Например у полиметилметакрилата (рис. 1) главный максимум потерь появляется при температуре около 100°C и обусловлен затратой энергии на принудительное перемещение сегментов основной цепи. При понижении температуры движение сегментов затормаживается и потери, характеризуемые углом сдвига фаз δ , резко падают. В застеклованном полиметилметакрилате сохраняются и другие виды теплового движения в макромолекулах, в том числе вращение эфирных боковых групп вокруг связи С-С, соединяющей боковую группу с основной цепью. Время, необходимое для вращения эфирных групп, то есть время их релаксации, экспоненциально возрастает с понижением температуры и около 20°C становится равным одной секунде, то есть может совпасть со временем действия силы. В результате на кривой $\delta - T$ появляется второй максимум гораздо более широкий, чем основной максимум при 100 °C. При охлаждении ПММА до -267 °C может появиться незначительный по величине третий максимум, если при этой температуре частота вращения метильных групп в эфирной группе вокруг связи С-О совпадает с частотой действующего механического напряжения [6].

Таблица 2

Частоты собственных колебаний $\nu_{\text{орг}}$ и максимальные линейные скорости движения ограниченных колебаний $U_{\text{орг}}$ структурных элементов полимерных макроцепей при различных температурах

Формула	Масса, УЕМ	Масса, кг	T, К	$\nu_{\text{орг}} \text{ с}^{-1}$ кТ/h	hν, Дж кТ	$2h\nu/m$ $\text{м}^2/\text{с}^2$	$U_{\text{орг}}, \text{ м/с}$
$(\text{CH}_2)_3$ в ПЭ ^{2*} , ПКА ^{3*}	42	$7 \cdot 10^{-26}$	153	$4,03 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^{-28}$	$0,77 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-2}$
$-\text{OCH}_2 \text{CH}_2 \text{O}-$ в ПЭТФ ^{4*}	60	10^{-25}	233	$1,55 \cdot 10^8$	$1,03 \cdot 10^{-25}$	2,06	1,44
$\begin{array}{c} \\ \text{O}=\text{C}-\text{O}-\text{CH}_3 \end{array}$	59	$9,8 \cdot 10^{-26}$	293	$1,7 \cdot 10^9$	$1,13 \cdot 10^{-24}$	23	4,8
$\text{OC}-\text{C}_6\text{H}_5-$ $\text{COOC}_2\text{H}_4\text{O}$	192	$3,2 \cdot 10^{-25}$	353	$8,1 \cdot 10^9$	$5,37 \cdot 10^{-24}$	33,6	5,8
$-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_3$ COOCH_3	100	$1,66 \cdot 10^{-26}$	373	$1,2 \cdot 10^{10}$	$7,96 \cdot 10^{-24}$	95,86	9,8

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что частоты и линейные скорости связанных частиц значительно меньше аналогичных характеристик свободных частиц. Частоты колебаний определённых связанных частиц находятся в интервале значений, характерных для различных колебательных воздействий – УЗ или СВЧ.

Собственные колебания олигомерных молекул

Таблица 3

Линейные скорости олигомерных молекул $U_{\text{ол.диф}}$ и соответствующие им частоты собственных колебаний олигомерных молекул $\nu_{\text{собст.}}$ при диффузии в процессе отверждения (130°C)

m, аем	m, кг	$U_{\text{ол.диф}}$ м/с	$mv^2/2$ Дж	$\nu_{\text{собст.}}$ Гц
400	$6,64 \cdot 10^{-25}$	10^{-8}	$3,32 \cdot 10^{-41}$	$0,5 \cdot 10^{-7}$
500	$8,3 \cdot 10^{-25}$	10^{-9}	$4,15 \cdot 10^{-43}$	$0,6 \cdot 10^{-9}$
600	$1 \cdot 10^{-24}$	10^{-9}	$0,5 \cdot 10^{-42}$	$0,7 \cdot 10^{-9}$

Проведённые кинетические и структурные исследования позволили оценить линейные скорости диффузии олигомерных молекул (10^{-8} - 10^{-9} м/с) и линейные скорости распространения фронта реакции отверждения ($2 \cdot 10^{-11}$ - $5 \cdot 10^{-12}$ м/с). Изучение изменения сетчатой структуры реактопластов в процессе отверждения показало, что скорость изменения линейных размеров неотверждённых участков ν находится в широком интервале значений 10^{-8} - $5 \cdot 10^{-12}$ м/с [7]. Глубокое отверждение протекает в диффузионной области, поэтому приведённые значения скорости можно считать линейными скоростями диффузии $U_{\text{ол.диф}}$ олигомерных молекул.

При значениях $U_{\text{ол.диф}} = 10^{-8}$ - 10^{-9} м/с (табл. 3). кинетическая энергия олигомерных молекул столь мала, что практически не может вызывать заметных колебаний ($\nu_{\text{собст.}}$ порядка 10^{-7} - 10^{-9} Гц).

Таблица 4

Оценка масс структурных элементов, возбуждаемых внешним колебательным воздействием

Тип колебаний	ν , Гц	$h\nu$, Дж	λ , м	u^* , м/с	M, кг
УЗ	$1,2 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^{-29}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	10^{-8}	$1,6 \cdot 10^{-12}$
УЗ	$1,2 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^{-29}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	10^{-9}	$1,6 \cdot 10^{-10}$
УЗ	$1,2 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^{-29}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-7}$
УЗ	$1,2 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^{-29}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-6}$
СВЧ	$2,4 \cdot 10^9$	$15,9 \cdot 10^{-25}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	10^{-8}	$3,18 \cdot 10^{-6}$
				$3 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^{-39}$
СВЧ	$2,4 \cdot 10^9$	$15,9 \cdot 10^{-25}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	10^{-9}	$3,18 \cdot 10^{-6}$
				$3 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^{-39}$
СВЧ	$2,4 \cdot 10^9$	$15,9 \cdot 10^{-25}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-3}$
				$3 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^{-39}$
СВЧ	$2,4 \cdot 10^9$	$15,9 \cdot 10^{-25}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$
				$3 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^{-39}$
УФИ	10^{15}	$6,63 \cdot 10^{-19}$	$3 \cdot 10^{-7}$	10^{-8}	$13,26 \cdot 10^{-3}$
				$3 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{-53}$
УФИ	10^{15}	$6,63 \cdot 10^{-19}$	$3 \cdot 10^{-7}$	10^{-9}	$13,26 \cdot 10^{-1}$
				$3 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{-53}$

* над чертой собственная линейная скорость олигомерной молекулы, под чертой – линейная скорость частиц излучения ν λ .

Излучения, применяемые при физической модификации, служат дополнительным источником энергии. Для оценки эффективности методов физической модификации представляет интерес определение массы структурных элементов материала, которые могут перемещаться с указанными выше линейными скоростями под действием используемых излучений (табл. 4) при условии полного преобразования энергии излучения в кинетическую энергию частиц материала

$$h\nu = mv^2/2. \quad (3)$$

Таким образом, получены два ряда масс: массы частиц связующего, перемещающихся под действием излучения с наблюдаемыми скоростями, и массы частиц, перемещающихся со скоростью излучения. Второй ряд имеет реальный смысл для оценки скорости движения части в объёме материала при использовании УЗ и СВЧ, так как полимерные материалы проницаемы для этих воздей-

вий. Изученные материалы практически не проницаемы для УФИ, поэтому УФИ может ускорять движение частиц только в поверхностном слое материала. В целом массы частиц, приводимых в движение излучением, видимо, занимают промежуточное положение между двумя рассмотренными предельными случаями.

Анализ полученных результатов показал: энергии изученных излучений вполне достаточно для приведения в движение частиц значительно более крупных, чем олигомерные молекулы; наиболее высокоэнергетическим является УФИ, однако массы частиц, приводимых в движение УФИ, явно завышены, так как полимеры мало проницаемы для столь высокочастотных излучений.

Таблица 5

Влияние температуры на частоты колебаний связанных частиц, то есть частоты, ограниченные наличием химических связей

t □ С	T, К	$\nu_{\text{своб}} \text{C}^{-1}$ кТ/ч	RT, Дж/моль	$U = e^{-E/RT}$ при E= 20000 Дж/моль	lnU	lgU	$\lg(\nu_{\text{огр.}} \text{C}^{-1})$ (кТ/ч)*U
-267	6	$1,3 \cdot 10^{11}$	50	10^{-174}	-400,0	-174	$1,3 \cdot 10^{-163}$
-120	153	$3,2 \cdot 10^{12}$	1270	$1,26 \cdot 10^{-7}$	-15,8	-6,9	$4,03 \cdot 10^5$
-40	233	$4,9 \cdot 10^{12}$	1934	$3,16 \cdot 10^{-5}$	-10,3	-4,5	$1,55 \cdot 10^8$
20	293	$6,2 \cdot 10^{12}$	2432	$2,75 \cdot 10^{-4}$	-8,2	-3,56	$1,7 \cdot 10^9$
30	303	$6,4 \cdot 10^{12}$	2515	$3,5 \cdot 10^{-4}$	-7,95	-3,46	$2,2 \cdot 10^9$
50	323	$6,8 \cdot 10^{12}$	2681	$5,7 \cdot 10^{-4}$	-7,46	-3,24	$3,9 \cdot 10^9$
70	343	$7,2 \cdot 10^{12}$	2847	$8,9 \cdot 10^{-4}$	-7,02	-3,05	$6,4 \cdot 10^9$
80	353	$7,4 \cdot 10^{12}$	2930	$1,1 \cdot 10^{-3}$	-6,8	-2,96	$8,1 \cdot 10^9$
90	363	$7,6 \cdot 10^{12}$	3013	$1,3 \cdot 10^{-3}$	-6,64	-2,89	$9,9 \cdot 10^9$
100	373	$7,8 \cdot 10^{12}$	3096	$1,52 \cdot 10^{-3}$	-6,5	-2,82	$1,2 \cdot 10^{10}$
120	393	$8,2 \cdot 10^{12}$	3262	$2,2 \cdot 10^{-3}$	-6,13	-2,66	$1,8 \cdot 10^{10}$
150	423	$8,9 \cdot 10^{12}$	3511	$3,3 \cdot 10^{-3}$	-5,70	-2,48	$2,9 \cdot 10^{10}$
210	483	$1,0 \cdot 10^{13}$	4009	$6,8 \cdot 10^{-3}$	-4,99	-2,17	$6,8 \cdot 10^{10}$
20	293	$6,2 \cdot 10^{12}$	2432	$5 \cdot 10^{-15}$ E=80000	-32,9	-14,3	$3,1 \cdot 10^{-2}$

Результаты, приведённые в табл. 2, полностью совпадают с результатами расчетов, приведёнными в табл. 5. Частоты ограниченных колебаний диффундирующих частиц растут с увеличением температуры (табл. 5), при этом ограничивающим фактором является эффективная энергия активации $E = 20000$ Дж/моль процессов отверждения, протекающих в диффузионной области. Увеличение ограничивающего фактора до $E = 80000$ Дж/моль (это значение эффективной энергии активации процесса отверждения, протекающего в кинетической области) снижает частоту до значения $\nu_{\text{огр.}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$, то есть до нулевой частоты. Отсюда следует, что излучение СВЧ должно быть эффективным для ускорения диффузионных процессов при отверждении смол.

В рассмотренных системах отсутствуют структурные единицы, которые могли бы резонировать с УФИ.

УЗ колебания $\nu = 10^5 \text{ c}^{-1}$ могут ускорять процессы с участием фрагментов $(\text{CH}_2)_3$, а излучение СВЧ - процессы с участием сложных эфирных групп (табл. 2).

Величина частоты собственных свободных колебаний $\nu_{\text{своб}}$ частиц растёт с увеличением температуры (рис. 2) и в рассматриваемом температурном интервале находится в пределах $10^{12} - 10^{13} \text{ c}^{-1}$. Указанные значения весьма велики и относятся к частицам, находящимся в вакууме. При расчёте частот собственных колебаний по соотношению (1) не учитываются влияние окружающей среды и наличие физических и химических связей с участием рассматриваемых частиц, то есть не учитываются факторы, приводящие к снижению частот колебаний реальных частиц, входящих в состав полимеров. Ограничивающие факторы можно учесть, умножая расчётное значение частоты колебаний на экспоненту закона Аррениуса (табл. 5). Полученные таким образом значения $\nu_{\text{огр}}$ также растут с увеличением температуры (рис. 2) и находятся в интервале $10^6 - 10^{10} \text{ c}^{-1}$.

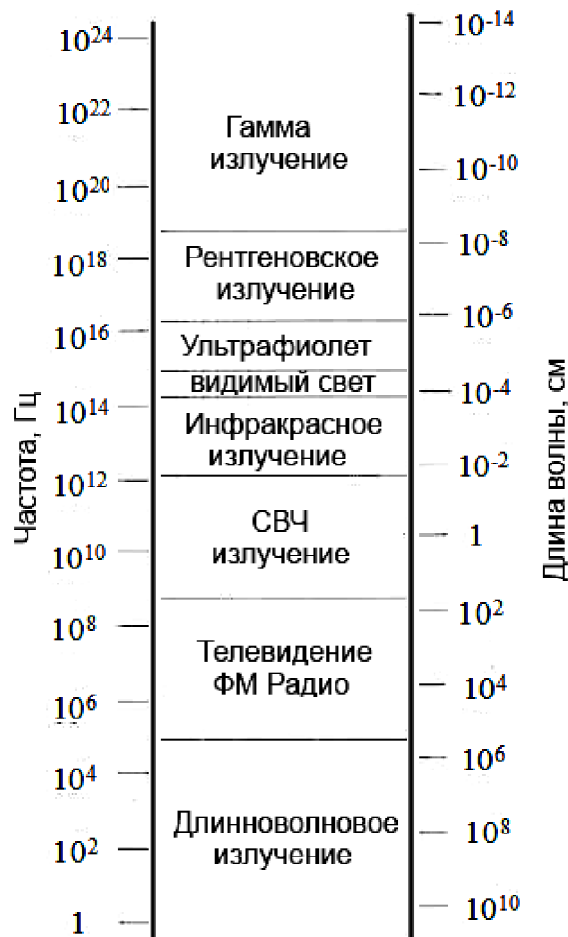
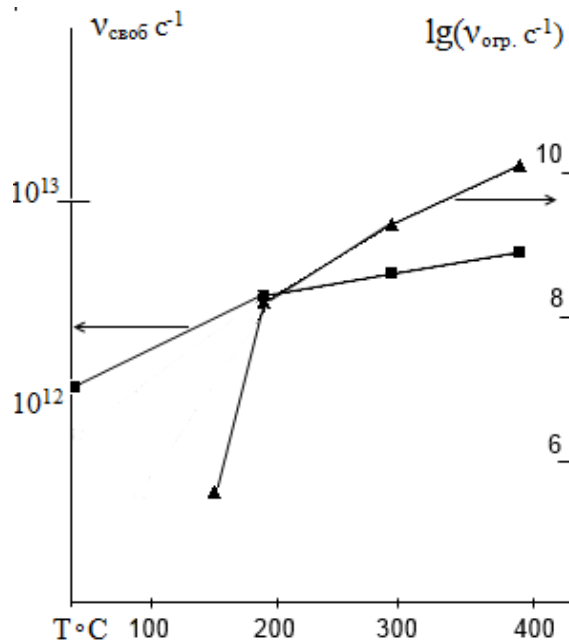


Рис. 1. Шкала частот и длин волн электромагнитных излучений

Рис. 2. Зависимости частот $\nu_{\text{своб}}$ (■) и $\nu_{\text{огр}}$ (▲) от температуры T

Результаты эксперимента, подтверждающие изложенную теорию

Частоте СВЧ-колебания порядка 10^9 Гц в указанном температурном интервале соответствуют собственные ограниченные частоты групп $(\text{CH}_2)_2$ в полиэтилентерефталате, групп $(\text{CH}_2)_2$ в полиэти-

лене и групп $(\text{CH}_2)_5$ в поликапроамиде (найлон 6). Кратковременная предварительная обработка гранул материала излучением СВЧ привела к повышению прочностных характеристик образцов, полученных способом литья под давлением (табл. 6): $\sigma_{\text{и}}$ – разрушающее напряжение при статическом изгибе, МПа (ГОСТ 4678-71); $a_{\text{уд}}$ – ударная вязкость, кДж/м² (ГОСТ 4648-71); $\sigma_{\text{р}}$ – разрушающее напряжение при растяжении, МПа (ГОСТ 11262-80); $H_{\text{В}}$ – твердость по Бринеллю, МПа (ГОСТ 4670-91).

Таблица 6

Относительное увеличение физико-механических характеристик после предварительной обработки СВЧ-излучением, %

	$\sigma_{\text{раст.}}$	$\sigma_{\text{изг.}}$	$a_{\text{уд.}}$	$H_{\text{В}}$
Полиэтилен высокого давления (ПЭВД)	12	16	30	-32
Полиамид-6 (ПА-6)	15	10	21	26
Арзамид (ПАСН)	26	8	26	19
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	28	40	32	-26

Упрочнение ПЭФД и ПЭТФ после обработки СВЧ сопровождается повышением пластичности этих материалов и снижением твердости. Применение СВЧ оказалось наиболее эффективным при обработке ПЭТФ в силу более высокой теплостойкости ПЭТФ по сравнению с другими изученными термопластами. Видимо, макроцепи ПЭТФ обладают оптимальной подвижностью в силу наличия ароматических звеньев в паразоложении, не нарушающем линейности макроцепей.

При обработке реакционной смеси колебательным воздействием при физической модификации происходит энергетическая подпитка системы в результате подвода дополнительной энергии излучения. Известно, что к подводу энергии наиболее чувствительны процессы, обладающие сравнительно высокими температурными коэффициентами, то есть процессы, требующие сравнительно высоких энергий активации.

При отверждении смол конкурируют процесс линейного роста полимерных цепей и процесс сшивания полимерных цепей. Второй процесс сопровождается образованием третичных углеродных атомов. Химические связи этих атомов менее прочны, чем связи вторичных атомов углерода, образующихся при линейном росте цепей. Следовательно, первый процесс требует несколько более высокой энергии активации, чем второй, поэтому первый процесс более чувствителен к энергетическим подпиткам колебательными воздействиями. Ускорение этого процесса оказывает пластифицирующее действие, проявляющееся в увеличении стойкости материалов к ударным воздействиям. Ускорение второго процесса проявляется в увеличении модулей упругости и разрушающих напряжений. Например, после обработки УФ-препрега, содержащего технический полиакрилонитрильный жгутик, пропитанный эпоксидной смолой ЭД-20, наблюдалось преимущественное увеличение $a_{\text{уд}}$ на +40% при одновременном увеличении $\sigma_{\text{и}}$ всего на +15% [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Пятаев И.В. Влияние СВЧ-обработки на отверждение волокнонаполненного эпоксидного связующего / И.В. Пятаев, В.Н. Студенцов // Волокна и плёнки 2011. Перспективные технологии и оборудования для производства и переработки волокнистых и плёночных материалов: материалы Междунар. науч.-практ. конф.-семинара, посв. памяти профессора Б.Э. Геллера, г. Могилёв, 28 октября 2011 г. Могилёв: Могилёв. госу. ун-т продовольствия, 2011. С. 19-20.
2. Пятаев И.В. Физическая модификация электромагнитным излучением СВЧ термопластов, содержащих звенья C_2H_4 . / И.В. Пятаев, В.Н. Студенцов // Приволжский научный вестник. 2013. №1 (17). С. 10.
3. Пятаев И.В. Модификация термопластов электромагнитным излучением СВЧ / И.В. Пятаев, В.Н. Студенцов, Р.Ю. Москвин // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология: докл. Междунар. конф. «Композит-2013». Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2013. С. 65-66.
4. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотная электротехнология / Ю.С. Архангельский // Вестник СГТУ. 2011. № 4. Вып. 3. 243 с.
5. Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. М.: Наука, 1979. 944 с.
6. Студенцов В.Н. Структура химических волокон: учеб. пособие / В.Н. Студенцов. Саратов: СПИ, 1982. 70 с.

7. Студенцов В.Н. Диффузионный механизм отверждения и структура композиционных материалов, армированных химическими волокнами / В.Н. Студенцов // Журн. приклад. химии. 1983. № 9. С. 2077-2082.

8. Пат. РФ № 2324709 Способ получения армированного полимерного композиционного материала / А.Б. Мурадов, И.В. Черемухина, В.Н. Студенцов, В.А. Кузнецов // Б.и. 2008. № 14.

9. Студенцов В.Н. Физическая модификация армированных реактопластов / В.Н. Студенцов // Вестник СГТУ. 2011. №4. Вып. 3.

Студенцов Виктор Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Химическая технология» Энгельсского технологического института (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Viktor N. Studentsov – Dr. Sc., Professor
Department of Chemical Engineering
Engels Technological Institute,
Part of Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Пятаев Илья Викторович – аспирант кафедры «Химическая технология» Энгельсского технологического института (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Илья V. Pyataev – Postgraduate
Department of Chemical Engineering,
Engels Technological Institute
Part of Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.04.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 539.193/.194;535/.33.34

П.М. Элькин, О.Н. Гречухина, П.Г. Дормидонтов, М.В. Карташов, А.А. Попов, В.Ф. Пулин

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДИАБАТИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ ФЛАВАНОВ

На основании модельных квантовых расчетов параметров адиабатического потенциала предложены структурно-динамические модели флаванов.

Флаваны, адиабатический потенциал, колебательные спектры, спектральная идентификация

M.D. Elkin, O.N. Grechuhina, P.G. Dormidontov, M.V. Kartashov, A.A. Popov, V.F. Pulin

MODELLING ADIABATIC POTENTIAL FOR FLAVANS

The proposed structural and dynamic models for flavanes are based on quantum simulation of adiabatic potential parameters.

Flavane, adiabatic potential, vibrational spectra, spectral identification

Введение

Флаваны (рисунок) являются базовыми фрагменты известного класса биомолекул – флавоноидов, содержащихся в высших растениях. Решение фундаментальной задачи установления связи между свойствами, структурой и спектрами соединений связано с исследованием формы их адиабатических потенциалов, определяющей основные физико-химические и биологические свойства молекулярных объектов. Достоверность результатов модельных расчетов параметров адиабатического потенциала требует как теоретического, так и практического обоснования. Таким обоснованием, в первую очередь, является совпадение рассчитанных и экспериментальных характеристик колебательных (ИК и КР) спектров исследуемых соединений.

Для флавоноидов имеющие в научной литературе экспериментальные данные по ИК и КР спектрам ограничены описанием отдельных спектральных диапазонов, поэтому результаты теоретической интерпретации молекулярных колебаний носят предсказательный характер. Сошлемся на публикации [1-3], в которых использовано физическое приближение, связанное с разделением всего набор фундаментальных колебаний на две группы. Первая связана с колебаниями сопряженных циклов, вторая – бензольного фрагмента.

Однако применение предложенного подхода к моделированию адиабатических потенциалов флавоноидов более сложной структуры нуждается в дополнительном обосновании, чем может служить сопоставление результатов теоретической интерпретации колебательных состояний флаванов с имеющимися экспериментальными данными для сопряженных циклов (нафталина) и бензольного фрагмента (дифенила). Такое исследование и является предметом данной статьи. Модельные расчеты осуществлены в рамках метода функционала плотности DFT/b3LYP [4].

Обсуждение результатов модельных расчетов

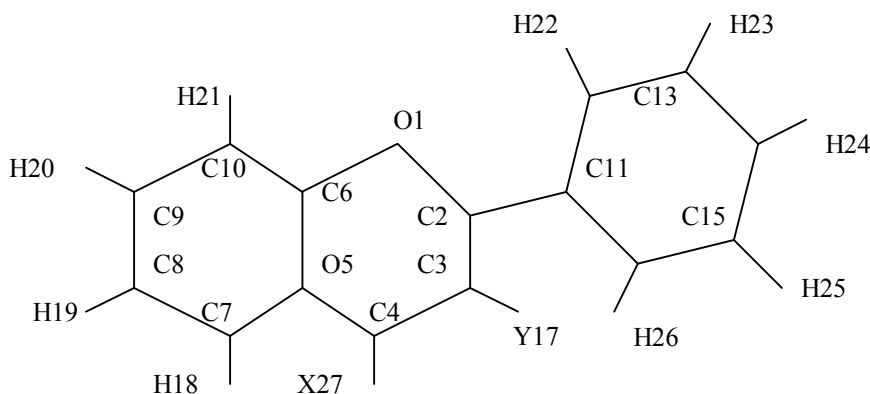
Результаты оптимизации неплоской исходной геометрии конформеров флавана, конформеров флавана 3-ОН (кахетина) и 3,4-ОН флавана представлены в табл. 1. При этом ограничились теми параметрами, которые подвержены изменению более 0.02 Å для длин валентных связей и 2° для значений валентных углов. Отметим, что для ряда конформеров использование модели симметрии Cs (плоская структура) не позволит воспроизвести низкочастотные крутильные (χ) колебания связей шестичленных фрагментов.

Теоретическая оценка положения полос в колебательном спектре соединения осуществлялась с помощью известного соотношения

$$E_v = \nu_s(n_s + 1/2) + \chi_{sr}(n_s + 1/2)(n_r + 1/2) \quad (1)$$

Для ангармонических констант χ_{sr} использовались выражения из публикации [5]. Полученные оценки ангармонического смещения полос хорошо согласуются с результатами процедуры масштабирования [6].

Выбор базиса модельных расчетов на положение полос не имеет принципиального значения ($\sim 20 \text{ см}^{-1}$). Качественная оценка интенсивностей сохраняется. Этот факт учтен при представлении результатов модельных расчетов в табл. 2-4. Полосы, разделенные щелью менее 20 см^{-1} , представлены усредненным положением полос и суммарной интенсивностью (для флавана такие полосы помечены *). Из рассмотрения исключены полосы слабой интенсивности. Отметим и факт наличия делокализации форм нормальных колебаний для случая, когда энергетическая щель между полосами $\sim 10 \text{ см}^{-1}$. Сказываются особенности численных методов технологии «Gaussian» [4].



Молекулярная диаграмма флавана (X,Y=H), флавана 3-ОН (X=H, Y=ОН), флавана 3,4-ОН (X,Y=ОН)

Таблица 1

Оптимизированные значения длин связей R(i,j) (в Å) и валентных углов A(i,j,k) в ° флаванов

R(1,2)	1.33	1.33	1.34	R(7,8)	1.38	1.38	1.38	A(2,1,6)	123.5	124.7	123.6
R(1,6)	1.37	1.36	1.36	R(8,9)	1.41	1.41	1.41	A(1,2,11)	114.8	114.3	114.5
R(2,3)	1.41	1.42	1.40	R(9,10)	1.39	1.38	1.38	A(3,2,11)	126.5	127.6	127.2
R(2,11)	1.45	1.45	1.46	R(11,12)	1.41	1.41	1.41	A(4,5,6)	117.0	117.3	116.6
R(3,4)	1.37	1.39	1.40	R(11,16)	1.41	1.41	1.41	A(4,5,7)	124.8	124.7	124.8
R(4,5)	1.42	1.41	1.42	R(12,13)	1.38	1.38	1.39	A(1,6,10)	117.7	118.1	117.3
R(5,6)	1.41	1.41	1.41	R(13,14)	1.40	1.40	1.40	A(5,6,10)	122.4	122.6	121.9
R(5,7)	1.41	1.41	1.41	R(14,15)	1.40	1.39	1.39	A(6,10,9)	117.9	117.8	118.4
R(6,10)	1.39	1.39	1.39	R(15,16)	1.39	1.39	1.39	A(9,10,21)	122.0	122.2	122.1

Таблица 2

Интерпретация фундаментальных колебаний флавана

Форма колеб	V _{эксп}		V _{выч}	ИК	КР	Форма колеб	V _{эксп}		V _{выч}	ИК	КР
	Парафин	Дифенил					Парафин	Дифенил			
Q,β,γ*	1624	1611	1609	109	849	β,Q*	1128	1092	1108	19	7
Q,β,γ*	1592	1592	1576	244	223	Q',γ'	1025	1032	1020	2	99
Q,β,γ*	-	-	1535	812	72	γ	1011	1003	991	21	99
β	1506	1504	1491	8	77	γ	936	-	919	11	26
β*	1460	1452	1455	232	113	γ	846	-	854	7	17
β	-	-	1435	5	23	γ,Q	753	740	764	7	60
Q,β	1361	-	1356	5	487	γ	717	-	695	12	21
β,Q*	-	1326	1339	240	61	γ*	681	612	611	9	31
Q _{сс} ,γ,β	-	-	1323	146	439	β _{сс}	-	-	284	4	20
Q,β*	1267	1280	1273	38	115	ρ*	-	838	824	47	1
β	1239	-	1251	30	6	ρ _{сс} ,ρ	-	780	780	55	0
β*	1210	-	1201	79	306	ρ	753	-	755	31	0
β*	1158	1185	1174	1	14	χ	717	740	737	22	0
β,Q*	1145	1155	1154	63	47	ρ _{сс} ,χ,ρ*	-	-	670	47	1

Примечание. Частоты колебаний в см⁻¹, интенсивности в ИКС в км/моль, в СКР в А⁴/аеи.

Таблица 3

Интерпретация колебательных состояний конформеров флавана-3-ОН

Форма колеб	V _{эксп} [6-8]	V _{выч}	Конф. С1		Конф. Сs		Форма колеб	V _{эксп} [6-8]	V _{выч}	Конф. С1		Конф. Сs	
			ИК	КР	ИК	КР				ИК	КР	ИК	КР
q _{ОН}	-	3644			111	141	β	1181	1195	31	97	130	128
q _{ОН}	-	3608	93	39			β,β _{ОН}	-	1173	81	34	54	17
Q,β,γ	1606	1605	58	965	111	970	β	1156	1150	80	23	231	51
Q,β,γ	1586	1576	156	279	144	171	β	1090	1097	6	3	6	15
Q,β,γ	-	1556	38	41	38	42	Q,β	1031	1036	1	11	1	33
β,Q	1504	1497	357	209	437	90	β,Q	-	1017	0	8	0	11
β,γ	1460	1463	43	25	36	13	γ	1004	1007	3	62	4	57
β	1439	1442	424	387	385	136	γ	993	990	15	115	20	167
β	1387	1361	211	500	22	709	ρ,χ	758	766	101	4	94	1
β	1331	1328	111	552	578	630	γ	702	707	26	85	23	74
β,Q _{с-с}	-	1306	38	6	15	8	γ	575	609	15	44	25	40
β,Q	1278	1262	19	75	3	9	χ _{ОН}	-	451	122	24	-	-
β,β _{ОН}	1218	1233	174	105	64	484	χ _{ОН}	-	357	-	-	121	2

Таблица 4

Интерпретация колебательных состояний конформеров флавана-3,4-ОН

Форма колебан	V _{эксп} [7-9]	V _{выч}	Максимум		3b;4a		3a;4a		3a;4b	
			ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР
q _{ОН}	-	3646	177	79	0.8	0.9	1.0	1.0	0.0	0.0
q _{ОН}	-	3608	138	100	0.7	0.5	1.0	1.0	0.8	0.5
q _{ОН}	-	3549	183	105	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
Q,β,γ	1606	1604	330	1273	0.9	1.0	1.0	1.0	0.2	0.7
Q,β,γ	1586	1575	249	346	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
Q,β,γ	-	1553	73	103	1.0	0.4	0.2	1.0	0.8	0.1
β,Q,Q _{сс}	-	1520	797	543	0.7	0.8	1.0	0.4	1.0	1.0
β,Q	1504	1494	163	92	1.0	1.0	0.4	0.9	0.5	1.0
β	1439	1437	341	451	0.8	1.0	1.0	0.7	0.5	0.9
Q	1361	1360	46	443	0.1	0.5	1.0	1.0	0.5	0.3

β	1331	1339	86	409	0.3	0.5	0.8	1.0	1.0	0.5
β, β_{OH}	1278	1301	460	371	0.3	1.0	1.0	0.3	0.0	0.1
β_{OH}, β	1267	1276	370	378	0.1	0.1	0.2	0.6	1.0	1.0
β	1218	1217	180	139	1.0	0.3	0.9	1.0	0.1	0.2
β_{OH}	1181	1190	348	140	1.0	0.6	0.5	1.0	0.6	0.6
β	1156	1167	223	31	0.7	0.7	1.0	0.8	0.1	1.0
β	1145	1142	24	55	0.6	1.0	1.0	0.7	0.3	0.5
γ	1090	1100	65	35	0.5	0.3	1.0	1.0	0.5	0.3
Q, β	1031	1028	13	90	0.4	0.6	0.4	1.0	1.0	0.5
γ	993	994	48	146	0.5	0.7	0.6	1.0	1.0	0.9
γ	-	874	49	1	0.5	0.7	1.0	0.8	0.4	1.0
ρ, χ	846	839	21	31	0.3	1.0	1.0	0.2	0.5	1.0
ρ, ρ_{cc}, χ	-	770	75	4	0.4	0.7	0.4	0.1	1.0	1.0
ρ, ρ_{co}, χ	758	751	91	2	1.0	1.0	0.8	0.1	0.5	0.3
χ, ρ_{co}	702	698	53	37	0.7	0.8	0.6	1.0	1.0	0.8
γ	681	670	71	17	0.2	1.0	1.0	1.0	0.2	1.0
ρ_{co}	-	638	43	7	0.6	0.8	0.7	1.0	1.0	0.9
ρ_{cc}	-	617	100	17	0.0	0.5	0.0	1.0	1.0	0.6
γ	575	574	9	41	0.5	1.0	1.0	0.9	0.4	0.9
ρ_{co}, χ	-	494	96	25	1.0	0.9	0.5	0.9	0.1	1.0
χ_{OH}, χ'	-	447	123	13	1.0	1.0	0.0	0.3	0.0	0.1
γ	-	418	91	17	0.0	0.2	1.0	0.1	0.4	1.0
χ_{OH}	-	354	134	7	0.0	1.0	1.0	0.4	0.7	0.4

Хорошее совпадение данных эксперимента для нафталина и дифенила с результатами модельных расчетов колебательных состояний флавана (табл. 2) могут служить обоснованием высказанного предположения об отнесении колебаний к бензольному фрагменту и сопряженным циклам.

Подтверждением сказанному являются результаты интерпретации фундаментальных колебаний флавана-3-ОН (табл. 3) и флавана 3,4-ОН (табл. 4). Для полос, отнесенных к колебаниям бензольного остов и сопряженного цикла, имеет место хорошее согласие с экспериментом для флавана и гидроксифлавонов [7-9]. Данный факт свидетельствует о локальном влиянии гидроксильного фрагмента на силовое поле сопряженного фрагмента.

Положение полос, интерпретированных как крутильные колебания гидроксильного фрагмента в флаване-3-ОН и флаване 3,4-ОН следует отнести к надежному признаку спектральной идентификации конформеров соединения.

Дополнительными признаками идентификации исследуемых молекулярных объектов и их конформеров могут служить данные об относительных интенсивностях полос, представленные в табл. 2-4.

Заключение

Представленные результаты модельных расчетов геометрической структуры и колебательных состояний флаванов позволяют сделать следующий вывод. Для достоверной интерпретации колебательного спектра соединений класса флавоноидов, выявления признаков их спектральной идентификации можно использовать метод функционала плотности DFT/b3LYP, а также имеющиеся закономерности в характере поведения полос, что имеют место для сопряженных шестичленных циклов и замещенных бензола.

ЛИТЕРАТУРА

1. Структурно-динамические модели флавоноидов. 2. Моногидроксифлавоны / Элькин М.Д., Гайсина А.Р., Лихтер А.М., Нуралиева Д.М., Смирнов В.В., Степанович Е.Ю., Шагаутдинова И.Т. // Естественные науки. 2012. № 4 (41). С. 133-140
2. Моделирование структуры и спектров конформеров 3,4 -дигидроксифлавонона / Элькин М.Д., Гайсина А.Р., Джалмухамбетова Е.А., Смирнов В.В., Степанович Е.Ю., Шагаутдинова И.Т. // Естественные науки. 2013. № 1 (42). С. 111-118
3. Структурно-динамические модели кризина / Элькин М.Д., Гайсина А.Р., Джалмухамбетова Е.А., Смирнов В.В., Степанович Е.Ю., Шагаутдинова И.Т. // Естественные науки. 2013. № 1 (42). С. 105-111.
4. Gaussian 03, Revision B.03 / Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H.B. and oth., Gaussian, Inc., Pittsburgh PA (2003)

5. Элькин М.Д. Учет ангармонического смещения полос в модельных расчетах колебательных спектров димеров с водородной связью / М.Д. Элькин, Л.М. Бабков // Изв. Саратов. гос. ун-та. Серия Физика. 2011, Т. 11. Вып.1. С. 20-25.

6. Краснощеков С.В. Масштабирующие множители как эффективные параметры для коррекции неэмпирического силового поля / С.В. Краснощеков, Н.Ф. Степанов // Журн. физ. химии. 2007. Т. 81. №4. С. 680-689/

7. Raman and surface-enhanced Raman spectra of flavone and several hydroxyflavone / Teslova T., Corredor C., Livingston R., Spataru T., Birke R.L., Lombardi J.R., Canameres M.V., Leona M. // J.Raman Spectroscopy. 2007. Vol.38. P.802-818.

8. Vavra A. Gas phase infrared spectra of flavone and its derivatives / A. Vavra, R. Linder, K. Kleinermans // Chem. Phys. Letters. 2008. Vol. 463. P. 349-352.

9. Erdogdu Y. Vibrational analysis of flavone / Y. Erdogdu, O. Unsalan, M.T. Gulluoglu // Turk. J. Phys. 2009. V. 33. P. 249-259.

Элькин Павел Михайлович –

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Техническая физика и информационные технологии» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel M. Elkin–

Ph. D., Professor
Department of Technical Physics
and Information Technologies,
Engels Technological Institute
Part of Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Гречухина Оксана Николаевна –

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и информатика» Астраханского государственного университета

Oksana N. Grechuhina -

Ph. D., Associate Professor
Department of Applied Mathematics and Informatics,
Astrakhan State University

Громовой Сергей Александрович –

магистрант Астраханского государственного университета

Sergei A. Gromovoy -

Master Programme Student
Astrakhan State University

Карташов Максим Вячеславович –

магистрант Астраханского государственного университета

Maxim V. Kartashov -

Master Programme Student
Astrakhan State University

Попов Андрей Александрович –

магистрант Астраханского государственного университета

Andrei A. Popov –

Master Programme Student
Astrakhan State University

Пулин Виктор Федотович –

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Victor F. Pulin –

Ph. D., Associate Professor
Department of Physics,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.04.14, принята к опубликованию 20.06.14

УДК 539.193/.194;535/.33.34

М.Д. Элькин, О.Н. Гречухина, П.Г. Дормидонтов, М.В. Карташов, А.А. Попов, В.Ф. Пулин

**СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
И СПЕКТРАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФЛАВОНОВ**

В рамках метода функционала плотности DFT/b3LYP осуществлены модельные квантовые расчеты геометрической структуры и колебательных спектров флавонов. Выявлены признаки спектральной идентификации соединений.

Флавоны, колебательные спектры, спектральная идентификация

M.D. Elkin, O.N. Grechuhina, P.G. Dormidontov, M.V. Kartashov, A.A. Popov, V.F. Pulin

STRUCTURAL- AND-DYNAMIC MODELS AND SPECTRAL IDENTIFICATION OF FLAVONES

Analysis of vibrational spectra and geometric structure for flavones is carried out by the DFT/B3LYP method. Indications of spectral identification are revealed.

Flavone, vibrational spectra, spectral identification

Введение. Флавоны (рис. 1) – базовый представитель известной группы биоорганических соединений – флавоноидов (гидроксизамещенные флавоны) [1]. Научный и практический интерес к указанным соединениям проявляют специалисты в области биофизики, биохимии, молекулярной биологии, медицины, что связано с обсуждением влияния флавоноидов на сигнальные и регуляторные системы клетки, рассмотрением механизма биохимического и биофизического их действия.

Подобного типа задачи требуют исследования формы адиабатического потенциала, который, согласно современным научным воззрениям, определяет основные физико-химические свойства вещества. Такую возможность предоставляют неэмпирические и гибридные методы квантовой механики молекул, программно реализованных в виде сервисных информационных технологий. К их числу принадлежит и известный программный продукт «Gaussian» [2]. Достоверность полученных данных может быть обоснована хорошим совпадением модельных расчетов колебательных спектров исследуемых соединений с имеющимся экспериментом. Для биоорганических соединений с сопряженными циклами указанный подход, продемонстрирован, к примеру, в [3, 4], а его использование для построения структурно-динамических моделей и выявления признаков спектральной идентификации флавонов является предметом данной статьи.

Результаты модельных расчетов

Выбор атомного базиса в модельных расчетах структуры колебательных спектров исследуемых соединений принципиального значения не имеет. Смещение полос не превышает величины $\sim 10 \text{ см}^{-1}$, качественная оценка интенсивностей в ИК и КР спектрах сохраняется. Исключение касается полос, интерпретированные как крутильные колебание связи ОН (χ_{OH}). Смещение этих полос может достигать величины $\sim 40 \text{ см}^{-1}$. Однако указанные полосы более чем на порядок интенсивнее остальных колебаний в низкочастотном диапазоне.

Воспроизвести частоту крутильного колебания бензольного и сопряженного фрагментов удастся, если исходить из неплоской конфигурации соединений. Характер поведения параметров фундаментальных колебаний при переходе от плоской конфигурации (C_s) к неплоской (C_1) позволяет говорить о правомочности приближения свободного вращения указанных фрагментов соединения.

Приведенные в табл. 1 данные иллюстрируют искажение геометрических параметров шестичленных циклов по сравнению с параметрами бензольного кольца. Для не указанных длин валентных связей и валентных углов расхождение в значениях не превышает величины $\sim 0.02 \text{ \AA}$ и $\sim 1.5^\circ$ соответственно. Тот же порядок расхождения величин геометрических параметров сохранятся в ряду исследуемых соединений.

Теоретическая оценка ангармонического смещения полос в колебательном спектре осуществлялась в рамках известного соотношения

$$\Delta E_v = \chi_{sr}(n_s + 1/2)(n_r + 1/2) \quad (1)$$

Константы ангармоничности χ_{sr} оценивались по методике работы [5]. Сравнимые результаты достигаются применением нелинейной процедуры масштабирования [6].

Данные модельных расчетов фундаментальных колебаний сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными по колебательным спектрам в табл. 2-4. Полосы низкой интенсивности исключены из рассмотрения, как не представляющие интерес для задачи спектральной идентификации соединений и их конформеров. Колебания, энергетическая щель между которыми не превышает величины $\sim 10 \text{ см}^{-1}$ представлены в таблицах полосой с усредненной частотой и суммарной интенсивностью. Наряду с экспериментом из публикаций [7-9] в таблицах приведено устоявшееся теоретическое отнесение колебательного спектра родственных по электронной структуре фрагментов нафталина и дифе-

нила. Сравнение данных позволяет сделать вывод, что замещение атома водорода на атом кислорода или гидроксильный фрагмент оказывает локальное влияние на силовое поле сопряженного цикла.

Для флавонола реализуются два конформера, определяемые положением гидроксидного фрагмента относительно связи C=O. Первый конформер (3a-тип) обладает симметрией C₁ (двугранный угол D(4,3,O₁₇,H₂₈) ~ 166 °). Вторым конформер (3b-тип) принадлежит группе симметрии C_s (двугранный угол D(4,3,O₁₇,H₂₈) = 0°). Для обоих конформеров имеет место внутримолекулярное взаимодействие атома кислорода фрагмента OH с атомом водорода связи C₁₆H₂₆ (R(17,26) ~ 2.15 Å). Для конформера типа b межмолекулярное взаимодействие типа водородной связи имеет место между атомом кислорода связи C=O и атомом водорода гидроксильного фрагмента (R(27,28) ~ 1.98 Å). Как результат смещение полос валентных и крутильных колебаний гидроксильного фрагмента (табл. 3) в соответствии с механизмом водородной связи.

Для крезина модельные расчеты (табл. 4) подтверждают наличие четырех возможных конформеров. Для конформеров типа 7a (D(5,7,O₁₈,H₂₈)) имеет место внутримолекулярная водородная связь (R(27,28) ~ 1.7 Å). Полоса валентного колебания связи O₁₈H₂₈ смещается в длинноволновый диапазон на величину ~ 600 см⁻¹. На величину ~ 500 см⁻¹ смещается в коротковолновый диапазон полоса, интерпретированная как крутильное колебание гидроксильного фрагмента. Налицо надежные признаки идентификации конформеров крезина. Дополнительными признаками спектральной идентификации могут служить полосы, отнесенные к деформационным колебаниям гидроксильного фрагмента (β_{OH}). Это полосы диапазона 1500 1200 см⁻¹.

Заключение

Проведенные модельные расчеты геометрической структуры и колебательных состояний флавонола позволяют сделать вывод, что для предсказательных расчетов параметров адиабатического потенциала, интерпретации колебательного спектра соединений группы флавоноидов можно использовать метод функционала плотности DFT/b3LYP и те закономерности в характере поведения полос, которые имеют место для сопряженных шестичленных циклов и замещенных бензола.

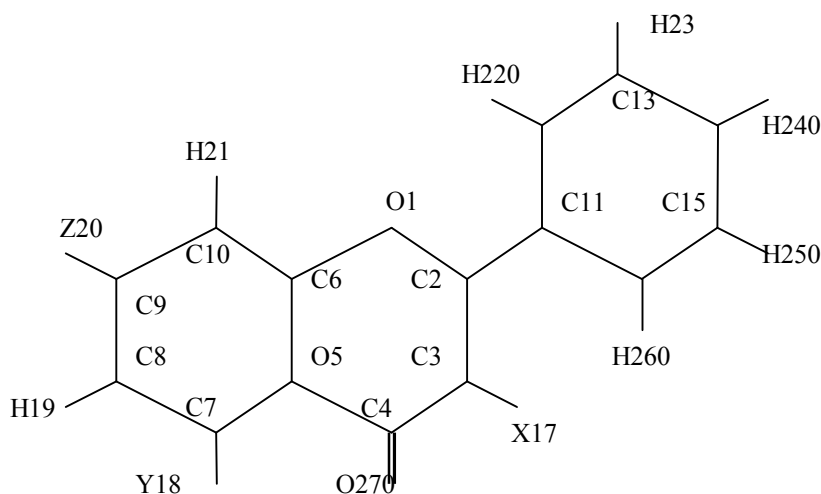


Рис. Молекулярные диаграммы флавонола (X,Y,Z=H), флавонола (X=OH, Y,Z=H), крезина (X=H, Y,Z=OH)

Таблица 1

Оптимизированные геометрические параметры флавонолов

R(1,2)	1.36	R(3,4)	1.45	R(5,7)	1.42	A(1,2,11)	112.2	A(1,6,10)	116.9
R(1,6)	1.37	R(4,5)	1.47	R(2,3)	1.36	A(3,4,5)	115.1	A(3,2,11)	126,0

Таблица 2

Интерпретация колебательных состояний флавона

Форма колеб.	$V_{\text{эксп}}$ [9]	$V_{\text{эксп}}^*$	$V_{\text{выч}}$	ИК	КР	Форма колеб.	$V_{\text{эксп}}$ [9]	$V_{\text{эксп}}^*$	$V_{\text{выч}}$	ИК	КР
$Q_{C=O}$	1646	1634	1678	439	211	Q, β	1210	1210	1207	36	86
Q, β	1606	1611	1608	150	1187	β	1181	1158	1180	12	39
Q, γ	1586	1592	1572	46	233	β, Q	1129	1145	1119	40	7
β	1504	1504	1488	17	29	β, Q	1079	1092	1083	10	11
γ, β, Q	1460	1452	1460	108	20	Q, β	1029	1031	1031	30	20
Q, β	1439	-	1443	24	23	Q, γ	993	1003	999	11	109
Q, β	1387	1361	1352	354	122	γ	675	-	672	3	11
Q, β	1331	1326	1325	21	31	$\gamma_{\text{сс}}, \gamma$	577	-	576	1	11
Q, β	1278	1280	1298	54	1	γ	506	-	497	4	15
β, Q	1267	-	1275	5	59	ρ, χ	769	753	765	101	2
$\beta, Q_{\text{сс}}$	1226	1239	1231	22	253	ρ, χ	687	-	691	33	1

Примечание. Частоты колебаний в см^{-1} , интенсивности в спектрах ИК в км/моль , в спектрах КР в $\text{Å}^4/\text{а.е.м.}$

*Свердлов Л.М., Ковнер М.А., Крайнов Е.П. Колебательные спектры многоатомных молекул. М.: Наука, 1970. 559 с.

Таблица 3

Интерпретация колебательных состояний конформеров флавонола

Форма колеб.	$V_{\text{эксп}}$ [9]	$V_{\text{выч}}$	К-р.С ₁		К-р.С _s		Форма колеб.	$V_{\text{эксп}}$ [9]	$V_{\text{выч}}$	К-р.С ₁		К-р.С _s	
			ИК	КР	ИК	КР				ИК	КР	ИК	КР
$q_{\text{ОН}}$	-	3618	48	102	-	-	β, Q	1128	1126	26	9	94	21
$q_{\text{ОН}}$	-	3418	-	-	120	169	γ, β	1101	1105	18	2	12	2
$Q_{C=O}$	1646	1684	364	133	-	-	β	1090	1082	13	1	40	0
$Q_{C=O}$	-	1646	-	-	142	154	Q, β	1031	1031	11	28	15	23
Q, β, γ	1606	1611	111	1191	346	2319	$\gamma, \beta_{\text{со}}$	1004	994	0	61	10	175
Q, β, γ	1586	1573	10	287	38	403	ρ	-	973	13	45	-	-
β, Q	1504	1496	16	18	29	59	γ	904	884	40	1	16	1
β	1460	1470	136	18	136	44	ρ	838	835	4	19	3	20
β	1439	1450	14	30	10	70	ρ, χ	758	756	107	2.0	116	2
$\beta, \beta_{\text{ОН}}$	1387	1410	92	41	218	46	χ	702	696	50	6	89	5
$\beta, \beta_{\text{ОН}}$	1331	1337	16	52	377	461	γ	675	671	4	13	3	16
$\beta_{\text{ОН}}, \beta$	1278	1295	135	235	86	191	$\rho_{\text{сс}}, \chi$	-	605	1	6	29	3
β	1218	1224	42	71	18	106	γ	577	576	1	9	1	18
β	1181	1185	336	33	128	141	$\chi_{\text{ОН}}$	-	641	-	-	52	6
β	1156	1157	9	11	2	20	$\chi_{\text{ОН}}$	-	459	97	17	-	-

Таблица 4

Интерпретация колебаний в конформерах крезина

Форма колебаний	$V_{\text{эксп}}$ [9]	$V_{\text{эксп}}$ [10]	$V_{\text{выч}}$	Максим.		7a;9a		7a;9b		7b;9a		7b;9b	
				ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР
$q_{\text{ОН}}$	-	-	3694	100	194	1.0	1.0	0.7	0.7	0.9	1.0	0.7	0.6
$q_{\text{ОН}}$	-	-	3680	68	186	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.0	1.0	1.0
$q_{\text{ОН}}$	-	-	3134	409	155	1.0	1.0	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0

Q,β,γ	1634	1624	1669	556	369	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.7	0.9	0.7
Q,β	1611	1611	1613	662	1376	1.0	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0
Q,γ,β	1582	1592	1578	117	428	0.9	1.0	0.8	0.8	0.6	0.5	1.0	0.3
β,β _{ОН}	1502	1504	1493	280	135	1.0	0.9	0.8	1.0	0.1	0.3	0.1	0.4
β	1451	1452	1447	243	80	1.0	1.0	0.8	0.6	1.0	0.5	0.6	0.4
β _{ОН}	-	-	1422	138	20	0.2	1.0	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Q,β	1355	1361	1372	172	128	0.7	0.7	0.2	1.0	1.0	0.9	0.4	1.0
q _{со,β}	-	1326	1333	384	100	0.7	1.0	0.8	1.0	0.7	0.6	1.0	0.7
Q,β	-	1280	1294	195	55	0.8	1.0	1.0	1.0	0.5	0.4	1.0	0.6
Q,β	-	1267	1260	91	28	0.6	0.3	0.4	0.3	0.9	1.0	1.0	0.9
Q _{с-с,β}	1247	1239	1236	183	512	0.9	1.0	1.0	0.9	0.2	0.5	0.0	0.4
β,β _{ОН}	1220	1210	1210	153	183	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.6	1.0	1.0
β	-	1158	1176	171	53	0.3	0.9	0.4	1.0	0.1	0.9	1.0	0.9
β	-	1145	1154	250	12	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.8	0.3	1.0
Q,γ _{сс}	-	1092	1087	170	24	0.6	0.8	0.4	0.9	1.0	0.9	0.8	1.0
Q,β	-	1032	1026	56	31	0.7	1.0	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9
γ	1002	1003	993	3	86	1.0	1.0	0.9	1.0	0.5	0.9	0.5	0.9
Q,β	-	958	968	31	15	0.2	0.8	0.1	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0
γ	-	614	619	36	49	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	0.9	0.1	0.9
χ _{ОН}	-	-	860	104	3	1.0	0.3	1.0	0.3	0.2	0.9	0.2	1.0
ρ,χ	780	753	770	101	2	1.0	0.5	0.9	0.7	0.6	1.0	0.9	0.4
ρ,χ	-	729	747	52	1	0.1	0.3	0.0	0.4	1.0	1.0	0.0	0.5
χ _{ОН}	-	-	408	111	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	1.0
χ _{ОН}	-	-	398	73	3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0
χ _{ОН}	-	-	351	113	3	0.9	1.0	0.9	0.8	1.0	1.0	0.8	0.8

ЛИТЕРАТУРА

1. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина / Тараховский Ю.С., Ким Ю.А., Абдраимов Б.С., Музафаров Е.Н. Synchrobook, 2013. 310 с.
2. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. 2003. Pittsburg, PA.: Gaussian Inc.
3. Элькин М.Д. Спектральное проявление межмолекулярного взаимодействия в димерах фталимида и изатина / М.Д. Элькин, Т.А. Шальнова, А.П. Смирнов // Журнал прикладной спектроскопии. 2010. Т. 77. № 1. С. 28-33.
4. Элькин М.Д. Моделирование внутримолекулярного взаимодействия в спинохромах / М.Д. Элькин, Е.А. Джалмухамбетова, Т.А. Шальнова // Естественные науки. 2011. № 1 (34). С. 199-206.
5. Элькин М.Д. Учет ангармонического смещения полос в модельных расчетах колебательных спектров димеров с водородной связью / М.Д. Элькин, Л.М. Бабков // Изв. Саратов. гос. ун-та. Серия Физика. 2011, Т. 11. Вып.1. С. 20-25.
6. Краснощеков С.В. Масштабирующие множители как эффективные параметры для коррекции неэмпирического силового поля / С.В. Краснощеков, Н.Ф. Степанов // Журн. физ. химии. 2007. Т. 81. №4. С. 680-689.
7. Raman and surface-enhanced Raman spectra of flavone and several hydroxyflavone / Teslova T., Corredor C., Livingston R., Spataru T., Birke R.L., Lombardi J.R., Canameres M.V., Leona M. // J.Raman Spectroscopy. 2007. Vol. 38. P. 802-818.
8. Vavra A. Gas phase infrared spectra of flavone and its derivatives / A. Vavra, R. Linder, K. Kleinerms // Chem. Phys. Letters. 2008. Vol. 463. P. 349-352.
9. Erdogdu Y. Vibrational analysis of flavone / Y. Erdogdu, O. Unsalan, M.T. Gulluoglu // Turk. J. Phys. 2009. V. 33. P. 249-259.

Элькин Михаил Давыдович –
доктор физико-математических наук,
доцент кафедры технической физики
и информационных технологий Энгельсского

Mihail D. Elkin –
Dr. Sc., Professor
Department of Technical Physics and Information
Technologies,

технологического института (филиала)
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Engels Technological Institute
Part of Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Гречухина Оксана Николаевна –
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры прикладной математики
и информатики Астраханского
государственного университета

Oksana N. Grechuhina –
Ph. D., Associate Professor
Department of Applied Mathematics
and Informatics, Astrakhan State University

Карташов Максим Вячеславович –
магистрант Астраханского государственного
университета

Maxim V. Kartashov -
Master Programme Student
Astrakhan State University

Попов Андрей Александрович –
магистрант Астраханского государственного
университета

Andrey A. Popov –
Master Programme Student
Astrakhan State University

Дормидонтов Павел Германович –
магистрант Астраханского государственного
университета

Pavel G. Dormidontov –
Master Programme Student
Astrakhan State University

Пулин Виктор Федотович –
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Victor F. Pulin –
Ph. D., Associate Professor
Department of Physics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.04.14, принята к опубликованию 20.06.14

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 518.5

С.В. Бородулина, М.К. Решетников

ФОРМА СУБЪЕКТИВНОГО ПРОСТРАНСТВА КАК ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОСНОВА НЕЛИНЕЙНОЙ ПЕРСПЕКТИВЫ

Изложены некоторые сведения по физиологии зрительного восприятия. Обосновывается необходимость учета, при построении перспективных изображений, корректирующей деятельности мозга в формировании зрительного образа пространства с натуры и по плоской картине. Описывается геометрическая модель воспринимаемого зрителем образа субъективного пространства. Статья содержит теоретические основы нелинейной перспективы.

Нелинейная перспектива, геометрическая модель субъективного пространства, топологическое преобразование, аппарат проецирования, константность восприятия

S.V.Borodulina, M.K. Resetnikov

FORM SUBJECTIVE SPACE AS THE GEOMETRIC BASIS OF THE NONLINEAR PERSPECTIVE

The article presents some information on the physiology of visual perception. The necessity of taking into account, in the construction of perspective images, correction of brain activity in the formation of the visual image of the space with nature and a flat picture. A geometrical model of the perceived image viewer subjective space. The paper contains the theoretical foundations of nonlinear perspective.

Nonlinear perspective, the geometric model of subjective space, topological transformation unit projection constancy of perception

Нас окружает реальное пространство, за геометрическую модель которого примем евклидово пространство. Зрительно воспринимаемый образ части реального пространства возникает в сознании человека в результате двух противоположно направленных процессов: анализа и синтеза, и в силу этого он субъективен.

Анализ экспериментальных данных, приведенных в работах [1, 2, 3, 5, 6], и наших опытов, показывает, что воспринимаемые сознанием человека расстояния до точек и между точками реального пространства уменьшаются. Чем дальше расположен предмет, тем меньших размеров мы его видим. Если расстояние до предмета нам заранее не известно, то воспринимается оно меньшим, чем есть на самом деле. Степень такой недооценки возрастает с увеличением расстояния, нелинейно и зависит от индивидуальных особенностей человека (возраста, наблюдательного опыта и т. д.). При восприятии пространства происходит его визуальная деформация, которая сводится к его центральному сжатию и искривлению прямоугольных элементов, что свидетельствует о нелинейном характере сжатия пространства. Следовательно, *субъективное пространство является сжатым пространством, а сжатие – нелинейным.*

Рассмотрим субъективное сжатое пространство, которое замыкается линией горизонта и содержит, как сжатое отображение, одну и притом единственную неподвижную точку, центр сжатого пространства. Если принять при этом, что при сжатии, как движении к центру сжатия, сохраняется принадлежность точек прямолинейным лучам центральной связки, то наложение естественного требования сохранения непрерывности и принадлежности не вступит в противоречие ни со свойствами исходного реального пространства, ни с характером преобразования. *При нелинейно-сжатом преобразовании пространства не сохранятся длины линий, величины углов, площади и объемы, но сохранятся непрерывность и принадлежность, следовательно, это топологическое преобразование [4].*

Очевидно, что образ подмножества субъективного пространства на любой стадии сжатия можно определить как совокупность образов точек, а их положение – центральными лучами и числами, характеризующими расстояния от центра до образов точек. Если ввести понятие коэффициента сжатия η , под которым понимать отношение расстояния от центра сжатия до образа точки a к расстоянию до точки в реальном пространстве b , то

$$\eta = a/b \tag{1}$$

Положение образа любой точки однозначно определится центральным лучом, расстоянием до точки в реальном пространстве и коэффициентом сжатия. В общем случае можно записать:

$$\eta = F(x) \tag{2}$$

С целью получения представления о форме сжатого пространства, отождествляемого с субъективным пространством, рассмотрим поведение параллельных прямых при преобразовании реального пространства в субъективное. При построении сжатого образа пучка параллельных прямых исходим из того, что инвариантами преобразования являются принадлежность, непрерывность, прямолинейность лучей центральной связки и форма сферических поверхностей с центром в точке S - центре сжатия.

Пусть на горизонтальной плоскости (рис. 1) с центром сжатия S (точка стояния наблюдателя) расположены два семейства параллельных прямых l, m, n, f и g , для построения сжатого субъективного образа этих прямых построим ряд сфер с центрами в точке S и радиусами 2, 4, 6, 8, и 10 км. Так как форма сферы, в соответствии с принятыми условиями преобразования, не изменится, а только уменьшится ее радиус, построим воспринимаемые образы сфер, для чего воспользуемся данными экспериментов по восприятию расстояний Коровея Ю.И. и Федорова М.В. [2, 3]. В соответствии с полученным ими графиком зависимости расстояния от удаления расстояние в 2 км будет восприниматься как 870 м, 4 км – как 1520 м, 6 км - как 2060 м, 8 км – как 3000 м. Используя эти цифры, легко построить сжатые образы выбранных сфер. На рис.1. сферы показаны тонкой сплошной линией, а их образы – пунктирной. Цифрами обозначены величины радиусов этих сфер. Пусть прямая m в точках A пересечет сферу радиусом 6 км. Соединим прямой линией точку A с центром S . Там, где прямая пересечет сжатый образ сферы радиусом 6 км, получим точку A_1 .

Через точку A_1 и аналогичные ей точки проходит кривая m_1 – субъективный образ прямой m .

По аналогии с кривой m_1 построим кривые n_1, l_1, f_1 и g_1 – субъективные образы прямых n, l, g и f .

Прямая n расположена симметрично прямой m относительно линии SC . Точки, определяющие положение образов прямых m и n , с увеличением длины этих прямых интенсивно приближаются к линии SC . Следовательно, можно ожидать, что образы бесконечно удаленных (несобственных точек) прямых m и n расположатся на линии SC , а в силу симметрии совпадут в районе точки B , которую, по аналогии с теорией перспективы, назовем *точкой схода*.

Расстояние SB до точки схода связки образов параллельных прямых l, m и n определено приблизительно по криволинейной сходимости кривых m_1 и n_1 .

По аналогии с линиями l, m и n построены образы параллельных прямых f и g . Из расположения точек, определяющих положение кривых f_1 и g_1 , видно, что они с увеличением длины прямых f и g приближаются друг к другу и сходятся в районе точки F . Расстояние до этой точки схода SF нет основания считать отличным от расстояния SB , так как ни одно из направлений взгляда при плоской предметной плоскости не имеет преимуществ и все точки схода расположатся на линии b – линии горизонта, имеющей форму окружности и представляющей собой образ несобственной прямой – геометрического места несобственных точек прямых, расположенных на предметной плоскости

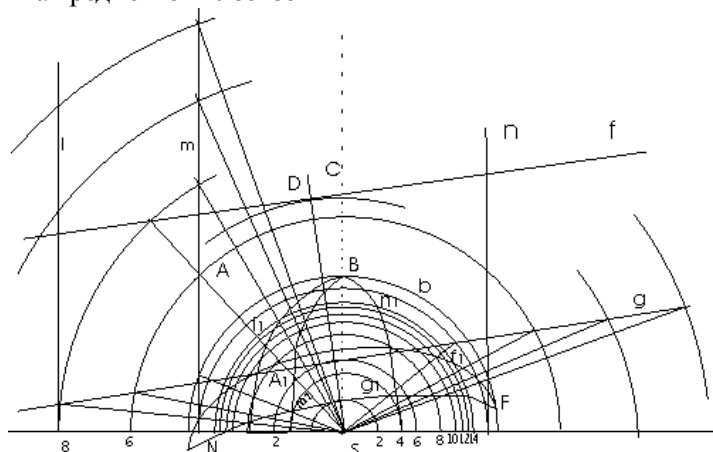


Рис.1. Геометрическая модель субъективного пространства

Рассматривая построение точки схода B можно увидеть, что направление взгляда SB на эту точку параллельно прямым, образы которых сходятся в данной точке. Положение прямых f и g взято произвольным, однако и в этом случае сохраняется параллельность направления взгляда SF на точку схода F , заданной связки прямых. Из чертежа также видно, что криволинейный образ прямой симметричен относительно перпендикуляра к истинному направлению прямой. Ось симметрии SN кривой m_1 (нижняя часть прямой не построена) перпендикулярна к прямой m так же, как и ось симметрии SD кривой f_1 перпендикулярна к прямой f .

Анализ рис. 1 позволяет сделать следующие выводы о субъективном сжатом пространстве:

1. Форма сжатого отображения прямых непостоянна. С удалением прямой от точки наблюдения и отклонением ее направления от направления луча зрения кривизна образа прямой возрастает.
2. Прямые, проходящие через центр сжатия - точку S , сохраняют коллинеарность.
3. Образы параллельных прямых имеют криволинейную сходимость.
4. Образы прямых, входящих в отображаемое подмножество евклидова пространства, принимают форму, симметричную относительно нормали, проведенной через точку наблюдения к самим прямым.
5. Прямая, удаленная от центра сжатия на неограниченное расстояние (несобственная прямая), в сжатом отображении принимает форму полуокружности, очерченной линией горизонта.
6. Прямые, проходящие в непосредственной близости от центра сжатия, в точке симметрии почти сохраняют свою прямолинейность, что является следствием отсутствия сжатия в окрестностях центра.
7. Образы прямолинейных отрезков небольшой протяженности или близко расположенные к наблюдателю и охватываемые углом зрения $15-20^\circ$, имеют незначительную кривизну и могут быть восприняты без искривления.

Исследования формы и свойств субъективного пространства позволили определить его как нелинейно-сжатое. Преобразование реального пространства в субъективное является топологическим. При определении методик создания изображения образа субъективного пространства на плоскости и выбора аппарата проецирования будем исходить из того, что преобразования, выполняемые таким аппаратом проецирования, должны быть взаимно-однозначными и взаимно-непрерывными. Математической базой нелинейной перспективы является не проективная геометрия, а топология.

Метод построения нелинейного перспективного изображения должен основываться на центральном проецировании из одного центра, так как только в этом случае сохранится непрерывность пространственных образов, с использованием поверхности-посредника, форма которой зависит от степени сжатия пространства, с последующим перепроецированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.С., Зайцев Ю.А. Наглядные изображения. Саратов: СГТУ, 1994. 160 с.
2. Короев Ю.И., Федоров М.В. Архитектура и особенности зрительного восприятия. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1954. 134 с.
3. Короев Ю.И., Федоров М.В. Объемно-пространственная композиция в проекте и в натуре. М.: Гос. изд-во лит. по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. 138 с.
4. Николаевский Г.К. Топологические преобразования в начертательной геометрии // Вопросы начертательной геометрии и ее приложения: Сб. статей. Харьков: ХАДИ, 1961. С. 97-107.
5. Раушенбах Б.Г. Геометрия картины и зрительное восприятие. М.: Интерпранс, 1994. 216 с.
6. Раушенбах Б.Г. Системы перспективы в изобразительном искусстве. Общая теория перспективы. М.: Наука, 1986. 254 с.

Бородулина Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная геометрия и промышленный дизайн» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Решетников Михаил Константинович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Инженерная геометрия и промышленный дизайн» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana V. Borjdulina – Ph.D., Associate Professor of the Department Engineering Geometry and Industrial Design Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Mikhail K. Resetnikov – Dr.Sc. Head of the Department Engineering Geometry and Industrial Design Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.03.14, принята к опубликованию 20.06.14

В.Ю. Карачаровский, М.К. Решетников, С.А. Рязанов

ВИЗУАЛИЗАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧАХ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ 3D КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ

На основе метода твердотельного моделирования процессов формообразования выполнено «виртуальное нарезание» колеса червячной передачи. Предложены методы предварительной оценки боковой поверхности зубьев червячного колеса на основе компьютерной визуализации их поверхности.

Червячная передача, технология изготовления, твердотельное моделирование, виртуальное нарезание, локализованный контакт, геометро-кинематические характеристики

V.Yu. Karacharovskiy, M.K. Reshetnikov, S.A. Ryazanov

EVALUATION OF GEOMETRIC IMAGING CHARACTERISTICS OF THE CONTACTING SURFACES IN WORM GEARS ON THE BASIS OF 3D COMPUTER GRAPHICS METHODS APPLICATION

Based on the method of forming solid modeling processes performed "virtual cutting" of the worm gear wheel. The methods for preliminary evaluation of the tooth flanks of the worm wheel on the basis of computer imaging surface thereof.

Worm gear, manufacturing techniques, solid modeling, virtual cutting, localized contact, characteristic geometrical-kinematic

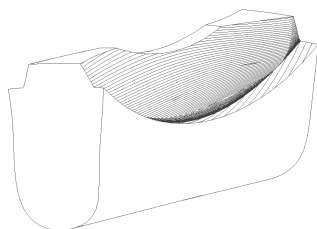


Рис. 1. Твердотельная модель
зуба червячного колеса

Червячные передачи обладают большим количеством достоинств: большое передаточное число при небольших размерах, бесшумностью в работе, возможностью самоторможения. Помимо достоинств, червячные передачи обладают и рядом недостатков – большое трение, перегрев, приводящий к заеданиям и заклиниваниям. Так же, червячные передачи склонны к возникновению кромоочного контакта в зацеплении вследствие теоретически линейного характера соприкосновения поверхностей зубьев колеса и витков червяка. Определенную нечувствительность

этих передач к неизбежным монтажным и технологическим погрешностям обеспечивает локализация контакта в зацеплении.

На этапе виртуального формообразования поверхности зубьев колеса можно оценить качество получаемой поверхности. Применение визуальной оценки поверхности зуба позволяет избежать длительных расчетов на уже некачественной модели червячного колеса.

Проведем визуальный анализ качества полученной поверхности зуба червячного колеса (рис. 1).

Существует несколько способов визуальной оценки характеристик поверхности.

Одним из способов является оценка непрерывности поверхности путем проецирования параллельных полос на твердотельную модель. Общеупотребительное название данного способа «анализ зебра» Данный анализ позволяет визуально оценить кривизну не только боковой поверхности зуба, но и кривизну впадины червячного колеса (рис. 2).

Анализ закрашенных областей показывает, что на боковой поверхности зуба существуют области где полосы выстраиваются в линии одного цвета, например область А, выстраиваются с небольшим смещением (область Б) и не выстраиваются в линию, например область В.

Это дает нам возможность судить, что в области А существует постепенный переход между плоскостями, которые являются отпечатками инструмента [5]. В области Б угол между отпечатками инструмента изменяется сильнее, а в области В явно виден резкий переход между отпечатками ре-

жущего инструмента. Таким образом, полученная поверхность относится к поверхностям класса G0. Т.е. она является непрерывной, но и в то же время не является гладкой.

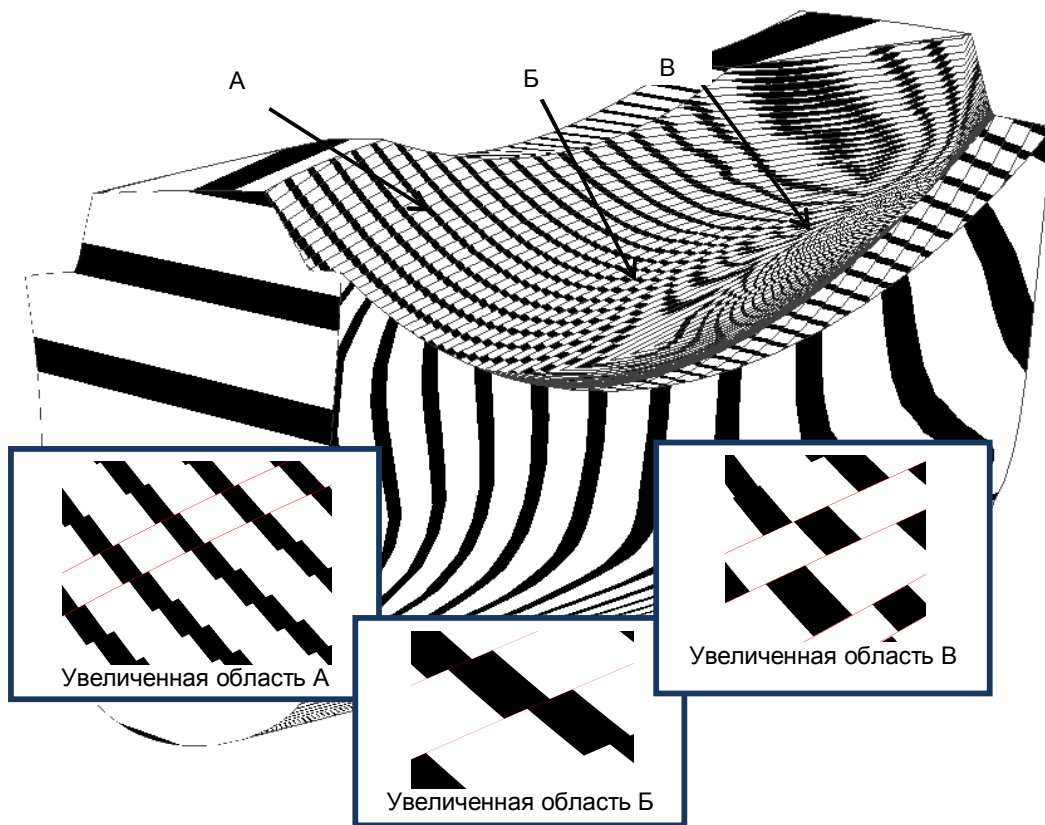


Рис. 2. Оценка поверхности зуба применением анализа «зебра»

Подтверждением этого является анализ средней кривизны боковой поверхности зуба (рис. 3).

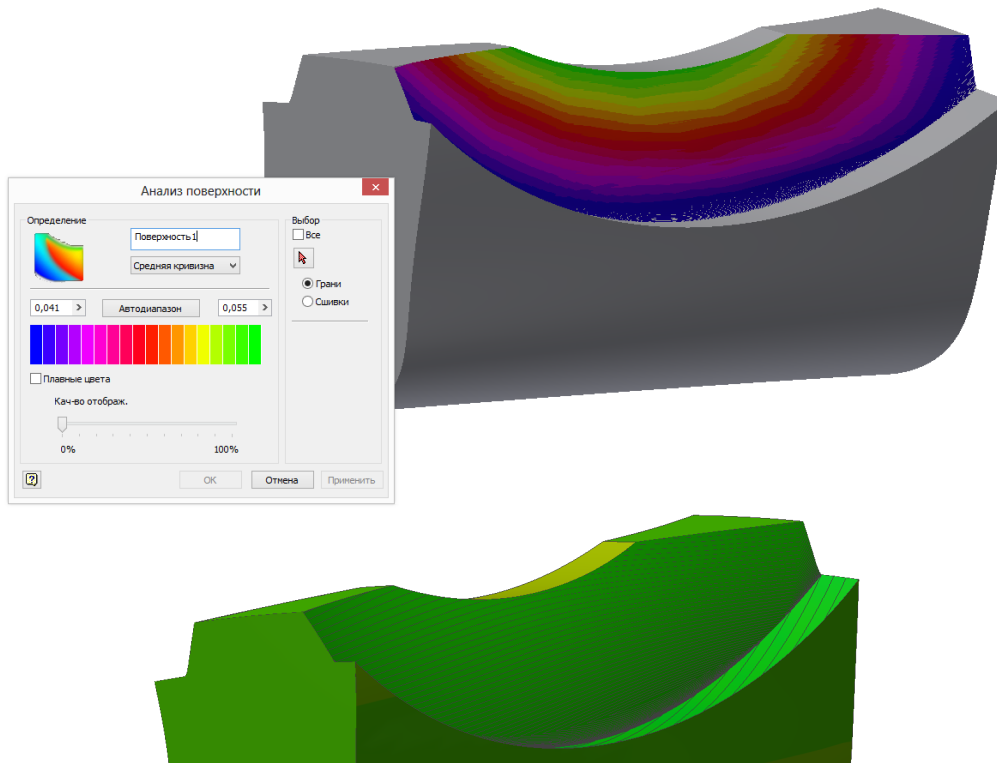


Рис. 3 Оценка поверхности зуба применением анализа кривизны поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карачаровский В.Ю. Моделирование на ЭВМ зацепления прецизионных червячных передач с локализованным контактом / В.Ю. Карачаровский, К.М. Писманик // Сб. Теория и геометрия пространственных зацеплений: Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума. Курган, 1979, С. 55-56.
2. Wildhaber E. A new look at wormgear hobbing. American Machinist, 1954, June 21, p.149-152.
3. А.с. СССР № 633677 Способ изготовления червячной передачи с локализованным пятном контакта / К.М. Писманик, В.Ю., Карачаровский. Оpubл. в Б.И., 1978, № 43.
4. Карачаровский В.Ю. Геометрическое моделирование формообразования пространственных поверхностей при винтовом относительном движении / В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов // Проблемы геометрического моделирования в автоматизированном проектировании и производстве: 1-й Международный науч. конф. М.: МГИУ, 2008. С. 143-146.
5. Карачаровский В.Ю. Визуализационная оценка параметров локализованного контакта в червячных передачах на основе методов 3D компьютерной графики / В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №2 (56). Выпуск 2. С.73-77.

Карачаровский Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Karacharovskiy Vladimir Yuriyevich – Ph.D., Associate Professor
Department of Technical Mechanics and Parts of Machines
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Решетников Михаил Константинович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Инженерная геометрия и промышленный дизайн» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Reshetnikov Mihail Konstantinovich – Dr. Sc.,
Head: Department of Engineering Geometry and Industrial Design
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Рязанов Сергей Анатольевич – заведующий лабораторией кафедры «Инженерная геометрия и промышленный дизайн» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ryazanov Sergey Anatoliyevich – Laboratory Head of the Department of «Descriptive Geometry and Computer Graphics»,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.04.14, принята к опубликованию 20.06.14

УДК 621.875.56

Р.А. Кобзев

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОДЪЕМА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Предлагается метод многокритериального оптимального проектирования механизмов подъема, основанный на применении принципа Парето, позволяющий получить конструкции механизма, обладающие минимальными капитальными и эксплуатационными затратами при выполнении всех требований технического задания.

Многокритериальное оптимальное проектирование, принцип Парето, метод динамического программирования

R.A. Kobzev

**MULTICRITERIA OPTIMUM DESIGN OF LOAD-LIFTING WINCHES
USING DYNAMIC PROGRAMMING**

The proposed method of multicriteria optimum design of load-lifting winches is based on the Pareto principle which allows for the design possessing minimum capital and operational expenditures through implementing the necessary requirements.

Multicriteria optimum design, Pareto principle, method of dynamic programming

Определение оптимальной конструкции механизма подъема груза является ключевой задачей конструктора при проектировании грузоподъемных машин, поскольку выбранная схема механизма в дальнейшем определяет конструкцию грузовой тележки, величину и характер приложения нагрузок, действующих на металлическую конструкцию крана [1].

Решение задачи оптимального проектирования механизма подъема заключается в выборе оптимальной структурной схемы механизма, а также подборе оптимальных параметров отдельных составляющих рассматриваемой схемы. Учитывая, что к механизмам подъема предъявляется достаточно широкий спектр зачастую противоречивых требований, перспективным представляется использование при их проектировании методов многокритериальной оптимизации, позволяющей оценивать различные решения по нескольким параметрам, в частности метода многокритериальной оптимизации, основанной на применении принципа Парето [2]. Для сравнения отдельных решений задачи оптимального проектирования механизма подъема используется векторный критерий оценки качества решения, включающий параметры, оказывающие непосредственное влияние на технико-экономические свойства машины. В состав векторного критерия для механизма подъема должны быть включены следующие величины: себестоимость механизма подъема C как параметр, определяющий капитальные затраты на изготовление крана; масса механизма M как параметр, определяющий эксплуатационные затраты и стоимость монтажа; КПД механизма η , также оказывающий влияние на эксплуатационные затраты; габаритные размеры механизма A и B , увеличение которых несет за собой увеличение массы грузовой тележки и, как следствие, также повышение эксплуатационных затрат. Требования, предъявляемые к конструкции механизма подъема, имеющие обязательный характер, задаются в виде ограничений, например условие обеспечения необходимой прочности механизма.

Суть принципа Парето заключается в том, что среди всех возможных решений механизма X существует некоторое множество решений $P_j(X)$, между которыми лицом, принимающим решения, (ЛПР) не может быть выражено четкое предпочтение. Данное множество называется множеством парето-оптимальных решений или множеством Парето. Любое парето-оптимальное решение превосходит другое парето-оптимальное решение по одним критериям, но уступает ему хотя бы одному другому. В то же время каждое парето-оптимальное решение превосходит любое прочее решение, не вошедшее во множество Парето, по всем критериям. Формирование множества Парето является первой задачей, которую необходимо решить при оптимальном проектировании механизма подъема.

Механизм подъема груза может быть выполнен по различным структурным схемам: с одной или двумя параллельно работающими лебедками, расположенными на одной или разных грузовых тележках. Кроме того, сами лебедки могут иметь различные кинематические схемы, в частности с применением мотора-редуктора или с двигателем и редуктором в виде отдельных узлов, с открытой зубчатой передачей или без нее, также могут быть применены различные варианты кратности полиспаста и параметры барабана. В связи с большим разнообразием возможных вариантов структурной схемы механизма предлагается производить поиск оптимального решения в следующей последовательности: сначала ЛПР должно выявить все перспективные структурные схемы; затем для каждой из структурных схем должно быть построено свое частное множество Парето; далее, сравнивая решения, полученные для отдельных схем с помощью векторного критерия качества, формируется общее множество Парето для всех структурных схем.

Для построения множества Парето для отдельной структурной схемы представим механизм подъема как сложную техническую систему, состоящую из отдельных подсистем или модулей. В наиболее сложном варианте в состав механизма подъема входят следующие модули: 1 – электродвигатель и система управления, 2 – полиспаст и грузозахватное устройство, 3 – установка барабана, 4 – модуль трансмиссии, включающий в себя редуктор и соединительные муфты, 5 – модуль открытой зубчатой передачи, 6 – мо-

дуль тормоза (или тормозов). В других вариантах структурных схем состав модулей может отличаться, в частности может отсутствовать пятый модуль, а первый и четвертый модули при применении моторов-редукторов могут быть объединены. Задача формирования множества Парето в рамках отдельной схемы заключается в подборе оптимальных покупных изделий, а также определении оптимальных параметров оригинальных узлов, т.е. в выборе оптимальных частных решений для отдельных модулей. Особенностью предложенного векторного критерия является то, что он может быть применен как для оценки общего решения для всей системы механизма подъема, так и для оценки частных решений для отдельных модулей, поскольку для каждого из них относительно легко могут быть определены себестоимость, масса, КПД и габаритные размеры. Кроме того, на каждый из модулей накладывается своя система ограничений, в частности ограничения по прочности, надежности, технологичности, условиям сборки и др. На всю систему механизма подъема целиком также накладывается ряд ограничений, прежде всего ограничение по заданной техническим заданием скорости подъема груза. На скорость подъема груза оказывают влияние: частота вращения вала выбранного электродвигателя, кратность применяемого полиспаста, диаметр барабана, передаточное отношение редуктора и открытой зубчатой передачи. При этом изменение одного из перечисленных параметров неизбежно должно сопровождаться изменением какого-либо другого с тем, чтобы в итоге была обеспечена необходимая скорость. Таким образом, в процессе поиска оптимального решения, помимо прочего, необходимо определить оптимальные значения вышеперечисленных взаимозависимых параметров. Поставленная задача по своей структуре близка к известной в литературе задаче об оптимальной загрузке судна [3], для решения которой может быть использован метод динамического программирования.

Для того, чтобы можно было легко менять распределение указанных выше параметров, определяющих скорость подъема груза и имеющих различную размерность, необходимо ввести новый безразмерный параметр ν , называемый степенью редукции.

Требуемая степень редукции для всего механизма определится из условия обеспечения заданной техническим заданием скорости подъема груза ν :

$$\nu = \frac{n_{дв\max} \cdot \pi \cdot D_{б\max}}{u_{п\min} \cdot u_{р\min} \cdot u_{оп\min} \cdot \nu},$$

где $n_{дв\max}$ – максимальные обороты электродвигателя для всех имеющихся в базе данных, $D_{б\max}$ – максимальный диаметр барабана для всех имеющихся в базе данных барабанов (задается предварительно ЛПР индивидуально для каждого крана), $u_{п\min}$, $u_{р\min}$, $u_{оп\min}$ – минимальные имеющиеся в базе данных значения кратности полиспаста ($u_{п\min} = 1$), передаточного отношения редуктора, открытой зубчатой передачи ($u_{оп\min} = 1$).

Для отдельных решений каждого из модулей степень редукции определится следующим образом:

для 1 модуля:
$$\nu_{1f} = \frac{n_{дв\max}}{n_{двf}};$$

для 2 модуля:
$$\nu_{2f} = \frac{u_{пf}}{u_{п\min}};$$

для 3 модуля:
$$\nu_{3f} = \frac{D_{б\max}}{D_{бf}};$$

для 4 модуля:
$$\nu_{4f} = \frac{u_{рf}}{u_{р\min}};$$

для 5 модуля:
$$\nu_{5f} = \frac{u_{опf}}{u_{оп\min}};$$

где $n_{двf}$, $u_{пf}$, $D_{бf}$, $u_{рf}$, $u_{оп}$ – соответственно обороты двигателя, кратность полиспаста, диаметр барабана, передаточные числа редуктора и открытой передачи для некоторого f -го решения, f – номер решения в базе данных для соответствующего модуля.

Фактическая степень редукции для всей системы определится:

$$\nu = \nu_{1f} \cdot \nu_{2f} \cdot \nu_{3f} \cdot \nu_{4f} \cdot \nu_{5f}.$$

Предварительно для каждого из модулей должны быть сформированы частные множества парето-оптимальных решений отдельно для каждой степени редукции, в дальнейшем на основе метода динамиче-

ского программирования, рассматривая сочетания различных частных парето-оптимальных решений для первого и второго модуля, будет составлено общее множество парето-оптимальных решений для двух первых модулей. Далее, рассматривая сочетания полученных общих парето-оптимальных решений для двух первых модулей с частными парето-оптимальными решениями для третьего модуля, формируется множество общих парето-оптимальных решений для первых трех модулей. Повторив аналогичную процедуру для оставшихся модулей, на последнем шаге будет получено множество парето-оптимальных решений для всей системы механизма в рамках рассматриваемой структурной схемы.

Алгоритм формирования множества Парето для отдельной кинематической схемы приведен на рис. 1. Для обозначения отдельных решений вводятся следующие индексы: i – номер рассматриваемого модуля (шага), j_i – номер степени редукции для i -го модуля, n – номер частного парето-оптимального решения в формируемом множестве парето-оптимальных решений, полученных для i -го модуля и j -й степени редукции, s – номер рассматриваемой кинематической схемы, z – номер общего парето-оптимального решения X_{jz} , полученного на текущем i -ом шаге при степени редукции y ; k_{i-1} – номер степени редукции для общих парето-оптимальных решений, полученных на предыдущем шаге (при рассмотрении « $i-1$ »-го модуля); m – номер общего парето-оптимального решения X_{i-1km} , полученного на предыдущем шаге и степени редукции k ; y_i – степень редукции, получаемая на текущем i -ом шаге при сочетании n -го частного парето-оптимального решения X_{jn} , полученного для i -го модуля при степени редукции j_i с общим парето-оптимальным решением X_{i-1km} , полученным на предыдущем $i-1$ -м шаге при степени редукции k и имеющим номер m .

Для первых 4 модулей общие парето-оптимальные решения образуются как сочетание частных парето-оптимальных решений для рассматриваемого модуля X_{jn} с общими парето-оптимальными решениями, полученными на предыдущем шаге (для всех уже рассмотренных ранее модулей) X_{i-1km} . Степени редукции рассматриваемого общего решения v сравнивается с полученными ранее v_y (блок 10). Если подобная степень редукции ранее встречалась, то по предложенному алгоритму рассматриваемое решение сравнивается с полученными ранее парето-оптимальными решениями X_{jz} с той же степенью редукции v_y (блоки 15, 16). Если данная степень редукции получена впервые, решение запоминается как первое парето-оптимальное решение с этой степенью редукции (блок 13). В результате формируются множества парето-оптимальных решений на каждом шаге, вплоть до пятого. На пятом шаге для каждого из общих парето-оптимальных решений, полученных для 4 первых модулей, определяются оптимальные параметры открытой зубчатой передачи таким образом, чтобы обеспечить заданную скорость подъема груза (блок 35). Все полученные на 5 шаге решения будут иметь одинаковую степень редукции, поэтому могут быть обозначены просто X_{5z} . Сравнивая все полученные решения с помощью аналогичного алгоритма (блоки 36, 37), формируем множество общих парето-оптимальных решений для 5 модулей. На последнем шаге для каждого решения рассматриваются различные варианты тормозов, при этом каждое полученное решение окончательно проверяется по всем ограничениям, накладываемым на всю систему (блок 51). В итоге формируется область общих парето-оптимальных решений для всей системы для рассматриваемого варианта кинематической схемы (блоки 53, 54).

На последующей стадии сравниваются общие парето-оптимальные решения, полученные для разных кинематических схем по схожему алгоритму. В итоге окончательно формируется множество парето-оптимальных решений для механизма подъема.

В случае если полученное множество парето-оптимальных решений для механизма подъема окажется слишком велико, чтобы ЛППР смог сделать осознанный выбор, рекомендовано воспользоваться методом последовательного сужения множества Парето. Рассматривая предложенный векторный критерий качества, можно сделать вывод, что критерий габаритных размеров является наименее значимым, поэтому, реализуя указанный метод, полученное множество Парето следует повторно исследовать с помощью упрощенного векторного критерия, содержащего только три первых компонента, при этом может быть введено дополнительное условие, позволяющее исключить решения, имеющие заведомо большие габариты. В случае если и данная процедура не позволит получить достаточно узкое множество Парето, для его дальнейшего сужения рекомендуется модифицированный метод целевого программирования. Для каждого из решений, входящих во множество Парето, определяется значение метрики $\rho(x_j)$, обозначающей расстояние между рассматриваемым решением и идеальным вектором, составленным из наименьших значений массы и стоимости механизма и наибольшего значения КПД:

$$\rho(x_j) = \sum_{i=1}^m \frac{f_{ij} - f_{i\min}}{f_{i\min}},$$

где i – номер компоненты векторного критерия качества, j – номер решения, f_{ij} – значение i -го критерия для j -го решения. На основании значения метрики множество Парето может быть сокращено до размера, позволяющего ЛППР произвести выбор окончательного решения механизма подъема.

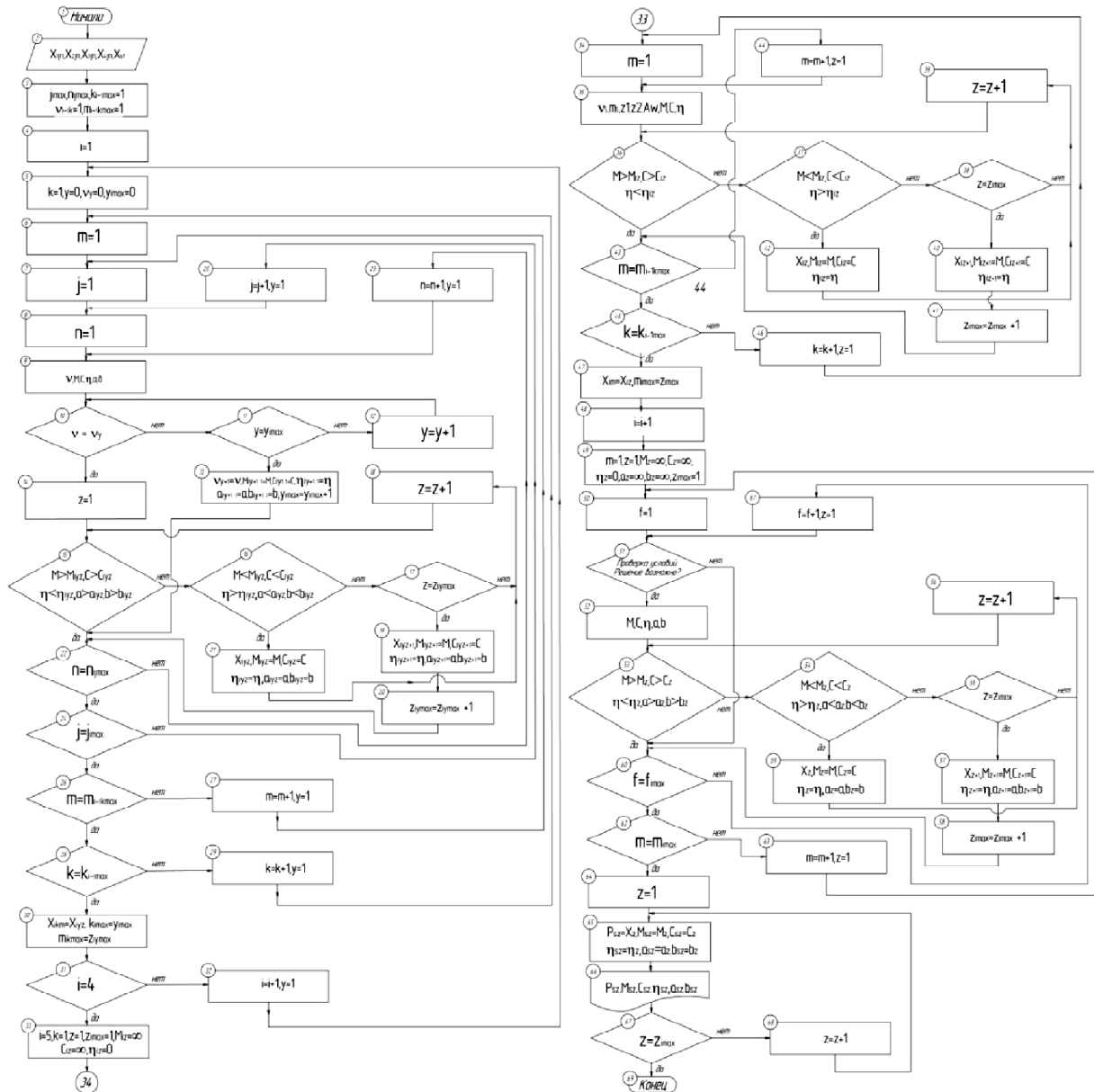


Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования множества парето-оптимальных решений

ЛИТЕРАТУРА

1. Барт Р. Лингвистика текста // Новое в зарубежной лингвистике / Р. Барт. М.: Прогресс, 1978. Вып. VIII: Лингвистика текста. С. 442-449.1.
2. Shuishui L. Introduction for new hoisting mechanism of a crane / L. Shuishui, F. Yuanxun, and B. Tingchun // Machinery Design & Manufacture. no. 5. P. 275-276, 2012.
3. Чернова Н.М. Двухуровневая задача оптимального проектирования механизмов подъема груза / Н.М. Чернова // Вестник СГТУ. 2008. № 4 (36). С. 50-52.
4. Bellman R. Applied dynamic programming / R. Bellman, S. Dreyfus. Princeton, New Jersey: Princeton university press, 1962. 382 p.

Кобзев Роман Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Балаковского института техники, технологий и управления (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Roman A. Kobzev – Ph. D., Associate Professor Department of Elevating, Construction and Road Machinery, Balakovo Institute of Engineering, Technologies and Management, Part of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.02.14, принята к опубликованию 15.05.14

Р.А. Кобзев

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОЗЛОВЫХ КРАНОВ
ВЫСОКОГО КЛАССА ОТВЕТСТВЕННОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

Предлагается метод определения коэффициентов запаса прочности отдельных элементов металлоконструкции и механизмов козловых кранов высокого класса ответственности с учетом требуемого уровня безопасности эксплуатации, заданного срока эксплуатации и группы классификации режима работы крана.

Козловые краны высокого класса ответственности, вероятностный анализ безопасности, анализ риска отказа, коэффициент запаса прочности

R.A. Kobzev

DESIGN PHILOSOPHY FOR GANTRY CRANES: SAFETY AND RELIABILITY EXCELLENCE

The author presents a new method to determine the safety factor for separate components in metal constructions and gears in gantry cranes of high responsibility taking into account the required level of operation safety, product warranty period, and intensity of crane operation.

Gantry cranes of high responsibility, probabilistic analysis of safety, analysis of failure risks, coefficient of safety margin

При проектировании козловых кранов высокого класса ответственности особое внимание необходимо уделять вопросам обеспечения необходимого уровня безопасности эксплуатации. Для оценки уровня безопасности эксплуатации грузоподъемных машин широко применяются методы анализа риска отказа [1], прежде всего дедуктивный логико-графический метод построения и анализа дерева отказов [2]. Данный метод позволяет установить логические причинно-следственные связи между появлением отказов отдельных простейших элементов крана и вершинного опасного события, выражаемые в виде графической структуры дерева отказов, тем самым устанавливая вклад каждого элемента в безопасность всей системы. В большинстве источников, посвященных проблеме анализа риска, принимается, что риск отказа отдельных элементов и относительно несложных технических систем подчиняется экспоненциальному закону распределения [3]

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

где λ – интенсивность отказов элемента или системы, t – время эксплуатации.

Для того чтобы установить зависимость между вероятностью отказа отдельного элемента крана и заложенным при его проектировании общим запасом прочности построена математическая модель, связывающая интенсивность отказа и запас прочности. Условие прочности отдельного элемента на основании известной модели «нагрузка-прочность» может быть представлено:

$$S \leq R,$$

где S – несущая способность, R – сопротивление элемента. При этом считается, что данные величины имеют нормальное распределение:

$$f(R) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{R - m_R}{2\sigma_R^2}\right);$$

$$f(S) = \frac{1}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{S - m_S}{2\sigma_S^2}\right),$$

где m_R, σ_R – соответственно математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение сопротивления R ; m_S, σ_S – соответственно математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение несущей способности S .

Под запасом прочности Z при расчете по допускаемым напряжениям понимается соотношение

$$Z = \frac{\sigma_{np}}{\sigma},$$

где σ_{np} – предельное значение напряжений для материала элемента, σ – фактическое значение напряжений. При расчете по предельным состояниям отдельно определяются коэффициенты, учитывающие воз-

возможность перегрузки K_Q , неоднородность материала γ_m , особенности условий работы элемента γ_c . При этом общий запас прочности может быть выражен как

$$Z = \frac{K_Q}{\gamma_m \cdot \gamma_c}.$$

Воспользуемся известным термином резерв прочности Ψ

$$\Psi = R - S.$$

Поскольку R и S распределены по нормальному закону, следовательно, Ψ также распределится по нормальному закону (рис. 1), т.е.

$$f(\Psi) = \frac{1}{\sigma_\Psi \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\Psi - m_\Psi}{2\sigma_\Psi^2}\right),$$

где m_Ψ , σ_Ψ – соответственно математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение резерва прочности Ψ . При этом

$$m_\Psi = m_R - m_S, \quad \sigma_\Psi = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}.$$

В литературе [1] предложено следующее условие безопасности:

$$P(\Psi > 0) = \int_0^{\Psi_{\max}} f(\Psi) d\Psi = 0,5 + \int_0^{m_\Psi} f(\Psi) d\Psi = 0,5 + \Phi(\alpha) - \Phi(\beta),$$

где Φ – функция Лапласа, $\alpha = \frac{m_\Psi - m_\Psi}{\sigma_\Psi} = 0$, $\beta = \frac{0 - m_\Psi}{\sigma_\Psi} = -\frac{m_\Psi}{\sigma_\Psi}$,

откуда

$$P(\Psi > 0) = 0,5 + \Phi\left(\frac{m_\Psi}{\sigma_\Psi}\right);$$

$$\frac{m_\Psi}{\sigma_\Psi} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{m_R(1 - \frac{m_S}{m_R})}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}.$$

Представим коэффициент общего запаса прочности элемента Z как $Z = \frac{m_R}{m_S}$;

$$P(\Psi > 0) = 0,5 + \Phi\left[\frac{m_R(1 - 1/Z)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right].$$

Тогда выражение для риска отказа элемента:

$$Q = 1 - P = 0,5 - \Phi\left[\frac{m_R(1 - 1/Z)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right].$$

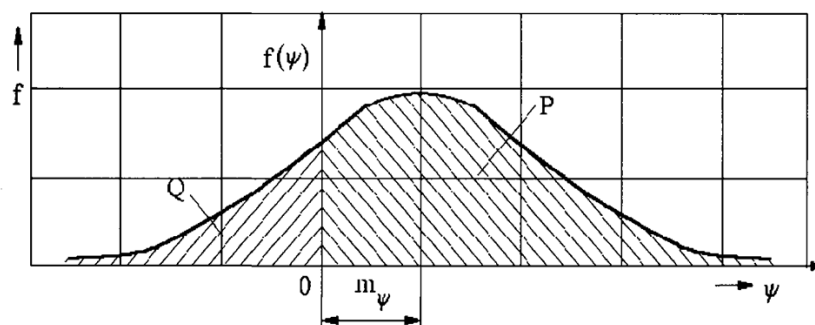


Рис. 1. Плотность распределения $f(\Psi)$ резерва прочности Ψ : P – зона безопасности; Q – зона риска

Данное выражение отражает зависимость между риском отказа и запасом прочности элемента в детерминированном аспекте. Фактически запас прочности, заложенный конструктором в момент проектирования, в дальнейшем в течение всего срока эксплуатации будет уменьшаться, пока не станет равным 1 в момент времени, когда произойдет отказ элемента. Характеристики сопротивления материала m_R и σ_R , и среднее квадратичное отклонение несущей способности σ_S в общем случае со

временем будут менять свое значение, поскольку геометрические характеристики сечения будут ухудшаться, а сопротивление металла снижаться вследствие процессов накопления усталостных повреждений, абразивного и коррозионного износа, также носящих случайный характер. Данные изменения и являются причиной изменения запаса прочности, поскольку математические ожидания несущей способности m_S и сопротивления m_R со временем будет смещаться в сторону друг друга до момента вероятного наступления отказа, когда их значения сравняются. Тогда вероятность безотказной работы можно выразить как функцию времени:

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left[\frac{m_R(t)(1 - 1/Z(t))}{\sqrt{\sigma_R(t)^2 + \sigma_S(t)^2}} \right],$$

где $Z(t)$ – функция фактического запаса прочности от времени, $m_R(t)$ – функция математического ожидания сопротивления элемента от времени, $\sigma_R(t)$ – функция среднего квадратичного отклонения сопротивления элемента от времени, $\sigma_S(t)$ – функция среднего квадратичного отклонения несущей способности от времени.

С точки зрения принятого экспоненциального закона распределения вероятность безопасной работы отдельного крана элемента также определяется выражением

$$P(t) = \exp(-\lambda t).$$

Тогда в момент начала эксплуатации крана ($t=1$), когда фактический запас прочности элемента равен исходному запасу, заложенному конструктором, значения m_R и σ_R соответствуют известным значениям распределения механических свойств материала элемента, а несущая способность элемента определяются только точностью его изготовления:

$$P(t=1) = 0,5 + \Phi \left[\frac{m_R(1 - 1/Z)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_0}^2}} \right] = e^{-\lambda}. \quad (1)$$

Из полученного выражения, зная значения интенсивностей отказов для типовых элементов кранов обычного класса ответственности, параметры распределения прочностных характеристик материала, а также нормативные коэффициенты запаса прочности для этих элементов, можно получить значение среднего квадратичного отклонения несущей способности элемента σ_{S_0} в начальный момент времени как

$$\sigma_{S_0} = \sqrt{\frac{m_R(Z-1)}{Z \cdot \text{probit}(e^{-\lambda} - 0,5)} - \sigma_R^2}, \quad (2)$$

где *probit* – функция, обратная функции Лапласа. Величина дисперсии несущей способности в начальный момент времени σ_{S_0} на момент начала эксплуатации отражает вероятность появления отклонений несущей способности при изготовлении элемента. Полученное значение σ_{S_0} далее может быть использовано для нахождения интенсивности отказа элемента λ , имеющего некоторый запас прочности Z , отличающийся от общепринятого в краностроении для элементов данного типа:

$$\lambda = \frac{\ln 1}{\Phi \left[\frac{m_R(1 - 1/Z)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_0}^2}} \right]}. \quad (3)$$

Или, задавшись необходимой величиной интенсивности отказа, можно определить минимальный необходимый запас прочности для достижения требуемого уровня риска отказа элемента:

$$Z = \frac{m_R}{m_R - \text{probit}(e^{-\lambda} - 0,5) \cdot \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_0}^2}}. \quad (4)$$

Если ввести параметр $\Theta = \frac{m_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_0}^2}}$ выражения (2), (4), (5) примут более удобный вид:

$$0,5 + \Phi(\Theta \cdot (1 - 1/Z)) = e^{-\lambda};$$

$$\lambda = \frac{\ln 1}{\Phi[\Theta \cdot (1 - 1/Z)] + 0,5};$$

$$Z = \frac{\Theta}{\Theta - \text{probit}(e^{-\lambda} - 0,5)}.$$

Изначально полагаем, что интенсивность отказа элемента λ , определенная из опыта эксплуатации подобных устройств, соответствует элементу, работающего в наиболее часто встречающемся среднем режиме (М5) на протяжении штатного срока службы $T_0=16$ лет (для группы классификации режима работы А5). В случае если в проектируемом кране данный элемент будет работать в каком-либо ином режиме и на протяжении другого срока эксплуатации, необходимо уточнить данное значение λ . Полагаем, что наработка двух элементов в момент окончания эксплуатации должна быть одинакова, также как и вероятность отказа P :

$$P_0 = e^{-\lambda_0 T_0} = P = e^{-\lambda T};$$

$$\lambda = \frac{T_0}{T} \cdot \lambda_0. \quad (5)$$

Наработка элемента может быть определена как

$$N = K_m \cdot \tau,$$

где K_m – коэффициент нагружения, τ – общее время работы механизма на протяжении всего срока эксплуатации согласно ИСО 4301/1-86. Вводим параметр k_p , характеризующий отношение времени работы механизма τ к продолжительности срока службы T :

$$k_p = \frac{\tau}{T}.$$

Предполагая, что циклы работы крана повторяются во времени, параметр k_p можно определить для временного интервала в 1 год, зная общее время работы крана на протяжении года. Общая наработка элемента:

$$N = K_m \cdot k_p \cdot T.$$

Учитывая, что наработка элементов одинакова

$$K_{m0} \cdot k_{p0} \cdot T_0 = K_m \cdot k_p \cdot T, \text{ тогда } \frac{T}{T_0} = \frac{K_{m0} \cdot k_{p0}}{K_m \cdot k_p}.$$

Выражение (6) принимает окончательный вид:

$$\lambda = \frac{K_m \cdot \tau \cdot T_0}{K_{m0} \cdot \tau_0 \cdot T} \cdot \lambda_0 = \frac{N \cdot T_0}{N_0 \cdot T} \cdot \lambda_0.$$

Если среднестатистический элемент подобного типа эксплуатировался в режиме М5, то согласно ГОСТ 25546-82 $T_0=16$ лет, $N_0=1575$, а

$$\lambda = \frac{16 \cdot N_0}{1575 \cdot T} \cdot \lambda_0. \quad (6)$$

Таким образом, используя выражения (2), (4) и (6), можно определить необходимое значение коэффициента запаса прочности типового кранового элемента, исходя из требуемой интенсивности отказа, заданного срока эксплуатации и группы классификации режима работы. Помимо увеличения коэффициента запаса прочности также следует рассматривать возможность резервирования наиболее ответственных элементов, например, при необходимости увеличить запас торможения следует ввести в состав механизма дополнительный тормоз, поскольку увеличение тормозного момента приведет к повышению динамических нагрузок на механизм. В практике краностроения также известны случаи использования двух параллельно работающих полиспастов, канаты которых наматываются на общий барабан.

Литература

1. Towards risk assessment for crane activities / O.N. Aneziris, I.A. Papazoglou, M.L. Mud, M. Damen and others // Safety Science. 2008. Vol. 46, Is. 6. P. 872-884.
2. Safety Assessment of Crane Based on FTA and ANP / Jian Zhang, Yuanrong Zhang, Chao Ji, Yudong Li // Proceedings of the Sixth International Conference on Management Science and Engineering Management. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2013. Vol. 185. P. 453-464.
3. Панасенко Н.Н. Безопасность подъемных сооружений: монография / Н.Н. Панасенко, В.С. Котельников. М.: ООО «НТЦ КВАН», 2004. 593 с.

Кобзев Роман Анатольевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Подъемно-транспортные, строительные
и дорожные машины» Балаковского института

Roman A. Kobzev –
Ph. D., Associate Professor
Department of Elevating, Construction and Road
Machinery,

техники, технологий и управления (филиала)
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Balakovo Institute of Engineering, Technologies
and Management,
Part of Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.04.14, принята к опубликованию 20.06.14

УДК 517.958:621.225:621.454

Д.В. Кондратов, А.В. Калинина

**ЗАДАЧИ ГИДРОУПРУГОСТИ ДЛЯ ТРУБЫ КОЛЬЦЕВОГО ПРОФИЛЯ
С УПРУГОЙ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕРЕГУЛЯРНОЙ ВНЕШНЕЙ ОБОЛОЧКОЙ
ПРИ НАЛИЧИИ ВИБРАЦИИ**

Рассмотрена механическая модель системы, представляющая собой трубу кольцевого профиля, образованную двумя поверхностями соосных цилиндрических оболочек, взаимодействующих с вязкой несжимаемой жидкостью, внешняя из которых является геометрически нерегулярной, а внутренняя – абсолютно жесткий цилиндр. Построена математическая модель этой системы, состоящая из дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих динамику вязкой несжимаемой жидкости и упругой ребристой оболочки совместно с граничными условиями.

Гидроупругость, труба кольцевого профиля, геометрически нерегулярная оболочка, вязкая несжимаемая жидкость, соосные оболочки, вибрация

D.V. Kondratov, A.V. Kalinina

**HYDROELASTICITY ISSUES OF THE RING-TYPE TUBE WITH ELASTIC
GEOMETRICALLY IRREGULAR OUTER SHELL UNDER VIBRATION**

The paper considers a mechanical model of the system constituting a ring tube formed by two surfaces of coaxial cylindrical shells interacting with viscous incompressible liquid. The mathematical model of the given system presents a partial differential equation describing the dynamics of the viscous incompressible liquid and elastic ridge shell together with the boundary conditions.

Hydroelasticity, tube of the ring section, geometrically irregular shell, viscous incompressible liquid, coaxial shell, vibration

Вопросы математических постановок задач гидроупругости сложных механических систем, являющихся совокупностью абсолютно жестких, упругих и жидких тел с учётом сложных динамических взаимосвязей, длительное время привлекают внимание исследователей. Одними из основных конструкций таких систем являются механические системы, состоящие из двух цилиндрических оболочек, вложенных друг в друга, между которыми расположена жидкость. Демпфирующая жидкость, протекающая между внутренней и внешней цилиндрической оболочками, может считаться вязкой несжимаемой жидкостью.

Примерами использования модели с двумя цилиндрическими оболочками можно считать двигатели внутреннего сгорания, поплавковые приборы навигации, жидкостные ракетные двигатели, телескопические шасси, силовые цилиндры с полым плунжером [1-3]. Также примерами использования модели с двумя цилиндрическими оболочками можно считать системы трубопроводов, где жидкость проходит по кольцевой трубе, а во внутренней трубе находится газ либо жидкость постоянного давления. Ранее рассматривалась задача для трубы кольцевого профиля с внешней геометрически нерегулярной цилиндрической оболочкой при воздействии гармонического перепада давления на концах [4].

В процессе эксплуатации механические системы подвергаются значительным вибрационным нагрузкам от внешних и внутренних источников вибрации. Наличие вибрации в механической систе-

ме может приводить к возникновению существенных колебаний элементов конструкции. На резонансных частотах скорости упругих перемещений стенок трубопроводов будут максимальны, а это может приводить к появлению разрывов в жидкости и возникновению вибрационной кавитации в потоке жидкости и, как следствие, кавитационного износа стенок цилиндрических оболочек [5].

Для уменьшения веса механических конструкций используются тонкостенные оболочки. Однако для достижения определенных целей конструкции внешняя оболочка может быть геометрически нерегулярной, а внутренняя – абсолютно жесткой. Использование геометрически нерегулярной внешней оболочки с поперечными ребрами жесткости в виде шпангоутов не только позволяет уменьшить вес конструкции, но и обеспечивает устойчивость к различным вибрационным воздействиям.

Таким образом, актуальной задачей является исследование динамики взаимодействия трубы кольцевого профиля с упругой, геометрически нерегулярной внешней оболочкой и абсолютно жесткой внутренней с вязкой несжимаемой жидкостью при наличии вибрации.

Рассмотрим модель механической системы, состоящую из двух соосных цилиндрических оболочек, вложенных друг в друга, взаимодействующих с вязкой несжимаемой жидкостью. Внутренняя оболочка представляет собой абсолютно жесткий цилиндр. Внешняя цилиндрическая оболочка представлена трубой кольцевого сечения, в которой толщина стенки трубы значительно меньше ее радиуса, что дает возможность рассматривать ее как упругую цилиндрическую оболочку. Кроме того, для увеличения жесткости внешней упругой цилиндрической оболочки используются ребра жесткости в виде шпангоутов. Между цилиндрическими оболочками рассматривается ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости. Модель механической системы представлена на рис. 1.

Ширина h_0 цилиндрической щели кольцевого сечения значительно меньше внешнего радиуса R_2 внутренней оболочки и внутреннего радиуса R_1 и радиуса срединной поверхности R внешней оболочки $h_0 = 2(R - R_1) \ll R$. Радиус срединной поверхности R значительно больше толщины внешней $h_0 = 2(R - R_1)$ оболочки. Радиус срединной поверхности оболочки равен R а ее толщина на участках, где отсутствуют ребра жесткости, равна h_0 . Длины цилиндрических оболочек l – одинаковые, а упругие перемещения внешней оболочки значительно меньше ширины δ цилиндрической щели. Торцы внешней оболочки свободно опираются на опоры, перемещение внутренней оболочки относительно внешней на концах отсутствует. Система считается термостабилизированной. В системе присутствует внешний источник вибрации.

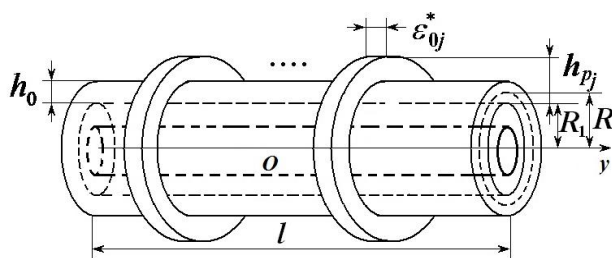


Рис. 1. Модель механической системы

Система рассматривается в цилиндрической системе координат r, θ, y ($\bar{n}_r, \bar{n}_\theta, \bar{j}$ – орты цилиндрической системы). Центр системы O_1 расположен в геометрическом центре соосных оболочек в невозмущенном состоянии. Полюс цилиндрической системы координат совпадает с началом координат $O_1x_1y_1z_1$ и направления осей Oy, O_1y_1 цилиндрической и декартовой систем координат совпадают. Перемещения вдоль оси O_1y_1 отсутствуют.

Внешняя поверхность внешней оболочки трубы является геометрически нерегулярной и имеет n ребер жесткости ступенчато изменяющейся высоты. Ребра жесткости представляют собой внешние шпангоуты, характеризуются своей высотой h_{pj} , длиной ϵ_{0j}^* и продольной координатой начала ребра y_j . При этом высота ребра при движении по оси Oy изменяется скачкообразно.

Таким образом, получается, что внешняя оболочка имеет разрывы в точках оси Oy , соответствующих началу появления ребер и точек их окончания. Можно воспользоваться единичной функцией Хевисайда $\Gamma(y)$, которая определяется как

$$\Gamma(y) = \begin{cases} 0, & \text{если } y < 0 \\ 1, & \text{если } y \geq 0 \end{cases}$$

В этом случае ступенчатый характер изменения высоты ребра можно описать с помощью разностей функций Хевисайда по продольной координате. Тогда внешнюю поверхность оболочки можно описать с помощью общего уравнения:

$$z_2 = \frac{h_0}{2} + \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{h_0}{h_{pj}}\right) h_{pj} \Delta \Gamma_{y_j},$$

где $\Delta \Gamma_{y_j} = \Gamma(y - y_j) - \Gamma(y - y_j - \varepsilon_{0,j}^*)$, $\Gamma(y)$ – единичная функция Хевисайда по продольной координате; y_j – точка появления ребра по продольной координате.

Математическая модель рассматриваемой механической системы представляет собой связанную систему уравнений, включающую нелинейные уравнения в частных производных Навье – Стокса и уравнение неразрывности, уравнения в частных производных для описания динамики внутренней и внешней упругих цилиндрических оболочек, полученные исходя из гипотез Кирхгофа – Лява, и соответствующие граничные условия.

Течение вязкой несжимаемой жидкости между цилиндрическими оболочками с учетом окружной деформации оболочки при наличии вибрации описывается уравнениями Навье – Стокса. Скалярная форма уравнений динамики жидкости имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} W_r &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial y^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{V_r}{r^2} \right), \\ W_\theta &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial y^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta}{r^2} \right), \\ W_y &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_y}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_y}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0.$$

где

$$\begin{aligned} W_r &= W_{1z1} \cos \theta + W_{1x1} \sin \theta + \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_y \frac{\partial V_r}{\partial y} - \frac{V_\theta^2}{r}, \\ W_\theta &= -W_{1z1} \sin \theta + W_{1x1} \cos \theta + \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_y \frac{\partial V_\theta}{\partial y} + \frac{V_r V_\theta}{r}, \\ W_y &= \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_y}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_y}{\partial \theta} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y}. \end{aligned}$$

Здесь V_y, V_r, V_θ – компоненты вектора скорости жидкости в цилиндрической системе координат (\bar{n}_r, \bar{j}) , начало O которой находится в центре внутренней оболочки; p – давление жидкости; ρ – плотность жидкости; ν – кинематический коэффициент вязкости; y – координата вдоль оси симметрии Oy ; r – расстояние от оси Oy ; t – время.

Граничные условия для системы (1) представляют собой условия прилипания вязкой жидкости к поверхностям оболочек и условия для давления на концах механической системы:

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{\partial u_3}{\partial t}, V_\theta = \frac{\partial u_2}{\partial t}, V_y = -\frac{\partial u_1}{\partial t} \text{ при } r = R_2 + \delta + u_3; \\ V_r &= 0, V_\theta = 0, V_y = 0 \text{ при } r = R_2; \end{aligned} \quad (2)$$

где u_3 – прогиб внешней оболочки, положительный в сторону противоположную центру кривизны; u_2 – окружное упругое перемещение оболочки в направлении \bar{n}_θ ; u_1 – продольное перемещение оболочек, положительное в сторону противоположную оси Oy .

Для вывода уравнений динамики геометрически нерегулярной оболочки применим вариационный интегральный принцип Гамильтона. Исходя из вариационного принципа Гамильтона, уравнения динамики упругой геометрически нерегулярной оболочки в случае осесимметричной и окружной деформации имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1^p}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial S^p}{\partial \theta} - h_0 \rho_0 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \left(1 + \sum_{j=1}^n k_{1j} \Delta \Gamma_{sj} \right) &= -q_s, \\ \frac{\partial S^p}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial N_2^p}{\partial \theta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial M_2^p}{\partial \theta} + \frac{2}{R} \frac{\partial H^p}{\partial y} - h_0 \rho_0 \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \left(1 + \sum_{j=1}^n k_{1j} \Delta \Gamma_{sj} \right) &= -q_\theta, \\ \frac{\partial^2 M_1^p}{\partial y^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 M_2^p}{\partial \theta^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial H^p}{\partial y \partial \theta} - \frac{1}{R} N_2^p - h_0 \rho_0 \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \left(1 + \sum_{j=1}^n k_{1j} \Delta \Gamma_{sj} \right) &= -q_n \end{aligned} \quad (3)$$

где зависимости $S^p, H^p, N_1^p, N_2^p, M_1^p, M_2^p$ от перемещений имеют вид

$$\begin{aligned} S^p &= \frac{Eh_0}{2(1+\mu_0)} \left\{ \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial u_1}{\partial \theta} \right) \left(1 + \sum_{j=1}^n k_{1j} \Delta \Gamma_{sj} \right) + \frac{2}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y \partial \theta} \right) h_0 \sum_{j=1}^n k_{2j} \Delta \Gamma_{sj} \right\}, \\ H^p &= \frac{Eh_0^3}{12(1+\mu_0)} \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y \partial \theta} \right) \left(1 + \sum_{j=1}^n k_{3j} \Delta \Gamma_{sj} \right) + \frac{Eh_0}{2(1+\mu_0)} \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial u_1}{\partial \theta} \right) h_0 \sum_{j=1}^n k_{2j} \Delta \Gamma_{sj}, \\ N_1^p &= \frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left\{ \left[\frac{\partial u_1}{\partial y} + \mu_0 \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} + u_3 \right) \right] \left(1 + \sum_{j=1}^n k_{1j} \Delta \Gamma_{sj} \right) + \left(\mu_0 \frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) h_0 \sum_{j=1}^n k_{2j} \Delta \Gamma_{sj} \right\}, \\ N_2^p &= \frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left\{ \left[\frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} + u_3 \right) + \mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right] \left(1 + \sum_{j=1}^n k_{1j} \Delta \Gamma_{sj} \right) + \left(\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \mu_0 \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) h_0 \sum_{j=1}^n k_{2j} \Delta \Gamma_{sj} \right\}, \\ M_1^p &= \frac{Eh_0^3}{12(1-\mu_0^2)} \left(\mu_0 \frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) \left(1 + \sum_{j=1}^n k_{3j} \Delta \Gamma_{sj} \right) + \frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \mu_0 \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} + u_3 \right) \right) h_0 \sum_{j=1}^n k_{2j} \Delta \Gamma_{sj}, \\ M_2^p &= \frac{Eh_0^3}{12(1-\mu_0^2)} \left(\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \mu_0 \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) \left(1 + \sum_{j=1}^n k_{3j} \Delta \Gamma_{sj} \right) + \frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left(\mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} + u_3 \right) \right) h_0 \sum_{j=1}^n k_{2j} \Delta \Gamma_{sj}, \\ k_{1j} &= \left(1 - \frac{h_0}{h_{pj}} \right) \frac{h_{pj}}{h_0}, \quad k_{2j} = \left(1 - \frac{h_0}{h_{pj}} \right) \frac{h_{pj}^2}{2h_0^2}, \quad k_{3j} = \left(1 - \frac{h_0}{h_{pj}} \right) \left(4 - 2 \frac{h_0}{h_{pj}} + \frac{h_0^2}{h_{pj}^2} \right) \frac{h_{pj}^3}{h_0^3}, \end{aligned}$$

Здесь $\Delta \Gamma_{sj} = \Gamma(y - y_j) - \Gamma(y - y_j - \varepsilon_{0j}^*)$, $\Gamma(y)$ – единичная функции Хевисайда по продольной координате y ; Y_j – точка появления ребра по продольной координате; μ_0 – коэффициент Пуассона материала оболочки; E – модуль Юнга материала оболочки; ρ_0 – плотность материала оболочки.

Граничные условия для уравнений (3) представляют собой условия свободного опирания на торцах:

$$\frac{\partial u_1}{\partial y} = 0, \quad u_2 = 0, \quad \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} = 0 \quad \text{при } y = \pm \frac{l}{2}. \quad (4)$$

Тогда уравнения динамики ребристой оболочки при осесимметричной и окружной деформации (3) в перемещениях имеют вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left\{ \left[-\frac{\partial u_1}{\partial y} + \mu_0 \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} + u_3 \right) \right] \cdot k_1(y) + \left(\mu_0 \frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) \cdot h_0 k_2(y) \right\} \right) \quad (5) \\
 & + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{Eh_0}{2(1+\mu_0)} \left\{ \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{1}{R} \frac{\partial u_1}{\partial \theta} \right) \cdot k_1(y) + \frac{2}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y \partial \theta} \right) \cdot h_0 k_2(y) \right\} \right) = -h_0 \rho_0 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} k_1(y) - q_s \\
 & \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Eh_0}{2(1+\mu_0)} \left\{ \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{1}{R} \frac{\partial u_1}{\partial \theta} \right) \cdot k_1(y) + \frac{2}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y \partial \theta} \right) \cdot h_0 k_2(y) \right\} \right) \\
 & + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left\{ \left(\frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} + u_3 \right) - \mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) k_1(y) + \left(\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \mu_0 \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) h_0 k_2(y) \right\} \right) \\
 & + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{Eh_0^3}{12(1+\mu_0^2)} \left(\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \mu_0 \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) k_3(y) + \frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left(-\mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} + u_3 \right) \right) \cdot h_0 k_2(y) \right) \\
 & + \frac{2}{R} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Eh_0^3}{12(1+\mu_0)} \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y \partial \theta} \right) k_3(y) + \frac{Eh_0}{2(1+\mu_0)} \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{1}{R} \frac{\partial u_1}{\partial \theta} \right) \cdot h_0 k_2(y) \right) = h_0 \rho_0 \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} k_1(y) - q_\theta \\
 & \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{Eh_0^3}{12(1-\mu_0^2)} \left(\mu_0 \frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) k_3(y) + \frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \mu_0 \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_1}{\partial \theta} + u_3 \right) \right) \cdot h_0 k_2(y) \right) \\
 & + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{Eh_0^3}{12(1-\mu_0^2)} \left(\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \mu_0 \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) k_3(y) + \frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left(-\mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} + u_3 \right) \right) \cdot h_0 k_2(y) \right) \\
 & + \frac{2}{R} \frac{\partial}{\partial \theta \partial y} \left(\frac{Eh_0^3}{12(1+\mu_0)} \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial y \partial \theta} \right) k_3(y) + \frac{Eh_0}{2(1+\mu_0)} \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{1}{R} \frac{\partial u_1}{\partial \theta} \right) \cdot h_0 k_2(y) \right) \\
 & - \frac{1}{R} \left(\frac{Eh_0}{1-\mu_0^2} \left\{ \left(\frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} + u_3 \right) - \mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) k_1(y) + \left(\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} \right) - \mu_0 \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) h_0 k_2(y) \right\} \right) \\
 & = -h_0 \rho_0 \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} k_1(y) - q_n
 \end{aligned}$$

Таким образом, была построена математическая модель механической системы представляющая собой связанную систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных для описания динамики жидкости (1) и динамики геометрически нерегулярной оболочки с ребрами жесткости ступенчато изменяющейся высоты (3) и соответствующих граничных условий (2), (4).

Предложенная математическая модель поможет исследовать динамику взаимодействия трубы кольцевого профиля с упругой, геометрически нерегулярной внешней оболочкой и абсолютно жесткой внутренней с вязкой несжимаемой жидкостью при наличии вибрации, что позволит определить причины возникновения кавитационной коррозии деталей и будет способствовать повышению прочности и надежности элементов механических систем.

Выполнено при поддержке гранта РФФИ 13-01-00049-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратов Д.В. Пульсирующее ламинарное течение жидкости по упругой цилиндрической трубе кольцевого сечения / Д.В. Кондратов, Ю.Н. Кондратова, Л.И. Могилевич // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2009. № 4. С. 60-72.
2. Кондратов Д.В. Математическое моделирование процессов взаимодействия двух цилиндрических оболочек со слоем жидкости между ними при свободном торцевом истечении в условия вибрации / Д.В. Кондратов, Л.И. Могилевич // Вестник СГТУ. 2007. № 3 (26). Вып. 1. С. 22-31.
3. Могилевич Л.И. Динамика взаимодействия упругих элементов вибромашины со сдвливаемым слоем жидкости, находящимся между ними / Л.И. Могилевич, В.С. Попов, А.А. Попова // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 23-32.

4. Кондратов Д.В. Гидроупругость геометрически нерегулярной оболочки, содержащей слой вязкой жидкости и упругий цилиндр, в условиях гармонического давления / Д.В. Кондратов, И.В. Плаксина, Е.Л. Кузнецова // Сборник научных трудов Sworld. 2013. Т. 6. № 4. С. 17-20.
5. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика / Т.М. Башта. М.: Машгиз, 1963. 696 с.

Кондратов Дмитрий Вячеславович – доктор физико-математических наук, профессор заведующий кафедрой «Прикладной информатики и информационных технологий в управлении» Поволжского института управления имени П.А. Столыпина – филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Dmitry V. Kondratov – Dr. Sc., Professor
Head: Department of Applied Informatics and Information Technologies in Management, Stolypin Volga Region Institute of the Russian Academy of Public Administration under the President of the Russian Federation

Калинина Анна Владимировна – старший преподаватель кафедры «Информационного и документационного обеспечения управления» Балаковского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Anna V. Kalinina – Senior Lecturer
Department of Information and Document Management, Balakovo Branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration

Статья поступила в редакцию 12.02.14, принята к опубликованию 20.04.14

УДК 621. 921

С.А. Крюков, Н.В. Байдакова

СИСТЕМНО-КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МОДИФИЦИРОВАНИЮ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ

Рассматриваются вопросы системного и комплексного подхода при проектировании новых технико-технологических приемов и способов модифицирования абразивных инструментов при их совершенствовании. Проведены исследования структурно-объемных и прочностных характеристик инструмента, по установлению степени влияния на них внешней среды, физико-химических и других воздействий, а также изучены функциональные связи между взаимодействиями и показателями инструмента. Экспериментальным путем подтверждена эффективность шлифкругов, изготовленных по предлагаемой методике.

Модифицирование, шлифовальный инструмент, наполнитель, порообразователь

S.A. Kryukov, N.V. Baydakova

A COMPREHENSIVE APPROACH TO MODIFICATION OF ABRASIVE TOOLS WHILE IMPROVING THEIR PROPERTIES

The paper presents a comprehensive approach to developing new technological methods for modification of abrasive tools while improving their quality. The conducted research was to determine the structural, volumetric and strength characteristics of the instrument used to establish the environmental impact rate, physical, chemical and other types of impact. Additionally, functional connections relating the interactions and indicators of the tool were analysed. Experiments were conducted to prove the efficiency of grinding wheels manufactured by means of the proposed methodology.

Modification, grinding tool, filler, blowing agent

В техническом и технологическом смысле качество и эффективность абразивного инструмента определяются комплексом свойств: структурными, физико-механическими, функциональными и эксплуатационными. Этот комплекс включает десятки показателей, определяемых количественно или качественно. Технические показатели отражают объективно существующие свойства инструмента, образуют о нем достаточно целостное представление и позволяют определить границы использования данного инструмента в том или ином процессе шлифования. Они могут быть объединены в несколько групп:

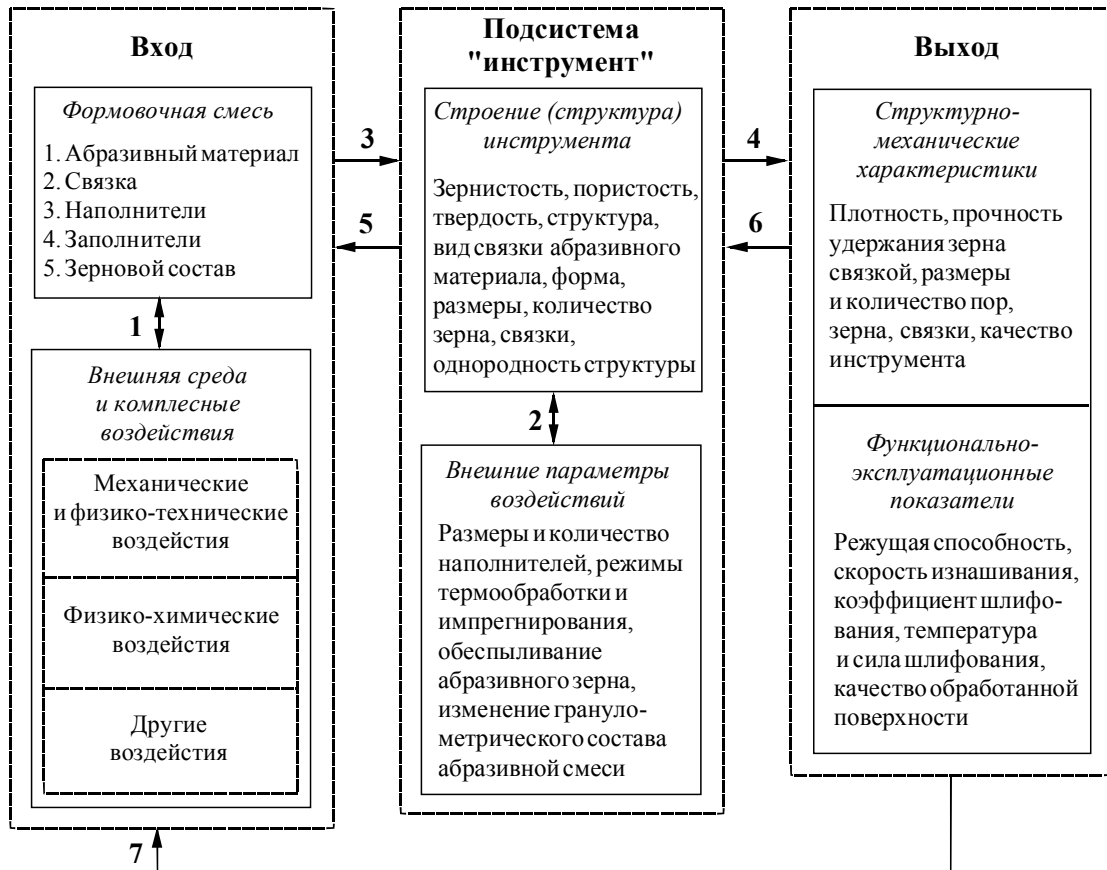
- 1) показатели структурных особенностей инструмента (зернистость, пористость, вид зерна, тип связки, объемное содержание зерна, связки, наполнителей и др.);
- 2) физико-механические показатели при действии различных нагрузок (предел прочности, модуль упругости, твердость, ударная вязкость, термостойкость, износостойкость и др.);
- 3) функционально-эксплуатационные показатели (режущая способность, износостойкость, производительность, стойкость, качество шлифованной поверхности детали и т.д.).

Для выявления технических и технологических решений, позволяющих обеспечивать высокоэффективные функциональные свойства и эксплуатационные показатели абразивного инструмента, необходимо исследование структурно-объемных и прочностных характеристик инструмента, установление степени влияния на них внешней среды, физико-химических и других воздействий, а также изучение функциональных связей между взаимодействиями и показателями инструмента.

В связи с этим рассмотрим абразивный инструмент в виде подсистемы общей системы «инструмент – среда – деталь». В этой подсистеме «входами» являются управляемые воздействия с целью регуляции и стабилизации свойств и показателей инструмента и неуправляемые факторы, например воздействия окружающей среды. «Выходы» характеризуют получаемые свойства и показатели инструмента в процессе его изготовления или совершенствования.

Блок-схема подсистемы позволяет выделить в общем спектре входные воздействия на структурно-механические характеристики и эксплуатационные показатели инструмента, систему комплексных воздействий, формируемые как система технологических методов регуляции и стабилизации характеристик и показателей инструмента.

В блок-схеме (рисунок) показаны основные типы связей, существующих в рассматриваемой подсистеме.



Блок-схема процессов в подсистеме «инструмент»

Связи 1 обусловлены взаимосвязью вариантов и параметров воздействий на подсистему «инструмент», а также взаимным влиянием технологических решений и внешней среды.

Связи 2 обусловлены взаимосвязью параметров, определяющих состояние подсистемы «инструмент» (структурно-объемные, физико-механические параметры, состояние рабочей поверхности инструмента, внешние механические и физико-химические параметры процесса шлифования).

Так, изменение зернистости инструмента влечет за собой изменение фракционного и объемного соотношения состава наполнителей и в целом абразивной смеси, а также режимов термообработки, импрегнирования и т.п.

Внешние параметры технологических воздействий и параметры структуры инструмента взаимосвязаны, что в конечном итоге определяет эффективность свойств инструмента в процессе шлифования.

Прямые связи 3, 4 предполагают изменения свойств и параметров подсистемы «инструмент» при комплексном механическом, физико-технологическом и физико-химическом воздействии на нее, а также при воздействии внешней среды. Закономерности изменения структурно-механических характеристик и эксплуатационных показателей инструмента при реализации различных технологических воздействий исследованы и представлены выше.

Обратные связи 5 и 6 предполагают изменение вида или параметров технологических воздействий при изменении параметров подсистемы. Так, при изготовлении высокопористого инструмента из-за неоднородности структуры снижается механическая прочность, что требует дополнительного воздействия, например введения мелкодисперсного наполнителя в формовочную массу или импрегнирование такого инструмента веществом, создающим упрочняющий каркас в черепке инструмента.

Обратные связи 7 – связи между входными и выходными параметрами, т.е. функциональными свойствами и эксплуатационными показателями инструмента, а также вариантами и параметрами технологических воздействий и внешней средой. Например, при улучшении структурно-механических свойств инструмента за счет подбора оптимального зернового состава абразивной смеси отпадает необходимость в других вариантах технологических решений для повышения механической прочности инструмента. Таким образом, рассмотрение абразивного инструмента как подсистемы позволяет выявить не только основные свойства и показатели инструмента, но и технологические способы и методы, применение которых позволит решить проблему эффективного совершенствования абразивного инструмента.

Таким образом, системный подход к изучаемой проблеме, позволяющий осуществить ее комплексное решение, предполагает следующее. Абразивный инструмент рассматривается как подсистема, изменяющая свое состояние в процессе эксплуатационного цикла, текущее состояние которой определяется в процессе шлифования. Техничко-технологическое решение по изготовлению или совершенствованию инструмента формируется как система методов и способов, реализующих комплексные механические, физико-химические воздействия и технологические режимы. Такой системный и комплексный подход к анализу проблемы обеспечения высокоэффективных функционально-эксплуатационных свойств инструмента позволяет разработать основные этапы решения поставленных задач.

Первоначальным этапом решения является изучение и выявление основных физико-механических и технологических свойств, а также рационального зернового состава абразивной смеси, определяющих качественные показатели инструмента после его изготовления. Затем рассматриваются основные технологические факторы и внешние воздействия разного характера, влияющие на структурно-механические характеристики, качество и функционально-эксплуатационные показатели инструмента. При этом анализируется возможность применения различных воздействий: механических, физико-технических, химических и комбинированных или совмещенных. После этого производится выбор вариантов и параметров регулирующих воздействий с целью выявления высокоэффективных свойств инструмента и показателей процесса шлифования.

Одновременно с этим должны устанавливаться зависимости и корреляционные взаимосвязи рассматриваемых свойств инструмента от параметров и режимов комплексных воздействий и процесса шлифования. С этой целью производится построение математических моделей и проводятся соответствующие теоретические и экспериментальные исследования.

Заключительным этапом является разработка комплексного технико-технологического обеспечения при создании и совершенствовании абразивного инструмента с регламентированными свойствами для повышения эффективности процесса шлифования.

Вышеприведенная методология легла в основу разработки технико-технологических принципов регуляции и стабилизации структурно-механических характеристик и показателей абразивных инструментов.

Известно, что высокопористые шлифкруги, изготовленные с помощью выгорающих наполнителей, а также шлифкруги из карбида кремния на керамической связке обладают существенным недостатком – низкой механической прочностью черепков. Для устранения этих недостатков применяются следующие структурно-технологические модифицирования инструментов. При производстве, например, высокопористых шлифкругов, в формовочную массу дополнительно вводится мелкодисперсный абразивный наполнитель [1] или готовые шлифкруги подвергаются импрегнированию растворами или расплавами, которые при взаимодействии с черепком инструмента образуют упрочняющий каркас [2]. В качестве таких импрегнаторов используются жидкое стекло, расплав серы и др. Нововведением в этой области является способ, предусматривающий при изготовлении высокопористого инструмента вместо выгорающих наполнителей использовать наполнители, выполненные из абразивного огнеупорного материала, который, в свою очередь, адгезионно инертен к керамической связке [3]. Например, при изготовлении электрокорундового инструмента в качестве материала частиц наполнителя могут использоваться: карбид бора, карбид кремния и др. При этом частицы наполнителя должны иметь равный размер и одинаковую форму с абразивными зёрнами. Это позволяет получать равномерное перемешивание абразивной массы при изготовлении инструмента, обеспечивая однородность его структуры и качество, а во время обжига инструмента отсутствует процесс образования дополнительных пор в теле его черепка, как в случаях, когда вводятся выгорающие наполнители. За счет этого повышается прочность черепка инструмента. Выполнение частиц наполнителя из адгезионно инертного материала к керамической связке позволяет увеличивать поровое пространство между абразивными зёрнами на рабочей поверхности инструмента во время шлифования за счет вырывания слабо закрепленных частиц наполнителя при незначительных нагрузках. Кроме того, абразивные частицы наполнителя при выравнивании производят дополнительное резание поверхности детали, а после их удаления с поверхности инструмента, образовавшиеся за счет этого поры между абразивными зёрнами, способствуют лучшему расположению стружки, снижению засаливания и увеличению стойкости и производительности инструмента. Предлагаемый инструмент позволяет создавать в процессе шлифования рабочую поверхность, подобную рабочей поверхности высокопористого инструмента при сохранении прочности черепка исходного инструмента заданной структуры.

Анализ результатов сравнительных испытаний показал, что высокопористые круги с огнеупорным наполнителем КК32 из карбида кремния 54С32 имеют режущую способность в $1,1 \div 1,4$ раза, а стойкость в $1,3 \div 1,6$ раза выше, чем у кругов, изготовленных с помощью выгорающих наполнителей КФ40. При этом отсутствуют прижоги, а шероховатость поверхности Ra уменьшается на $15 \div 20\%$.

Для производства обдирочного инструмента из карбида кремния разработаны два новых технических решения на уровне изобретений [4, 5]. Низкая механическая прочность таких инструментов объясняется тем, что керамическая связка не реакционноспособна к карбидкремниевым зёрнам, которые к тому же имеют гладкую поверхность и более широкие углы режущих граней, что отрицательно сказывается на характере удержания зерна в черепке инструмента. Зёрна карбида кремния удерживаются лишь за счет механического заклинивания в связке.

При устранении вышеуказанных недостатков использовался технологический принцип совмещения и комбинирования, заключающийся в том, что в массу для изготовления инструмента из карбида кремния вводятся дополнительно адгезионно активные к связке мелкодисперсные абразивные частицы, например зёрна электрокорунда. При этом частицы наполнителя имеют размер $0,16-0,25$ размера зёрен карбида кремния, а объём частиц наполнителя составляет $8-10\%$ от общего объёма массы. Кроме того, рекомендуется использовать частицы наполнителя пластинчатой и игольчатой формы. Выбор частиц наполнителя, адгезионно активных к связке, а также пластинчатой и игольчатой формы позволяет усилить степень армирования мостиков связки между абразивными зёрнами и повысить в целом прочность инструмента и, как следствие, увеличить стойкость и производительность инструмента. Таким образом, совмещение двух типов абразивных зёрен (карбида кремния и электрокорунда), комбинирование их по объёму и форме зёрен позволяет создавать абразивные инструменты с повышенным качеством по прочности и более высокой производительностью. Анализ результатов предварительных испытаний показывает, что абразивные инструменты, изготовленные из предлагаемых масс, имеют прочность на разрыв в $1,13-1,19$ раза, коэффициент шлифования в $1,30-1,35$ раза и стойкость в $1,20-1,26$ раза выше соответствующих показателей у инструментов прототипов.

Таким образом, системный и комплексный подход к решению возникающих проблем и задач позволяет разрабатывать и проектировать новые технико-технологические приемы и способы модифицирования абразивных инструментов при их совершенствовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багайсков Ю.С. Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов: монография / Ю.С. Багайсков, В.М. Шумячер; ВолгГАСУ, ВИСТех. Волгоград: ВолгГАСУ, 2005. 200 с.
2. Крюков С.А. Стабилизация и регуляция структурно-механических характеристик абразивных инструментов: монография / С.А. Крюков, В.М. Шумячер; Волгогр. гос. арх.-строит. ун-т; Волжский ин-т строит. и технол. (филиал) ВолгГАСУ. Волгоград, 2013. 207 с.
3. Пат. 2215643 РФ. Абразивный инструмент / В.М. Шумячер, В.А. Назаренко, С.А. Крюков, И.В. Дуличенко // Бюл. № 31. 2003. 2 с.
4. Пат. 2262434 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В.М. Шумячер, А.В. Славин, И.В. Дуличенко, С.А. Крюков // Бюл. № 29. 2005. 3 с.
5. Пат. 2354534 РФ. Масса для изготовления абразивного инструмента / В.М. Шумячер, А.В. Славин, С.А. Крюков // Бюл. № 13. 2009. 3 с.

Крюков Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общетехнические дисциплины» Волжского института строительства и технологий филиал Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета

Sergey A. Kriukov – Ph. D., Associate Professor
Department of General Technical Disciplines
Volzhsky Institute of Civil Engineering and Technologies (branch of the institute) Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

Байдакова Наталья Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы и машины» Волжского института строительства и технологий филиал Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета

Natalya V. Baidakova – Ph. D., Associate Professor
Department of General Technical Disciplines
Volzhsky Institute of Civil Engineering and Technologies,
Branch of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

Статья поступила в редакцию 15.01.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 658.511

А.А. Кутин, В.А. Долгов, В.А. Милькин

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Определены требования к информационному обеспечению метода оценки производственного потенциала. Разработаны информационные модели производственной системы машиностроительного предприятия

Информационное обеспечение, информационная модель, производственная система, оценка производственного потенциала

A.A. Kutin, V.A. Dolgov, V.A. Milkin

INFORMATION SUPPORT FOR THE METHOD EVALUATING THE PRODUCTION POTENTIAL AT MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRIES

The paper sets the requirements for the method relating information support evaluation of the production potential. Information models for the production systems at mechanical engineering enterprise are developed.

Information support, information model, the production system, the evaluation of the production potential

Введение

Накопленный российский опыт технического перевооружения машиностроительных предприятий свидетельствует о необходимости дальнейшего повышения эффективности этих мероприя-

тий. При выполнении проектов технического перевооружения, как правило, решаются локальные задачи по преодолению трудностей, возникающих в текущий момент времени, для производственных мощностей в цепи технологического процесса путем приобретения отдельных видов оборудования. Это приводит к тому, что мощности производственной системы в долгосрочной перспективе становятся несбалансированными.

Одной из главных причин возникновения указанных сложностей следует считать неправильное определение задач для достижения поставленных целей. Для научно обоснованного выбора задач необходимо знать не только проблемы в существующей производственной системе предприятия по всему технологическому маршруту изготовления заданной номенклатуры изделий, но и недостающие технические возможности производственной системы для выполнения производственного заказа. Именно такой подход при формировании структуры технического перевооружения и разработке критерия, учитывающего развитие производственных мощностей, способны повысить эффективность проводимых мероприятий и конкурентоспособность производимой продукции.

Постановка задачи

Определение элементов производственной системы, подлежащих технологическому перевооружению и модернизации, предлагается осуществлять путем оценки производственного потенциала для выполнения машиностроительным предприятием заданной производственной программы [1].

Каждый этап метода оценки производственного потенциала организационно включает следующие стадии:

- формализация исходных данных,
- построение математической модели,
- расчет показателей производительности,
- формирование заключения.

На стадии «Формализация исходных данных» выполняются работы по сбору, анализу и формализации значительного объема информации: заданной производственной программы, конструкторской и технологической документации, технических возможностей производственной системы. Трудоемкость этапа может достигать 60% от общей трудоемкости экспресс оценки [2-4]. Целью формализации исходных данных является обеспечение информационной поддержки расчета показателей производительности.

Для разработки правил формального описания исходных данных были сформированы требования, предъявляемые методом оценки производственного потенциала, к составу и организации исходных данных.

Метод оценки производственного потенциала состоит из трех этапов [5].

Этап 1. Оценка длительности производственных циклов изготовления приведенных программ деталей-представителей.

Целью этапа 1 является предварительная оценка возможности выполнения производственного процесса с учетом заданного рабочего фонда времени. Производственный процесс (ПП) включает технологический процесс (ТП), процессы транспортировки (ПТр) и хранения заготовок.

При оценке производственного цикла вводятся следующие ограничения:

- для выполнения каждой операции используется одно рабочее место;
- временной ресурс рабочего места может расходоваться только на закрепленную операцию, т.е. коэффициент закрепления операций равен 1;
- длительность хранения определяется эффективностью среднесрочного (квартального, месячного) и оперативного планирования.

Производственный цикл рассчитывается для выполнения среднестатистической партии запуска.

Этап 2. Оценка производственных возможностей базовой производственной системы (ПС) процесса для изготовления приведенных программ деталей-представителей.

Целью этапа является оценка возможности выполнения технологических процессов и процессов транспортировки деталей-представителей в соответствующих базовой производственных системах процесса, заданных технологической документацией.

При оценке производственных возможностей базовой производственной системы процесса вводятся следующие ограничения:

- для выполнения каждой операции используется одно рабочее место,
- временной ресурс рабочего места может распределяться между несколькими конкурирующими операциями, т.е. коэффициент закрепления операций больше 1.

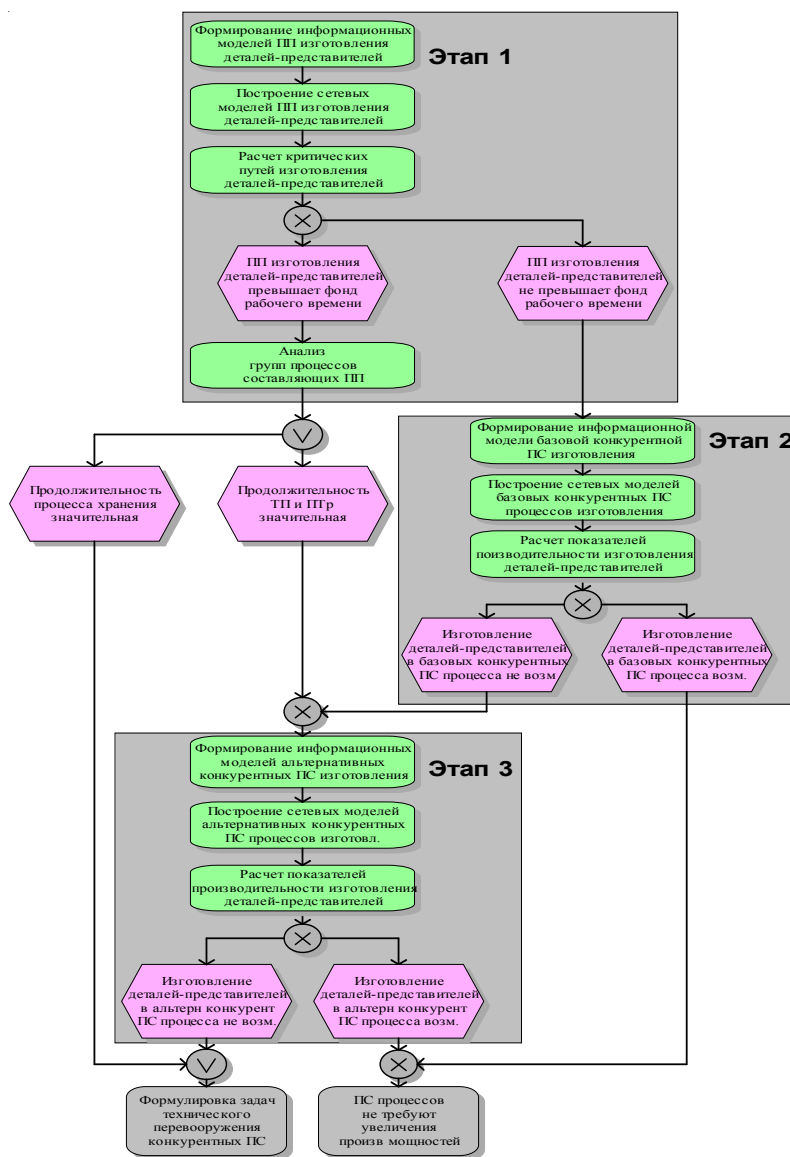
Этап 3. Оценка производственных возможностей производственной системы предприятия для изготовления приведенных программ деталей-представителей.

Целью этапа является оценка возможности выполнения технологических процессов и процессов транспортировки деталей-представителей в соответствующих производственных системах процесса, содержащих альтернативные рабочие места.

При оценке производственных возможностей производственной системы процесса, содержащей альтернативные рабочие места, вводятся следующие ограничения:

- для выполнения каждой операции могут использоваться альтернативные рабочие места,
- временной ресурс рабочих мест может распределяться между несколькими конкурирующими операциями.

Укрупненный алгоритм метода оценки производственного потенциала приведен на рисунке. При описании алгоритма использованы следующие логические операнды: V – дизъюнкция, X – исключающее ИЛИ.



Укрупненный алгоритм метода оценки производственного потенциала

С учетом вышесказанного были сформированы следующие требования к информационному обеспечению:

1. Информационное обеспечение должно формироваться для каждого этапа.
2. Информационное обеспечение этапа 1 должно включать процессные модели.
3. Информационное обеспечение этапа 2 должно содержать процессные модели и базовые конкурентные ресурсные модели изготовления деталей-представителей.
4. Информационное обеспечение этапа 3 должно содержать процессные модели и альтернативные конкурентные ресурсные модели изготовления деталей-представителей, включающие альтернативные элементы производственной системы предприятия.

5. Должна быть обеспечена информационная преемственность моделей.

Для информационной поддержки этапов расчета показателей производительности разработаны соответствующие информационные модели.

Описание информационных моделей

В качестве информационного обеспечения этапа 1 была разработана информационная модель процесса изготовления партии запуска n детали-представителя i -й группы.

Информационная модель производственных процессов изготовления деталей-представителей содержит следующие данные:

- наименование группы деталей;
- наименование и код детали-представителя;
- приведенная программа выпуска;
- размер партии запуска n ;
- наименование подсистемы;
- наименование и номер операции;
- трудоемкость операции (штучное время);
- подготовительно-заключительное время для операций;
- количество одновременно обрабатываемых заготовок на операции.

Для построения процессных и ресурсных моделей изготовления деталей-представителей, обеспечивающих информационную поддержку этапа 2 и 3, были предложены информационные модели базовой конкурентной производственной системы процесса и альтернативной конкурентной производственной системы процесса.

Производственная система процесса включает в качестве подсистем совокупность элементов технологической, транспортной и складской подсистем, задействованных в изготовлении одного наименования изготавливаемой продукции. Производственная система процесса является подсистемой производственной системы предприятия.

Альтернативная конкурентная производственная система процесса включает элементы производственной системы предприятия, имеющие технические возможности, которые удовлетворяют технологическим требованиям для выполнения соответствующих операций.

При построении информационных ресурсных моделей производственные системы процессов рассматриваются как системы, обладающие следующими характеристиками:

- состояние системы не зависит от влияния внешних факторов;
- состояние системы с течением времени остается неизменной;
- поведение системы объяснимо и предсказуемо.

Таким образом, в информационных моделях производственная система определяется как статическая система. Информационные модели определяют временные, логистические связи между элементами производственной системы. Анализ этих связей позволяет оперативно проводить укрупненную оценку показателей производительности производственной системы.

В ресурсные модели было введено значение доступного временного ресурса i -го элемента технологической и транспортной подсистемы для выполнения операций $\Phi_{ДВ_i}$. Значение определяется по формуле

$$\Phi_{ДВ_i} = \frac{\Phi_{РВ_i}}{Kзo_i},$$

где $\Phi_{РВ_i}$ – действительный фонд рабочего времени i -го элемента производственной системы, $Kзo_i$ – коэффициент закрепления операций i -го элемента производственной системы.

Информационная модель базовой конкурентной производственной системы процесса содержит данные процессной модели и дополнительно включает следующие данные:

- наименование и код цеха,
- наименование и код производственного участка,
- наименование и коды элементов технологической, транспортной и складской подсистем,
- коэффициент закрепления операций базовых элементов производственной системы.

Информационная модель альтернативной конкурентной производственной системы процесса содержит данные информационной модели базовой конкурентной производственной системы процесса и дополнительно включает следующие данные:

- коэффициент закрепления операций альтернативных элементов производственной системы,
- доступный временной ресурс альтернативного элемента технологической и транспортной подсистемы для выполнения заданных операций.

Информационное обеспечение метода оценки производственного потенциала для изготовления детали-представителя «Переходная втулка»

В качестве примера выбрана деталь-представитель «Переходная втулка». Выполненный на этапе 1 (см. рис. 1) анализ показал, что производственный цикл изготовленной программы превышает годовой фонд времени.

Поэтому для этой детали-представителя была сформирована информационная модель конкурентной производственной системы процесса ее изготовления, фрагмент которой представлен в табл. 1.

Выводы

Разработана структура информационного обеспечения для метода оценки производственного потенциала, которая содержит необходимые и достаточные исходные данные для выполнения каждого этапа. Информационное обеспечение 1-го этапа включает информационные модели производственных процессов изготовления деталей-представителей (процессные модели). Информационное обеспечение соответственно 2-го и 3-го этапов содержит информационные модели базовой и альтернативной конкурентной производственной системы процесса изготовления деталей-представителей (ресурсные модели). Информационные модели 2-го и 3-го этапов формируются путем добавления данных к информационным моделям предыдущих этапов.

Созданное информационное обеспечение позволяет значительно сократить трудоемкость наиболее сложной стадии «Формализация исходных данных» при оценке производственного потенциала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С.Н. Инновационное развитие высокотехнологичных машиностроительных производств на основе интегрированных АС ТПП / С.Н. Григорьев, А.А. Кутин // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 11. С. 23-29.
2. Бржозовский Б.М. Проблемы моделирования и идентификации сложных технологических систем / Б.М. Бржозовский // Вестник СГТУ. 2009. № 3. Вып. 2. С. 39-41.
3. Управление станками и станочными комплексами: учебник / Б.М. Бржозовский, А.Г. Схиртладзе, В.В. Мартынов, П.Ю. Бочкарев. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2011. 388 с.
4. Бочкарев П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10-14.
5. Кутин А.А. Метод оценки производственного потенциала многономенклатурного машиностроительного производств / А.А. Кутин, В.А. Долгов, В.А. Милькин // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6.

Кутин Андрей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, проректор по инновационной деятельности, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Московского государственного технологического университета «Станкин»

Andrey A. Kutin – Dr. Sc., Professor, Vice Rector for Innovations, Head: Department of Mechanical Engineering, Moscow State University of Technology STANKIN

Долгов Виталий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения» Московского государственного технологического университета «Станкин»

Vitaliy A. Dolgov – Dr. Sc., Professor, Department of Mechanical Engineering, Moscow State University of Technology STANKIN

Милькин Владимир Андреевич – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Московского государственного технологического университета «Станкин»

Vladimir A. Milkin – Postgraduate, Department of Mechanical Engineering, Moscow State University of Technology STANKIN

Статья поступила в редакцию 14.01.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 621.7:658.12

С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ КОНСТРУКТОРСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКОЙ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Статья посвящена вопросу принятия рациональных проектных решений на стадии разработки конструкции деталей в условиях недостатка информации о технологических возможностях производственной системы, в которой предполагается изготовление детали. Рассматривается система автоматизированного планирования многоно-

менклатурных технологических процессов и определяются её возможные взаимодействия с проектными процедурами конструкторской подготовки.

Автоматизация проектирования, технологическая подготовка производства, конструкторская подготовка производства, многономенклатурное производство

S.G. Mitin, P.Yu. Bochkarev

INTERACTION MECHANISMS BETWEEN THE DESIGN AND PROCESS ENGINEERING TO MAKE EFFICIENT DESIGN SOLUTIONS

The article focuses on the issues of efficient solutions at the stage of developing product parts under lack of information about the technological potential of the manufacturing system to be used for manufacturing the product parts. The authors consider the computer-aided multinomenclature process planning system, and determine its possible interactions with the design procedures. .

Automation of design, CAD/CAM/CAPP, multinomenclature manufacturing

Машиностроительное производство на современном этапе развития характеризуется широкой и постоянно меняющейся номенклатурой изготавливаемых деталей в соответствии с возникающими потребностями рынка. Рыночные условия диктуют необходимость сокращения длительности производственного цикла, большую часть времени которого составляет конструкторско-технологическая подготовка производства (КТПП). Одним из путей решения этой задачи является комплексная автоматизация КТПП и автоматизация отдельных её этапов [1].

Развитие информационных технологий и повышение вычислительных мощностей позволяют создавать и реализовывать качественно новые подходы к решению задач автоматизации проектирования. Одним из таких подходов является разработка автоматизированной конструкторско-технологической системы, позволяющей при проектировании конструкции изделия и технологии его изготовления ориентироваться на реально складывающиеся производственные условия и обеспечивающей рациональные решения задач проектирования в кратчайшие сроки.

Такой подход обусловлен тем, что в современных условиях при разработке конструкции новых изделий проектировщик зачастую не имеет возможности оценить, насколько рациональным будет то или иное его решение с точки зрения дальнейшего технологического проектирования и производства в конкретной производственной системе. Из-за недостатка информации некоторые из принятых конструктором решений могут значительно усложнить технологическую подготовку и реализацию её результатов. В связи с этим необходима разработка механизмов взаимодействия конструктора с системой технологического проектирования с целью получения рекомендаций по созданию рациональной конструкции изделия в рамках конкретной производственной системы. С рациональной конструкцией изделия связано одно из базовых понятий технологии машиностроения – понятие технологичности конструкции, определяющее такую совокупность конструктивных и точностных параметров деталей, которые могут быть получены с использованием имеющихся технологических возможностей за минимальное время и с минимальной себестоимостью. Разработка технологических процессов и операций с учетом показателя технологичности [2], в конечном итоге и позволит повысить конкурентоспособность машиностроительных предприятий в современных рыночных условиях.

Конструкторская подготовка производства проводится в несколько этапов: разработка технического предложения, разработка эскизного проекта, разработка технического проекта, разработка технической документации. На каждом этапе задействованы существующие CAD/CAE системы, однако они не имеют возможности получения информации о технологических возможностях конкретной производственной системы, поэтому конструктор не может провести сравнение нескольких возможных вариантов решения задач по разработке конструкции изделий и выбирает один из вариантов по своим субъективным причинам.

Наметим проектные процедуры, в которых может осуществляться взаимодействие конструктора и технологической системы, когда конструктор может получить рекомендации по принятию решений, обеспечивающих рациональную конструкцию деталей для конкретной производственной системы, а принятые им решения могут существенно повлиять на время и стоимость изготовления деталей (рис. 1).

При разработке конструкции детали определяется функциональное назначение всех её поверхностей, на основе которого формируются требования к точности их изготовления, качеству поверхности, отклонениям геометрической формы. Эти требования, зачастую, определены в справочной литературе в виде диапазона значений, из которого конструктор может выбирать конкретные значения, исходя из своего опыта. Ввиду отсутствия информации о технологических возможностях производственной системы, конструктор

тор может выбрать такие значения качеств точности или шероховатости поверхностей, которые существенно увеличат трудоёмкость и себестоимость механической обработки.

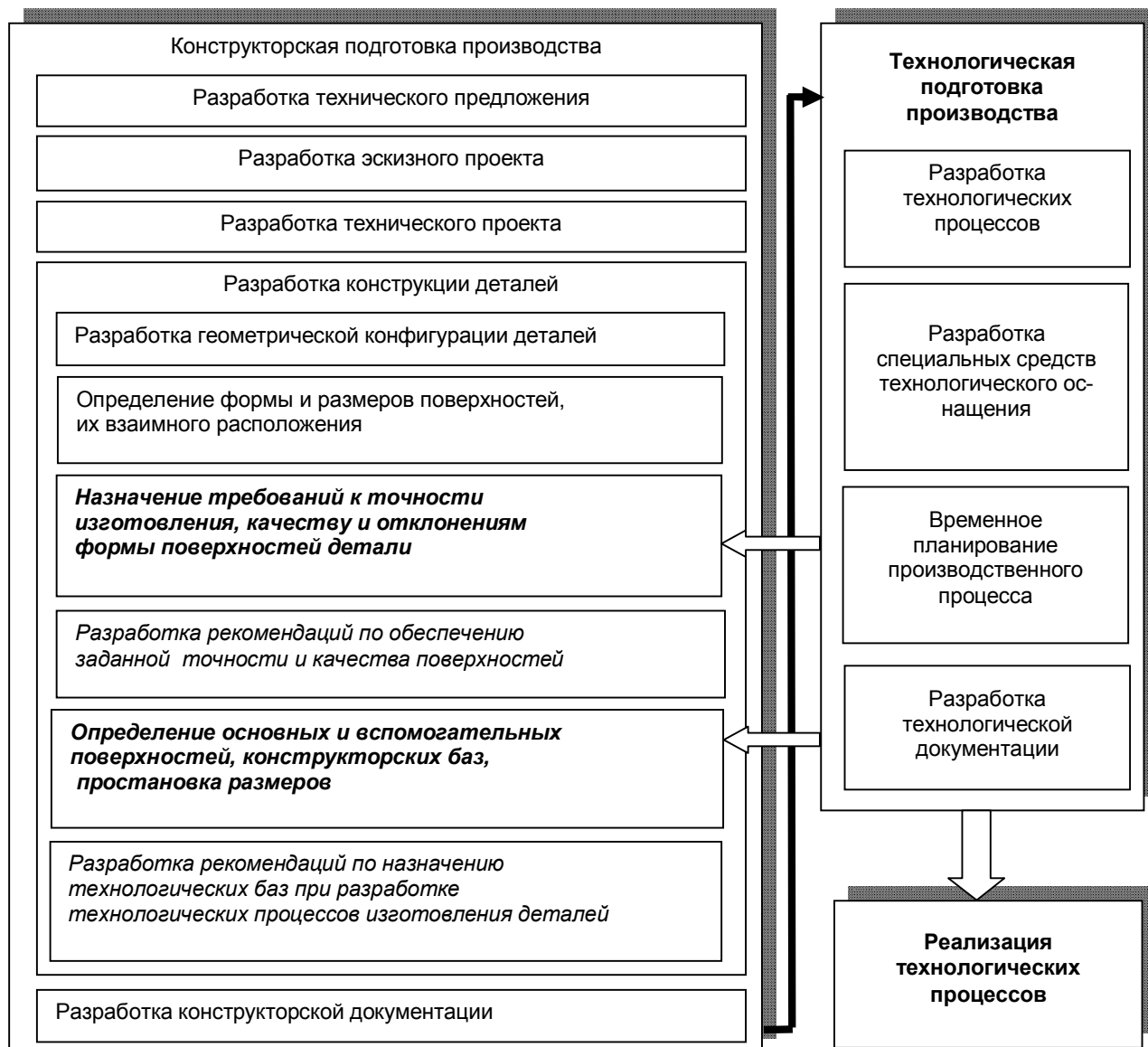


Рис. 1. Схема взаимодействия конструкторской и технологической подготовки производства

В связи с этим первой конструкторской проектной процедурой, взаимодействующей с технологической системой, можно определить процедуру назначения конструктором требований к точности изготовления, качеству и отклонениям формы поверхностей детали. По результатам выполнения этой проектной процедуры формируются рекомендации по обеспечению заданной точности и качества поверхностей при разработке технологических процессов.

Вместе с тем в ходе рабочего проектирования при конструкторской подготовке производства осуществляется разработка рабочих чертежей для всех деталей, подлежащих изготовлению в данной производственной системе. Для каждой детали определяются форма и размеры поверхностей, расстояния между ними и их относительное и угловое положения, которые в совокупности определяют представление о геометрическом образе детали.

Между значениями отклонений размеров, расстояний, формы и относительных расположений элементов деталей существуют качественные и количественные связи. Качественные связи отражают общую закономерность в соотношениях величин отклонений, не затрагивая функциональную зависимость, имеющуюся между ними.

Количественные связи между отклонениями размеров, расстояний, формы и относительных расположений поверхностей раскрываются в процессе придания детали необходимого положения в машине или при изготовлении. Относительное положение поверхностей деталей определяется на основе учёта участия детали в работе узла совокупностями исполнительных поверхностей, совокупностями свободных поверх-

ностей, комплектами основных и вспомогательных баз. В зависимости от функций, выполняемых деталью в машине, могут быть самые различные варианты увязки относительного положения комплектов баз как координатных систем. Именно здесь проявляется функциональная связь между значениями этих показателей и процессом изготовления деталей. Так, при случайном выборе из двух или нескольких равнозначных с точки зрения конструктора вариантов простановки размеров в ходе технологического проектирования может быть выявлен вариант, при котором не соблюдаются фундаментальные принципы совмещения и постоянства баз, что приведёт к дополнительному ужесточению допусков размеров и к необходимости разработки и реализации лишних технологических переходов или операций.

Следовательно, в качестве второй взаимодействующей проектной процедуры определим процедуру выбора вариантов простановки размеров при задании относительного положения поверхностей деталей. При выполнении этой процедуры из технологической системы получается информация о прогнозируемой структуре технологических процессов и технологических операций. По результатам выполнения процедуры формируются рекомендации по назначению технологических баз при разработке технологических процессов.

Далее следует определить, каким образом конструктор сможет получать информацию из технологической системы предприятия. Существующие САМ/САРР системы не могут предоставить информацию о технологических возможностях и текущем состоянии производственной системы, в которой они используются.

В настоящее время в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. разрабатывается система автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов (САПМТП) [3-5], главными инновационными аспектами создания которой являются:

- 1) проектирование технологических процессов (ТП) механической обработки ориентировано на конкретную производственную систему для обеспечения возможности рационального использования её ресурсов;
- 2) подсистема проектирования технологических процессов механической обработки имеет связь с подсистемой реализации для обеспечения возможности быстрой адаптации к изменениям производственной ситуации;
- 3) создание технологии механической обработки каждой детали проводится с учётом всей запланированной номенклатуры деталей, что позволит принимать решения по рациональному использованию технологических возможностей производственной системы;
- 4) разработка технологических процессов механической обработки ведётся в автоматическом режиме для сокращения затрат времени и повышения качества проектных решений.

В САПМТП предлагается параллельное проектирование ТП для всех запланированных деталей. При этом наличие связи между подсистемами проектирования и реализации ТП позволяет корректировать технологию с учётом изменений в производственной системе.

САПМТП представляет собой многоуровневую иерархическую систему и состоит из двух страт (рис. 2).

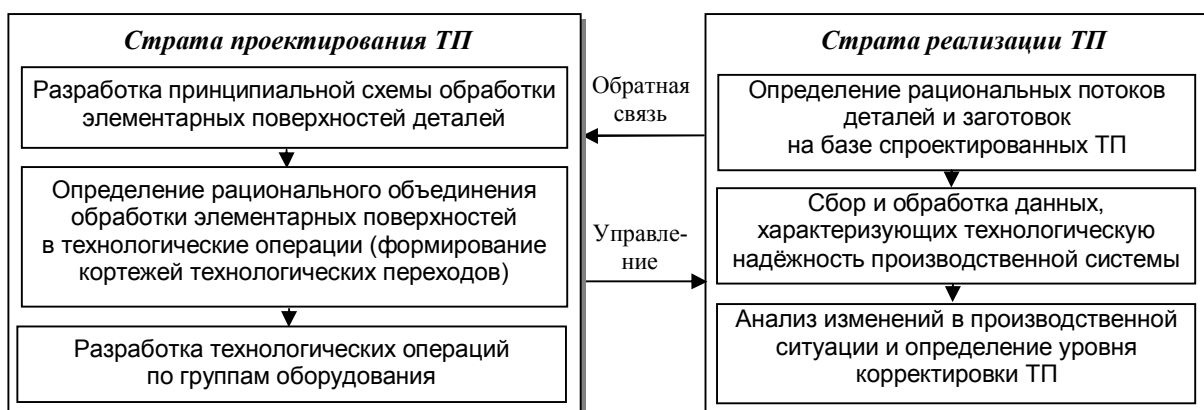


Рис. 2. Система автоматизированного планирования ТП

На страте проектирования формируется множество ТП, которые обеспечивают возможность изготовления всей номенклатуры деталей в конкретной производственной системе. На страте реализации ТП определяются показатели эффективности работы производственной системы, которые наряду с информацией об изменении производственных условий поступают в виде обратной связи на страту проектирования. При изменении производственной ситуации (отказе оборудования, выходе из строя инструмента или оснастки, изменении номенклатуры деталей), из ранее сформированного множества ТП выбираются варианты, соответствующие действующим производственным условиям.

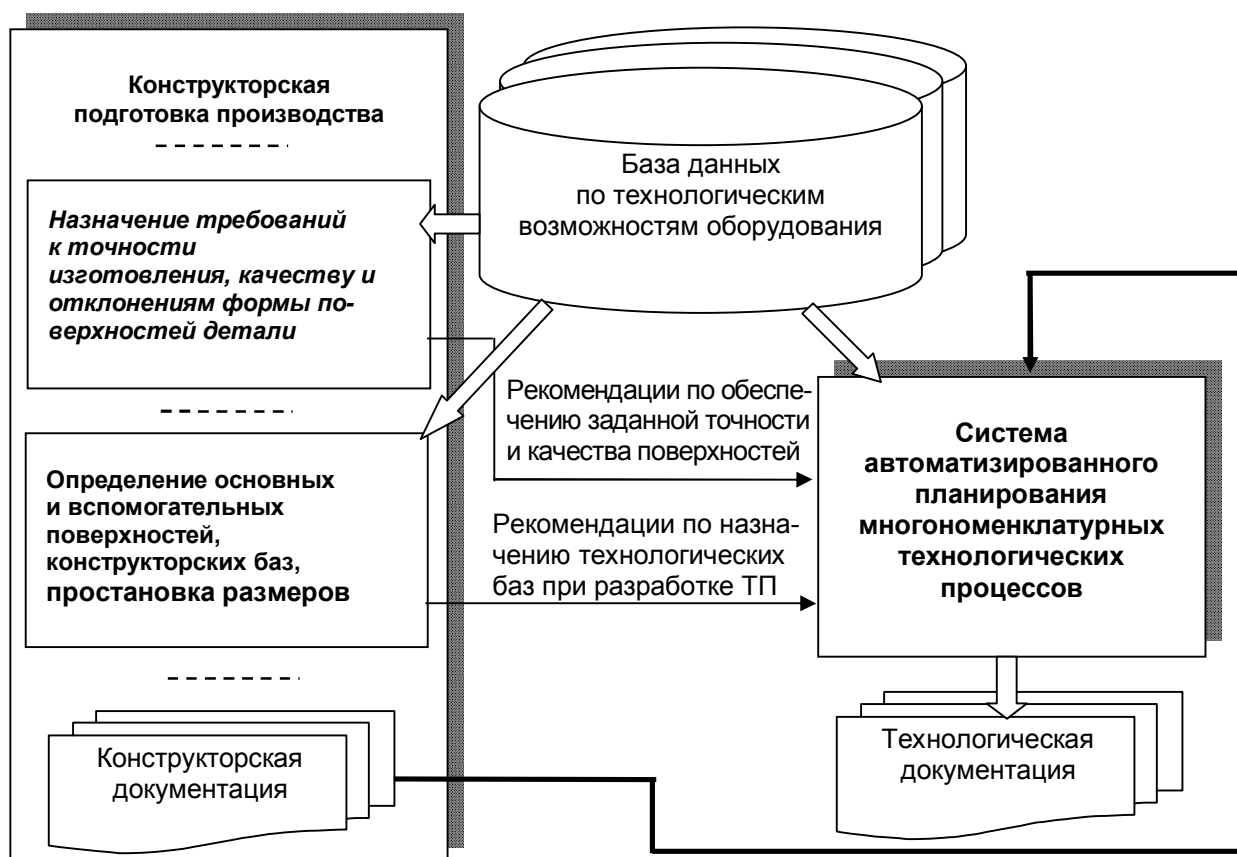


Рис. 3. Схема информационных взаимодействий в конструкторско-технологической САПР

В ходе создания САПМТП формируется её информационное обеспечение, включающее базу данных по технологическим возможностям оборудования и базу данных технологической оснастки для операций механической обработки. Структура этих баз данных спроектирована таким образом, что она отражает связи между технологическими способами получения параметров деталей и конкретными возможностями технологического оборудования и оснастки. Информация постоянно поддерживается в актуальном состоянии, благодаря наличию связи с подсистемой реализации технологических процессов.

На основании вышеизложенного можно сформировать схему информационных взаимодействий между этапами конструкторской подготовки производства и системой автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов (рис. 3), в которой определены места взаимодействия и конкретные блоки конструкторско-технологической системы автоматизированного проектирования (САПР).

Конструкторская часть этой системы получает информацию о технологических возможностях и текущем состоянии [6] производственной системы, на основе которой формируются рекомендации для конструктора по:

- 1) назначению требований к точности, качеству и отклонениям формы поверхностей детали;
- 2) определению основных и вспомогательных поверхностей, конструкторских баз, простановке размеров.

По результатам выполнения этих проектных процедур в САПМТП поступает информация с рекомендациями по:

- 1) обеспечению заданной точности и качества поверхностей, что влияет, в том числе, на выбор режущего инструмента [7];
- 3) выбору технологических баз при разработке ТП, что определяет стратегию обработки, структуру ТП и технологических операций [8].

Таким образом, разработка механизмов взаимодействия между конструктором и конкретной технологической системой даёт возможность конструктору получить рекомендации по простановке размеров и назначению требований к точности, качеству и отклонениям формы и расположения поверхностей деталей. Учёт полученных рекомендаций позволит рационально использовать технологические возможности конкретной производственной системы, сократить затраты времени на конструкторско-технологическую подготовку производства и уменьшить себестоимость изготовления деталей.

Фрагмент информационной модели производственного процесса изготовления детали-представителя «Переходная втулка»

Наименование группы деталей		Втулка переходная коническая										
Наименование и код детали-представителя		Втулка переходная										
Приведенная программа выпуска, шт/год		590										
Размер партии запуска <i>n</i> , шт		118										
Наименование подсистемы	Наименование технол. передела	Операция				Кол-во одно- временно обра- батыв. заго- товок, шт.	Цех/ участок		Код базо- вого эле- мента ПС	Код альтерна- тивного элемен- та ПС	Коэффициентт закреплен. операций	
		Наименование	Код	Трудоемкость, штучное вре- мя, ч	Подготовит.- заклю- ч. время, ч.		Наимен.	Код				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Транспорт.	Перемещение	Транспортная (межцеховая)	105	0,7	–	–	Транспортный	24	4.С.1	–	–	
Складская.	Обработка ре- занием	Хранение	110	6	–	–	Механич.	№ 4	4.С.2			
Складская.	Обработка ре- занием/	Накопление	115	3	–	–	Механич.	№ 4	4.Р.2			
Технологич.	Обработка ре- занием	Токарно- револьверная	120	0,05	0,23	1	Механич.	№ 4	4.Т.2		32	
		Токарно- револьверная					Механич.	№ 4		4.Т.28	32	
		Токарно- револьверная					Механич.	№ 4		4.Т.31	32	
		Токарная с ЧПУ					Механич.	№ 4		4.Т.32	38	
Транспорт.	Обработка ре- занием	Транспортная	125	0,1	–	20	Механич.	№ 4	4.С.3			
Складская.	Обработка ре- занием	Накопление	130	1	–	–	Механич.	№ 4	4.Р.3			
Технологич.	Обработка ре- занием	Токарно- автоматная	135	0,07	0,42	1	Механич.	№ 4	4.Т.3		25	
										4.Т.5	25	
										4.Т.6	25	
										4.Т.7	25	
Транспорт.	Обработка ре- занием	Транспортная	140	0,1	–	–	Механич.	№ 4	4.Р.4			
Технологич.	Обработка ре- занием	Вертикально- сверлильная	145	0,01	0,2	1	Механич.	№ 4	4.С.4		35	
											4.С.12	35
Складская.	Обработка ре- занием	Накопление	150	1	–	–	Механич.	№ 4	4.Р.5			
Технологич.	Обработка ре- занием	Автоматно- токарная	155	0,04	0,42	1	Механич.	№ 4	4.Т.5		25	
											4.Т.3	25
											4.Т.6	25
											4.Т.7	25

Окончание таблицы

Транспорт.	Обработка резанием	Транспортная	160	0,1	–	–	Механич.	№ 4	4.С.6		
Складская.	Обработка резанием	Накопление	165	1	–	–	Механич.	№ 4	4.Р.6		
Технологич.	Обработка резанием	Автоматно-токарная	170	0,09	0,42	1	Механич.	№ 4	4.Т.6		25
										4.Т.3	25
										4.Т.5	25
										4.Т.7	25
Транспорт.	Обработка резанием	Транспортная	180	0,1	–	–	Механич.	№ 4	4.С.2		
Складская	Обработка резанием	Накопление	190	3	–	–	Механич.	№ 4	4.Р.2		
Технологич.	Обработка резанием	Токарно-револьверная	195	0,02	0,23	1	Механич.	№ 4	4.Т.2		32
										4.Т.28	32
										4.Т.31	32
										4.Т.32	38
Транспорт.	Обработка резанием	Транспортная	200	0,1	–	–	Механич.	№ 4	4.Т.7		
Складская	Обработка резанием	Накопление	205	1	–	–	Механич.	№ 4	4.Р.7		
Технологич	Обработка резанием	Автоматно-токарная	210	0,03	0,42	1	Механич.	№ 4	4.Т.7		25
										4.Т.3	25
										4.Т.6	25
										4.Т.7	25
Транспорт.	Обработка резанием	Транспортная	215	0,1	–	–	Транспортный	24	4.С.1		

ЛИТЕРАТУРА

1. Безъязычный В.Ф. Исследование путей повышения производительности при различных типах производства / В.Ф. Безъязычный, А.Н. Рябов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2012. № 2 (23). С. 148-152.
2. Митин С. Г. Разработка технологических операций с учетом показателя технологичности в системе планирования многономенклатурных технологических процессов / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв, Л.Г. Бокова // Вестник СГТУ. 2011. № 58. С. 101-105.
3. Бочкарёв П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарёв // Технология машиностроения. 2002. №1. С. 10-14.
4. Митин С.Г. Автоматизированное проектирование операций фрезерования при многономенклатурном производстве / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв // Машины, технологии, материалы 2013: X Международный конгресс, 18-20 сентября 2013. Варна, Болгария, 2013. Т. 2. С. 23-26.
5. Бочкарёв П.Ю. Проектирование технологических операций механообработки в системе планирования технологических процессов / П.Ю. Бочкарёв, В.В. Шалунов, Л.Г. Бокова // Вестник СГТУ. 2009. Т. 3. № 1. С. 46-54.
6. Бровкова М.Б. Обоснование и разработка алгоритма идентификации качества динамических процессов при резании / М.Б. Бровкова, В.В. Мартынов, С.В. Свиридов // Вестник СГТУ. 2012. Т. 4. № 1 (68). С. 118-125.
7. Митин С.Г. Формирование рационального комплекта режущего инструмента с применением аппарата динамического программирования / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв // СТИН. 2012. № 6. С. 20-24.
8. Митин С.Г. Генерация возможных вариантов структур технологических операций с применением аппарата теории графов / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв // Технология машиностроения. 2012. № 4. С. 69-73.

Митин Сергей Геннадьевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Проектирование технических и технологических
комплексов» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergei G. Mitin –
Ph.D., Associate Professor
Department of Technical and Technological
Systems Design,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бочкарёв Пётр Юрьевич –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Проектирование технических и технологических
комплексов» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pyotr Yu. Bochkarev –
Dr. Sc., Professor
Department of Technical and Technological
Systems Design,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 620.92:658.261

И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Рассмотрены технические решения по повышению энергоэффективности газотурбинных установок, включающие охлаждение циклового воздуха и комбинированную выработку тепловой и электрической энергии и воды. Приведены схема интегрированной установки и результаты технико-экономической оценки ее эффективности

Газотурбинная установка, охлаждение воздуха, энерго-, водообеспечение, эффективность

I.V. Dolotovskiy, E.A. Larin, N.V. Dolotovskaya

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF GAS TURBINE PLANTS

The authors reviewed the technical solutions to improve the efficiency of gas turbine plants, including the cooling cycle of the air and co-generation of heat, electricity and water. An integrated circuit setup and the results of technical and economic evaluation of its effectiveness are provided.

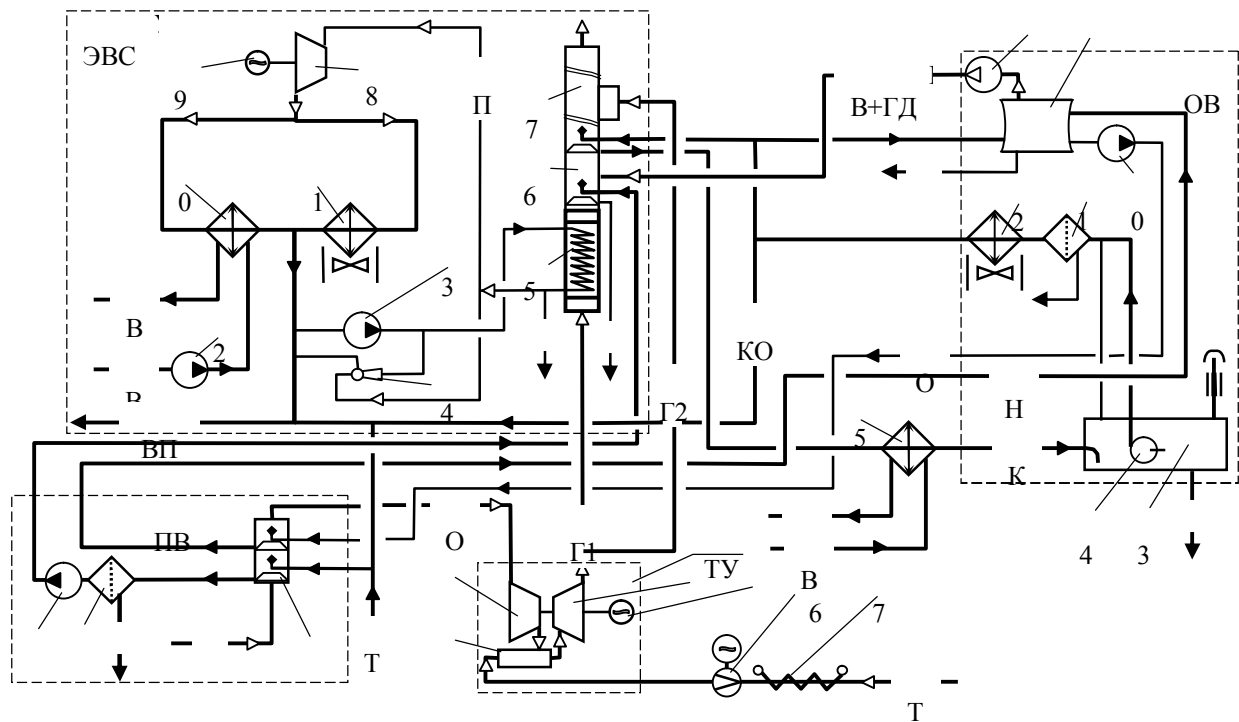
Gas turbine plant, air cooling, energy of water supply, effectiveness

Газотурбинные установки (ГТУ) являются в настоящее время одним из основных типов привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА) компрессорных станций и широко используются в парогазовых установках (ПГУ) при модернизации и обновлении оборудования тепловых электростанций и котельных, а также строительстве новых источников энергообеспечения. Основная причина преобладания ПГУ в структуре вновь вводимых энергетических объектов заключается в повышении их КПД до 58-60% [1] (при прогнозируемом его увеличении до 65%).

Классические ПГУ строятся по принципу сочетания газотурбинного и паротурбинного циклов, работающих по собственным тепловым схемам. ГТУ ГПА аналогичным образом обустраиваются котлами-утилизаторами (КУ). При наличии предтопка у КУ с линиями подачи воздуха и топлива такое комбинирование дает возможность автономной работы каждой установки без остановки всего блока.

Основным недостатком ГТУ является снижение их полезной мощности в условиях повышенных температур окружающего воздуха. Предлагаемая новая схема (рис. 1, заявка на ПМ № 2014117720 от 29.04.2014) позволяет повысить энергоэффективность ГТУ при эксплуатации ее в составе комбинированных ПГУ и установок энерго-водоснабжения (УЭВС) [2, 3], а также стабилизировать мощность ГТУ в переменных режимах.

При работе установки топливный газ высокого давления (поток ГТ на рис. 1), поступает на вход детандер-генератора 26, на котором обеспечивается снижение давления газа до рабочего давления перед ГТУ (в состав которой входит камера сгорания 1, воздушный компрессор 2, газовая турбина 3 и потребитель механической энергии – электрогенератор 4). Выработанная в детандер-генераторе электрическая энергия подается на электронагреватель 27 топливного газа, обеспечивающий безгидратный режим эксплуатации системы газоснабжения ГТУ. Использование детандер-генератора позволяет, по сравнению с традиционными техническими решениями, уменьшить расход топливного газа на собственные нужды (на нагрев потока дросселируемого газа) системы газоснабжения ГТУ.



Установки: ГТУ – газотурбинная; УПВ – подготовки воздуха; УОВ – охлаждения воды; ЭВС – энергоснабжения;

технологические потоки: В, ВО – воздух атмосферный и охлажденный; ВК, ВКО – конденсат водяных паров; ВП – водяные пары; ВТ – вода техническая; ГД – газы дегазации; ГТ – газ топливный; Д – дренажные стоки; ДГ1, ДГ2 – дымовые газы; ДН, ДО – дистиллят нагретый и охлажденный; ПВ, ОВ – прямая и обратная вода системы теплоснабжения; ПП – пар перегретый; ХПВ – вода на установку подготовки хозяйственной воды; аппараты: 1 – камера сгорания; 2 – воздушный компрессор; 3 – газовая турбина; 4, 19 – потребители механической энергии (электрогенераторы); 5 – воздухопромыватель; 6, 11 – фильтры; 7, 10, 14, 22, 23 – насосы; 8 – испаритель; 9 – вакуум-компрессор; 12, 21 – аппараты воздушного охлаждения; 13 – емкость конденсата; 15 – КУ; 16 – газоохладитель; 17 – дымовая труба; 18 – паровая турбина; 20, 25 – теплообменники-подогреватели воды; 24 – пароструйный насос; 26 – детандер-генератор; 27 – электронагреватель газа

Рис. 1. Принципиальная схема ПГУ с установкой стабилизации мощности ГТУ

Запыленный атмосферный воздух поступает на установку его подготовки (УПВ) в первую ступень воздухопромывателя 5, в которую через форсунки производится впрыск технической воды. При контактом теплообмене происходит обеспыливание воздуха и его охлаждение за счет частичного испарения воды (или охлажденного конденсата водяных паров – части потока ВКО). Дальнейшее охлаждение воздуха происходит на второй ступени эжекторного воздухопромывателя, на форсунки которой подается охлажденный дистиллят. Охлажденный воздух поступает в воздушный компрессор 2, нагнетающий воздух в камеру сгорания 1 ГТУ. Эжектирование потока воздуха спутными потоками распыленной форсунками воды обеспечивает практически отрицательные аэродинамические потери воздухопромывателя и наибольшую его энергоэффективность среди известных конструкций.

За счет охлаждения циклового воздуха массовая производительность воздушного компрессора повышается и, тем самым обеспечивается стабилизация (исключение потерь мощности) ГТУ в жаркое время года. Обеспыливание воздуха обеспечивает повышение моторесурса ГТУ за счет исключения эрозийного износа лопаток.

Выхлопные газы ГТУ поступают в паровой КУ 15, в котором за счет рекуперации их теплоты генерируется перегретый пар, подаваемый в паровую теплофикационную турбину 18, подключенную к потребителю механической энергии 19 (на рис. 1 – к электрогенератору). Расход дымовых газов (поток ДГ1), поступающих в КУ, и соответственно, его теплопроизводительность, регулируется с помощью дымового шибер. Охлажденные в КУ дымовые газы поступают двухступенчатый эжекторный газоохладитель 16. Остальная часть дымовых газов (поток ДГ2), подается в дымовую трубу 17, минуя КУ и газоохладитель.

Следует отметить, что предварительное охлаждение в КУ дымовых газов, поступающих затем в газоохладитель, обеспечивает снижение энергозатрат на генерацию водяного конденсата (из водяных паров), поскольку уменьшается энергопотребление привода вентилятора охладителя конденсата 12.

В первой ступени газоохладителя дымовые газы охлаждаются и увлажняются в процессе тепло- и массообмена с предварительно очищенной от механических примесей в фильтре 6 технической водой, подаваемой на форсунки из воздухопромывателя 5 насосом 7. Не испарившаяся часть воды сбрасывается в дренаж.

Во второй ступени газоохладителя происходит дальнейшее охлаждение и осушка дымовых газов за счет впрыска через форсунки в их спутный поток охлажденного конденсата водяных паров. Охлажденные дымовые газы по дымовой трубе 17 отводятся в атмосферу.

Применение двухступенчатого эжекторного газоохладителя снижает газодинамические потери по тракту выхлопных газов ГТУ вследствие эжекции потока газов «факелами» распыла охлаждающей воды.

Нагретый конденсат, а также сконденсированные из дымовых газов водяные пары (поток ВК) подаются вначале в теплообменник подогрева теплофикационной воды 25, а затем поступают в емкость водяного конденсата (деаэратор) 13. Деаэрированный водяной конденсат насосом 14 через фильтр 11 подается в охладитель конденсата 12. Охлажденный конденсат водяных паров (поток ВКО) подается на форсунки второй ступени газоохладителя, а также на подпитку испарителя 8 установки охлаждения воды (УОВ). Обвязка установки предусматривает подачу охлажденного водяного конденсата на форсунки первой ступени воздухопромывателя (при низком качестве или отсутствии технической воды), входы питательного насоса 23 и пароструйного насоса 24 для подпитки КУ, вход сетевого циркуляционного насоса 22 для подпитки системы теплоснабжения, а также на установку подготовки хозяйственной воды (поток ХПВ).

Необходимый температурный уровень охлажденного воздуха перед воздушным компрессором ГТУ обеспечивается испарителем 8 УОВ, в котором происходит частичное испарение нагретого дистиллята (поток ДН), поступающего из второй ступени воздухопромывателя. Отвод теплоты испарением от потока нагретого дистиллята в испарителе интенсифицируется за счет вакуума, создаваемого вакуум-компрессором 9. Отбираемая из испарителя парогазовая смесь (поток ВП+ГД) подается в патрубок между первой и второй ступенями газоохладителя. Водяные пары из парогазовой смеси конденсируются на второй ступени газоохладителя совместно с водяными парами влажных дымовых газов, поступивших из первой ступени, тем самым способствуя повышению энергоэффективности установки за счет исключения потерь водяного конденсата.

Охлажденный дистиллят (поток ДО) из испарителя подается циркуляционным насосом 10 на форсунки второй ступени воздухопромывателя, обеспечивая оптимальную температуру охлажденного воздуха, исключаящую потери мощности ГТУ в жаркое время года или образование ледяных отложений в проточной части воздушного компрессора (и снижение мощности и моторесурса) в холодное время года.

Технико-экономическая эффективность использования УПВ и УОВ в структуре ПГУ оценивается по значениям сравнительного интегрального социально-экономического эффекта (ΔZ_{Σ}) или чистого дисконтированного дохода (ЧДД)

$$\Delta Z_{\Sigma} = \sum_{\tau=0}^T (\Delta Z_{\tau}^{np} + \Delta Z_{\tau}^{п}) (1 + E)^{\tau_0 - \tau} + \Delta \Phi_T (1 + E)^{-T} \xrightarrow{y \rightarrow opt} max,$$

где ΔZ_{τ}^{np} , $\Delta Z_{\tau}^{п}$ – соответственно, экономия затрат при производстве и потреблении электрической и тепловой энергии, водоснабжении и водоотведении в τ -й год эксплуатации энергоэффективной ПГУ (с УПВ, УОВ и УЭВС) по сравнению с базовым вариантом ПГУ (без охлаждения воздуха ГТУ и выработки воды); $\Delta \Phi_T$ – разность остаточной стоимости основных фондов вариантов на конец расчетного периода времени T ; E – норматив приведения затрат и эффектов к единому времени.

Сравнение вариантов ПГУ выполнено при одинаковом уровне надежности энергообеспечения технологических потребителей в τ -й год эксплуатации.

Основные технико-экономические показатели инвестиционного проекта создания и функционирования ПГУ с установками повышения ее энергоэффективности в структуре многопрофильного предприятия переработки газа в сопоставлении с базовым вариантом ПГУ (таблица) определены с использованием разработанного программного обеспечения [4].

В состав ПГУ включены три ГТУ типа GT8C2 фирмы ALSTOM, три котла-утилизатора КУ-93 и три паровых турбины К-6-2.4 КТЗ.

Показатели вариантов ПГУ

Показатель, единица измерения	Вариант ПГУ	
	базовый	энергоэффективный
Установленная мощность, МВт		
–электрическая	192	192
–тепловая	163	163
Удельный расход топлива на выработку энергии		
– электрической, т у. т./МВт·ч	0,162	0,145
– тепловой, т у. т./ГДж	0,045	0,045
Годовая выработка энергии:		
– электрической, МВт·ч	1 549 008	1 562 400
– тепловой, тыс. ГДж	4875,9	4875,9
Капитальные затраты, млн. руб.	6219,9	6267,8
Годовые эксплуатационные затраты на производство и потребление энергоносителей, воды, водоотведение, млн. руб.	451,9	420,7
Интегральный эффект (ЧДД), млн. руб., (за 10 лет)	13263,2	13516,1
Индекс доходности, руб./руб.	2,13	2,16
Срок окупаемости, лет	5,3	5,2
Себестоимость:		
– электроэнергии, руб./кВт·ч	0,498	0,485
– тепловой энергии, руб./ГДж	138,7	136,4

Затраты на дополнительное оборудование УПВ и УОВ определены по необходимой суммарной холодопроизводительности испарителей, равной 11 МВт.

Разность отдельных показателей в % базового и энергоэффективного вариантов ПГУ приведена на рис. 2, анализ которого показывает, что базовый вариант характеризуется меньшими капитальными затратами. Однако и интегральный эффект этого варианта также меньше.

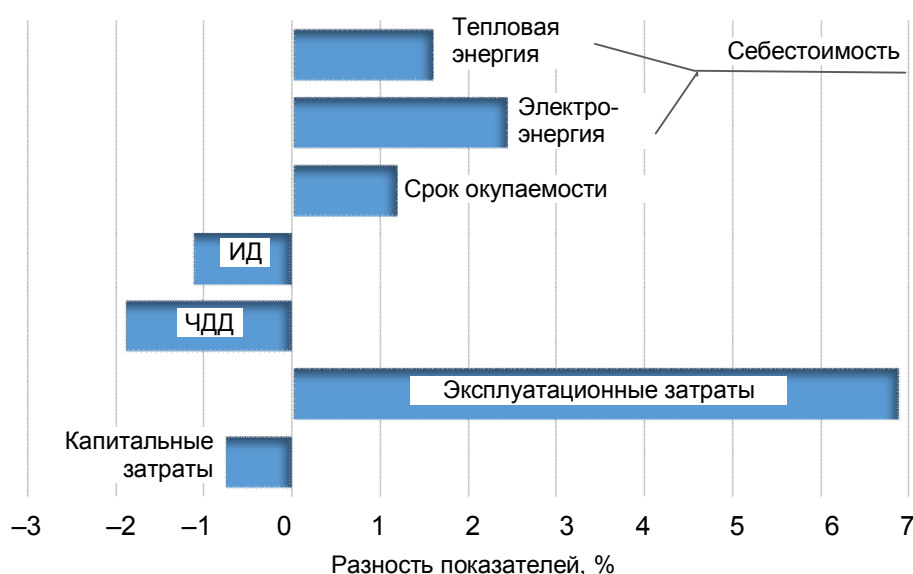


Рис. 2. Сопоставительные показатели вариантов ПГУ

Энергоэффективный вариант ПГУ характеризуется уменьшением эксплуатационных затрат (без отчислений от капитальных затрат на амортизацию и ремонт оборудования) почти на 7%. Себестоимость выработки тепловой и электрической энергии для этого варианта также меньше по сравнению с базовым.

Таким образом, при небольших различиях в сроке окупаемости и индексе доходности внедрение ПГУ с охлаждением циклового воздуха ГТУ и выработкой воды экономически целесообразно.

Вывод. Повышение энергоэффективности ГТУ в структуре ПГУ и компрессорных станций обеспечивается за счет ее комбинирования с установками охлаждения воды и воздуха. Стабилизация мощности ГТУ при повышенной температуре окружающего воздуха и выработка воды в комбинированных установках электротепловодоснабжения позволяют снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии на 2,4%, тепловой энергии – на 1,6% при несущественном увеличении капитальных затрат на дополнительное оборудование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ольховский Г.Г. Применение газотурбинных и парогазовых установок в энергетике (обзор) / Г.Г. Ольховский, В.В. Гончаров. М.: Комиссия по газовым турбинам РАН. Ассоциация газотурбинных технологий для энергетики и промышленности, 2005. 27 с.
2. Пат. 134993 РФ, МПК F01K 17/02. Установка электро-тепло-водоснабжения / И.В. Долотовский, А.В. Ленькова, Н.В. Долотовская. № 2013130457; заявл. 02.07.2013; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.
3. Пат. 118360 РФ, МПК F01K 17/02. Установка электро-тепло-водоснабжения предприятий добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья / Долотовский И.В. 2012109097; заявл. 11.03.2012; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.
4. Система «Энергоресурс»: программа для ЭВМ № 2010615353 / Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. №2010613798; заявл. 29.06.10; зарегистр. 20.08.10.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Долотовский Игорь Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor V. Dolotovskiy – Ph. D., Senior Research Fellow, Department of Thermal Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ларин Евгений Александрович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Eugeniy A. Larin – Ph. D., Professor, Department of Thermal Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Долотовская Надежда Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nadezhda V. Dolotovskaya – Ph. D., Associate Professor, Department of Industrial Heat Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.04.14, принята к опубликованию 20.06.14

УДК 621.365.5.029.5, 664.046.1

И.В. Злобина, В.А. Коломейцев, В.А. Кошуро, Н.В. Бекренев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ МЯСНЫХ КУЛИНАРНЫХ РУБЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ МУКИ НУТА

Выполнены экспериментальные исследования динамики структуры мясных фаршевых систем с добавлением муки нута в зависимости от способа тепловой обработки – с помощью СВЧ нагрева и традиционным методом. Установлено существенное повышение однородности структуры и уменьшение размеров пустот (пор) в ней при одновременном увеличении их процентного содержания. Показано,

что добавление муки нута способствует уменьшению размеров пор и стабилизации пористой структуры.

СВЧ-термия, микроволновое излучение, пористая структура, агломераты, однородность, мука нута, кулинарная готовность

I.V. Zlobina, V.A. Kolomeyev, V.A. Koshuro, N.V. Bekrenev

RESEARCH INTO IMPACT OF MICROWAVE RADIATION ON THE STRUCTURE OF CHOPPED MEAT PRODUCTS WITH ADDED CHICK-PEA FLOUR

The conducted experiments refer the dynamics in the structure of meat farce products with added chick-pea flour depending on the method of thermal treatment by means of microwave heating and traditional methods. Essential increase in the uniformity of structure and size reduction of cells is observed accompanied by the increase in their percentage. It is shown that addition of chick-pea flour facilitates reduction of cell sizes and stabilization the porous structure.

Microwave thermie, microwave radiation, porous structure, agglomerates, uniformity, flour of chick-pea, culinary readiness

Начало XXI века характеризуется широким внедрением высоких технологий, ранее известных только в оборонных отраслях промышленности, в сферы обеспечения качественной жизни населения в разных странах, в том числе и в России. Значительная роль в выполнении данной задачи принадлежит совершенствованию структуры питания абсолютного большинства населения. Наметившаяся в настоящее время тенденция к расширению использования белков растительного происхождения в продуктах питания, а также стремление производителей снизить их себестоимость, определяют спектр применения зернобобовых культур, в частности возделываемых в регионах России. В Саратовской области такой культурой является нут, отличающийся высокой устойчивостью к засухе, вредителям, технологичностью в уборке, высоким содержанием белка, пищевых волокон, β -каротина, макроэлементов (калия, магния, кальция, железа) и селена. Поэтому весьма перспективным является введение муки нута в мясные фаршевые системы [1, 2]. Однако неоднородность структуры изготовленных из них изделий в сочетании с их многокомпонентным составом создает существенные трудности по равномерному прогреву в процессе термической обработки и может привести к снижению потребительских свойств. В связи с этим приобретает актуальность использование новых способов термической обработки, основанных на использовании высокоэффективных электротехнологий, обеспечивающих сокращение времени, необходимого для достижения кулинарной готовности, и хорошие потребительские свойства продукции. Одним из эффективных электротехнологических методов обработки различных материалов, в том числе диэлектрических, является использование электромагнитного микроволнового излучения сверхвысокой частоты (СВЧ). Большой вклад в развитие теории и практики СВЧ обработки материалов внесли Ю.С. Архангельский, В.А. Коломейцев, И.В. Лебедев, В.Т. Свиридов, С.Г. Калганова [3, 4]. При этом наряду с применением СВЧ – электротермии для сушки и сублимации, модифицирования структуры, низкотемпературной обработки материалов в машино- и приборостроении, а также строительстве данный метод в последнее время успешно применяется для направленного воздействия на биологические объекты, например в медицине для гипертермической обработки опухолей и других глубинных нарушений тканей [5, 6]. В области применения СВЧ процессов в пищевой отрасли значительный объем исследований выполнен И.А. Роговым, С.В. Некрутманом, О.П. Семеновой, А.А. Бабенко, М.А. Беляевой, Т.А. Козловой [7]. Преимущественно данный метод используется в бытовых условиях для размораживания и разогрева пищевых продуктов, а в промышленных условиях – для пастеризации продуктов, в частности молока, и также разогрева крупных партий полуфабрикатов в предприятиях общественного питания (фаст-фуды и т.п.) [8]. Однако несмотря на активное и широкое использование указанной технологии и значительный объем исследований, выполненных, в том числе, в СГТУ имени Гагарина Ю.А. [9],

существуют недостаточно изученные научно-практические аспекты применения СВЧ излучения при термической обработке сложных систем типа фаршевых композиций, включающих в состав высокобелковые компоненты растительного происхождения, с целью доведения до кулинарной готовности.

Нами проведены сравнительные экспериментальные исследования влияния добавки муки нута на структуру фаршевых систем при использовании традиционного метода тепловой обработки (жарки) и термической обработке в микроволновой печи. Использовались образцы трех групп, изготовленные на основе фарша из говядины: контрольные (выработанные по Сборнику рецептов [10]); с заменой 5% массы мяса мукой нута и 20% массы хлеба мукой нута размерами 60×20×20 мм. Одну часть образцов подвергали тепловой обработке путем жарки в течение 5,5 мин, другую – СВЧ обработке в микроволновой печи Samsung ME711KR в течение 4,5, 4 и 5,3 мин соответственно. Затем образцы разрезали вдоль наибольшей оси и подготовили шлифы, которые изучали под микроскопом МБС-6 при 12-кратном увеличении. Образцы фотографировали цифровым фотоаппаратом Canon PowerShot A2500. Полученные изображения транслировали в компьютерный анализатор изображений микроструктур АГПМ-6М, где выполняли их обработку в программе «*Metallograph*». Оценивали внешний вид образцов, распределение пустот (пор) в структуре по размерам, включая дисперсию размеров, и выполняли определение открытой пористости. Отдельно фиксировали наличие в структуре частиц нута.

В ходе подготовки образцов, было отмечено, что под действием СВЧ излучения происходит более интенсивный и равномерный нагрев, о чем визуально свидетельствует малое различие по цвету поверхности и внутреннего объема. Результаты компьютерной обработки изображений образцов представлены на рис. 1 и 2.

При СВЧ обработке контрольных образцов средний размер пор снижается более чем в 2 раза по сравнению с традиционным способом тепловой обработки (рис. 3).

Добавление муки нута вместо части мяса вызывает при использовании жарки существенное снижение размеров пор, а при использовании СВЧ обработки, напротив, приводит к некоторому их увеличению по сравнению с контрольным образцом.

Замена части хлеба нутовой мукой приводит во всех случаях к снижению размеров пор. При этом во всех случаях использование СВЧ обработки способствует уменьшению разноразмерности пор, что позволяет говорить о равномерном теплопереносе в объеме образца и, как следствие, равномерной его кулинарной обработке, что обеспечит улучшение потребительских свойств.

Влияние СВЧ излучения на изменение параметров структуры по сравнению с образцом, подвергнутым традиционной обжарке, проявляется по-разному в зависимости от состава образца (рис. 4).

В наибольшей степени эффект снижения размеров пор и их дисперсии проявляется у контрольного образца состава. При замещении части мяса мукой нута отмечается увеличение размеров пор по сравнению с контрольным образцом, а также меньшее снижение дисперсии, при замещении части хлеба мукой нута наблюдается наибольшее снижение как размеров пор, так и их дисперсии. Пористость во всех случаях воздействия СВЧ излучения возрастает примерно на 10%.

Таким образом, выполненные нами исследования показали целесообразность применения СВЧ излучения для доведения до кулинарной готовности мясных рубленых кулинарных изделий с добавлением муки нута. Неоднородность теплофизических свойств исходных полуфабрикатов, вызванная введением растительных добавок в виде муки нута, не оказывает существенного влияния на равномерность термической обработки изделий и структурные параметры. Применение СВЧ излучения способствует снижению размеров пор и разброса их размеров при одновременном увеличении пористости. Последний факт может способствовать сохранению целостности изделия при хранении и возможной транспортировке. В дальнейшем целесообразно проведение исследований по определению оптимальных режимов СВЧ обработки (удельной мощности и времени) с целью улучшения выявленных нами результатов, а также разработка метода обработки изделий на двух частотах с целью улучшения их потребительских свойств.

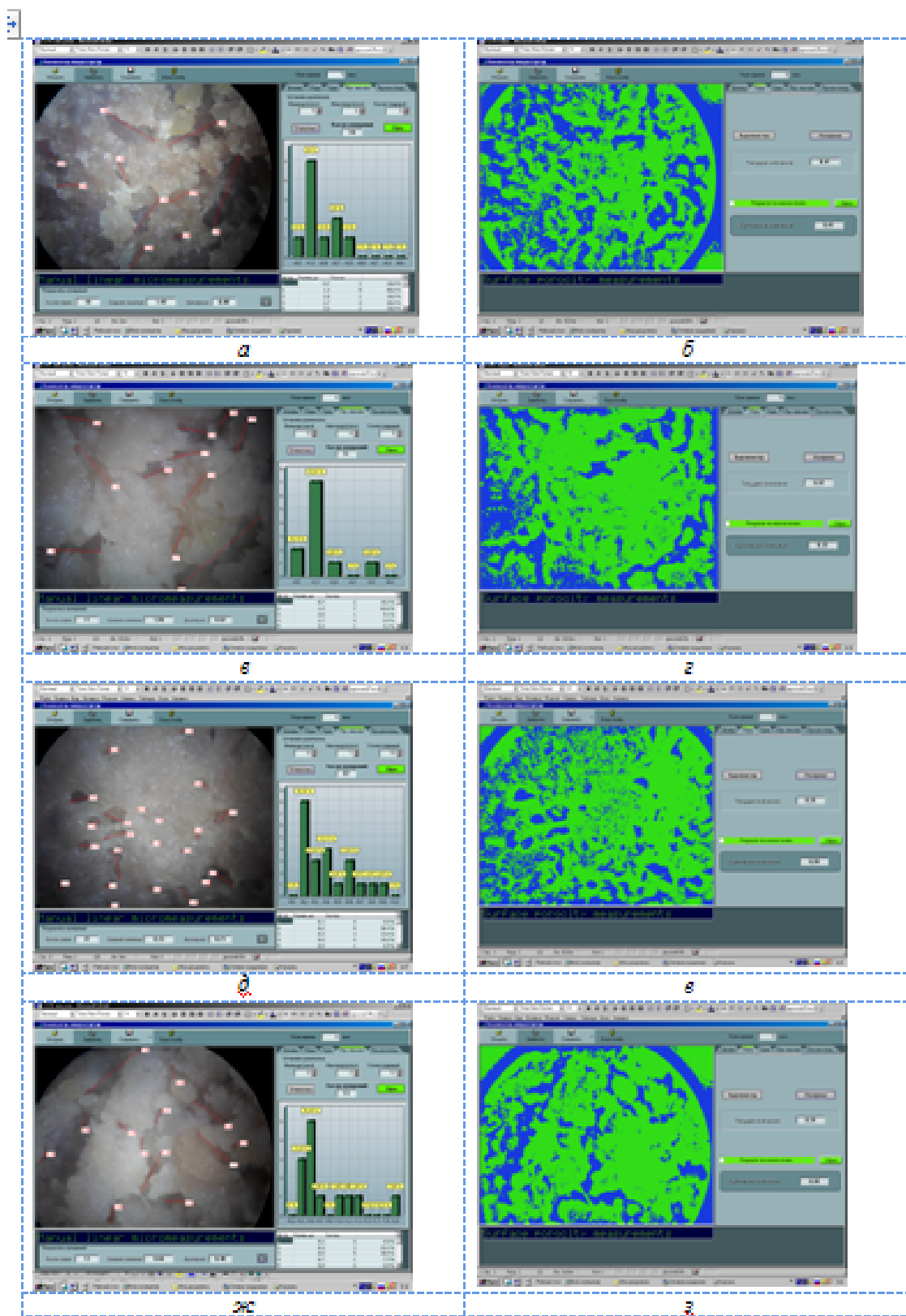


Рис. 1. Статистическая оценка размеров пор (а, в, д, ж) и открытой пористости (б, г, е, з) образцов с замещением части мяса (2 верхних ряда) и части хлеба (2 нижних ряда) мукой нута после СВЧ обработки (а, б и д, е) и жарки (в, г и ж, з)

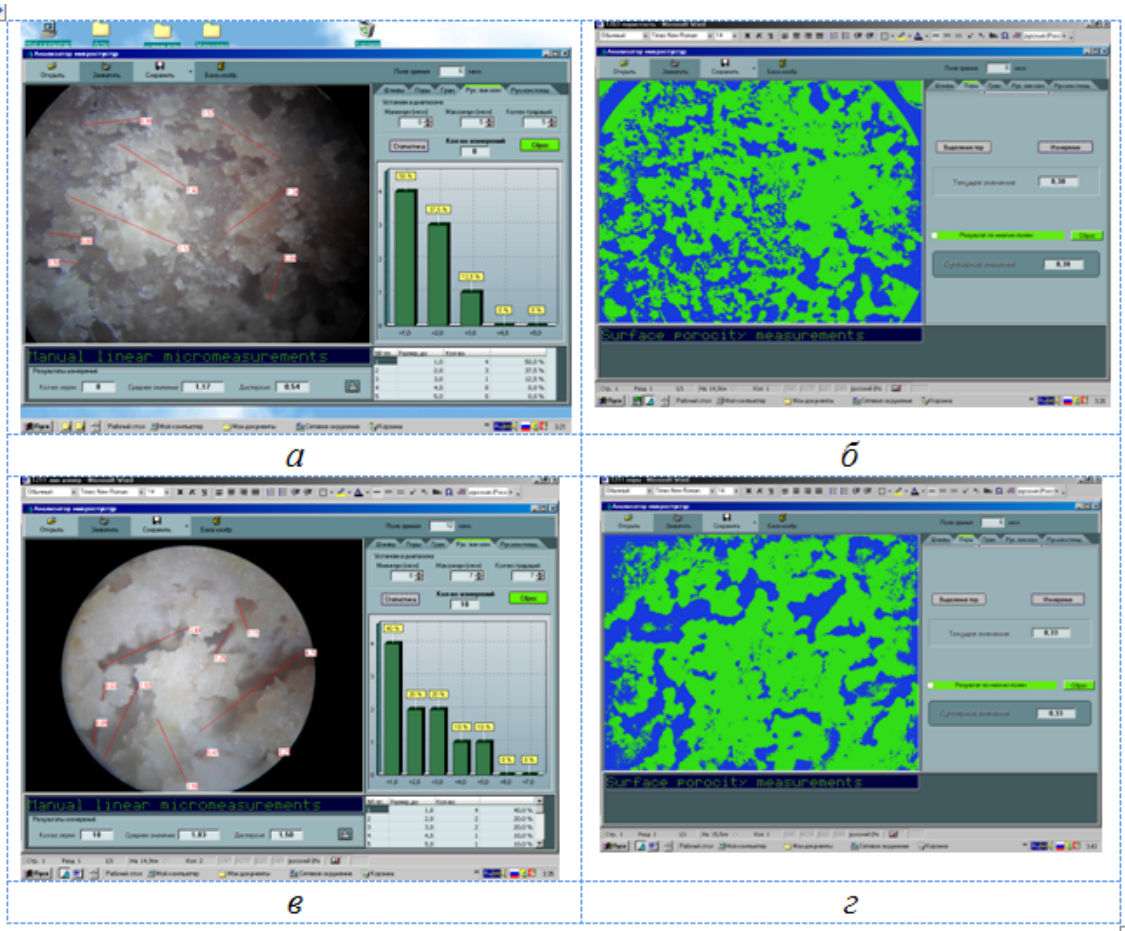


Рис. 2. Статистическая оценка размеров пор (а, в) и открытой пористости (б, г) контрольных образцов после СВЧ обработки (а, б) и жарки (в, г)

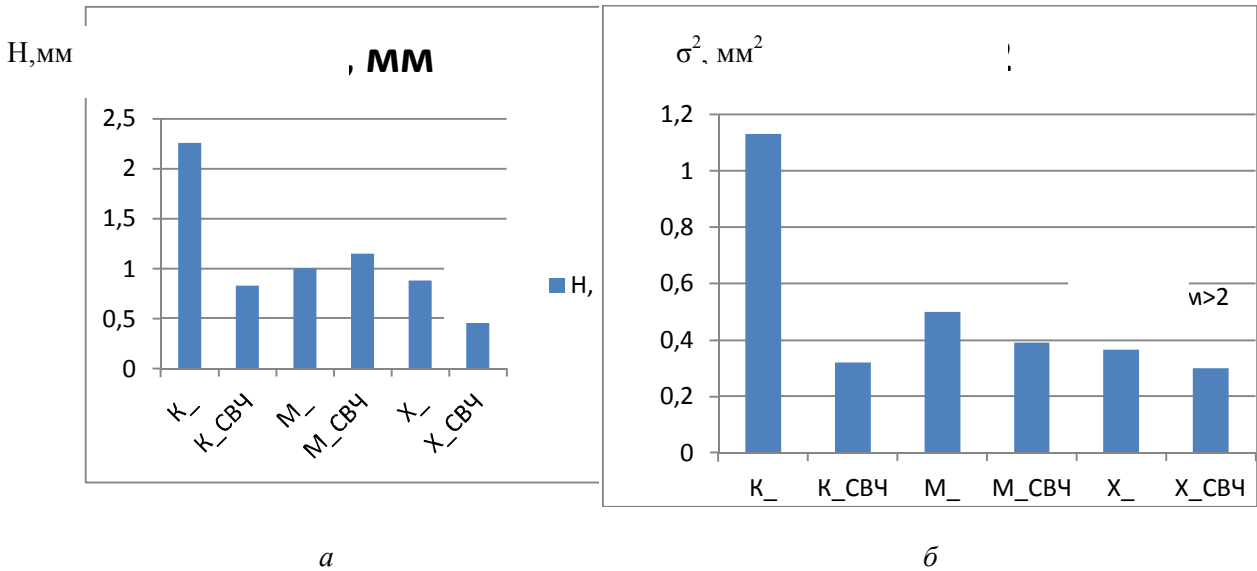


Рис. 3. Влияние метода обработки и состава образцов на размеры пор H (а) и их дисперсию σ^2 (б): K_, M_, X_ - контрольный образец, образец с замещением части мяса, образец с замещением части хлеба при жарке; K_CBЧ, M_CBЧ, X_CBЧ - то же, при СВЧ обработке

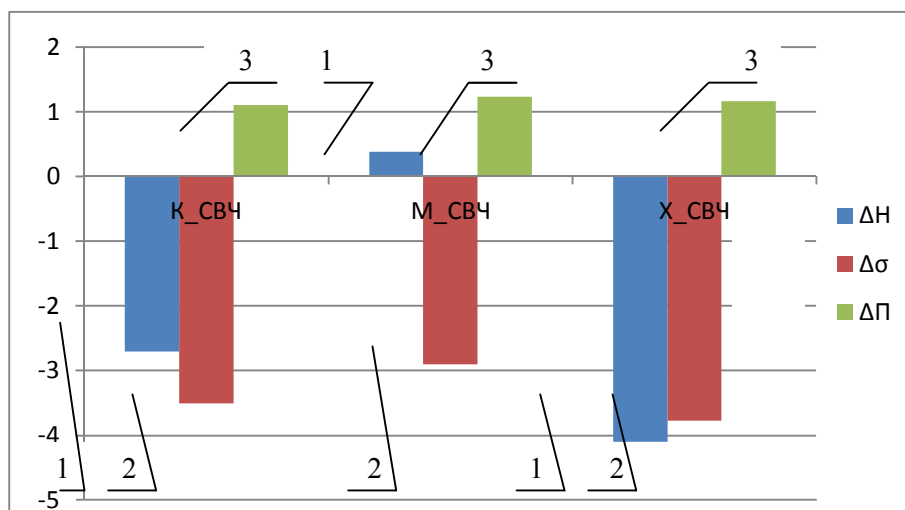


Рис. 4. Изменение размеров порот (пор) H , их дисперсии σ^2 и величины пористости P в зависимости от состава образцов, подвергнутых СВЧ термической обработке, по сравнению с обжаркой на сковороде (K_CVЧ - контрольный образец без добавок, M_CVЧ – образец с замещением 5% мяса, X_CVЧ – образец с замещением 20% хлеба). 1 – $H_{СВЧ}/H$, 2 – $\sigma^2_{СВЧ}/\sigma^2$, 3 – $P_{СВЧ}/P$. Знак (-) означает уменьшение показателя

ЛИТЕРАТУРА

1. Злобина И.В. Исследование мясных кулинарных изделий с добавлением муки нута / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Технология и товароведение Инновационных пищевых продуктов. 2012. № 3(14). С. 30-36.
2. Злобина И.В. Обогащение мясных кулинарных изделий растительным белком / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Научный электронный архив. URL: <http://forum2009.rae.ru/26/337> (дата обращения: 30.04.2013)
3. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: Справочник / Ю.С. Архангельский. Саратов: Изд-во «Научная книга», 2011. 560 с.
4. Архангельский Ю.С. Высокотемпературный нагрев диэлектриков с фазовыми переходами / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов // Вестник СГТУ. 2012. № 2 (66). С. 34-37.
5. Fear Enhancing Breast Tumor Detection with Near-Field Imaging / Elise C. Fear, Susan C. Hagness, Paul M. Meaney, Michal Okoniewski, Maria A. Stuchly // IEEE Microwave Journal magazine, v. 3, №1, march 2002. p. 48-56.
6. Sterzer F. Microwave Medical Devices / Fred Sterzer // IEEE Microwave Journal magazine. V. 3. № 1. March 2002. P. 65-70.
7. Рогов И.А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. М.: Агропромиздат, 1986. 361 с.
8. Kachmar M. Microwave Heating: 50 MW and Counting / Michael Kachmar // Microwaves & RF. sept. 1992. P. 41-44.
9. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотная электротехнология. Саратовская школа электротехнологов / Ю.С. Архангельский // Вестник СГТУ. 2011. № 4 (3). С. 5-15.
10. Здобнов А.И. Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий: для предприятий общественного питания / Здобнов А.И., Цвганенко В.А.. М.: ИКТЦ «Лада», 2005. 276 с.

Злобина Ирина Владимировна – ассистент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – Assistant Lecturer
Department of Technical Mechanics and Machine Parts,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Коломейцев Вячеслав Александрович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры

Vyatsheslav A. Kolomeytsev – Dr. Sc., Professor,
Department of Radio Electronics and Telecommunications,

«Радиоэлектроника и телекоммуникации»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Кошуру Владимир Александрович –
аспирант кафедры «Биотехнические
и медицинские аппараты и системы»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir A. Koshuro –
Postgraduate
Department of Biotechnical and Medical Devices
and Systems,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бекренев Николай Валерьевич –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Техническая механика
и детали машин» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikolai V. Bekrenev –
Dr. Sc., Professor
Head: Department of Technical Mechanics
and Machine Parts,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 536.242

Б.А. Семенов, Н.А. Озеров

ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН В ЦЕНТРЕ УДАРА ПЛОСКОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ, РАСТЕКАЮЩЕЙСЯ ПО ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ *

Обоснован метод нормализации пространственных координат, позволивший путем обобщения массивов экспериментальных данных разных авторов получить адекватное математическое описание локального теплообмена в критической точке плоской поверхности, обдуваемой нормально направленной плоской воздушной струей, отличающееся тем, что хорошо согласуется с экспериментальными данными не только в области линейно-логарифмической корреляции, но и в наиболее интересной для практики зоне экстремума, где наблюдается максимум локальной интенсивности теплообмена.

Струйный обдув, плоская струя, плоская поверхность, точка разделения потока, локальный теплообмен, максимум интенсивности, близость экрана, метод нормализации координат

B.A. Semyonov, N.A. Ozerov

LOCAL HEAT-TRANSFER IN THE IMPACT CENTRE OF THE FLAT AIR STREAM SPREADING OVER THE FLAT SURFACE

The utilized method for normalization of spatial coordinates allowed for generalization of experimental data files by various authors to receive adequate mathematical description of the local heat-transfer at a critical point of the flat surface blown by normally directed flat air stream. This agrees with the experimental data both in the area of linear-logarithmic correlation, and in the extremum zone with the maximum local intensity heat-transfer.

JET having blown, flat stream, flat surface, a point of stream division, local heat-transfer, intensity maximum, proximity of the screen, a method for normalization of coordinates

Введение. Анализ отечественной и зарубежной научной литературы [1-11] показывает, что полученные разными авторами результаты аналитических и экспериментальных исследований аэродинамики и

теплообмена при взаимодействии импактных струй с плоскими поверхностями существенно различаются. Удовлетворительное совпадение теоретических зависимостей с экспериментальными данными наблюдается только в отдельных частных случаях: как правило, при небольших числах Рейнольдса $Re < 3 \cdot 10^4$ [7], расположении сопла на значительном удалении от обдуваемой поверхности $z/B > 14$ [2], а также в области развитого пристенного течения, которая расположена за пределами зоны стагнации [2, 3, 8]. В то же время наибольший практический интерес представляет получение расчетных зависимостей, отражающих закономерности изменения интенсивности локального теплообмена в непосредственной близости к точке растекания струи при условии расположения сопла на таком расстоянии от обдуваемой поверхности, которое может обеспечить достижение максимума охлаждающего эффекта.

Для решения этой задачи в настоящей работе приведено обоснование метода нормализации пространственных координат, с помощью которого удалось обобщить массивы экспериментальных данных разных авторов, получив адекватное математическое описание локального теплообмена в критической точке плоской поверхности, обдуваемой нормально направленной плоской воздушной струей, справедливое в наиболее интересной для практики зоне экстремума.

Общие положения. Схема развития воздушного потока, истекающего из щелевидного сопла на плоскую поверхность, показана на рис. 1.

Согласно данной схеме, при натекании нормально направленной воздушной струи на плоскую поверхность эта струя разделяется на две части, образуя продольные токи воздуха, омывающие плоскую поверхность в двух противоположных направлениях.

Начальной точкой области теплообмена является центр зоны торможения (центр удара струи), то есть точка с координатой $x = 0$, в которой происходит разделение потока. Анализ данных [1, 2, 4, 7-9], показывает, что при постоянных значениях Pr и Re_B зависимость интенсивности теплообмена в центре удара струи от расстояния между соплом и преградой $Nu_0 = f(z/B)$ имеет экстремальный характер.

Однако большинство опубликованных данных существенно расходится как в числовых значениях максимальных чисел Нуссельта, так и в координатах точки оптимума. Все это свидетельствует об отсутствии обобщенного математического описания, пригодного для адекватной оценки интенсивности локального теплообмена в центре удара плоской импактной струи, натекающей на экран.

Согласно рекомендациям [1], в практических инженерных расчетах принято использовать простую полуэмпирическую зависимость, полученную Р. Гардоном и Дж. К. Акфиратом [2] на основе обработки результатов эксперимента в диапазоне значений $2000 \leq Re_B \leq 50000$; $14 \leq z/B \leq 80$ при $Pr = 0,7$, которая имеет вид

$$Nu_0 = 1,2 \cdot Re_B^{0,58} \cdot (z/B)^{-0,62} \quad (1)$$

По данным [2], погрешность этой зависимости в пределах указанных диапазонов варьирования не превышает $\pm 5\%$, что является вполне достаточным для инженерного расчета. Однако существенным недостатком данной зависимости является ее неадекватность вблизи точки максимума, связанная с тем, что линейный вид графика зависимости (1) в логарифмических координатах не пригоден для адекватного отображения реальной картины изменения функции Nu_0 вблизи точки экстремума.

Формирование и обработка массива исходной информации

Массив исходной информации, необходимой для получения обобщающей аппроксимационной зависимости, адекватно отражающей изменение интенсивности локального теплообмена в широком диапазоне варьирования расстояний между соплом и экраном, включая и область экстремума, был сформирован путем оцифровки экспериментальных кривых [2]. Результаты оцифровки представлены в левой части табл. 1. Для сравнения в правой части этой же таблицы даны конечные результаты расчета по аппроксимирующим формулам, полученным в настоящей работе.

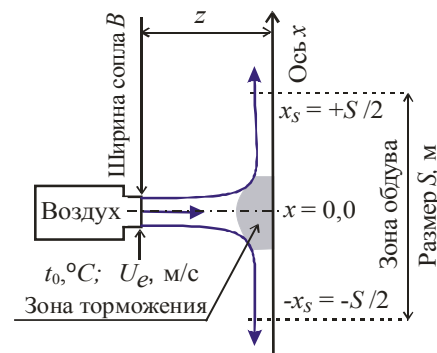


Рис. 1. Схема образования продольных течений при обдуве плоской поверхности

Исходные данные и результаты расчета по полученным аппроксимирующим зависимостям

Области	z/B	Значения Nu ₀ , считанные с графиков [2], при Re _B , равных				Расчетные значения Nu ₀ при Re _B , равных			
		22000	11000	5500	2750	22000	11000	5500	2750
Область существования экстремума	2,5	62,5	49	32,5	26	66,48	46,89	33,38	24,00
	5	65	52	35	28	65,58	49,07	37,07	28,16
	6	67,5	53	37,5	29,5	69,02	52,30	39,74	30,02
	7	71	56	41	30,3	73,02	55,46	41,79	30,92
	7,5	75	58	43	30,4	74,99	56,79	42,43	30,97
	8	79	59	43,5	31	76,82	57,86	42,77	30,78
	10	82,5	58	42,5	28,5	81,50	59,10	41,64	28,61
	12,5	81	55	38	25,5	80,42	55,59	37,68	25,27
Область линейной корреляции дан- ных в логарифмиче- ских координатах	15	76	51	34,7	22,6	74,98	50,56	33,83	22,58
	17,5	69	47	32	20,5	68,90	46,07	30,74	20,50
	20	63,2	43	29	18,5	63,53	42,39	28,27	18,85
	22,5	58	39,5	27	17,3	59,03	39,37	26,26	17,51
	25	55,5	37	25,3	16,2	55,26	36,85	24,58	16,39
	27,5	52,2	35	23,4	15,1	52,05	34,71	23,15	15,44
	30	49,2	33	22,5	14,5	49,29	32,87	21,92	14,62
	32,5	47	31,5	21,5	13,6	46,88	31,26	20,85	13,90
	35	44,7	30	20,4	13,2	44,75	29,84	19,90	13,27
	37,5	42,5	28	19,5	12,6	42,85	28,58	19,06	12,71
	40	40,5	27	19	12,4	41,15	27,44	18,30	12,20
	45	37,2	24,8	17,5	11,8	38,22	25,49	17,00	11,34

Математическая обработка представленного в табл. 1 массива экспериментальных данных выполнялась в два этапа. На первом этапе были уточнены коэффициенты зависимости (1), являющейся в данном случае асимптотической функцией, к которой должна приближаться реальная зависимость $Nu_0=f(z/B)$ при $z/B \rightarrow \infty$. Для этого показанные в левой части табл. 1 числовые значения были прологарифмированы и нанесены в виде точек на поле логарифмической системы координат. Полученное расположение экспериментальных точек подтвердило линейный характер двух корреляционных однофакторных зависимостей: $Ln(Nu_0)=f[Ln(Re_B)]$ при $z/B = const$ и $Ln(Nu_0)=f[Ln(z/B)]$ при $Re_B = const$ в интервале варьирования расстояний $15 \leq z/B \leq 40$. Подтвердилось также и нарушение линейности данных функций при значениях $z/B < 15$. Таким образом, в табл. 1 были выделены две характерные области: область линейной корреляции данных в логарифмических координатах и область существования экстремума.

В пределах области линейно-логарифмической корреляции на основе ортогонального плана ПФЭ-2² была реализована стандартная процедура регрессионного анализа, в результате которой были уточнены значения коэффициентов регрессии и получена уточненная асимптотическая функция (2), адекватная с доверительной вероятностью 95 %:

$$Nu_0 = 1,206 \cdot Re_B^{0,5845} \cdot (z/B)^{-0,6273} \quad (2)$$

Далее были выявлены максимальные значения $Nu_{0,max}$, которые в табл. 1 выделены жирным шрифтом. Анализ этих значений позволил получить следующую зависимость максимально достигимых чисел Нуссельта от Рейнольдса:

$$Nu_{0,max} = 0,7671 \cdot Re_B^{0,4676} \quad (3)$$

Для удобства дальнейшего анализа функция (2) была нормализована путем почленного деления правой и левой частей уравнения (2) на соответствующие части уравнения (3). При этом был получен следующий нормализованный вид асимптотической функции:

$$Y_a(z) = Nu_0 / Nu_{0,max} = 1,57 \cdot Re_B^{0,1169} \cdot (z/B)^{-0,6273}, \quad 0 \leq Y_a(z) \leq 1. \quad (4)$$

В результате решения уравнения (4) при $Y_a(z) = 1$ было получено следующее выражение, определяющее координату z_0 , м, нижней границы области определения нормализованной асимптотической функции:

$$z_0 = B \cdot (1,57 \cdot \text{Re}_B^{0,1169})^{(1/0,6273)} \quad (5)$$

Обоснование метода нормализации пространственных координат

Главная идея предлагаемого метода заключается в том, что параметр z_0 , м, числовое значение которого определяется выражением (5), удобно использовать в качестве некоей нормализованной единицы для измерения расстояний между соплом и обдуваемой поверхностью. Использование такой условной единицы позволяет существенно упростить запись определяющей функции отклика и облегчить всю последующую процедуру математического анализа.

Подтверждением этому является следующий преобразованный вид асимптотической функции, полученный путем умножения и деления правой части уравнения (4) на одну и ту же величину $z_0^{0,6273}$:

$$Y_a(z) = (z/z_0)^{-0,6273}, \text{ при } z/z_0 > 1 \quad (6)$$

График функции (6), построенный в нормализованных координатах, условной единицей расстояния в которых служит параметр z_0 , показан на рис. 2.

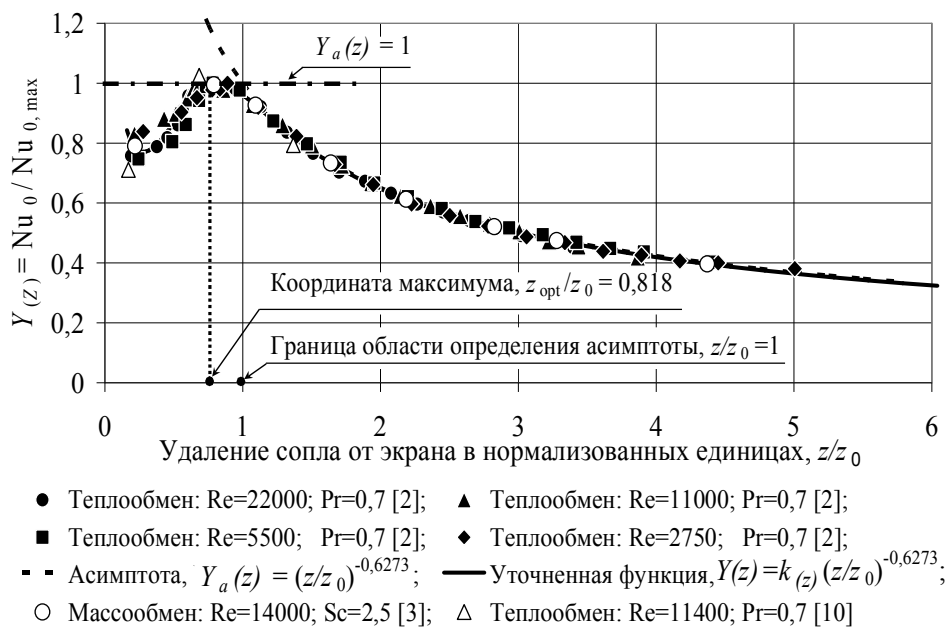


Рис. 2. Нормализованный график изменения интенсивности локального теплообмена в центре удара плоской струи

Точки на этом графике построены по нормализованным экспериментальным данным [2]. Кроме того, для получения обобщенной картины на этом же графике дополнительно показаны точки, построенные по нормализованным экспериментальным данным [3, 10].

Представленное на рис. 2 распределение точек свидетельствует о том, что использованный способ обобщения результатов эксперимента позволяет при любых сочетаниях уровней двух независимых факторов ($\text{Re}_B, z/B$) в пределах линейно-логарифмической области (при $z/z_0 > 1$) получать плотную корреляцию данных на основе простейшей степенной зависимости (6), единственным аргументом которой является безразмерный комплекс z/z_0 .

Кроме того, хорошо видно, что при $z/z_0 < 1$ функция $Y(z)$ имеет максимум, однако и в этой области графика рис. 2 точки, полученные разными авторами при различных сочетаниях варьируемых факторов, достаточно плотно концентрируются вокруг единой плавной кривой, что позволяет учесть ее отклонение от асимптоты (6) простым введением коэффициента близости экрана $k(z)$, зависящего только от z/z_0 .

Количественная оценка влияния близости экрана

На рис. 3 показан график, отражающий зависимость формального параметра $\text{Ln}[1/k(z) - 1]$ от нормализованного расстояния между соплом и обдуваемой поверхностью, который построен на основе обработки данных таблицы пределов области экстремума нормализованной функции $Y(z)$.

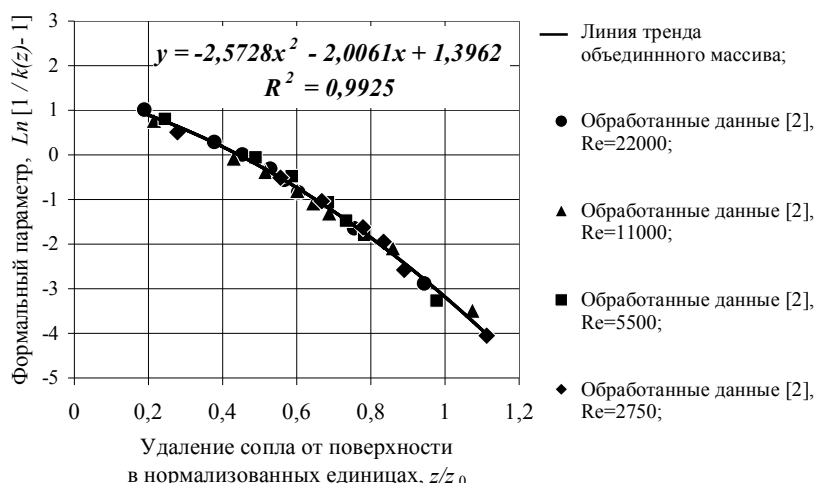


Рис. 3. Корреляция экспериментальных данных, подтверждающая влияние близости экрана

Числовые значения $k(z)$, использованные при построении этого графика, определялись как

$$k(z) = Y_{(z)}^* / Y_a(z), \quad (7)$$

где $Y_{(z)}^*$ – значения нормализованной функции, рассчитанные по экспериментальным данным из табл. 1; $Y_a(z)$ – значения нормализованной функции, рассчитанные по асимптотической формуле (6) в диапазоне $z/z_0 < 1$.

График рис. 3 демонстрирует достаточно тесную корреляцию экспериментальных точек вокруг полиномиальной линии тренда, уравнение которой представлено на поле данного графика. Решением полученного уравнения линии тренда является следующее выражение для расчета коэффициента близости экрана $k(z)$, которое имеет вид

$$k(z) = \left\{ 1 + 4 \cdot \exp \left[-\frac{z}{z_0} \cdot \left(2 + 2,573 \cdot \frac{z}{z_0} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (8)$$

На рис. 4 графически показано изменение коэффициента $k(z)$ по мере приближения сопла к обдуваемой поверхности. Визуальное сопоставление данного графика с графиками изменения продольных компонент турбулентности, представленными в [7, 8], свидетельствует о схожем характере сравниваемых кривых и близости числовых значений коэффициента $k(z)$ к значениям показателя относительной турбулентности ε^* [7] при одинаковых относительных расстояниях между соплом и обдуваемой поверхностью. Этот факт косвенно подтверждает гипотезу Б.Н. Юдаева о том, что главной причиной снижения интенсивности локальной теплоотдачи в центре удара струи по мере приближения сопла к обдуваемой поверхности на расстояние, меньшее оптимального ($z/z_0 < z_{opt}/z_0$), может являться уменьшение продольной компоненты турбулентности, наблюдаемое в сечениях свободных затопленных струй вблизи от среза сопла [7].

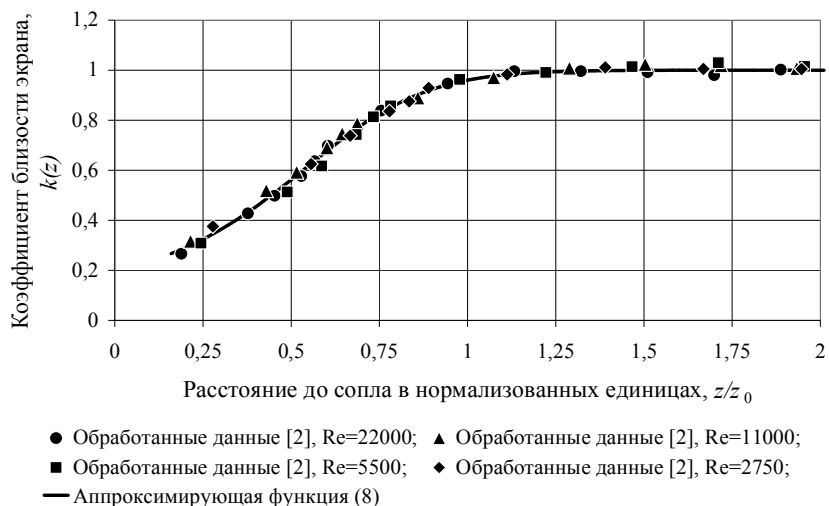


Рис. 4. Изменение $k(z)$ по мере приближения сопла к экрану

С учетом всего вышеизложенного уточненное уравнение нормализованной функции изменения интенсивности локального теплообмена в центральной точке удара струи, дополнительно охватывающее область экстремума, было представлено в виде

$$Y(z) = k(z) \cdot (z/z_0)^{-0,6273}, \text{ при } 0,2 \leq z/z_0 \leq 6,0 \quad (9)$$

После возврата к исходным переменным и преобразований нормализованной функции (9) уточненное уравнение для расчета теплоотдачи в центре удара плоской воздушной струи приняло вид

$$\text{Nu}_0 = 1,206 \cdot k(z) \cdot \text{Re}_B^{0,5845} \cdot (z/B)^{-0,6273} \quad (10)$$

где $k(z)$ – коэффициент близости экрана, определяемый зависимостью (8).

Результаты расчета чисел Нуссельта по уравнению (10) при различных значениях варьируемых параметров, соответствующих условиям опытов [2], показаны кривыми на рис. 5. Точками на графике рис. 5 показаны данные из табл. 1.

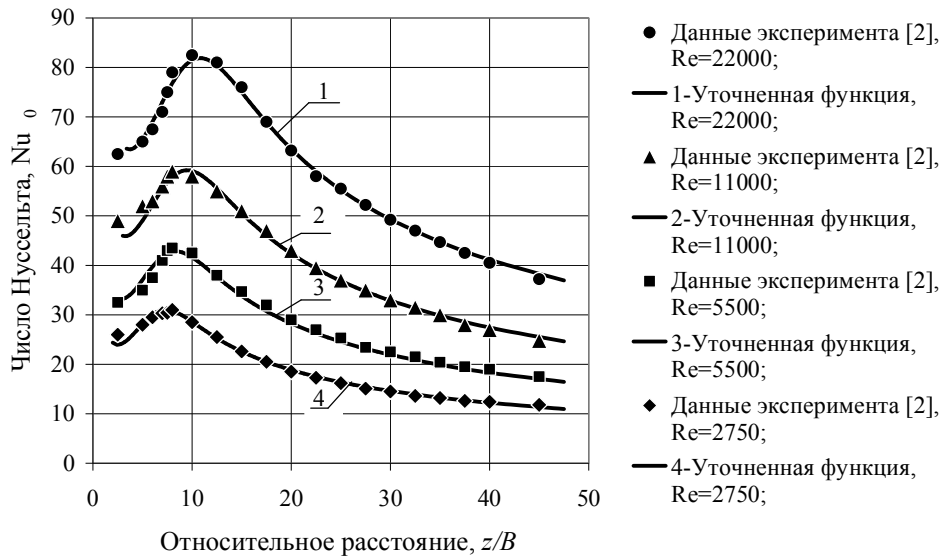


Рис. 5. Сравнение уточненных аппроксимирующих кривых с экспериментальными данными [2]

Анализ представленных материалов свидетельствует о хорошей сходимости уточненной критериальной зависимости (10) с экспериментальными данными [2], полученными на воздушных продувках в пределах всей исследованной области чисел Re_B и значений z/B , включая и область экстремума, при постоянном числе Прандтля $\text{Pr} = 0,7$. Однако, как известно, изменение числа Прандтля может существенно влиять на интенсивность процесса теплоотдачи.

Влияние числа Прандтля

Для количественной оценки влияния числа Прандтля на интенсивность локального теплообмена был образован безразмерный комплекс F_t , зависимость которого от Pr в наиболее общем виде описывается следующим выражением, полученным в результате преобразований критериального уравнения (10):

$$F_t = \text{Nu}_0 \cdot k(z)^{-1} \cdot \text{Re}_B^{-0,5845} \cdot (z/B)^{0,6273} = C \cdot \text{Pr}^b \quad (11)$$

где C и b – неизвестные коэффициенты, значения которых могут быть определены на основе экспериментальных данных, полученных при двух различных значениях Pr .

В связи с тем, что числа Pr для воздуха и других газов мало отличаются от 0,7 и при этом слабо зависят от изменений температуры, при составлении второго уравнения для определения коэффициентов C и b были использованы данные М. Кумада и И. Мабуши [3], полученные в серии опытов по сублимации нафталина при струйных обдувках с числом Шмидта $\text{Sc} = 2,5$. Для этого на основе существующей аналогии между тепло- и массообменом, был сформирован комплекс $-F_m$, аналогичный комплексу F_t , но включающий в себя соответствующие критерии подобия процесса массообмена:

$$F_m = \text{Sh}_0 \cdot k(z)^{-1} \cdot \text{Re}_B^{-0,5845} \cdot (z/B)^{0,6273} = C \cdot \text{Sc}^b \quad (12)$$

где Sh_0 и Sc – соответственно числа Шервуда и Шмидта, замещающие в уравнениях массообмена Nu_0 и Pr , согласно аналогии Чилтона-Колберна.

В результате числовые значения коэффициентов $C=1,414$ и $b=0,45$ были рассчитаны по двум уравнениям с использованием, экспериментальных данных [2] и [3], полученных при исследовании двух аналогичных процессов тепло- и массообмена с $Pr = 0,7$ и $Sc = 2,5$. Все использованные в расчетах числовые значения представлены в табл. 2.

С учетом коэффициентов $C=1,414$ и $b=0,45$ критериальное уравнение (10) приобрело более общий вид, одновременно справедливый как для тепло-, так и для массообменных процессов:

$$Nu_0 = 1,414 \cdot k(z) \cdot Re^{0,5845} \cdot (z/B)^{-0,6273} \cdot Pr^{0,45} \quad (13)$$

$$Sh_0 = 1,414 \cdot k(z) \cdot Re^{0,5845} \cdot (z/B)^{-0,6273} \cdot Sc^{0,45} \quad (14)$$

Для количественной оценки влияния числа Прандтля на величину максимальной интенсивности тепло- и массообменных процессов в центре удара струи, на основе математической обработки массивов экспериментальных данных [2] и [3] были получены две следующих аппроксимационных зависимости:

– для теплообмена $Nu_{0,max} = 0,9468 \cdot Re_B^{0,4676} \cdot Pr^{0,59}$, (15)

– для массообмена $Sh_{0,max} = 0,9468 \cdot Re_B^{0,4676} \cdot Sc^{0,59}$. (16)

Таблица 2

Данные для расчета коэффициентов C и b

Условия опытов		Массообмен по данным [3]					Теплообмен по [2]				
		Результаты			Логарифмы		Результаты			Логарифмы	
z/B	Re	Sc	Sh_0	F_m	$Ln(Sc)$	$Ln(F_m)$	Pr	Nu_0	F_t	$Ln(Pr)$	$Ln(F_t)$
15	14000	2,5	102	2,104	0,916	0,744	0,7	58,079	1,198	-0,357	0,180
20	14000	2,5	86	2,124	0,916	0,753	0,7	48,816	1,206	-0,357	0,187
30	14000	2,5	68	2,166	0,916	0,773	0,7	37,858	1,206	-0,357	0,187
40	14000	2,5	56	2,137	0,916	0,759	0,7	31,607	1,206	-0,357	0,187
25	11700	2,5	68	2,146	0,916	0,763	0,7	38,219	1,206	-0,357	0,187

Далее путем почленного деления выражений (13) на (15) и (14) на (16) были нормализованы функции относительной интенсивности локального тепло- и массообмена в центре удара струи, учитывающие влияние близости сопла к обдуваемой поверхности:

$$Y(z) = Nu_0 / Nu_{0,max} = 1,4935 \cdot k(z) \cdot Re_B^{0,1169} \cdot Pr^{-0,14} \cdot (z/B)^{-0,6273} , \quad (17)$$

$$Y(z) = Sh_0 / Sh_{0,max} = 1,4935 \cdot k(z) \cdot Re_B^{0,1169} \cdot Sc^{-0,14} \cdot (z/B)^{-0,6273} . \quad (18)$$

Анализ показывает, что значение коэффициента $k(z)$ в этих зависимостях может рассчитываться по ранее полученной формуле (8). Однако, в отличие от (5), единица нормализованной шкалы расстояний z_0 , м, в данном случае должна определяться более общими выражениями, учитывающими числа подобия Прандтля или Шмидта:

– при теплообмене: $z_0 = B \cdot (1,4935 \cdot Re_B^{0,1169} \cdot Pr^{-0,14})^{1/0,6273}$, (19)

– при массообмене: $z_0 = B \cdot (1,4935 \cdot Re_B^{0,1169} \cdot Sc^{-0,14})^{1/0,6273}$. (20)

Несложно заметить, что при расчете локального теплообмена при воздушном обдуве с числом Прандтля $Pr = 0,7$ выражение (19) сводится к ранее полученной формуле (5).

Расчетная оценка интенсивности исследованных процессов

С учетом всего вышеизложенного алгоритм расчетной оценки показателей локальной интенсивности процессов тепло- или массообмена в центре удара плоской импактной струи, определяемых критериями Nu_0 или Sh_0 , реализуется в следующем порядке:

1. При заданных параметрах обдува, определяемых шириной сопла B , м, а также числами Re_B , Pr или Sc , по формулам (19) или (20) определяется нормализованная единица расстояний между соплом и обдуваемой поверхностью, z_0 , м.

2. Фактическая удаленность сопла от обдуваемой поверхности z , м, выражается в единицах нормализованной шкалы z/z_0 , а затем по формуле (8) определяется коэффициент близости экрана $k(z)$.

3. По формулам (13) или (14) определяются числа Nu_0 или Sh_0 , характеризующие интенсивность соответствующих локальных процессов в центральной точке области торможения обдуваемой струи.

Для визуального сопоставления расчетных и экспериментальных результатов числовые значения нормализованной функции $Y(z)$, рассчитанные с использованием данных, полученных в опытах по тепло- и массообмену [2, 3, 10], были нанесены в виде отдельных точек на график рис. 2, где хорошо вписались в общую картину корреляционной связи.

Показанная на этом графике форма аппроксимирующей кривой $Y(z)=f(z/z_0)$, свидетельствует о наличии двух экстремумов: максимума $Y(z)_{max}=1$ при $z/z_0=0,818$ и локального минимума $Y(z)_{min}=0,77$ при $z/z_0=0,278$. Представленные числовые значения нормализованных координат этих экстремальных точек определены численным методом на основе полученных зависимостей, а характерная форма графика с двумя экстремумами хорошо согласуется с данными [11], а также с результатами математического моделирования, выполненного К.Н. Волковым [9] на примере круглой струи.

Статистический анализ показал, что центр распределения погрешностей (математическое ожидание расхождения расчетных результатов с экспериментальными данными, рассчитанное в пределах всей выбранной области сопоставления) оценивается величиной $-0,3\%$, а доверительный интервал погрешности не превышает $\pm 6,5\%$ при доверительной вероятности 95% .

С использованием разработанной методики получены расчетные формулы для определения оптимальных расстояний между плоским соплом и обдуваемой поверхностью, при которых может достигаться максимум локальной интенсивности тепло- и массообменных процессов в центре удара струи:

$$(z/B)_{opt,1} = 1,55 \cdot Re_B^{0,1863} \cdot Pr^{-0,223} \quad (21)$$

$$(z/B)_{opt,1} = 1,55 \cdot Re_B^{0,1863} \cdot Sc^{-0,223} \quad (22)$$

Удаление сопла от поверхности, при котором указанные процессы характеризуются наилучшими показателями из-за существования локальных минимумов интенсивности, определяются выражениями:

$$(z/B)_{opt,2} = 0,527 \cdot Re_B^{0,1863} \cdot Pr^{-0,223} \quad (23)$$

$$(z/B)_{opt,2} = 0,527 \cdot Re_B^{0,1863} \cdot Sc^{-0,223} \quad (24)$$

С учетом всего вышеизложенного можно констатировать, что достоверность полученных обобщенных зависимостей подтверждается хорошим совпадением результатов расчета с экспериментальными данными разных авторов, что позволяет рекомендовать полученные зависимости и основанную на них методику расчета интенсивности локального теплообмена в точке растекания плоской импактной струи для практического использования при проектировании систем струйного охлаждения плоских поверхностей.

Заключение. Обоснован метод нормализации пространственных координат, позволивший на основе анализа и систематизации экспериментальных данных разных авторов получить адекватное аппроксимационное математическое описание процессов локального теплообмена в критической точке плоской поверхности, обдуваемой плоской воздушной струей.

В отличие от известных частных зависимостей, используемых в инженерных расчетах, полученное обобщенное критериальное уравнение, хорошо согласуется с экспериментальными данными не только в области линейно-логарифмической корреляции, но и в наиболее интересной для практики области максимальной интенсивности теплообмена.

Изменение характера нормализованной функции отклика вблизи экстремальной точки учитывается введением специального коэффициента близости экрана, зависимость для расчета которого получена и протестирована путем сравнения с экспериментальными данными разных авторов, в том числе и не использованными при аппроксимировании.

Визуальное сопоставление экспериментально полученной функции изменения коэффициента близости экрана с формой кривых изменения продольных компонент турбулентности, представленных в специальной литературе, свидетельствует об их одинаковом характере и косвенно подтверждает гипотезу Б.Н. Юдаева о том, что главной причиной снижения интенсивности локальной теплоотдачи в случае приближения сопла к обдуваемой поверхности (при $z < z_{opt}$), может являться уменьшение продольных компонент турбулентности, наблюдаемое в сечениях свободных затопленных струй вблизи от среза сопла.

Характер полученной нормализованной функции изменения интенсивности локальных процессов теплообмена $Y(z)=f(z/z_0)$, учитывающей влияние близости экрана, свидетельствует о наличии двух экстремумов: максимума $Y(z)_{max}=1$ при $z/z_0=0,818$ и локального минимума $Y(z)_{min}=0,77$ при $z/z_0=0,278$. Характерная форма графика с двумя экстремумами хорошо согласуется с данными [11], а также с результатами математического моделирования, выполненного [9] на примере осесимметричной струи.

Получены расчетные формулы (21)-(24), определяющие наилучший и наихудший варианты удаления сопел от обдуваемой поверхности с точки зрения интенсификации теплообменных процессов.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heat transfer from impinging jets a literature review, AFWAL-TR-81-3054 / Peter Hrycak // Final Report for Period: September 1979 – November 1980 (Approved for Public Release; Distribution Unlimited). New Jersey Institute of Technology. June 1981. 63 p.
2. Gardon R. Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets Robert Gardon and J. Cahit Akfirat // Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME, February 1966. P. 101-108.
3. Kumada M. Studies on the heat transfer of impinging jet (Ist Rep.) / M. Kumada, J. Mabuchi // Bull JSME. 1970. 13. N 55. P. 77-85.
4. Metzger, D.E. Spot Cooling and Heating of Surfaces with High Velocity Impinging Air Jets. Part 1. Slot Jets on Plane Surfaces / D.E. Metzger // TR No. 52. California: Stanford University, 1962. 62 p.
5. Meyers G.E. Heat Transfer to Plane Turbulent Wall Jet / G.E. Meyers, J.J. Schauer, R.H. Eustis // Journal of Heat Transfer. Transactions of the ASME. Ser. C. Vol. 85. No. 3 (1963-8). P. 209-214.
6. Андреев А.А. Исследование теплообмена при натекании плоской турбулентной струи на пластину, расположенную нормально к потоку: автореф. дис....канд. техн. наук / А.А. Андреев. М., 1971. 16 с.
7. Юдаев Б.Н. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин. М.: Машиностроение, 1977. 248 с.
8. Дыбан Е.И. Теплообмен при струйном обтекании тел / Е.И. Дыбан, А.И. Мазур. Киев: Наукова думка, 1982. 303 с.
9. Волков К.Н. Моделирование крупных вихрей турбулентного теплообмена в области взаимодействия круглой струи с плоской преградой / К.Н. Волков; Университет Суррея, Гилфорд, Великобритания // Труды 4-й РНКТ. Т. 2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости. М.: Изд-во МЭИ, 2006. С. 89-92.
10. Cadek F. F. A Fundamental Investigation of Jet Impingement Heat Transfer / Frederick F. Cadek // Ph. D. Thesis. Univ. Cincinnati, 1968.
11. Korger M. Mass-transfer coefficient in impingement flow from slotted nozzles / M. Korger, F. Krizek // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. 1966. 9. N 4. P. 337-344.

Семёнов Борис Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris A. Semyonov – Dr. Sc., Professor
Head: Department of Heat Process Engineering,
Yuri Gagarin Saratov State Technical University

Озеров Никита Алексеевич – аспирант, ассистент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita A. Ozerov – Postgraduate, Assistant Lecturer
Department of Heat Process Engineering,
Yuri Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 002.63:339.138

А.П. Власов, С.П. Бобков

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Рассмотрена целесообразность использования методов исследования операций на примере линейного программирования. Даны конкретные предложения по практическому использованию.

MRP/ERP/APS-система, исследование операций, язык UML, язык x++, Microsoft Dynamics AX 2009, маркетинг

A.P. Vlasov, S.P. Bobkov

ON RESEARCH METHODS IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS AT CHEMICAL ENGINEERING COMPANIES

The paper considers applicability of the operation research methods through the case of linear programming. The authors present new proposals as to their practical application.

MRP / ERP / APS-system, operations research, the UML language, the x ++ language, Microsoft Dynamics AX 2009, marketer

В нашей стране и за рубежом с середины 60-х годов XX века начали создаваться типовые проектные решения (ТПР), которые позже получили обобщенное название MRP/ERP-системы. С ростом мощностей вычислительных систем и поиском новых более эффективных методов управления в условиях конкуренции с середины 90-х годов на базе систем MRPII/ERP появляются системы класса APS (Advanced Planning/Scheduling-«Развитые системы планирования»), для которых декларировалось применение экономико-математических методов для решения задач планирования. Однако представленные на рынке системы редко используют методы оптимизации (или методы исследования операций).

Системы класса MRP/ERP/APS, которые правильнее было бы называть типовыми проектными решениями (ТПР), занимают значительную долю на рынке информационных технологий [1, 2]. Отличительной особенностью этих систем является следующее:

- интегрированность всех подсистем промышленного предприятия;
- настраиваемость модулей;
- наличие технологии обучения.

Специфика предприятий химической промышленности (а также и предприятия химического машиностроения) состоит в том, что они подвержены большому количеству рисков вследствие нестабильной экономической ситуации в мире и достаточно высокой фондоёмкости химического производства. Технологическая сложность производства, специфика используемого сырья характеризуют большинство химических предприятий.

К продукции химического машиностроения предъявляются жесткие требования по температурному режиму (в ряде случаев оборудование должно обеспечивать возможность работы при температурах, близких к абсолютному нулю; в других случаях – проведение процессов при температурах до 3000°C), по давлению (в ряде случаев минимальным давлением в системах для проведения некоторых процессов является остаточное давление 10^{-6} – 10^{-9} мм рт. ст., а максимальным – 1000 атм), а также по стойкости к агрессивному воздействию кислот и щелочей различной концентрации.

Оборудование, выпускаемое предприятиями химического машиностроения, как правило, состоит из большого количества деталей и сборочных единиц и представляет собой комплексы с количеством уровней структуры изделий до $9 \div 10$. Длительность цикла изготовления одного изделия разных типов колеблется в пределах от одного месяца до полутора лет.

Количество товарных изделий может достигать несколько сотен, база данных (БД) состав изделий может достигать до 10 тысяч записей, трудовые и материальные нормативы – до 100 тысяч записей каждая.

Впервые вопрос о применении методов оптимизации в ТПП поднял В.М. Глушков [10], им было дано следующее определение: «Автоматизированная система управления предприятием (АСУ) – человеко-машинная система, предназначенная для управления экономическими ячейками, построенная на основе применения вычислительной техники, экономико-математических методов».

Наиболее часто встречающийся метод оптимизации – линейное программирование, классическое описание которого дано в [4]. Суть данного метода приведена ниже.

Целевая функция в каноническом виде представлена выражением (01).

$$\sum_{i=1}^n c_i x_i \Rightarrow \max \quad (01)$$

где n – общее количество продуктов предприятия, i – порядковый номер продукта, c_i – цена i -го продукта; x_i – выпуск i -го продукта в соответствующих единицах измерения (план), $x_i \geq 0$.

Для упрощения рассмотрим только два ограничения – по персоналу см. выражение (02), по материалам см. выражение (03).

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i \leq A \quad (02)$$

где a_i – норма трудозатрат (ч) на один продукт i -го наименования; A – общий наличный фонд рабочих, чел.

$$\sum_{i=1}^n b_i x_i \leq B \quad (03)$$

где b_i – норма расхода материалов на один продукт i -го наименования; B – общая величина запасов материалов на складе.

При описании модели линейного программирования обычно указывают еще два ограничения – по финансам и по пропускной способности (мощности) оборудования. Эти два ограничения записываются аналогично (02) и (03), поэтому для упрощения изложения можно опустить.

Теория линейного программирования впервые была разработана в 30-е годы XX века [4].

В научных исследованиях методы оптимизации давно и успешно используются, см. например, [8, 9]. Однако в автоматизированных системах предприятий долгое время практическое внедрение было затруднено вследствие двух основных причин:

- вычислительная техника или отсутствовала, или мощности ее были явно недостаточны;
- не было экономической свободы в нашей стране. План определялся правительством (госпланом) и был обязателен для всех предприятий страны. А, как известно [4], оптимизация возможна только в случае свободы выбора.

В настоящий момент ситуация кардинально изменилась, мощность вычислительной техники резко возросла, страна полностью перешла к рыночной экономике. См., например, [8]. Тем не менее как отмечено выше, в представленных на рынке ERP-системах отсутствуют методы оптимизации. Причина подобной невостребованности, по мнению авторов, в следующем.

Размерность реальных задач для практического применения чрезвычайно велика. Так, величина параметра n в выражении (01) измеряется десятками и сотнями. А для предприятий химического машиностроения может достигать тысячи, так как любая деталь и сборочная единица может в качестве запасных частей являться отдельным товарным продуктом.

Выражение (02) в представленном виде не может быть использовано для практического применения, так как количество профессий, участвующих в создании современной продукции, измеряется десятками, с учетом различных разрядов работ (которые, как правило, имеются для каждой профессии) счет уже идет на сотни. В этом случае должно быть не одно выражение (02), а множество ограничений, так как каждая совокупность профессия-разряд может ограничивать область допустимых значений линейной модели.

Номенклатура используемых материалов в реальном производстве также измеряется сотнями и тысячами. Соответственно вместо одного выражения (03) должно быть столько ограничений, сколько материалов используется для каждого товарного продукта.

В многочисленных публикациях, посвященных использованию линейного программирования в ТПП, см. например, [5], демонстрируются исключительно примеры учебного характера. Многие пакеты прикладных программ, реализующих метод линейного программирования, в основе своей содержат или MathCad, или Excel (в Excel, например максимальное количество переменных достигает двухсот). Для учебных целей возможности указанных программных средств более чем достаточны, чего нельзя сказать о промышленном применении.

В результате исследований, проведенных в Ивановском химико-технологическом университете [3, 6, 7], была предложена следующая модель.

Автоматизированным путем формируется матрица трудозатрат на единицу продукта по каждой связке профессия-разряд, см. выражение (04). Также рассчитывается общий фонд наличных трудовых ресурсов по каждой связке профессия-разряд.

$$\|a_{ij}\| \quad (04)$$

где i – порядковый номер продукта, j – порядковый номер связки профессия-разряд, $j = \overline{1, m}$, m – общее количество связок профессия-разряд.

Ограничения по трудовым ресурсам будут представлять собой совокупность выражений

$$\sum_{i=1}^n a_{i1}x_i \leq A_1, \sum_{i=1}^n a_{i2}x_i \leq A_2, \dots, \sum_{i=1}^n a_{ij}x_i \leq A_j, \dots, \sum_{i=1}^n a_{im}x_i \leq A_m, \quad (05)$$

Как указывалось выше, количество ограничений (05) может быть довольно большим. Предлагается из множества элементов $j = \overline{1, m}$ выбрать такое подмножество $j = \overline{1, r}$, которое будет содержать только явно критические позиции. Отбор производится экспертно с учетом данных прошлых периодов.

Аналогичная процедура проводится для материалов, финансов, оборудования.

Для практического применения линейного программирования необходимо также учесть один важный нюанс. Ограничение на $x_i \geq 0$ не всегда может соответствовать реальной действительности.

В начальный момент некоего планового периода портфель заказов предприятия может оказаться пустым, в этом случае область допустимых значений определяется только ограничениями А, В и $x_i \geq 0$ (рис. 1 а).

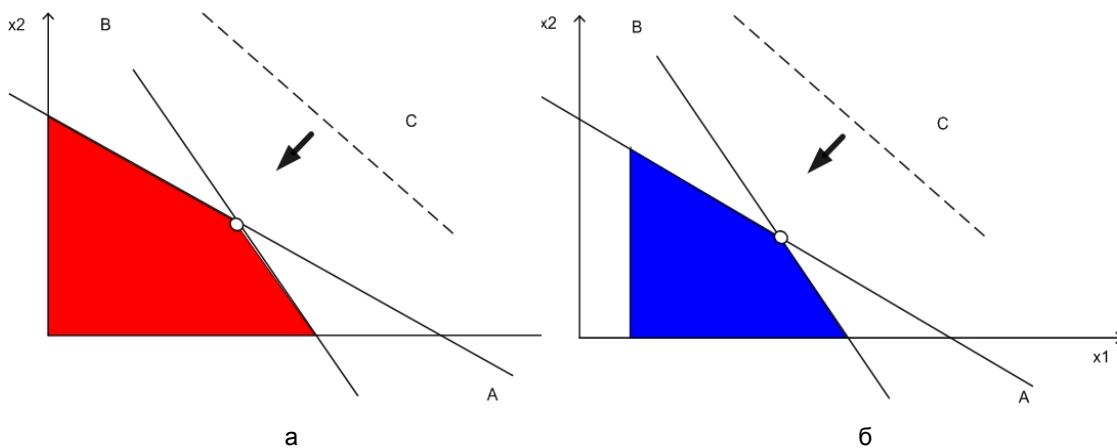


Рис. 1. а – начальный момент. Заказы отсутствуют. Область допустимых значений заштрихована; б – второй момент. Появился заказ на первое изделие. Область допустимых значения сузилась

В некоторый момент (рис. 1 б) может быть заключен договор с клиентом на первое изделие в количестве x_1^{\min} , в результате чего область допустимых значений уменьшится, т.к. совершенно очевидно, что невыполнение договорных обязательств может привести к штрафным санкциям. При этом точка оптимума не изменится. В следующий момент времени (рис. 2 а) может появиться договор на второе изделие в количестве x_2^{\min} . Область допустимых значений еще более сузится, но точка оптимума опять же останется неизменной.

Ситуация, отображенная на рис. 2 а, характерна следующим обстоятельством. Заданы ограничения $x_1^{\min} \leq x_1$ и $x_2^{\min} \leq x_2$. Заштрихованная область представляет собой свободу выбора для маркетолога по формированию плана производства «на склад». Известна точка оптимума. Однако в практической деятельности часто возникает ситуация, когда (например, для поддержания цен на заданном уровне) может потребоваться ограничение «сверху» по какому-либо изделию (рис. 2б). Точка оптимума в этом случае может измениться.

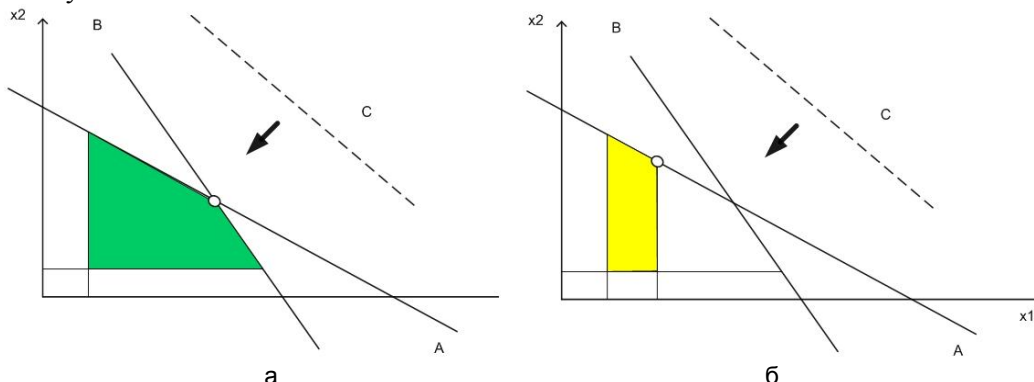


Рис. 2. а – третий момент. Появился заказ на второе изделие; б – маркетолог задал ограничение «сверху» на первое изделие

Таким образом, в предложенной технологии задается ограничение следующего вида:

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}$$

Представленная модель используется маркетологами предприятия для заключения договоров в оперативном режиме. В течение планового периода (например, месяца) маркетологи заключают договоры с клиентами, при этом используя упрощенную модель с частичным перечнем ограничений. В конце месяца производится уточненный расчет выполнимости плана по каждой составляющей $j=1, m$ трудовых ресурсов (аналогично по материалам, финансам, оборудованию). Описание предложенной технологии сделано с использованием языка UML (рис. 3).

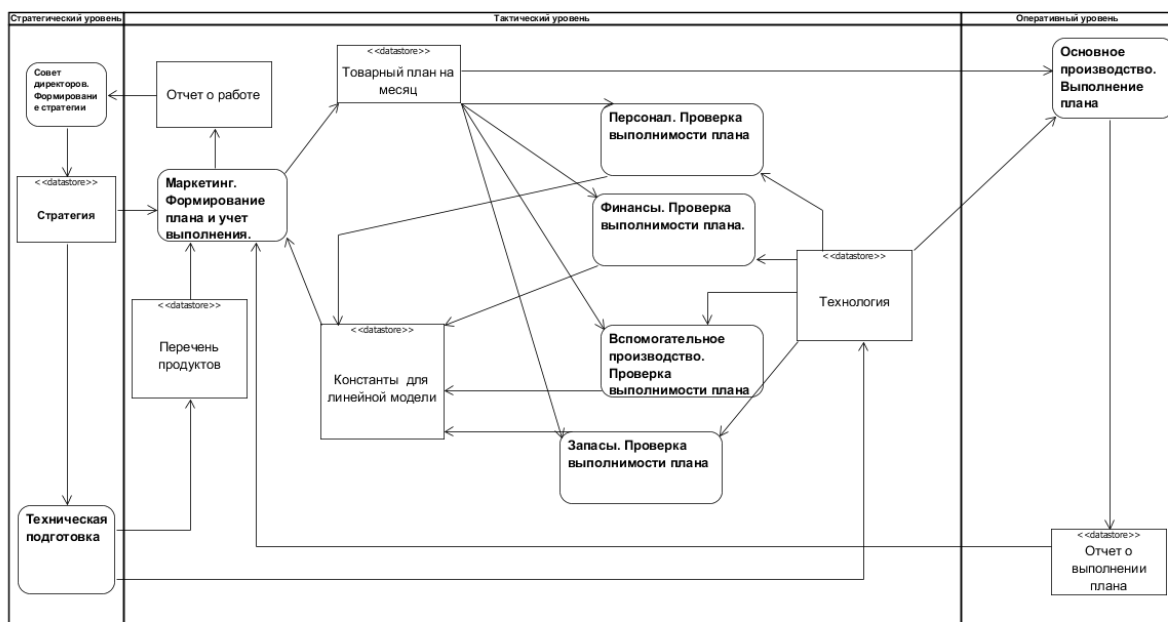


Рис. 3. Предложенная технология

Апробирование модели проведено в учебном варианте Microsoft Dynamics AX 2009. Модуль линейного программирования с использованием симплекс-метода реализован на языке x++, см. [3, 6].

Верификация и валидация модели проводились следующим образом. До проведения расчета на ЭВМ готовился контрольный пример, включающий все множества данных, в том числе и выход-

ные на основании интуитивного представления экспериментаторов. Сопоставление данных контрольного примера с результатами расчета на ЭВМ продемонстрировало адекватность модели.

Предложенная модель поднимает работу маркетологов на качественно новый уровень, они могут оперативно, в течение месяца, вести работу с клиентами, при этом на упрощенной модели проверяются и выполнимость плана, и выгодность того или иного заказа. В конце месяца проводится полная проверка выполнимости плана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности использования и внедрения ERP-систем в России / В.В. Баронов, Ю.И. Попов, Б.А. Позин, И.Н. Титовский И.Н. <http://www.citforum.ru/seminars/cis99/epg.shtml> (06.04.2009).
2. Власов А.П. Анализ современных ERP-систем / А.П. Власов, С.П. Бобков, Б.Я. Солон // Российская академия естествознания. региональное приложение к журналу «Современные наукоемкие технологии». 2009. № 2. С. 50-54
3. Каткова А.П. Совершенствование корпоративной информационной системы Microsoft Dynamics AX 2009 / А.П. Каткова, рук. А.П.Власов // Фундаментальные науки – специалисту нового века; тез. докл. IX региональной студ. науч. конф. Иваново, 2012. Т. 2. С. 108.
4. Канторович Л. В. Математические методы организации и планирования производства / Л. В. Канторович. М., 1939.
5. Пакет прикладных программ FinPlus (версия 2.0) / Бухвалова В.В., Ковальчук. А.В.; СПбГУ <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/buhvalova/index2.asp>, 16.03.2013
6. Боровых А.А. Совершенствование модуля «Маркетинг» корпоративной информационной системы Microsoft Dynamics AX 2009 / А.А. Боровых, рук. А.П. Власов // Фундаментальные науки – специалисту нового века: тез. докл. IX региональной студ. науч. конф. Иваново, 2012. Т. 2. С. 74.
7. Власов А.П. Исследование автоматизированных информационных система, используемых в химической промышленности / А.П. Власов, С.П. Бобков, С.М. Чаусова // Известия вузов. Сер. Химия и хим. технология. 2011. Т. 54. № 11. С. 126-128.
8. Математические методы анализа в процессе оптимизации сушки алюмокремниевого флокулянта-коагулянта / М.Г. Гордиенко, Е.Н. Кузин, А.А. Войновский, Э.Н. Надеева // Вестник СГТУ. 2012. № 1(64). Вып. 2. С. 176-180
9. Егоров И.В. Оптимизация параметров системы технического зрения на базе трех камер / И.В. Егоров, Д.В. Лачугин // Вестник СГТУ. 2012. № 1(64). Вып. 2. С. 393-398.
10. Глушков В.М. Введение в АСУ / В.М. Глушков. Киев: Техніка, 1974. 320 с.

Власов Алексей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии» Ивановского государственного химико-технологического университета

Alexey P. Vlasov – Ph. D., Department of Information Technologies, Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Бобков Сергей Петрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Информационные технологии» Ивановского государственного химико-технологического университета

Sergey P. Bobkov – Dr. Sc., Professor Head: Department of Information Technologies S Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 681.5

А.А. Игнатьев, А.Г. Мотков, С.С. Щеголев

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЛЬЦА ПОДШИПНИКА КАК ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Производится построение математической модели кольца подшипника на основании данных полученных практическим способом при импульсном воздействии. Дано теоретическое обоснование применения метода. Произведён расчёт

элементов математической модели и выявлены основные отличительные особенности моделей для кольца без дефекта и кольца с трещиной.

Дефект, кольцо подшипника, математическая модель, виброакустический метод, импульсное воздействие

A.A. Ignatiev, A.G. Motkov, S.S. Shchegolev

IDENTIFICATION OF BEARING RINGS USING ULTRASONIC AND ACOUSTIC METHODS

The mathematical model of the bearing ring is developed on the basis of the data obtained from practical experiments using the pulse action. The authors provide theoretical rationale for the given method. The provided calculations relate the elements of the mathematical model, and the core features for the ring models without the defects and the ring models having cracks.

Defect, a bearing ring, a mathematical model, vibroacoustic method, impulse action

В ряде случаев на предприятиях, осуществляющих восстановление узлов и деталей железнодорожного транспорта, возникает задача оперативного оценивания состояния колец буксовых подшипников. Одним из наиболее важных моментов является выявление трещин в кольцах, так как их наличие существенно влияет на надёжность подшипников в условиях эксплуатации.

Известен вихретоковый метод контроля поверхностного слоя колец подшипников, однако он позволяет определить дефект на глубине 20-50 мкм [2]. Ультразвуковой метод позволяет определить наличие трещин в структуре колец, однако измерение выполняется достаточно длительное время из-за необходимости сканирования поверхности кольца [3].

Более оперативным является метод, связанный с регистрацией виброакустических (ВА) колебаний кольца при импульсном воздействии на него, например путём удара [4].

Научный интерес при этом представляет идентификация кольца как динамической системы при ударе, то есть построение соответствующей математической модели, учитывающей экспериментальные данные [5].

При ударе по кольцу динамометрическим молотком входное воздействие с точки зрения теории автоматического управления можно рассматривать как дельта-импульс, а выходное воздействие – как импульсную переходную функцию $w(t)$ [6].

Типичный вид импульсной передаточной функции (ИПФ) для кольца без дефекта представлен на рис. 1.

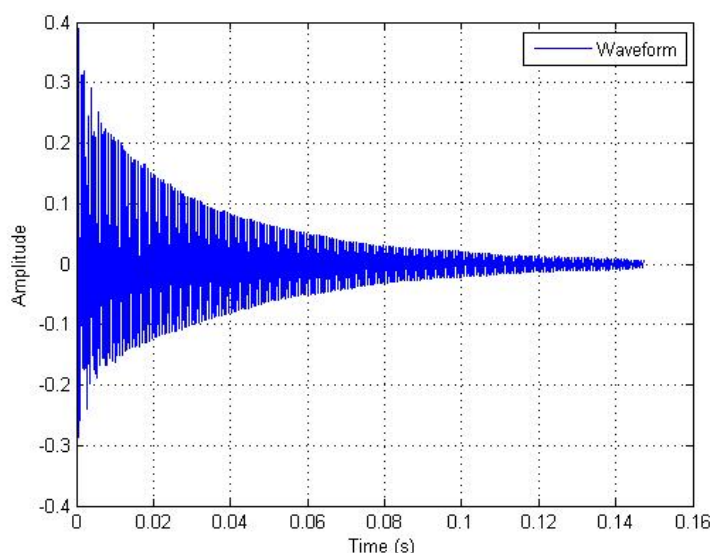


Рис. 1. Импульсная переходная функция для кольца подшипника без дефекта

Данная ИПФ описывается выражением

$$w(t) = a_0 \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t), \quad (1)$$

где α – коэффициент затухания, ω_0 – частота колебаний системы, a_0 – начальная амплитуда переходного процесса.

Применяя преобразование Лапласа [5], приведём выражение (1) к операторному виду и получим передаточную функцию кольца как динамической системы (ДС):

$$W_1(p) = \frac{2a_0 \cdot \omega_0}{(p+\alpha)^2 + \omega_0^2} = \frac{a_0 \cdot \omega_0}{p^2 + 2p\alpha + \alpha^2 + \omega_0^2} = \frac{\frac{a_0 \cdot \omega_0}{\alpha^2 + \omega_0^2}}{\frac{1}{\alpha^2 + \omega_0^2} p^2 + 2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega_0^2} p + 1} \quad (2)$$

Введём замену $k = \frac{a_0 \cdot \omega_0}{\alpha^2 + \omega_0^2}$, $T^2 = \frac{1}{\alpha^2 + \omega_0^2}$, $2T\gamma = 2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega_0^2}$, получим

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2T\gamma p + 1}; \quad (3)$$

Далее определяем амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) кольца как динамической по формуле:

$$A^2(\omega) = |W(j\omega)|^2,$$

где $W(j\omega)$ – частотная функция, полученная из передаточной функции путём замены $p = j\omega$, ω – круговая частота.

Тогда

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\gamma^2 \omega^2 T^2}}; \quad (4)$$

Типичный вид ИПФ для кольца с трещиной представлен на рис. 2.

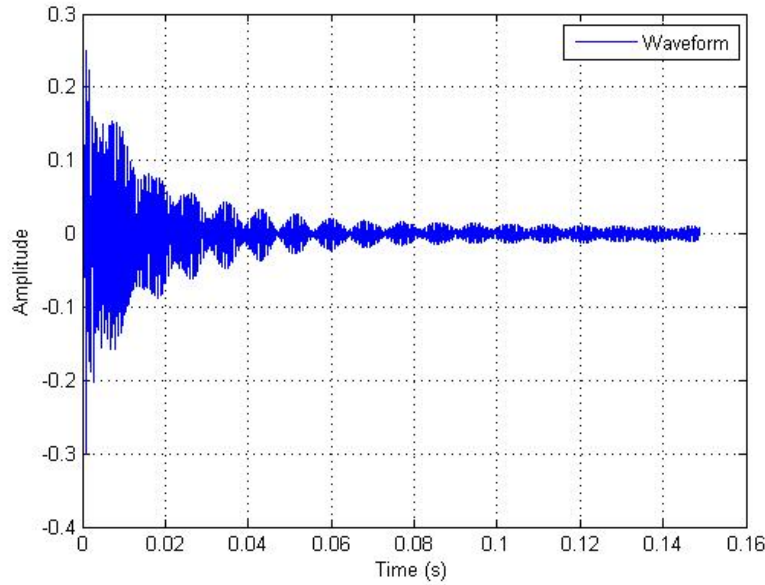


Рис. 2. Импульсная переходная функция для кольца подшипника, содержащего дефект

В этом случае ИПФ содержит две гармоники:

$$w(t) = e^{-\alpha t} (a_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + a_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)), \quad (5)$$

где α – коэффициент затухания; ω_0, ω_1 – частоты первой и второй составляющей переходного процесса соответственно; a_0, a_1 – начальные амплитуды составляющих переходного процесса.

Проведём математические преобразования:

$$w(t) = e^{-\alpha t} (a_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + a_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)) = a_0 e^{-\alpha t} \left(\sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{a_1}{a_0} \sin(\omega_1 \cdot t) \right) \quad (6) \quad (7)$$

Введём обозначение

$$\frac{a_1}{a_0} = \text{tg}(\varphi) \quad (7)$$

Рассмотрим выражение в скобках отдельно с учётом последней формулы:

$$\begin{aligned} \sin(\omega_0 \cdot t) + \text{tg}(\varphi) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) &= \sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) = \\ &= \frac{\sin(\omega_0 \cdot t) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)}{\cos(\varphi)} = \frac{1}{2\cos(\varphi)} [\sin(\omega_0 \cdot t + \varphi) + \sin(\omega_0 \cdot t - \varphi) + \\ &\quad + \cos(\omega_1 \cdot t + \varphi) - \cos(\omega_1 \cdot t - \varphi)] \end{aligned} \quad (8)$$

Учитывая, что

$$\cos(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2(\varphi)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{a_1}{a_0})^2}}, \text{ а } \sin(\varphi) = \frac{\text{tg}(\varphi)}{\sqrt{1 + \text{tg}^2(\varphi)}} = \frac{a_1}{a_0 \cdot \sqrt{1 + (\frac{a_1}{a_0})^2}}, \quad (9)$$

Уравнение (2) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{1}{2\cos(\varphi)} [\sin(\omega_0 \cdot t + \varphi) + \sin(\omega_0 \cdot t - \varphi) + \cos(\omega_1 \cdot t + \varphi) - \cos(\omega_1 \cdot t - \varphi)] = \\ &= \frac{\alpha_0}{2 \cdot \cos(\varphi)} \cdot [e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi) + e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 \cdot t - \varphi) + e^{-\alpha t} \cos(\omega_1 \cdot t + \varphi) - \\ &\quad - e^{-\alpha t} \cos(\omega_1 \cdot t - \varphi)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Применяя преобразование Лапласа, получим передаточную функцию кольца как ДС:

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{(p + \alpha) \sin(\varphi) + \omega_0 \cos(\varphi)}{(p + \alpha)^2 + \omega_0^2} + \frac{-(p + \alpha) \sin(\varphi) + \omega_0 \cos(\varphi)}{(p + \alpha)^2 + \omega_0^2} + \\ &+ \frac{(p + \alpha) \cos(\varphi) + \omega_1 \sin(\varphi)}{(p + \alpha)^2 + \omega_1^2} - \frac{(p + \alpha) \cos(\varphi) - \omega_1 \sin(\varphi)}{(p + \alpha)^2 + \omega_1^2} = \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)}{(p + \alpha)^2 + \omega_0^2} + \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)}{(p + \alpha)^2 + \omega_1^2} \end{aligned} \quad (11)$$

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) = \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)}{(p + \alpha)^2 + \omega_0^2} + \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)}{(p + \alpha)^2 + \omega_1^2} \quad (12)$$

Следовательно, модель кольца можно представить в виде двух параллельно соединенных звеньев (рис. 3).

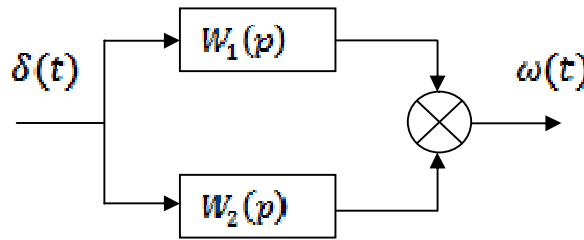


Рис. 3. Модель динамической системы кольца подшипника

Из формулы (8) заменой $p = j\omega$ получается выражение для частотной функции $W(j\omega)$ в виде

$$W(j\omega) = \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)}{(j\omega + \alpha)^2 + \omega_0^2} + \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)}{(j\omega + \alpha)^2 + \omega_1^2} \quad (13)$$

Далее определяем амплитудно-частотную характеристику:

$$A^2(\omega) = (P(\omega))^2 + (Q(\omega))^2 \quad (14)$$

Из выражения (9) определим значения $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ и найдём АЧХ:

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)}{(j\omega + \alpha)^2 + \omega_0^2} + \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)}{(j\omega + \alpha)^2 + \Omega^2} = \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)}{(-\omega^2 + 2j\omega\alpha + \alpha^2) + \omega_0^2} + \\ &+ \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)}{(-\omega^2 + 2j\omega\alpha + \alpha^2) + \Omega^2} = \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)((-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2) - 2j\omega\alpha)}{((-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2) + 2j\omega\alpha)((-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2) - 2j\omega\alpha)} + \\ &+ \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)((-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2) - 2j\omega\alpha)}{((-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2) + 2j\omega\alpha)((-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2) - 2j\omega\alpha)} = \\ &= \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)((-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2) - 2j\omega\alpha)}{(-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} + \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)((-\omega^2 + \Omega^2 + \alpha^2) - 2j\omega\alpha)}{(-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} = \\ &= \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)(-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2)}{(-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} - j \frac{4\omega\alpha\omega_0 \sin(\varphi)}{(-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} + \\ &+ \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)(-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2)}{(-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} - j \frac{4\omega\alpha\omega_1 \sin(\varphi)}{(-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$P(\omega) = \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)(-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2)}{(-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} + \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)(-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2)}{(-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} \quad (16)$$

$$Q(\omega) = \left(\frac{4\omega\alpha\omega_0 \cos(\varphi)}{(-\omega^2 + \omega_0^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} + \frac{4\omega\alpha\omega_1 \sin(\varphi)}{(-\omega^2 + \omega_1^2 + \alpha^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2} \right) \quad (17)$$

По полученным характеристикам из формул (16), (17) строится график АЧХ (рис. 4).

Показатель динамичности определяется отношением максимального значения АЧХ ДС кольца к начальному значению $|W(0)|$, причём чем выше резонансный пик, тем более качественное кольцо.

$$M_{max} = \frac{|W(j\omega)|_{max}}{|W(0)|} \quad (18)$$

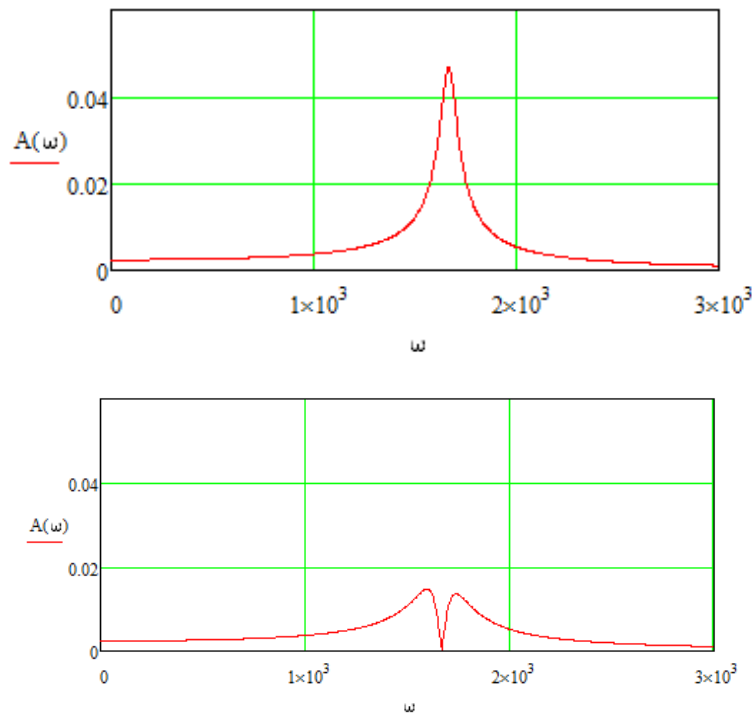


Рис. 4. АЧХ кольца как динамической системы:
а – кольца без дефекта, б – кольца с дефектом

На основании данной методики проведена серия экспериментов. Результаты данного эксперимента приведены на рис. 5. Исходя из полученных данных, можно определить показатель динамичности системы для каждого из колец.

Для первого кольца амплитуде первого пика равна 0,01479, при этом значение амплитуды при нулевом значении частоты 0,0024, следовательно $M_{max} = \frac{0,01479}{0,0024} = 6,16$.

Второе кольцо характеризуется амплитудой первого пика равной 0,01945, при значении амплитуды в начальный момент 0,0024, таким образом $M_{max} = \frac{0,01945}{0,0024} = 8,112$.

Для третьего кольца $A_{max} = 0,0178$, значение $A(0) = 0,0024$, определим значение показателя динамичности системы $M_{max} = \frac{0,0178}{0,0024} = 7,41$.

Для четвертого кольца $A_{max} = 0,02402$, $A(0) = 0,0024$, $M_{max} = \frac{0,02402}{0,0024} = 10$.

Для пятого кольца $A_{max} = 0,001488$, $A(0) = 0,000076$, $M_{max} = \frac{0,001488}{0,000076} = 19,58$.

Для шестого кольца $A_{max} = 0,0099$, $A(0) = 0,0024$, $M_{max} = \frac{0,0099}{0,0024} = 4,125$.

Таким образом, можно судить о состоянии колец подшипников относительно друг друга.

Для определения размера трещин в кольцах подшипников, влияющих на показатель динамичности, в [7] проведён сравнительный анализ виброакустического и ультразвукового методов.

Для большей наглядности все полученные дефекты сведем в таблицу.

Сравнение результатов ВА и УЗ методов дефектоскопии

Номер кольца	Ультразвуковой анализ (размер дефекта)	Виброакустический анализ (показатель динамичности)
1	295	6,16
2	201, 207, 293	8,12
3	209, 340	7,41
4	Дефектов не обнаружено	19,58
5	395	4,125

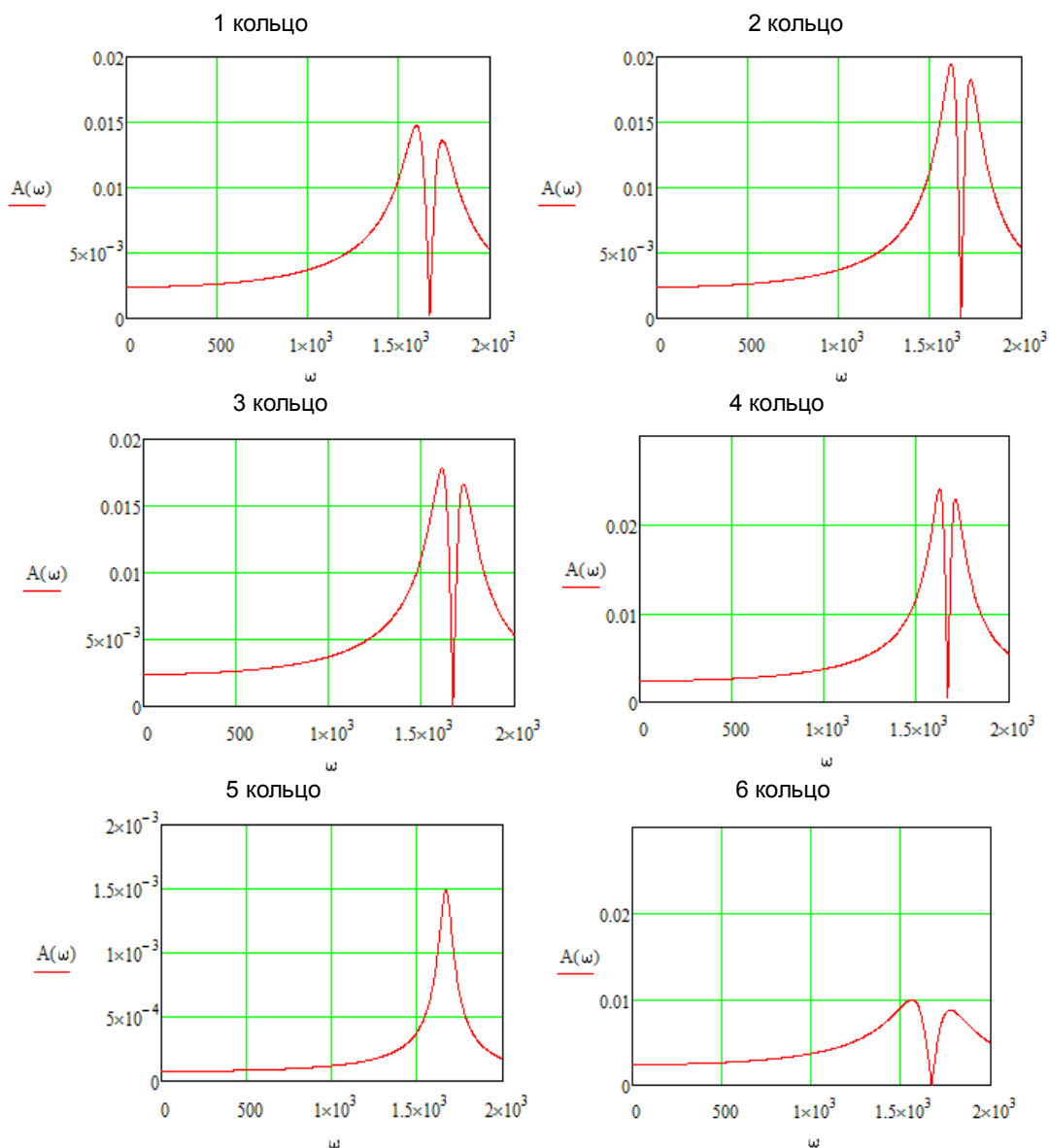


Рис. 5. Экспериментальные АЧХ колец как динамических систем

Из результатов таблицы видно, что при анализе показателя динамичности разных колец можно судить об их состоянии относительно друг друга, таким образом, имея эталонные кольца (без дефектов и трещин) можно разработать метод идентификации, на основании которого реализуется автоматизированное распознавание колец с дефектами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика / В.В. Клюев. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А.А. Игнатъев, М.В. Виноградов, В.В. Горбунов и др. Саратов: СГТУ, 2004. 124 с.
3. Щеголев С.С. Экспериментальное обнаружение неоднородностей в строении внешнего кольца подшипника качения колесной пары вагона / С.С. Щеголев, А.Г. Мотков, В.В. Погораздов // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2013. С. 202-206.
4. Гельман Л.М. Виброакустический метод свободных колебаний при неразрушающем контроле трещин / Л.М. Гельман, С.В. Горнилич // Акустичний вісник. 1999. Т. 2. № 4. С. 13-22.
5. Игнатъев А.А. Метод идентификации динамического качества станков / А.А. Игнатъев // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2013. С. 85-91.
6. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления / Е.А. Никулин СПб.: БХБ-Петербург, 2004. 640 с.

7. Щеголев С.С. Оценка состояния колец подшипников с применением ультразвукового и виброакустического методов / С.С.Щеголев, А.Г. Мотков, А.А. Игнатъев // Вестник СГТУ. 2013. № 73. С. 132-136.

8. <http://blog.vibroexpert.ru/?p=1166>

Игнатъев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexandre A. Ignatiev - Dr. Sc., Professor
Department of Automation, Control and Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Мотков Александр Геннадьевич – аспирант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexandre G. Motkov - Postgraduate
Department of Automation, Control and Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Щеголев Сергей Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey S. Shchegolev - Postgraduate
Department of Automation, Control and Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК: 004.891

Н.В. Ле

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МЕДИЦИНСКАЯ СИСТЕМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрен подход к проектированию интеллектуальной медицинской системы диагностики на основе теории экспертных систем. Предложена формальная модель медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики. Приведены схема архитектуры данной системы.

Медицинская диагностика, экспертная система, фреймовая система, продукционная система, управление выводом

N.V. Le

AN INTELLIGENT MEDICAL DIFFERENTIAL DIAGNOSIS SYSTEM BASED ON EXPERT SYSTEMS

This paper presents an approach to designing an intelligent medical diagnosis system based on the theory of expert systems. A formal model for a medical expert system on differential diagnosis is proposed. The architecture of the system is also presented.

Medical diagnosis, expert system, frame system, product system, inference engine

Введение

Задача системы дифференциальной медицинской диагностики заключается в определении заболеваний, которыми возможно болен пациент, на основе данных о наблюдениях за его симптомами. В зависимости от типа медицинских данных различают 2 основных подхода к медицинской диагностике: диагностика с использованием методов теории вероятностей и математической статистики основана на объективной статистической информации; диагностика с использованием искусственного интеллекта на основе субъективной информации, т.е. знаний и опыта группы врачей.

Одним из множества направлений искусственного интеллекта является экспертная система. Экспертная система обладает следующими преимуществами: высокой эффективностью; производительностью; высокой надежностью; доступностью для понимания. Существуют классические меди-

цинские экспертные системы: PUFF – диагностирование легочных заболеваний; CADUCEUS – диагностирование заболеваний внутренних органов; MYCIN – диагностирование и лечение заболеваний, вызванных бактериальными инфекциями; GUIDON – подготовка инструктивных указаний по борьбе с бактериальными инфекциями и др.

Несмотря на то, что разработан ряд медицинских экспертных систем, система диагностики не может нести никакой ответственности за полученное с ее помощью диагностическое решение, всегда считается, что система выступает только в качестве консультанта. Другими словами, задача таких систем заключается в определении возможного специалиста, к которым пациенту нужно обращаться, на основании полученных диагностических гипотез. Кроме того, система диагностики заболеваний должна функционировать даже при недостатке информации, т.е. иметь возможности рассуждения в условиях не определенности. Полученное диагностическое решение может и не быть точным, однако система не должна останавливаться из-за того, что отсутствует какая-либо часть входной информации.

Для повышения эффективности работы системы необходима гибкость базы знаний. Система ориентирована на возможное расширение списка болезней, симптомов и взаимосвязей между ними по критерию целесообразности их использования. Объяснение обеспечивает наблюдения поведения системы о диагностике. Поэтому пациент хорошо понимает его диагностические результаты, сформированные системой на каком-либо конкретном этапе. Веб-ориентированная система диагностики заболеваний позволяет связать пациентов с врачом через веб-интерфейсы, которые дают возможность медицинской диагностики пациентам, не находящимся в клинике врачей.

Целью работы является описание формальной модели системы медицинской диагностики, основанной на экспертных системах, а также проведение информационных структур медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики.

Формальная модель медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики.

Медицинская экспертная система дифференциальной диагностики представляет собой систему для определения диагностических гипотез на основе медицинских знаний группы врачей и фактов проявления поступающих симптомов пациента. Диагностические гипотезы представляют собой возможные заболевания (с экспертной оценкой), которыми страдает пациент. На основании диагностических гипотез можно определить возможную специальность врача, по которой пациенту нужно обращаться.

Формальная модель системы может быть представлена в виде кортежа:

$$MESDD = \langle WM, KB, UI, IE, EM, KA \rangle, \quad (1)$$

где *WM* – рабочая память; *KB* – база медицинских знаний; *UI* – пользовательский интерфейс; *IE* – управление выводом диагностического решения; *EM* – объяснение результативной информации; *KA* – приобретение медицинских знаний.

На рис. 1 представлена схема медицинской экспертной системы диагностики.



Рис. 1. Схема медицинской экспертной системы диагностики

По данной схеме система работает в 2 следующих режимах [1-3]. В режиме приобретения знаний эксперты-врачи наполняют систему медицинскими знаниями, которые позволяют ей в режиме медицинской консультации самостоятельно решать задачи вывода диагностического решения. В режиме медицинской консультации в общении с системой участвует пользователь-пациент, которого интересует результативная информация диагностики и объяснительная информация полученного результата.

База медицинских знаний

Ключевым понятием системы является база знаний. Для представления знаний в системе выбрано сочетание фреймовой и нечеткой баз знаний. Фреймовая база знаний представлена для описания текущего состояния области диагностики, т.е. количественные оценки каждого заболевания на основе знаний из базы знаний и поступающих фактов проявления симптомов. Нечеткая база знаний представлена для описания динамических знаний о переходах между состояниями области диагностики, т.е. причинно-следственное отношение, связывающее какое-либо заболевание с симптомами в его симптомокомплексе. Используя процедурные знания и наследование свойства фреймов, можно реализовать механизм управления выводом диагностического решения.

Фреймовая база знаний

Формально база знаний может быть представлена в виде кортежа:

$$KB = \langle FC, FSM, FSD, FSS, FSC, \{FIM_i\}, \{FID_j\}, \{FIS_k\}, \{FIC_h\} \rangle, \quad (2)$$

где FC – фрейм-класс; FSM – фрейм-прототип специальности; FSD – фрейм-прототип заболевания; FSS – фрейм-прототип симптома; FSC – фрейм-прототип симптомокомплекса; $\{FIM_i\}$ – множество фреймов-экземпляров специальностей; $\{FID_j\}$ – множество фреймов-экземпляров заболеваний; $\{FIS_k\}$ – множество фреймов-экземпляров симптомов; $\{FSC_h\}$ – множество фреймов-симптомокомплексов.

Под фреймом-классом понимается фрейм верхнего уровня для представления совокупности фреймов-прототипов. Фрейм-класс определяется именем и совокупностью слотов. Формально фрейм-класс может быть представлен в виде кортежа:

$$FC = \langle NFC, \{ \langle NS, TS, VS, \{PMS_i\}, \{PDS_j\} \rangle \} \rangle, \quad (3)$$

где NFC – имя фрейма-класса; NS – имя слота; TS – тип данных слота; VS – значение слота; $\{PMS_i\}$ – множество процедур-методов; $\{PDS_j\}$ – множество процедур-демонов.

Под фреймом-прототипом понимается фрейм для описания абстрактных объектов области диагностики заболеваний. Используются 4 типа фрейма-прототипа для специальности, заболевания, симптома и симптомокомплекса. Под фреймом-экземпляром понимается фрейм для отображения реальных объектов области диагностики, например «простуда», «грипп», «кашель», «насморк» и т.д.

Формально фрейм-прототип специальности может быть представлен в виде кортежа:

$$FSM = \langle NFSM, AKO, NM, \{CD_i\} \rangle, \quad (4)$$

где $NFSM$ – имя фрейма-прототипа специальности; AKO – данный слот задает имя фрейма-класса; NM – данный слот задает имя специальности; $\{CD_i\}$ – данный слот задает набор контактов врачей по специальности.

Формально фрейм-прототип заболевания может быть представлен в виде кортежа:

$$FSD = \langle NFSD, AKO, LVOD, CVO, \{CF_i\}, SX, AE, NFIM \rangle, \quad (5)$$

где $NFSD$ – имя фрейма-прототипа заболевания; AKO – данный слот задает имя фрейма-класса; $LVOD$ – данный слот задает лингвистическую выходную переменную заболевания; CVO – данный слот задает значение выходной переменной заболевания; $\{CF_i\}$ – данный слот задает множество коэффициентов уверенности правдоподобия заболевания; SX – данный слот задает пол пациента, который возможно страдает заболеванием; AE – данный слот задает диапазон возраста пациента; $NFIM$ – данный слот задает имя фрейма-экземпляра специальности.

Формально фрейм-прототип симптома может быть представлен в виде кортежа:

$$FSS = \langle NFSS, AKQLVISCVI, \{SF_i\}, SG \rangle, \quad (6)$$

где $NFSS$ – имя фрейма-прототипа симптома; AKO – данный слот задает имя фрейма-класса; $LVIS$ – данный слот задает лингвистическую входную переменную симптома; CVI – данный слот задает значение входной переменной симптома; $\{SF_i\}$ – данный слот задает множество коэффициентов специфичности симптома в соответствующего симптомокомплексе; SG – данный слот имя групп симптомов.

Формально фрейм-прототип симптомокомплекса может быть представлен в виде кортежа:

$$FSC = \langle NFSC, AKO, NFID, \{NFIS_i\}, \{FR_j\}, \{SFI_k\} \rangle, \quad (7)$$

где $NFSC$ – имя фрейма-симптомокомплекса конкретного заболевания; AKO – данный слот задает имя фрейма-класса; $NFID$ – данный слот задает имя фрейма-экземпляра заболевания; $\{NFIS_i\}$ – данный слот задает множество имен фреймов-экземпляров симптомов в симптомокомплексе; $\{FR_j\}$ – данный слот задает набор нечетких причинных правил заболевания; $\{SFI_k\}$ – данный слот задает множество слотов фреймов-экземпляров заболевания $NFID$ и симптомов, указанных во множестве $\{NFIS_i\}$.

Нечеткая база знаний

Формально нечеткое правило может быть представлено в виде кортежа:

$$FR = \langle NFR, \{FSMS_i, SF_i\} \rightarrow FSM D, CF \rangle, \quad (8)$$

где NFR – имя нечеткого правила; $FSMS_i$ – нечеткое высказывание переменной симптома; SF_i – коэффициент специфичности симптома в симптомокомплексе; $FSM D$ – нечеткое высказывание переменной заболевания; CF – коэффициент уверенности правдоподобия заболевания.

Формально нечеткое высказывание одной переменной может быть представлено в виде кортежа:

$$FSM = \langle LV, LT, M \rangle, \quad (9)$$

где LV – лингвистическая переменная; LT – лингвистический терм переменной; M – модификатор, которому соответствуют слова «очень», «более-менее», «нет» и др.

Формально лингвистическая переменная может быть представлена в виде кортежа:

$$LV = \langle NLV, TSLV, ULV, GLV, MLV, TLV \rangle, \quad (10)$$

где NLV – имя лингвистической переменной; $TSLV$ – терм-множество лингвистической переменной; ULV – область определения каждого элемента $TSLV$; GLV – синтаксические правила, часто в виде формальной грамматики, порождающие название лингвистических термов; MLV – семантические правила, задающие функции принадлежности лингвистических термов, порожденных синтаксическими правилами GLV ; TLV – тип лингвистической переменной (симптома или заболевания).

Формально лингвистический терм переменной может быть представлен в виде кортежа:

$$LT = \langle NLT, MF \rangle, \quad (11)$$

где NLT – имя лингвистического термина; MF – функция принадлежности переменной лингвистическому терму. В качестве функции принадлежности используется функции следующего вида:

$$\mu_{LT}(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-b}{c}\right)^2}, \quad (13)$$

где b и c – параметры настройки: b – координата максимума функции $\mu_{LT}(b)=1$; c – коэффициент концентрации-растяжения функции.

Рабочая память

Рабочая память системы предназначена для хранения информации пациента, результативной информации диагностики, а также объяснительной информации.

Под информацией пациента понимается 2 вида информации:

- персональная информация о пациенте: имя; электронная почта; пол; возраст и др.;
- количественные оценки поступающих симптомов.

Под результативной информацией диагностики понимаются количественные интегральные оценки каждого заболевания.

Для оценки симптомов и заболеваний используется шкала, диапазону показаний которой соответствует окрестность $[0, 1]$.

Под объяснительной информацией понимается информация о ходе рассуждений, т.е. почему и как система формирует то или иное решение пользователя.

Когда факты поступления информации пациента или результатной информации актуализированы, система создает записи (т.е. элементы рабочей памяти) для каждого факта в виде кортежей разной длины. Каждая запись может содержать весь факт или наоборот, факт может быть системой записей фиксированной длины. Формально элемент рабочей памяти может быть представлен в виде кортежа:

$$WME = \langle NE, IDE, ATE, TPE, VLE \rangle, \quad (14)$$

где NE – название элемента; IDE – идентификатор элемента; ATE – атрибут; TPE – тип атрибута элемента; VLE – значение атрибута элемента.

Формально рабочая память может быть представлена в виде кортежа:

$$WM = \langle \{WME_i\}, PSE, ELINF \rangle, \quad (15)$$

где $\{WME_i\}$ – множество фактов; PSE – процедура поиска фактора; $ELINF$ – объяснительная информация.

Управление выводом диагностического решения

Управление выводом диагностического решения предназначено для получения диагностического решения на основании количественных оценок поступающих симптомов. Под диагностической гипотезой понимается заболевание со значением выходной переменной. В зависимости от количественной оценки заболевание находится в одном из 3 возможных состояний: неактивный кандидат; потенциальный кандидат; активный кандидат.

Управление выводом диагностического решения состоит из 4 основных шагов: сопоставление; разрешение конфликта; срабатывание; действие. Перед выводом решения необходимо ввести факты проявления симптомов в рабочую память. Поэтому управление выводом комбинировано осуществляется следующим образом [4]:

- применение обратного вывода осуществляет генерацию дополнительных вопросов по ведущим симптомам;
- вывод решения соответствует применению прямого вывода после каждого шага обратного вывода.

В системе, основанной на сочетание фреймовой и нечетко-продукционной моделей, слоты симптомов рассматриваются как исходные, а слоты заболеваний – целевые. При генерации дополнительных вопросов инициируются процедуры-методы, реализующие обратный вывод, для выяснения исходных значений возможных симптомов. При присваивании исходных значений слотам сработают процедуры-демоны, отвечающие за прямой вывод, которые выполняют нечеткий вывод для получения целевых значений слотов заболеваний. Таким образом, управление выводом диагностического решения может быть как обратным, так и прямым выводом [4]. Формально управление выводом диагностического решения может быть представлено в виде кортежа:

$$IE = \langle KB, VCVI, VCVO, BC, GQ, FC, CL, SL, OP, AT \rangle, \quad (16)$$

где KB – база медицинских знаний; $VCVI$ – вектор количественных оценок симптомов; $VCVO$ – вектор количественных интегральных оценок заболеваний; BC – стратегия обратного вывода; GQ – генерация дополнительных вопросов; FC – стратегия прямого вывода; CL – сопоставление; SL – разрешение конфликта; OP – срабатывание; AT – действие.

Стратегия обратного вывода. В [5] каждый из симптомокомплексов включает множество симптомов, причем некоторые симптомы могут одновременно включаться в несколько симптомокомплексов. Как показано на рис. 2, симптом S_m одновременно включается в заболевания D_1 и D_2 , что приводит к пересечению эллипсоидов рассеяния. В эллипсоиде рассеяния D_1 можно условно выделить область достоверного решения для D_1 , Ω_1 , и область недостоверного решения для D_1 при D_2 , Ω_{12} .

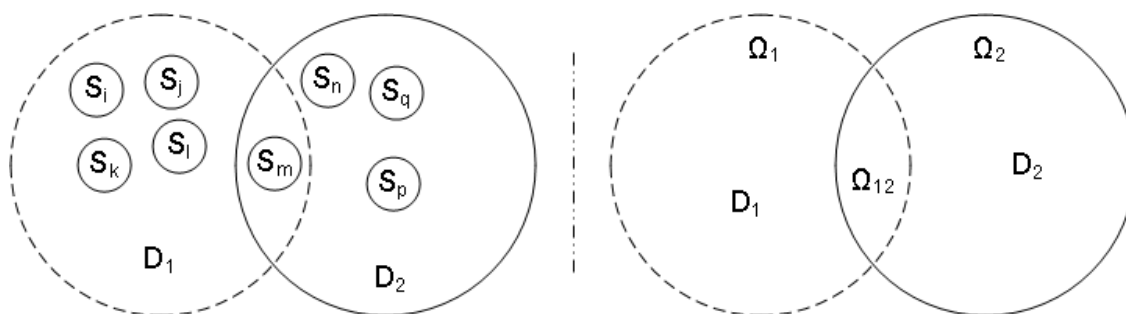


Рис. 2. Иллюстрация расположения эллипсоидов рассеяния заболеваний

Пусть имеется пространство заболеваний $\{D_1, \dots, D_n\}$. Для уточнения диагноза необходима генерация дополнительных вопросов, касающихся только возможных заболеваний. Это обеспечивает более высокую эффективность диагностики. Генерация дополнительных вопросов состоит из 4 следующих этапов:

Вычисление областей достоверного и недостоверного решений для каждого заболевания выполняется по следующим формулам:

$$\Omega_i = \sum_{S_k \in D_i \setminus D_j} SF_k^i, \quad (17)$$

$$\overline{\Omega}_i = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{S_k \in D_i \cap D_j} SF_k^i, \quad (18)$$

где Ω_i – область достоверного решения для D_i ; $\overline{\Omega}_i$ – область недостоверного решения для D_i ; SF_k^i – коэффициент специфичности k -го симптома из симптомокомплекса D_i .

Для **выделения окончательного диагноза для заболевания D_i** из данного множества используется 3 основных критерия:

- наиболее минимальная область достоверного решения;
- наиболее максимальная текущая интегральная оценка заболевания;
- наиболее максимальная область недостоверного решения.

Определение ведущего симптома выделенного заболевания. Ведущему симптому соответствует k -й симптом, имеющий наиболее максимальный коэффициент специфичности SF_k^i .

На этапе **генерации дополнительного вопроса по ведущему симптому** требуется задавать пациенту очередной правильный вопрос для выяснения количественных оценок возможных симптомов.

Стратегия прямого вывода. При буквальной реализации система проверяет применимость нечетко-продукционных правил каждого заболевания к каждому факту проявления симптомов в рабочей памяти, при необходимости выполняет их и переходит к следующему заболеванию, возвращаясь в начало при исчерпании всех заболеваний. Для обеспечения скорости при большой базе знаний и большого количества фактов в рабочей памяти применяется алгоритм Rete, предложенный Форджи в 1982 г. Данный алгоритм жертвует объемом памяти ради скорости. На рис. 3 представлена схема управления выводом диагностического решения.

При использовании алгоритма Rete база медицинских знаний при трансляции преобразуется в сеть Rete (или префиксное дерево), в конечных узлах которой расположены, с одной стороны, процедуры-демоны, присоединенные к исходным слотам, а с другой – процедуры-методы для получения значений целевых слотов при истинности предпосылки нечетко-продукционных правил, информация о которой сохраняется в промежуточных узлах (α и β -памяти). При проявлении поступающих в рабочую память симптомов присваиваются исходным слотам значения, и происходят обновления только небольшой части связанной с ней сети. На рис. 4 представлена сеть процедур-демонов для фреймовой и нечетко-продукционной баз при использовании алгоритма Rete.

На момент присваивания не все правила известны при условиях неопределенности. Поэтому нельзя строить единую сеть для всех правил. Такая модификация алгоритма Rete называется быстрыми алгоритма Rete, который был разработан в [4].

В модифицированной сети Rete должны храниться следующие компоненты:

- список активации, в котором хранятся родительские слоты, т.е. слоты фреймов-прототипов;
- контекст активности, в котором хранятся ссылки на текущие фреймы, вызвавшие активацию, т.е. фреймы-экземпляры.

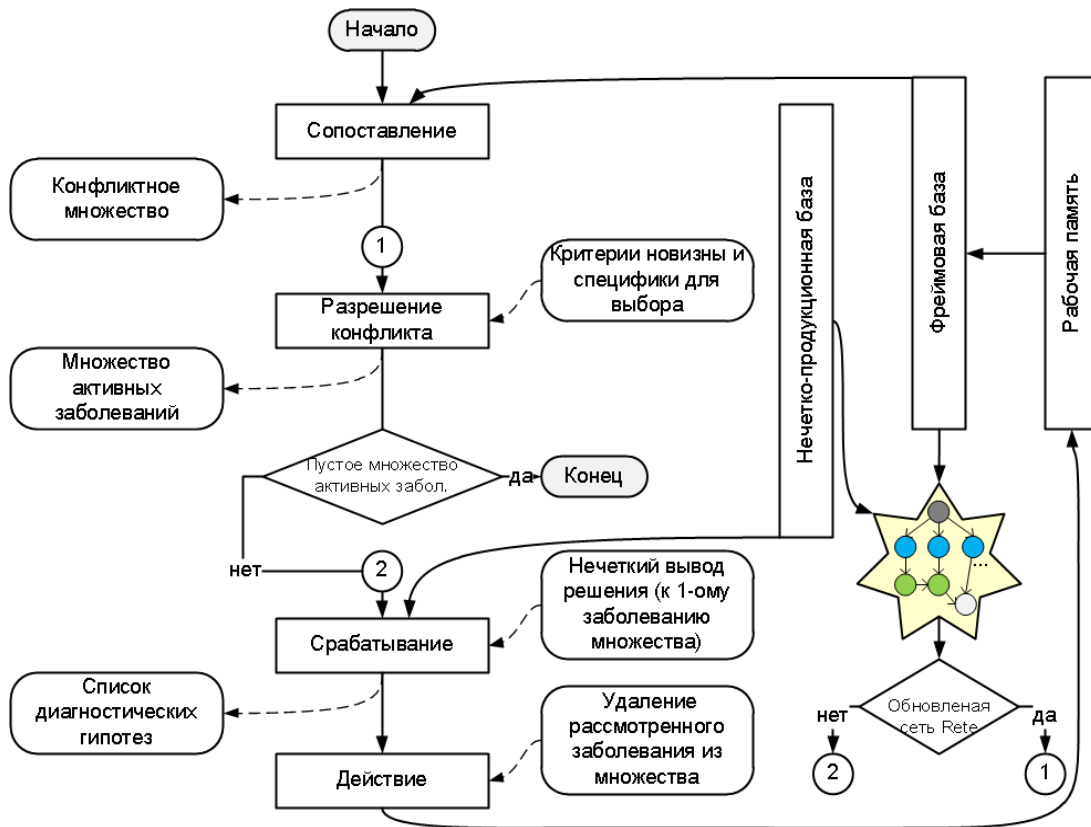


Рис. 3. Схема управления выводом диагностического решения

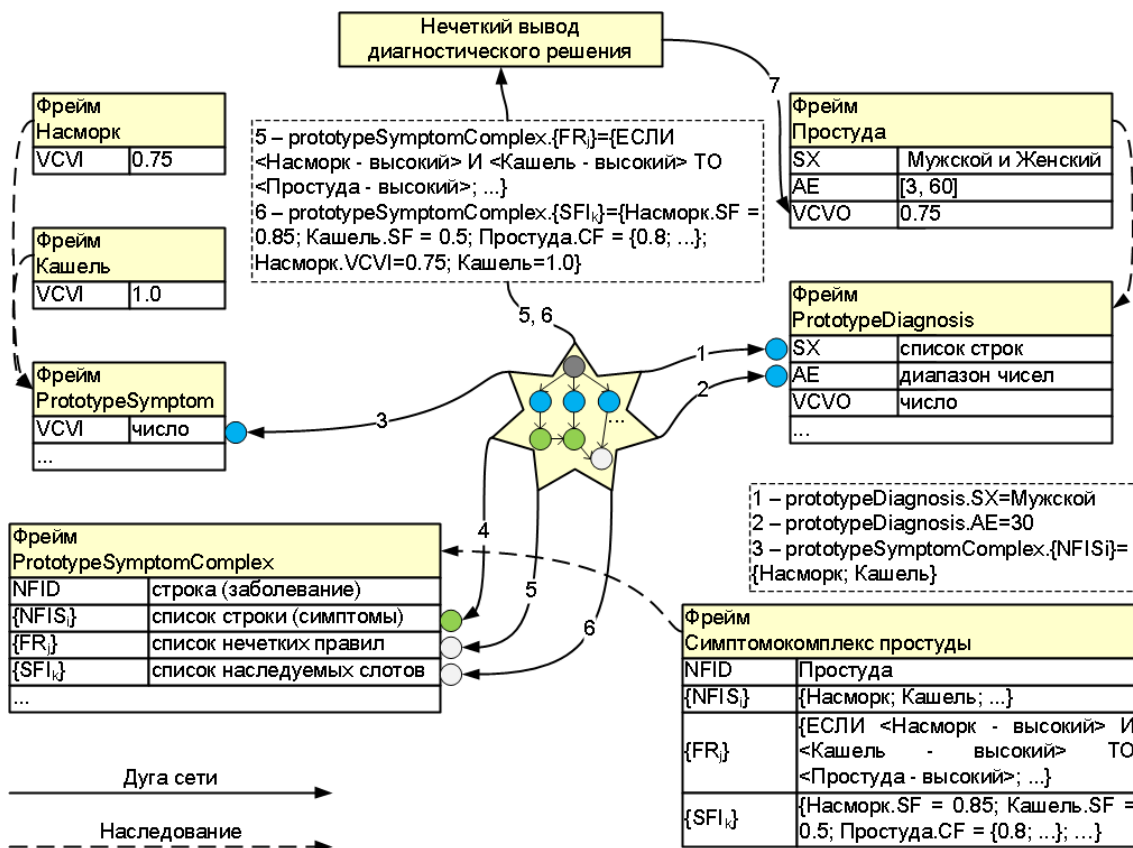


Рис. 4. Сеть процедур-демонов для фреймовой и нечетко-продукционной баз при использовании алгоритма Rete

При изменении значения некоторого исходного слота, находящегося в предпосылке, активируются все связанные с ним процедуры-демоны, которые непосредственно пытаются вычислить значения целевого слота, находящиеся в заключении. При вычислении по алгоритму нечеткого вывода β -память запоминает промежуточные результаты, а в качестве α -памяти используются сами слоты. Унификация правила со значениями в рабочей памяти как таковая не производится, а заменяется неявной унификацией по наследованию, которая достигается за счет вызова процедур-демонов всех родительских фреймов с передачей текущего фрейма (вызвавшего активацию) в качестве контекста вызова. Таким образом, сеть неявно образована присоединенными к слотам демонами, связанными с ними правилами и нечетким выводом, в узлах которых запоминаются промежуточные результаты вычислений.

Сопоставление симптомокомплексов с имеющимися фактами из рабочей памяти выполняется после утверждения поступающих симптомов. В результате, на этапе конфликтное множество состоит из потенциальных заболеваний по следующим критериям:

- потенциальному заболеванию соответствует симптомокомплекс, в котором симптомы, совпадающие с поступающими в рабочую память симптомами;
- потенциальному заболеванию соответствуют возраст и пол пациента, который возможно страдает этим заболеванием.

В случае, если все симптомы какого-либо заболевания имеются в рабочей памяти, то такое заболевание состоит из множества рассмотренных заболеваний.

Разрешение конфликта выполняется для выбора одного или нескольких наиболее подходящих заболеваний из конфликтного множества. Результатом данного этапа является множество активных заболеваний, а также определяется порядок их выполнения.

Разрешение конфликта основано на принципе «первым пришел, первым обслужен», т.е. приоритет перед выбором первого из активных заболеваний для срабатывания. Кроме того, для выбора подходящих заболеваний используются следующие критерии:

- новизна. Активнее заболеванию соответствуют факты проявления симптомов, поступающих в рабочую память как самые последние. Для этого необходимо снабжать факты специальным атрибутом времени порождения;
- специфика. Активнее заболеванию соответствует симптомокомплекс с большим количеством фактов проявлений поступающих в рабочую память симптомов.

Можно выбрать критерий разрешения конфликтов или определить очередь из нескольких критериев. Кроме того, не следует применять сработанные нечетко-продукционные правила к имеющимся фактам. Для этого необходимо удалить рассмотренные заболевания после срабатывания.

Срабатывание. При присваивании слоту значения выполняется срабатывание нечетко-продукционных правил, связанных с этим слотом, т.е. в левой части которых фигурирует значения этого слота. Применению таких правил соответствует изменение состояния области диагностики. Нечеткий вывод диагностического решения на модели Мамдани включает следующие шаги [6-8]:

Шаг 1. Фаззификация входных переменных, т.е. приведение количественных оценок симптомов к нечеткости.

Шаг 2. Агрегирование предпосылки. На основании набора нечетких правил определяются степени истинности предпосылки для каждого нечеткого правила.

Шаг 3. Активизация заключения. Определяется активизированная функция принадлежности оценки заболевания терму из заключения для каждого нечеткого правила.

Шаг 4. Аккумуляция заключений. В результате получается итоговое нечеткое множество каждой переменной заболевания.

Шаг 5. Дефаззификация выходных переменных, т.е. приведение нечетких значений переменных заболеваний к четкости.

Формирование списка диагностических гипотез определяется таким образом, что если максимальное значение функции принадлежности итогового нечеткого множества какой-либо переменной заболевания оказывается в диапазоне от 0 до 0.2, то диагностическая гипотеза такого заболевания отбрасывается.

На этапе **действия** результатом срабатывания нечетко-продукционных правил, скорее всего, обновлено состояние рабочей памяти. В состав результативной информации входят не только список диагностических гипотез и список активизированных правил, а также возможных врачей-специалистов, к которым пациенту нужно обращаться. Кроме того, обеспечивается возможность формирования анкет с ответами на вопросы в случае, если пациент соглашается или отказывается с диагностическим решением перед выходом из системы.

Объяснение результативной информации

Объяснение результативной информации предназначено для хранения журнала протоколирования вывода, т.е. информации о поведении системы о диагностике заболеваний. Память состояний используется для хранения данного журнала, каждая запись которого соответствует одному диагностическому решению на основании предшествующих симптомов.

Формально запись журнала протоколирования вывода может быть представлено в виде кортежа:

$$HR = \langle NR, \{SR_i\}, \{DHR_j\}, \{ARR_k\} \rangle, \quad (19)$$

где HR – номер записи в журнале; $\{SR_i\}$ – список предшествующих симптомов; $\{DHR_j\}$ – список активных диагностических гипотез; $\{ARR_k\}$ – множество активизированных правил.

Формально объяснение может быть представлено в виде кортежа:

$$EM = \langle \{HR_i\}, FELINF \rangle, \quad (20)$$

где $\{HR_i\}$ – журнал протоколирования вывода; $FELINF$ – выделение объяснительной информации из журнала на основании предшествующих симптомов.

Приобретение медицинских знаний

Модель приобретения медицинских знаний формально может быть представлена в виде кортежа:

$$KE = \langle KB, CRKB, RPSQ, LRKB, TTKB \rangle, \quad (21)$$

где KB – база знаний; $CRKB$ – построение базы знаний; $RPSQ$ – извлечение знаний из отправленных анкет; $LRKB$ – обучение нечетких баз знаний; $TTKB$ – проверка базы знаний.

Построение базы знаний. Врачи, с участием инженера по знаниям, описывают область медицинской диагностики и диагностическое состояние в виде гибридной модели представления знаний. *Формализация гибридной модели* представления знаний является подготовительным этапом. Инженер по знаниям создает фреймовую и нечетко-продукционную модели представления знаний.

На этапе *формирования фреймовой иерархии* врачи описывают текущее состояние области диагностики следующим образом: определение специальностей, заболеваний, групп симптомов, симптомов; создание взаимодействий между объектами области; отображение количественных оценок поступающих симптомов и количественной интегральной оценки каждого заболевания.

На этапе *формирования нечетко-продукционных правил* врачи описывают переходы между состояниями области диагностики следующим образом: описание входных и выходных переменных (симптомов и заболеваний); задание функций принадлежности для созданных переменных; создание нечетко-продукционных правил.

Извлечение знаний из отправленных анкет. Данный подход основан на формировании ответов на электронное письмо, отправленное пациентом, согласно подготовленной анкете, и выделении из них новых знаний, характеризующих его содержание. В качестве источника знаний выступает диагностическое решение, сформированное врачами, для медицинской консультации, в которой система не смогла поставить конечный диагноз. *Формирование подготовленной анкеты* является предварительным этапом. Для этого задается перечень понятий, необходимых для описания структуры анкеты (возможная специальность; вопросы-ответы; и др.) затем формируется иерархия понятий на основе их связей.

На этапе *заполнения анкеты и отправления врачам* все поля анкеты заполняются информацией медицинской диагностики. Затем анкета в письме отправляется врачам по возможной специальности.

На этапе *получения письма и формирования ответов на вопросы* врач решает принимать письмо и отвечать на вопросы. Ответное письмо отправляется пациенту на его электронную почту.

На этапе *формирования новых нечетко-продукционных правил* происходит сопоставление ответных анкет с базой знаний для извлечения новых фактов, которые сохраняются в виде правила.

Обучение нечетких баз знаний. Для повышения эффективности обучения нечетко-продукционной модели представления знаний, решающей задачу формирования базы знаний, предлагается использование генетического алгоритма [9]. Для этого первым необходимо задавать способ кодирования/декодирования нечетко-продукционной модели представления знаний, которая определяет некоторые параметры (параметры функции принадлежности; коэффициенты специфичности и уверенности), которые сводятся в единственный вектор. Значение одного параметра лежит в определенной окрестности, которую можно разбить на 2-16 интервалов. Затем для кодирования номера ин-

тервала можно использовать 16-битовое значение в коде Грея, при котором соседние числа отличаются меньшим количеством позиций.

Для создания начальной популяции хромосом случайным образом выполняется генерация 100 хромосом с начальной инициализацией значений генов в заданной окрестности, используя метод Гауссиан. Затем с использованием операции композиции объединить набор генов в единую хромосому для оценки приспособленности хромосом.

Каждой хромосоме из популяции ставится в соответствие оценка ее приспособленности хромосом в популяции, вычисление которой выполняется на основании обучающих выборок и векторов параметров модели. Процесс обучения считается законченным, если выполняется условие того, что полученная оценка больше порогового значения.

Селекция хромосом. В процедуре селекции, основанной на принципе колеса рулетки, чем больше секторы на колесе рулетки (т.е. соответствующая оценка приспособленности хромосомы), тем выше шанс, что выбрана именно эта хромосома, к которой в дальнейшем после выполнения операции декомпозиции применяются генетические операторы для создания потомков для следующей популяции.

Применение генетических операторов к хромосомам. В генетических алгоритмах за передачу генов родителей потомкам отвечает оператор скрещивание (вероятность 90%). Операторы мутации и инверсии (вероятность 10%) предназначены для того, чтобы поддерживать разнообразие хромосом в популяции.

Формирование новой популяции. Результативные хромосомы необходимо поместить в популяцию после выполнения операции композиции. Для сокращения популяции до исходного числа хромосом применяется оператор редукции.

После останова работы генетического алгоритма получается обученная модель, аппроксимирующая с заданной точностью данные из обучающей выборки и формирующая базу знаний, состоящую из системы нечетко-продукционных правил.

Проверка базы знаний предназначена для оценки полноты и целостности базы знаний по тестирующей выборке [10].

Пользовательский интерфейс

Пользовательский интерфейс обрабатывает все сообщения, которыми обмениваются пользователи и система, а также выполняет распределение ролей участников диалога между ними и организацию их взаимодействия в процессе медицинской консультации, а также приобретения медицинских знаний. Формально пользовательский интерфейс может быть представлен в виде кортежа:

$$UI = \langle CDUS, CDSU, \{ \{ DG_i, RU_i, \{ PD_j^i \} \} \} \rangle, \quad (22)$$

где $CDUS$ – преобразование входной информации пользователей в сообщения системы; $CDSU$ – преобразование сообщений системы в выходную информацию пользователей; DG_i – диалог между i -м пользователем и системой; RU_i – роль i -го пользователя; $\{ PD_j^i \}$ – множество возможных процедур i -го пользователя.

Информационные структуры медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики

Схема архитектуры медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики представлена на рис. 5.

Для сбора и отображения пользовательской информации используются браузеры (IE, Firefox, Safari, Opera, Chrome и др.). На этапе ввода информации реализуется диалог пациента с системой в режиме «вопрос–ответ».

Для обеспечения работы веб-приложений на основе веб-форм ASP.NET с использованием DotNetNuke требуется проприетарный набор серверов для нескольких служб интернета IIS, основным компонентом которой является веб-сервер, предоставляющий пользователю доступ к веб-страницам.

По умолчанию продукт поддерживает базу данных в DotNetNuke – система управления базами данных Microsoft SQL Server, которая относится к реляционным системам. В данной системе используется язык T-SQL для управления экземплярами компонента SQL Server Database Engine.

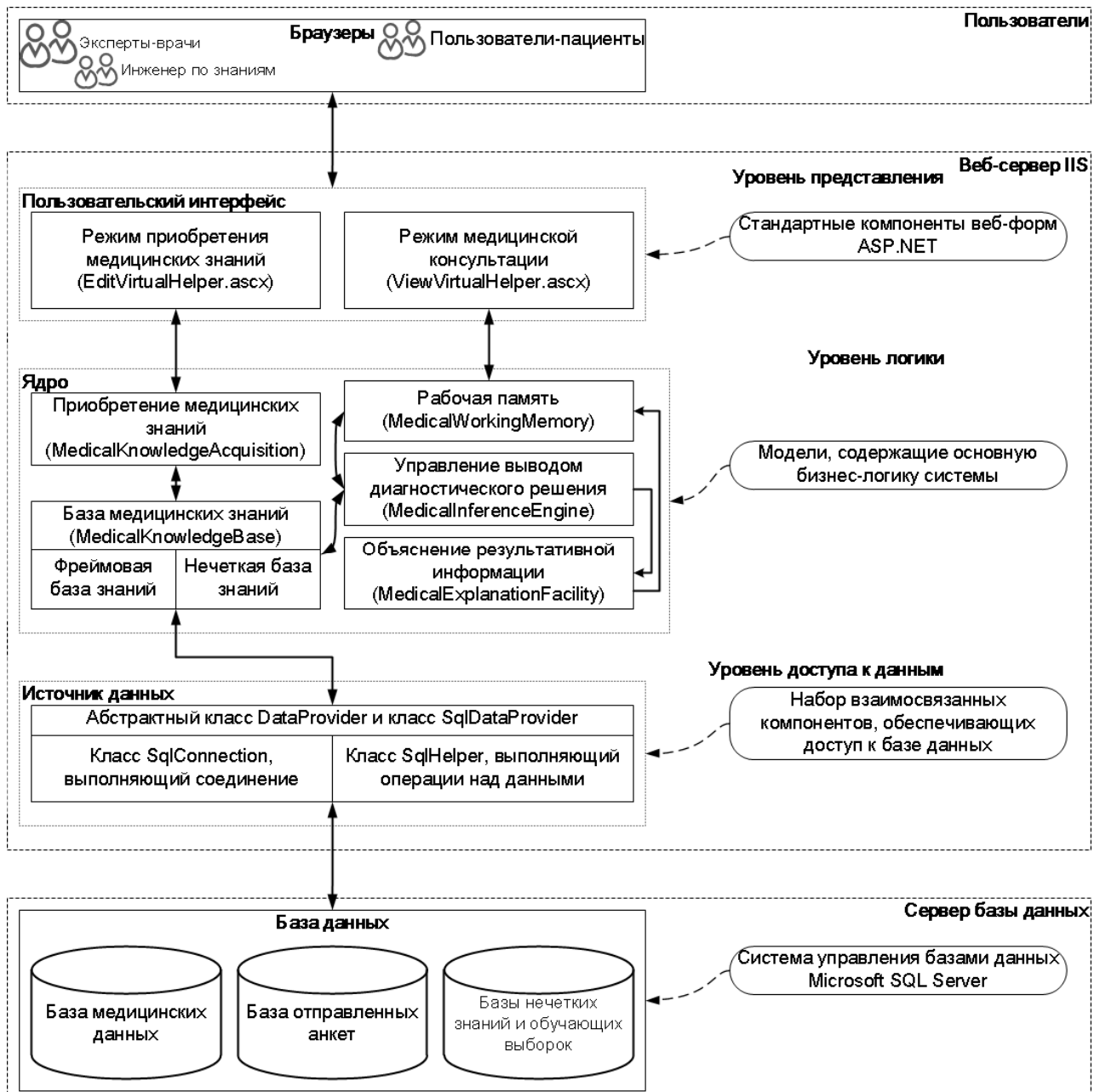


Рис. 5. Схема архитектуры системы

При проектировании системы необходимо четко разграничить следующие уровни:

- уровень представления предназначен для взаимодействия с пользователем, отображения информации и элементов управления;
- уровень логики предназначен для реализации функциональности ядра системы;
- уровень доступа к данным предназначен для взаимодействия с источником данных, используемым уровнем бизнес-логики.

Ядро системы реализовано в виде программных модулей. На рис. 6 представлена структурная схема ядра данной системы.

Заключение

В результате работы предложена формальная модель медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики. База медицинских знаний основана на сочетании следующей модели представления знаний: фреймовая модель представления статических знаний о текущем состоянии области диагностики; нечетко-продукционная модель представления динамических знаний о переходах между различными состояниями. Построение базы знаний предназначено для формализации гибридной модели представления знаний, а также формирования фреймовой иерархии и нечетко-продукционных правил.

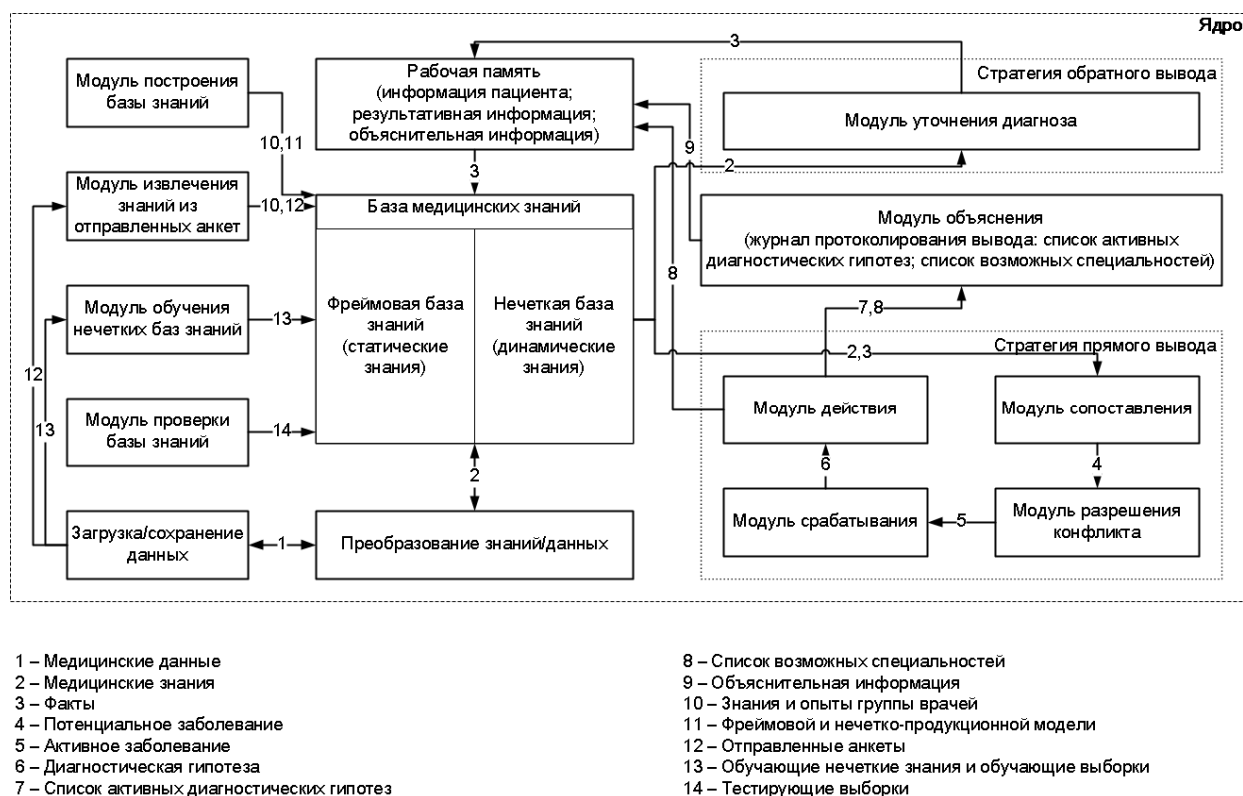


Рис. 6. Структурная схема ядра системы

Предложены извлечение знаний из отправленных анкет, обучение нечетких баз знаний и тестирование полноты и целостности базы знаний. Управление выводом диагностического решения основано на комбинации прямого и обратного выводов. При обратном выводе дополнительные факты проявления симптомов получают у пользователя-пациента, и сохраняются в рабочей памяти. В то время как прямой вывод позволяет вычислить на выходе количественные интегральные оценки каждого заболевания на основании поступающих в рабочую память симптомов. Для формирования стратегии прямого вывода рекомендовано использование быстрого алгоритма Rete. А также предложены модели объяснения результирующей информации, рабочей памяти и пользовательского интерфейса. Предполагается разделение архитектуры медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики на следующие уровни: уровень представления; уровень логики; уровень доступа к данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Искусственный интеллект. Базы знаний и экспертные системы: учеб. пособие / Дворянкин А.М., Кизим А.В., Жукова И.Г., Сипливая М.Б., ВолгГТУ. Волгоград, 2002. 140 с.
2. Джексон, Питер. Введение в экспертные системы. Пер. с англ.: уч. пос. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.
3. Джарратано, Джозеф, Райли, Гари Экспертные системы принципы разработки и программирование, 4-е издание. : Пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 1152 с.: ил. Парл. тит. англ.
4. Сошников, Д.В. Методы и средства построения распределенных интеллектуальных систем на основе продукционно-фреймового представления знаний: дис. . канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / Сошников Дмитрий Валерьевич. М., 2002. 190 с.
5. Концептуальная модель объекта диагностики в компьютерных системах медицинской диагностики / А.И. Поворознюк // Системи оброб. інформації. 2007. Вип. 9. С. 133-136. Библиогр.: 6 назв. рус.
6. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах: учеб. пособие. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 200 с: ил.
7. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования / Б. Лю, Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 416 с: ил. (Адаптивные и интеллектуальные системы)
8. Фоменков С.А. Математическое моделирование системных объектов: учеб. пособ.(гриф). Доп. УМО вузов по университетскому политехн. образованию / Фоменков С.А., Давыдов Д.А., Камаев В.А.; ВолгГТУ. Волгоград: РПК «Политехник», 2006. 180 с.

9. Катасёв А.С. Ахатова Ч.Ф. Нейронечеткая модель формирования баз знаний экспертных систем с генетическим алгоритмом обучения // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XII Межд. конференции. Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. С. 615-621.

10. Статические и динамические экспертные системы: учеб. пособие / Э.В. Попов, И.Б. Фоминных, Е.Б. Кисель, М.Д. Шапот. М.: Финансы и статистика, 1996.

Ле Нгуен Виен –
аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования», Волгоградского государственного технического университета

Vien N. Le –
Postgraduate
Department of CAD/CAE Systems,
Volograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК [378.147:004]:331.156

И.В. Сибикина, И.Ю. Квятковская, И.М. Космачёва

ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА ВУЗА НА ПРИМЕРЕ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ

Разработана процедура, позволяющая осуществлять оценку сформированности компетенций у студента в процессе обучения. Для решения этой задачи предложено построение интегрального критерия на основе аддитивного преобразования. Описана вычислительная процедура и представлены формулы для определения различных характеристик накопления компетенции с течением времени и, соответственно, потерь компетенции по сравнению с максимально возможным уровнем её формирования. Учтена возможность применения процедуры для различных балльно-рейтинговых систем, используемых в вузах.

Оценка компетенции, качество образования, управление учебным процессом, модель компетенции, интегральный критерий, значимость дисциплин

I.V. Sibikina, I.Yu. Kvyatkovskaya, I.M. Kosmacheva

ASSESSMENT OF THE COMPETENCE LEVEL OF A STUDENT USING THE GRAPH MODEL

The paper presents a procedure, which allows evaluating the competence of a student during the learning process. To solve the problem it is proposed to construct an integral criterion on the basis of additive transformations. The computational procedure was developed including the formulas to calculate the various types of competence accumulation over time, and consequently, competence losses compared to the maximum possible levels of its formation. The possibility for application of the procedures in various rating systems at higher schools was taken into account.

Assessment of competences, quality of education, educational administration, the competence model, an integral criterion, significance of disciplines

Введение. В настоящее время подготовка специалистов осуществляется по новым стандартам, основное требование которых – формирование у специалистов необходимого набора компетенций. Многие исследователи подтверждают эффективность компетентного подхода в системе высшего профессионального образования (ВПО) [1-15] и др. Компетентный подход в системе ВПО является одним из наиболее актуальных способов построения новой образовательной стратегии. Новая компетентная методология разработки федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования ФГОС ВПО разрабатывалась в

рамках Болонского процесса. С введением в систему российского образования новых ФГОС, основанных на формировании у студентов необходимого перечня компетенций, возник ряд вопросов, связанных с оценкой этих компетенций.

При этом формирование и комплексная оценка уровня компетенций студентов проводятся в вузах в форме аттестации [6], на базе балльно-рейтинговой системы [3], организации информационно-образовательной среды и проектирования, позволяющих выявлять и диагностировать личностный потенциал, интеллектуальные, профессиональные и творческие способности студентов [3, 7, 8], а также экспертного оценивания и самооценки на соответствие предъявляемым требованиям [3, 5, 9, 10, 13, 14]. Проводится оценка качества выпускаемых вузом специалистов с позиций системного и компетентного подходов [9], создаются соответствующие системы мониторинга за процессом формирования компетенций в вузе [3, 15, 16].

Согласно новым требованиям ФГОС ВПО России каждое высшее учебное заведение должно иметь адекватные средства для оценки компетенций, формирующихся у студентов в процессе обучения. Поэтому целью статьи является разработка процедуры определения уровня формирования компетенции студента на основе балльно-рейтинговой системы, традиционно используемой во многих вузах.

Постановка и анализ задачи. Компетенция студента в период обучения в вузе приобретает на основе изученных дисциплин. Дисциплины имеют различную степень значимости μ для компетенции, описываемую на базе энтропийного подхода [19] и выражаемую числовым значением. Кроме этого, степень изучения дисциплины студентом характеризуется интегральным баллом, который набрал студент по заданной дисциплине. Характеристикой степени изучения дисциплины может являться:

- 1) рейтинг, набранный студентом по заданной дисциплине;
- 2) результаты Интернет-экзамена, выявляющие усвоение дидактических единиц дисциплины;
- 3) результаты экзамена по дисциплине;
- 4) средний интегрированный балл по дисциплине;

Определение уровня формирования компетенции - это задача принятия решения, с фиксированным числом критериев, выраженных целевыми функциями. Поэтому процесс принятия решений можно свести к задаче векторной оптимизации.

Существует несколько методов решения задач многокритериальной оптимизации:

- выделения главного критерия;
- лексикографической оптимизации;
- свертывания векторного критерия в скалярный.

В методе выделения главного критерия лицо, принимающее решение, назначает один главный критерий, остальные выводятся в состав ограничений, т.е. указываются границы, в которых эти критерии могут находиться. Недостаток метода: нет смысла проводить глубокое системное исследование, если все критерии, кроме одного, не учитываются. Очевидно, что в решении задачи оценки компетенции этот метод является неприемлемым.

В методе лексикографической оптимизации предполагается, что критерии, составляющие векторный критерий B , могут быть упорядочены на основе отношения абсолютной предпочтительности. Этот метод является неприемлемым для решения задачи оценки компетенции, т.к. процесс упорядочения критериев, составляющих векторный, не представляется возможным из-за специфики задачи. Компетенция зависит от множества дисциплин, пренебрегать одной из них, а тем более выбирать одну и по ней осуществлять оценку компетенции невозможно из-за определения компетенции.

Основной трудностью этого подхода является построение функции f , называемой сверткой. Для ее преодоления необходимо решить четыре задачи:

1. Обоснование допустимости свертки.
2. Нормализация критериев для их сопоставления.
3. Учет приоритетов (важности) критериев.
4. Построение функции свертки, позволяющей решить задачу оптимизации.

Обоснование допустимости свертки требует подтверждения, что рассматриваемые показатели эффективности являются однородными. Известно, что показатели эффективности разделяются на три группы:

- показатели результативности;
- показатели ресурсоемкости;
- показатели оперативности;

В общем случае разрешается свертка показателей, входящих в обобщенный показатель для каждой группы отдельно. Свертка показателей из разных групп может привести к потере физического смысла такого критерия. В задаче оценки компетентности показателями эффективности являются

баллы, набранные студентом по дисциплинам, формирующим компетенцию. Эти баллы являются однородными, относятся к показателям результативности, следовательно, применение свёртки допустимо.

Учет приоритетов критериев осуществляется в большинстве методов свертывания заданием вектора коэффициентов важности критериев. Определение коэффициентов важности критериев, как и в случае с показателями, связано с серьезными трудностями и сводится к использованию формальных процедур, либо к применению экспертных оценок. В результате нормализации и учета приоритетов критериев образуется новая векторная оценка. Именно эта полученная векторная оценка подлежит преобразованию с использованием функции свертки.

Решение задачи. Ранее построена структура формирования компетенции в виде графа. При использовании энтропийного подхода разработана процедура определения степени влияния каждой дисциплины на формирование компетенции [17]. Вычисление этой характеристики основано на данных о степени влияния дисциплин на формирование компетенции, полученных от экспертов.

Выбор способа свертки зависит от характера показателей и целей оценивания системы. Известны несколько видов свертки. Наиболее часто используются аддитивная и мультипликативная свертка компонентов векторного критерия.

Аддитивная свертка компонентов векторного критерия состоит в представлении обобщенного скалярного критерия в виде суммы взвешенных нормированных частных критериев. *Мультипликативная свертка компонентов векторного критерия состоит* в представлении обобщенного скалярного критерия в виде произведения. Выбор между свертками определяется степенью важности абсолютных или относительных изменений значений частных критериев соответственно.

В задаче оценки компетенции целесообразно использовать аддитивную свёртку. Это обосновано тем, что характерным свойством аддитивной свертки является то, что максимальную оценку компетенции на ее основе получают выпускники, которые имеют больше критериев, близких по значениям к максимальным (при одинаковых средних у всех выпускников).

Пусть $B = (b_{D_1}, b_{D_2}, \dots, b_{D_n})$ – векторный критерий, баллы по всем дисциплинам формирующим компетенцию b_{D_i} – скалярный критерий, балл набранный студентом по дисциплине D_i ; μ_{D_i} – степень значимости дисциплины [20].

Для оценки компетенции в качестве обобщенного критерия берётся аддитивная свёртка, тогда математическая модель оценки уровня формирования компетенции запишется так:

$$\begin{cases} B_K = \sum_{i=1}^n \mu_{D_i} \cdot b_{D_i} \\ \sum_{i=1}^n \mu_{D_i} = 1 \\ \mu_{D_i} \in [0,1] \\ b_{D_i} \in [0,1] \end{cases} \quad (1)$$

где B_K – оценка компетенции K , μ_{D_i} – степень значимости дисциплины D_i , b_{D_i} – балл по дисциплине D_i согласно балльно-рейтинговой системе (БРС), действующей в вузе; a, b – минимальный и максимальный балл, соответственно; n – количество дисциплин, формирующих компетенцию.

Процедура вычисления уровня формирования компетенции определяет окончательный результат после изучения всех дисциплин, формирующих компетенцию. Однако в процессе формирования компетенции очень важным является мониторинг и прогнозирование возможной оценки компетенции на любом этапе обучения с последующей коррекцией его процесса.

Подробно процедура расчёта характеристик уровня компетенции в процессе её формирования изложена в [23]. Она состоит из следующих этапов:

- вычисление вклада каждой дисциплины в компетенцию;
- определение максимально возможной оценки компетенции в заданный момент времени (в баллах согласно БРС);
- вычисление текущей оценки компетенции в заданный момент времени (в баллах согласно БРС);
- расчёт максимально возможного вклада в компетенцию в заданный момент времени (в процентах);
- определение потерь компетенции в заданный момент времени (в процентах).

Покажем на примере определение характеристик уровня формирования компетенции на примере модели, представленной на рис. 1 [18, 19]. Наименьший балл согласно балльно-рейтинговой системе, используемой и приемлемый в вузе – 3, наибольший – 5.

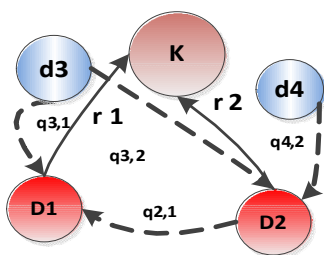


Рис. 1. Модель компетенции

Порядок изучения дисциплин, согласно графовой модели следующий: d4 и d3 → D2 → D1.

Весовые коэффициенты влияния этих дисциплин, баллы по дисциплинам и вклад каждой дисциплины в компетенции приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики дисциплин, формирующих компетенцию

Дисциплины	Весовые коэффициенты	Балл по дисциплине	Вклад каждой дисциплины в компетенцию
D_i	μ_{D_i}	b_{D_i}	$B_{K_{D_i}} = \mu_{D_i} \cdot b_{D_i}$
d4	0,21	4	1,05
d3	0,41	3	2,05
D2	0,32	4	1,6
D1	0,06	5	0,3

На диаграмме (рис. 2) можно видеть, что наибольший вклад в формирование компетенции при имеющихся баллах вносит дисциплина D2, наименьший дисциплина D1.

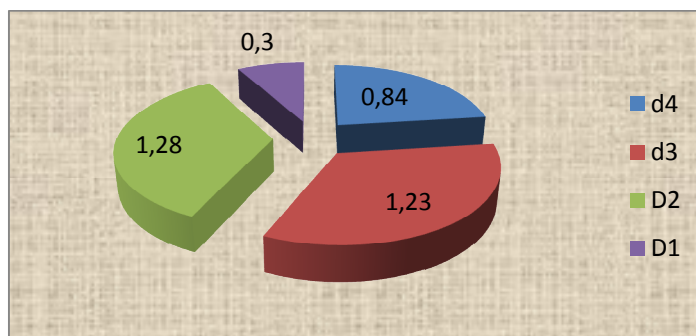


Рис. 2. Вклад дисциплин в компетенцию

Вычисляем максимально возможную, минимально возможную и текущую оценку накопления компетенции (табл. 2).

Таблица 2

Текущие характеристики накопления компетенции (в баллах)

Изученные дисциплины	$B_{K_{max}} = \sum_{i=1}^K B_{K_{max}D_i}$	$B_{K_{min}} = \sum_{i=1}^K B_{K_{min}D_i}$	$B_{K_{curr}} = \sum_{i=1}^K B_{K_{D_i}}$
d4	1,05	0,63	0,84
d4 и d3	3,1	1,86	2,07
d4, d3, D2	4,7	2,82	3,35
d4, d3, D2D1	5	3	3,65

На диаграмме (рис. 3) показано накопление компетенции после изучения каждой из дисциплин, формирующих компетенцию, в сравнении с минимально и максимально возможным накоплением.

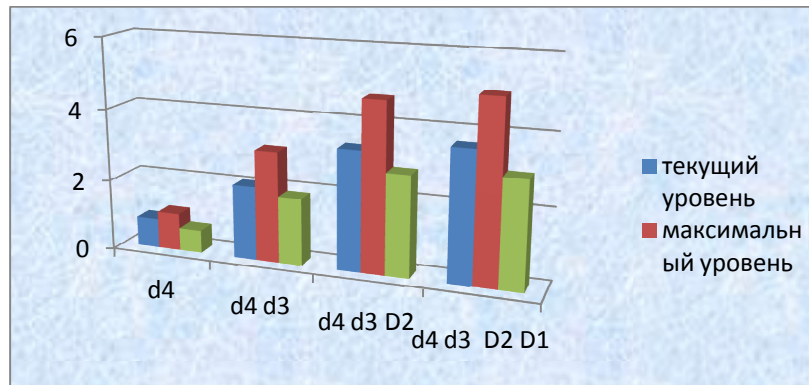


Рис. 3. Накопление компетенции

В различных БРС существуют, соответственно, разные шкалы для оценки уровня усвоения дисциплин, поэтому целесообразным представляется привести полученные значения к диапазону [0; 1], и получать процентное соотношение уровня формирования компетенции (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики накопления компетенции после изучения дисциплин

Изученные дисциплины	$I_{K_{max}} = \sum_{i=1}^K \mu_{D_i} \cdot 100\%$	$I_{K_{min}} = \frac{B_{K_{min}}}{B_{K_{max}}} \cdot 100\%$	$I_{K_{curr}} = \frac{B_{K_{curr}}}{B_{K_{max}}} \cdot 100\%$
d4	21%	12,6%	16,8%
d4 и d3	62%	37,2%	41,4%
d4, d3, D2	94%	56,4%	67%
d4, d3, D2, D1	100%	60%	73%

Потери компетенции после изучения каждой дисциплины по сравнению с максимально возможным уровнем приведены в табл. 4.

Таблица 4

Потери компетенции

Изученные дисциплины	$\delta_{K_{curr}} = I_{K_{max}} - I_{K_{curr}}$
d4	4,2%
d4 и d3	20,6%
d4, d3, D2	27%
d4, d3, D2, D1	27%

Выводы. Таким образом, для определения уровня сформированности компетенции на основе предложенной процедуры необходимо иметь модель компетенции, т.е. перечень всех дисциплин, её формирующих, вес влияния каждой дисциплины на формирование компетенции и баллы, набранные студентом по каждой из дисциплин. На основе предложенной процедуры предоставляется возможность определить текущий уровень сформированности компетенции и максимально возможный уровень на заданный период времени. Кроме этого, эта методика позволяет прогнозировать уровень сформированности компетенции, имея текущие результаты. Процедура вычисления уровня формирования компетенции универсальна, т.е. может применяться для любой балльно-рейтинговой системы, используемой в вузе.

Оценка потерь компетенции позволит организаторам процесса подготовки специалистов, а также профессорско-преподавательскому составу контролировать уровень состояния компетенции на текущий момент времени. Этот показатель необходим для осуществления мониторинга процесса подготовки специалистов и является элементом поддержки принятия решений в процессе управления формированием компетенции.

ЛИТЕРАТУРА

1. The Education and Training of Learning Technologists: A Competences Approach / Hartley R., Kinshuk Koper R., Okamoto T., & Spector J.M. // *Educational Technology & Society*. 2010. 13(2): 206–216.
2. Lystras M.D. Competencies Management: Integrating semantic web and technology enhanced learning approaches for effective knowledge management. *Journal of Knowledge Management*. 2008. 12(6): 1-5.
3. Новые методы математического моделирования динамики и управления формированием компетенций в процессе обучения в вузе: монография / Большаков А.А., Вешнева И.В., Мельников Л.А., Перова Л.Г. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 250 с.
4. Берестнева О.Г. Моделирование интеллектуальной компетентности студентов / О.Г. Берестнева // *Известия Томского политехнического университета*. 2005. Т. 308. № 2. С. 152–156.
5. Метод оценки профессиональных компетенций, основанный на лингвистическом подходе для системы управления вузом / Большаков А.А., Вешнева И.В., Мельников Л.А., Перова Л.Г. // *Системы управления и информационные технологии*. 2013. № 2.1 (52). С. 116-12.
6. Караваева Е.В. Принципы оценивания уровня освоения компетенций по образовательным программам ВПО в соответствии с требованиями ФГОС нового поколения / Е.В. Караваева, БВ.А. огословский, Д.В. Харитонов // *Вестник Челябинского государственного университета*. 2009. №18 *Философия. Социология. Культурология*. Вып. 12. С. 155-162.
7. Абакумова Н.Н. Компетентностный подход в образовании: организация и диагностика / Н.Н. Абакумова, И.Ю. Малкова. Томск: Томск. гос. ун-т, 2007. 368 с.
8. Соколова И.Ю. Создание творческой образовательной среды в предметной области знаний / И.Ю. Соколова, Г.П. Кабанов // *Вестник УМО по профессиональному образованию*: Вып. 1 (37). Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2005. с. 131-136.
9. Иванов Д.А. Компетентности и компетентностный подход в современном образовании / Д.А. Иванов. М.: Чистые пруды, 2007. 32 с.
10. Пугачева Е.Е. Формирование и оценка компетенций студентов-географов ТГПУ / Е.Е. Пугачева // *Вестник ТГПУ*. Томск, 2010. С. 63-65.
11. Соколова И. Ю. Качество подготовки специалистов в профессиональном образовании с позиций системного и компетентностного подходов / И. Ю. Соколова // *Вестник ТГПУ*. Томск, 2011. С. 162-168.
12. Вешнева И.В. Комплексные функции принадлежности для оценки предметных компетенций студентов вуза / И.В. Вешнева, А.А. Большаков, Л.А. Мельников // *Вестник СГТУ*. 2011. Т. 4. № 4. С. 200-207.
13. Применение теории нечетких множеств к задачам оценки и управления формированием компетенций: описание проблемы и подход к ее разрешению / А.А. Большаков, И.В. Вешнева, Л.А. Мельников, Л.Г. Перова // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 174-181.
14. Большаков А.А. Создание системы комбинированного управления формированием компетенций студентов технического вуза / А.А. Большаков, Л.Г. Перова // *Системы управления и информационные технологии*. 2012. Т. 49. № 3. С. 81-86.
15. Вешнева И.В. Построение интеллектуальной системы мониторинга процесса формирования компетенций студентов вуза / И.В. Вешнева, А.А. Большаков, Л.Г. Перова // *Системы управления и информационные технологии*. 2012. Т. 50. № 4. С. 19-23.
16. Квятковская И.Ю. Энтропийный подход в задаче определения системных характеристик модели компетенции / И.Ю. Квятковская, И.В. Сибикина // *Науч.-техн. ведомости СПбГПУ*. Сер.: Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. № 3. С. 89-93.
17. Kvyatkovskaya I.Yu. Procedure of the System Characteristics Competence Graph Model Calculation / I.Yu. Kvyatkovskaya, I.V. Sibikina and G.V. Berezhnov // *World Applied Sciences Journal (Information Technologies in Modern Industry, Education & Society)*. 2013. № 24. С. 111-116.
18. Сибикина И.В. Процедура оценки компетентности студентов вуза, обучающихся по направлению «Информационная безопасность» / И.В. Сибикина // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та*. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 1. С. 200-205.
19. Сибикина И.В. Построение лингвистических шкал в целях выявления важных дисциплин, формирующих компетенцию / И.В. Сибикина, И.Ю. Квятковская // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та*. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 182-186.

20. Сибикина И.В. Мониторинг качества подготовки выпускника вуза при осуществлении компетентностного подхода / И.В. Сибикина, И.М. Космачёва, Н.В. Давидюк // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 1. С. 208-214.

Сибикина Ирина Вячеславовна –
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Информационная безопасность»
Астраханского государственного
технического университета

Irina V. Sibikina –
Ph. D., Associate Professor
Department of Information Security,
Astrakhan State Technical University

Квятковская Ирина Юрьевна –
доктор технических наук, директор института
информационных технологий и коммуникаций
Астраханского государственного технического
университета

Irina Yu. Kvyatkovskaya –
Dr. Sc.,
Director: Institute of Information Technologies
and Communications,
Astrakhan State Technical University

Космачева Ирина Михайловна –
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Информационная безопасность» Астраханско-
го государственного технического университета

Irina M. Kosmachova –
Ph. D., Associate Professor
Department of Information Security,
Astrakhan State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК [004.383: 654.1.02.003.13]: [519.233.6: 519.816]

Фам Куанг Хиеп, И.Ю. Квятковская

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТОВ С НЕОДНОРОДНЫМИ ПРИЗНАКАМИ

Рассмотрена методика решения задачи многокритериальной оптимизации для оценки качества и ранжировки объектов в телекоммуникационных компаниях. Определены задачи выбора, альтернативами в которых являются состояния качества различных объектов в структуре управления телекоммуникационной компании. Предложенный подход может быть использован при разработке программ повышения эффективности управления деятельностью телекоммуникационных компаний.

Многокритериальная задача, ранжировка, предпочтение, эффективность, множество Парето, телекоммуникационная услуга

Pham Quang Hiep, I. Yu. Kvyatkovskaya

SOLVING MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEMS TO EVALUATE THE QUALITY OF OBJECTS WITH HETEROGENEOUS FEATURES

The paper discusses the methodology for solving the problem of multicriteria optimization for quality evaluation and ranking of objects in telecommunications companies. The authors define the tasks of choice alternatives, which are quality status of various objects in the management structure of telecommunication companies. The proposed approach could be used to develop programs enhancing efficiency of telecommunication companies.

Multicriteria problem, ranking, preference, efficiency, Pareto, telecommunication service

Введение

Оценка и ранжировка объектов крупных технических и народнохозяйственных проектов – одни из важных условий трудов повышения эффективности управления деятельности в любых компаниях. Однако наибольшая трудность анализа их заключается в необходимости решения задачи многокритериальной оптимизации для управления его характеристиками.

Существуют различные подходы к решению задач многокритериальной оптимизации, которые рассмотрены в работах Подиновского В.В, Ларичев О.И. и статьях российских ученых [1-9]. Большинство существующих подходов решения многокритериальных задач позволяют находить одно решение оптимальное по Парето при фиксированных параметрах метода. Актуальной задачей является разработка подходов к решению задачи многокритериальной оптимизации путем сужением множества Парето на основе количественной информации об относительной важности показателей.

Целью данной работы является разработка подходов к решению задачи многокритериальной оптимизации для оценки и ранжировки объектов при оценке деятельности телекоммуникационных компаний, характеризующихся неоднородными признаками, и определение наиболее предпочтительного объекта по заданным показателям.

Для этого определим объект как альтернативу в задаче многокритериального принятия решения. Все показатели, характеризующие различные стороны этого процесса, должны быть сведены в систему [6, 7]. Часть показателей отражает параметры работы технической системы, другая часть формируется посредством обработки данных, хранящихся в корпоративной информационной системе предприятия, остальные формируются экспертным путем, либо в результате опроса.

Положим, всего имеется n альтернатив (объектов), каждая из которых характеризуется значениями m показателей, причем в качестве показателей могут выступать как количественные, так и качественные показатели. Значение j -го показателя для выбора i -го объекта будем обозначать $k_{j,i}$, $j=\overline{1, m}$, $i=\overline{1, n}$. Исходные данные можно задать в следующем виде (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные для оценки

Альтернативы (Объекты)	Показатели					
	k_1	k_2	...	k_j	...	k_m
O_1	k_{11}	k_{12}	...	k_{1j}	...	k_{1m}
O_2	k_{21}	k_{22}	...	k_{2j}	...	k_{2m}
...
O_i	k_{i1}	k_{i2}	...	k_{ij}	...	k_{im}
...
O_n	k_{n1}	k_{n2}	...	k_{nj}	...	k_{nm}

На основе неоднородных данных результатов, полученных в процессе измерения параметров качества телекоммуникационных услуг, необходимо привести к единой шкале измерения и затем найти итоговое ранжирование объектов.

Значения показателей могут иметь различную важность для лица, принимающего решения (ЛПР) при выборе наилучшего объекта из множества объектов, поэтому введем α_j как критерий важности j -го показателя. В случае количественного измерения α_j показатель называется коэффициентом важности j -го показателя, а сумма всех коэффициентов показателей должна составлять 1.

Можно разделить существующие методы многокритериальной оптимизации на 2 группы. Первая группа включает задачи, в которых методы сводят многокритериальную задачу к однокритериальной путем сужения векторного показателя.

При этом многокритериальную задачу желательно свести к однокритериальной задаче, сформулировав единую цель при множестве показателей:

$$K_1 = \max \{k_1(x)\},$$

$$K_2 = \max \{k_2(x)\}$$

...

$$K_m = \max \{k_m(x)\}, \text{ при } x \in X, \text{ где:}$$

X – множество допустимых значений переменных x ;

m – число целевых функций(показателей);

K_j – значение j -го показателя (целевой функции).

По существу, многокритериальная задача отличается от обычной задачи оптимизации только наличием нескольких целевых функций вместо одной.

Решение этой задачи не даст наилучших значений для каждого показателя, так как зачастую улучшение другого вызывает ухудшение первого. Таким образом, при решении многокритериальной задачи получаем некоторое компромиссное решение [1, 2].

Информация о сравнительной важности показателей задается совокупностью сообщений ЛПР типа:

- показатель i важнее, чем показатель j ($i \succ j$);
- показатели i и j равноценны ($i \approx j$);
- набор показателей (i_1, \dots, i_l) важнее, чем набор (j_1, \dots, j_m) ;
- наборы показателей (i_1, \dots, i_l) и (j_1, \dots, j_m) равноценны по важности.

При поиске одной наиболее предпочтительной альтернативы необходимы дополнительные сведения о показателях или предпочтениях, которые смогли бы уменьшить множество Парето.

Альтернатива a_i , для которой не существует другой альтернативы a_k , лучшей по всем показателям одновременно, т.е. каждая из них превосходит любую другую по какому-то из показателей, называется номинируемой, или оптимальной по Парето. Множество всех таких альтернатив называется множеством Парето [3].

Полученная информация используется для сужения множества Парето (множество неулучшаемых или эффективных точек) следующим образом: пусть $x \in R_i^n$, x^{ij} получен из x перестановкой координат i и j . Тогда, если от ЛПР получено сообщение о равноценности показателей i и j ($i \approx j$), то варианты x и x^{ij} считаются эквивалентными ($x \sim x^{ij}$). Если же ЛПР считает, что показатель i важнее показателя j ($i \succ j$), то из двух вариантов более предпочтительным считается тот, у которого больше i -я координата. Так, если $x_i > x_j$, то x предпочтительнее, чем x^{ij} ($x \succ x^{ij}$).

Построенное на основании информации о важности показателей бинарное отношение предпочтения позволяет существенно сузить множество Парето. Так, если имеется информация о том, что все n показателей равноценны, то при большом числе сравниваемых вариантов это позволяет сузить Паретовское множество приблизительно в $n!$ раз [5].

Ниже дается детальное описание подхода к решению этой задачи.

Решение задачи с упорядоченными по важности однородными показателями [2]

При выборе наилучшего объекта (альтернативы) из множества всех объектов ОВЖ необходимо учитывать не один, а несколько показателей, $k_1, k_2, k_3, \dots, k_m$, образующих векторный показатель $K = (k_1, k_2, k_3, \dots, k_m)$. Рассматриваем задачу в условиях определенности и считаем, что по каждому показателю $k_j(u)$, $j=1, m$ желательно иметь возможно большее значение.

Вообще всякая многокритериальная задача формально может быть сведена к задаче с однородными показателями, если каждый исходный показатель k_j разделить на положительную величину той же размерности. Однородные показатели $k_1, k_2, k_3, \dots, k_m$, заданные на множестве объектов ОВЖ, называются равноценными, если для характеристики каждого объекта u достаточно перечислить в произвольном порядке m чисел $k_1(u), k_2(u), \dots, k_m(u)$ не указывая при этом, какое из них является значением того или иного показателя.

Считаем, что объект u не менее предпочтителен, чем объект v ($u \succsim v$), если векторная оценка $k(u)$ не хуже вектора $k(v)$ ($k(u) \geq k(v)$), т. е. если выполняются неравенства

$$k_j(u) \geq k_j(v), j=1, m. \quad (1)$$

Если среди неравенств (1) хотя бы одно строгое, то $k_j(u) > k_j(v)$, а объект u предпочтительнее объекта v ($u \succ v$). Если же все нестрогие неравенства (1) выполняются как равенства, то векторы $k(u)$ и $k(v)$ равны, а объекты эквивалентны ($u \sim v$).

Объект v называется эффективной альтернативой (или неподчиненной, недоминируемой, не худшей, оптимальной по Парето), если он не улучшаем по отношению \succ , т.е. если не существует объекта такого, что $u \succ v$.

Пример: Оценить 8 компаний (объектов) по 5 показателям: k_1 – время выполнения начального подключения потребителя к сети (день), k_2 – доля успешных вызовов потребителя (процент), k_3 – скорость установлений соединения (секунда), k_4 – качество передачи речи (балл), и k_5 – степень удовлетворенности (балл).

1. Ранжируем объекты по каждой строке, соответствующей одному из показателей. Каждый j -й показатель даст свой вектор предпочтений $k_j = (k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jn})$, $j = \overline{1, m}$, где k_{ji} – порядковый номер объекта, занимающего в ранжировании по j -му показателю i -е место.

В этом примере исходные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные показатели объектов

Альтернатив (O _i)	Показатели (k _j)				
	k ₁ ↓(день)	k ₂ (процент) ↑	k ₃ (секунда) ↓	k ₄ (балл) ↑	k ₅ (балл) ↑
O ₁	3	96	3	5	4
O ₂	6	90	2	4	3
O ₃	2	98	1	4	5
O ₄	4	95	4	5	3
O ₅	3	80	5	3	4
O ₆	5	98	4	4	5
O ₇	5	96	3	3	4
O ₈	3	93	2	5	4

2. Перейдем к единой порядковой шкале, определяя для каждого j -го столбца таблицы вектор предпочтений $\lambda_j = (\lambda_{j1}, \lambda_{j2}, \dots, \lambda_{jn})$, где $\lambda_{j,i}$ равно количеству объектов, по которому i -й элемент вектора k_j предпочтительнее остальных объектов этого вектора. Объединить полученные m ранжировок $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$. В матрицу Λ , где строки соответствуют экспертным оценкам каждого объекта $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и выражены рангами. Затем перейти матрицу Λ к матрице X : если значения элемента $\lambda_{j,i} = 1$ (в матрице Λ), то в векторе X полагаем $x_{j,i} = n - 1$, где n – количество объектов.

Для примера: приоритет каждого показателя определяем следующим образом (табл. 3).

Таблица 3

Матрица Λ – Приоритет каждого показателя по местам

Альтернативы (O _i)	Векторы предпочтений λ_j				
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
O ₁	2	2	2	1	2
O ₂	5	4	2	2	3
O ₃	1	1	1	2	1
O ₄	3	3	4	1	3
O ₅	2	6	5	3	2
O ₆	4	1	4	2	1
O ₇	4	2	3	3	2
O ₈	4	4	2	1	2

Матрица X - Приоритет каждого показателя по коэффициентам важности

Альтернативы (O _i)	Векторы предпочтений x_j				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
O ₁	6	6	6	7	6
O ₂	3	4	6	6	5
O ₃	7	7	7	6	7
O ₄	5	5	4	7	5
O ₅	6	2	3	5	6
O ₆	4	7	4	6	7
O ₇	4	6	5	5	6
O ₈	4	4	6	7	6

Следовательно, исходное множество объектов OBJ , сравниваемых по пяти показателям, имеет вид

$$\begin{aligned} O_1 &= (6, 6, 6, 7, 6); & O_5 &= (6, 2, 3, 5, 6); \\ O_2 &= (3, 4, 6, 6, 5); & O_6 &= (4, 7, 4, 6, 7); \\ O_3 &= (7, 7, 7, 6, 7); & O_7 &= (4, 6, 5, 5, 6); \\ O_4 &= (5, 5, 4, 7, 5); & O_8 &= (4, 4, 6, 7, 6); \end{aligned}$$

Упорядочим оценки:

$$\begin{aligned} \tilde{O}_1 &= (7, 6, 6, 6, 6); & \tilde{O}_5 &= (6, 6, 5, 3, 2) \\ \tilde{O}_2 &= (6, 6, 5, 4, 3); & \tilde{O}_6 &= (7, 7, 6, 4, 4); \\ \tilde{O}_3 &= (7, 7, 7, 7, 6); & \tilde{O}_7 &= (6, 6, 5, 5, 4); \\ \tilde{O}_4 &= (7, 5, 5, 5, 4); & \tilde{O}_8 &= (7, 6, 6, 4, 4); \end{aligned}$$

Недоминируемым по Парето оказался объект \tilde{O}_3 , следовательно, результат выбора – это объект O_3 .

На первое место в ранжировании OBJ помещается объект O_3 и он исключается из дальнейших рассмотрений.

Получаем подмножество OBJ₁, включающее 7 объектов: $\tilde{O}_2, \tilde{O}_4, \tilde{O}_5, \tilde{O}_6, \tilde{O}_7$ и \tilde{O}_8 тогда аналогично сравниваем эти объекты. Недоминируемыми по Парето оказались векторы \tilde{O}_1 и \tilde{O}_6 , следовательно, на второе место в ранжировании OBJ помещаются объекты O_1 и O_6 , и они исключаются из дальнейших рассмотрений.

Аналогично сравниваем и получаем порядок предпочтения оставшихся объектов $O_4 \sim O_7 \sim O_8 \succ O_2 \succ O_5$.

Таким образом, ранжировка OBJ имеет следующий вид:

$$OBJ = (O_3 \succ O_1 \sim O_6 \succ O_4 \sim O_7 \sim O_8 \succ O_2 \succ O_5)$$

Замечание

Достоинством этого метода является то, что сужение множества Парето происходит без ввода числовых аналогов важности показателей с использованием лишь качественной информации об их сравнительной важности. Однако метод может быть применен только в случае однородности показателей, т.е. показателей, значения которых принадлежат одному и тому же множеству.

Решение задачи лексикографическим методом [2, 4, 5]

Во многих случаях эффективным методом сведения многокритериальной задачи к однокритериальной является расстановка приоритетов показателей. В этом случае в многокритериальной задаче оптимизации на множестве допустимых решений задаются лексикографические отношения предпочтения: все показатели можно ранжировать (строго упорядочить) по важности так, что при последовательном рассмотрении показателей вначале используется первый показатель (наиболее важный с точки зрения ЛППР), затем второй и т.д. Для этого на первом этапе оптимизации определяют множество решений, которые оптимизируют цель наивысшего ранга. Множество допустимых значений, полученное на втором этапе, сужается при оптимизации второй по важности цели. И этот процесс продолжается до тех пор, пока не останется одно единственное решение.

Лексикографическое отношение предпочтения задается в виде

- объект u предпочтительнее объекта v (обозначается $u \succ v$), если выполняется одно из m условий:

1. $k_1(u) > k_1(v)$;
2. $k_1(u) = k_1(v), k_2(u) > k_2(v)$;
3. $k_1(u) = k_1(v), k_2(u) = k_2(v), k_3(u) > k_3(v)$;
- ...
- j. $k_1(u) = k_1(v), k_2(u) = k_2(v), \dots, k_{j-1}(u) = k_{j-1}(v), k_j(u) > k_j(v)$;
- ...
- m. $k_1(u) = k_1(v), k_2(u) = k_2(v), \dots, k_{m-1}(u) = k_{m-1}(v), k_m(u) > k_m(v)$;

- объекты u и v эквивалентны ($u \sim v$), если $k_1(u) = k_1(v), k_2(u) = k_2(v), \dots, k_{m-1}(u) = k_{m-1}(v), k_m(u) = k_m(v)$;

- объект u лексикографически не менее предпочтителен, чем объект v (обозначается $u \succ^L v$), если выполнено одно из приведенных выше $(m + 1)$ условий.

При сравнении любых двух объектов по рассматриваемому отношению предпочтения всегда выполняется одно из условий

$$u \sim v, u \succ v, u \prec v$$

Объект $u^* \in OBJ$ будет лексикографически оптимальным, если $u^* \succ^L v$ для любого допустимого объекта v . OBJ – множество всех объектов.

Для отыскания оптимальных объектов возможно решить такую последовательность задач:

1. найти $k_1(u^*) = \max_{u \in OBJ} k_1(u)$ в области $u \in OBJ$;
2. найти $k_2(u^*) = \max_{u \in OBJ} k_2(u)$ в области, задаваемой условиями $u \in OBJ; k_1(u^*) = k_1(u)$
- ...
- m. найти $k_m(u^*) = \max_{u \in OBJ} k_m(u)$ в области, задаваемой условиями $u \in OBJ; k_j(u^*) = k_j(u);$

$$j = \overline{1, m-1}$$

При решении лексикографической задачи оптимизации определяются оптимальные объекты. Так как все такие объекты эквивалентны, можно ограничиться отысканием не всего множества OBJ^* , а лишь одной оптимальной объекту. Каждый последующий частный показатель сужает множество объектов, получаемых с помощью всех предыдущих частных показателей:

$$OBJ_m^* \subseteq OBJ_{m-1}^* \subseteq \dots \subseteq OBJ_2^* \subseteq OBJ_1^* \subseteq OBJ; OBJ^* = OBJ_m^*$$

Пример. Задача об оценке степени удовлетворенности потребителей, использующих телекоммуникационные услуги пяти компании в 2014 году. Степень удовлетворенности оценивается по 4 показателям:

k_1 – степень удовлетворённости потребителей качеством обслуживания.

k_2 – степень удовлетворённости потребителей качеством информационного и материально-го обеспечения.

k_3 – степень удовлетворённости потребителей техническими параметрами качества услуги.

k_4 – степень удовлетворённости потребителей качеством технической поддержки телекоммуникационной услуги.

Каждый показатель оценивается по шкале от 5 до 1.

Исходные данные задачи представлены в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные для оценки

Альтернативы (O_i)	Показатели (k_j)			
	k_1	k_2	k_3	k_4
O_1	4	5	4	3
O_2	5	3	4	4
O_3	5	4	5	5
O_4	3	3	4	4
O_5	5	3	3	5
Коэффициент важности	0,1	0,2	0,4	0,3

В исходных данных показатели имеют общую порядковую шкалу измерения с градацией на «очень высокие», «высокие», «средние», «низкие» и «очень низкие» значения, которые для удобства оперирования заменены цифрами 5, 4, 3, 2 и 1 соответственно.

Приведем исходные данные к такому виду, в котором все показатели оценки были бы равноважны. Для этого используется процедура клонирования – удлинения векторной оценки. Для ее осуществления веса показателей необходимо умножить на такое натуральное число, которое бы преобразовало их в целые числа. В данном примере таким числом является 10. Следовательно, $W = \{0,1; 0,3; 0,4; 0,2\}$ преобразуется в $W^* = \{1; 3; 4; 2\}$

После этого значения по показателю вписываются в удлиненный вектор оценки соответствующее числу его важности раз. В рассматриваемом случае $O_1 (4, 5, 4, 3)$ преобразуется в $O_1^{W^*} = (4, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 3, 3)$;

$O_2 = (5, 3, 4, 4)$ преобразуется в $O_2^{w*} = (5, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 4, 4)$;

$O_3 = (5, 4, 5, 5)$ преобразуется в $O_3^{w*} = (5, 4, 4, 4, 5, 5, 5, 5, 5, 5)$;

$O_4 = (3, 3, 4, 4)$ преобразуется в $O_4^{w*} = (3, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 4, 4)$;

$O_5 = (5, 3, 3, 5)$ преобразуется в $O_5^{w*} = (5, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 5, 5)$;

Упорядочим оценки:

$\tilde{o}_1^{w*} = (5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 4, 3, 3)$; $\tilde{o}_4^{w*} = (4, 4, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3, 3)$;

$\tilde{o}_2^{w*} = (5, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3)$; $\tilde{o}_5^{w*} = (5, 5, 5, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)$;

$\tilde{o}_3^{w*} = (5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 4, 4, 4)$;

Полученные результаты позволяют на основе лексикографического сопоставления удлиненных векторов оценки получить следующие отношения: $O_3 \succ O_1 \succ O_2 \sim O_5 \succ O_4$.

Заключение

В статье описаны подходы к решению задачи оценки и ранжировки объектов в телекоммуникационных компаниях по многокритериальным выборам, что позволяет сравнить и оценить качество предоставления услуг между компаниями в целом, и телекоммуникационными компаниями в частности. Кроме того, такой подход может быть применен, например, для сравнения различных хозяйствующих субъектов, предоставляющих телекоммуникационные услуги: сотовых компаний и их филиалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подиновский В.В. Многокритериальные задачи с упорядоченными по важности критериями / В.В. Подиновский // Автоматика и телемеханика, 1976, № 11. С. 118-127/
2. Подиновский В.В. Оптимизация по последовательно применяемым критериям / В.В. Подиновский, В.М. Гаврилов. М.: Сов. радио, 1975. 192 с.
3. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в Волшебных Странах: учеб. / О.И. Ларичев. М.: Логос, 2002. 392 с.
4. Саранча М.А. Методика лексикографической оценки туристско-рекреационного потенциала территории с использованием географических информационных систем / М.А. Саранча // Вестник Удмуртского университета. Серия: биология. науки о земле. 2011. Вып. 3. С. 114-122.
5. Березовский Б.А. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты / Б.А. Березовский. М.: Наука, 1989. 128 с.
6. Квятковская И.Ю. Методика мониторинга и оценки качества телекоммуникационных услуг / И.Ю. Квятковская, Фам Куанг Хиеп // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2013. № 4 (24). С. 126-135.
7. Квятковская И. Ю. Система показателей оценки качества телекоммуникационных услуг и метод их оценки / И.Ю. Квятковская, Фам Куанг Хиеп // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 2. С. 98-103.
8. Квятковская И.Ю. Линейное расслоение классов альтернатив с использованием логической формы функции выбора / И.Ю. Квятковская // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2007. № 1. С. 116-119.
9. Полумордвинова А.О. Информационная система поиска оптимального управленческого решения / А.О. Полумордвинова, И.Ю. Квятковская // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2009. № 2. С. 61-64.

Квятковская Ирина Юрьевна – доктор технических наук, профессор, директор института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

Irina Yu. Kvyatkovskaya – Dr. Sc., Professor
Director: Institute of Information Technologies and Communications,
Astrakhan State Technical University

Фам Куанг Хиеп – аспирант кафедры «Прикладная информатика

Pham Quang Hiep – Postgraduate

УДК 681.5

О.С. Шумарова, С.А. Игнатьев, Е.М. Самойлова

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ
КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

Рассматривается автоматизированная обработка данных вихретокового контроля поверхности колец подшипников на основе вейвлет-анализа в системе мониторинга.

Вейвлет, мониторинг, вихретоковый контроль, локальный дефект

O.S. Shumarova, S.A. Ignatyev, E.M. Samoylova

**AUTOMATED DATA PROCESSING OF EDDY CURRENT TESTING
FOR BEARING RINGS USING WAVELET TRANSFORMS**

The article discusses automated data processing of eddy current for surface inspection of the bearing based on wavelet analysis in a monitoring system.

Wavelet, monitoring, eddy current testing, a local defect

Анализ данных вихретокового контроля в системе мониторинга требует от специалиста высокой квалификации и опыта работы с конкретным прибором. Из-за особенностей субъективного восприятия информации может значительно снижаться точность результатов контроля. В связи с этим при организации мониторинга необходимо стремиться минимизировать влияние человеческого фактора, обеспечив эффективность контроля за счет разработки и применения автоматизированных методов распознавания дефектов поверхностного слоя деталей подшипников путем внедрения специализированного программного обеспечения (ПО) [1].

С целью распознавания дефектов разработано ПО с графическим интерфейсом, позволяющее анализировать дискретные данные, полученные с вихретокового датчика, отображая итоговые и промежуточные результаты на экране. Предлагаемый программный продукт является исследовательским и при некоторой доработке под конкретные технологические процессы подлежит практическому внедрению.

Для определения дефектов поверхностного слоя деталей ПО должно решать следующие задачи: выбрать файл данных, содержащий информацию сигнала вихретокового преобразователя о поверхностном слое текущей детали; считать с выбранного файла данные сигнала, определить структуру по поверхностям и каналам; фильтрация сигнала; дискретное вейвлет-преобразование; определение координат дефекта по среднеквадратическому отклонению значений детализирующих коэффициентов [2].

Все рассмотренные способы визуального представления вейвлет-коэффициентов содержат один общий недостаток – коэффициенты необходимо дополнительно обработать, чтобы вывести на экран, а это отнимает лишние ресурсы. Такое отображение совсем не способствует автоматическому выявлению дефекта, поэтому выбор остановлен на построении графика коэффициентов детализации в декартовых координатах и обнаружение дефекта с помощью среднеквадратического отклонения [3, 4].

Вейвлет-спектр анализируемого дефекта при его разложении вейвлетом Добеши 3 порядка приведен на рис. 1. Для распознавания дефекта в сигнале необходимо его точное отображение вейвлетом на определенном уровне разложения.

Из рис. 1 видно, что на уровне разложения 2 отображаются мелкие детали сигнала, не соответствующие общему виду дефекта. При $N = 4$ дефект искажается по амплитуде и частоте. Вейвлет при $N = 3$ наилучшим образом повторяет дефект. Разложение отфильтрованного сигнала и вейвлет-коэффициенты приводятся на рис. 2.

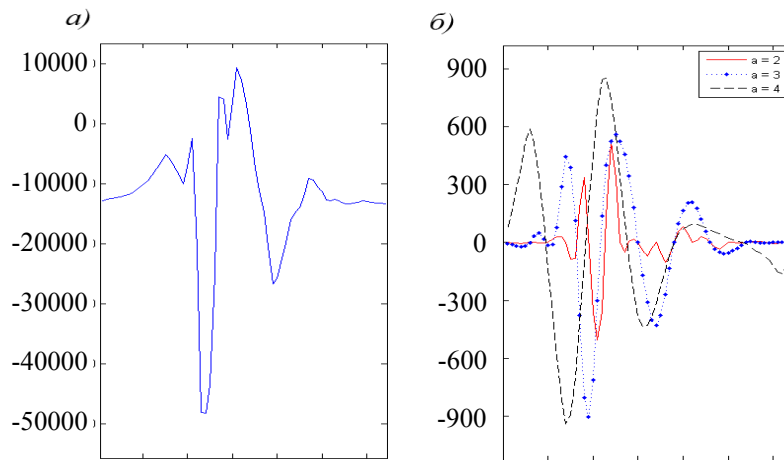


Рис. 1. Сигнал дефекта поверхностного слоя детали (а), коэффициенты детализации 2, 3, 4 уровня разложения (б)

По графику детализирующих коэффициентов в сигнале выделяются пять дефектов с разными отклонениями. Три из которых слабо проявляются, а остальные два характеризуются наибольшими амплитудами. Нас интересует дефект с максимальным отклонением от сигнала (рис. 3) [3, 5].

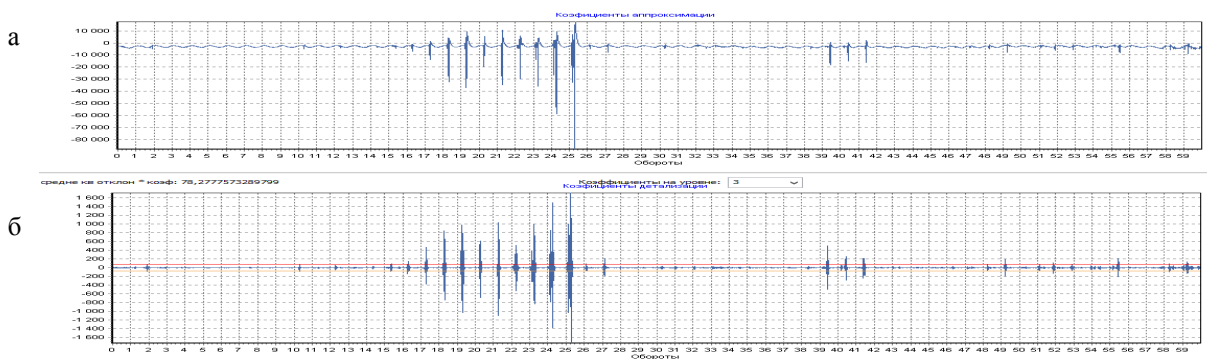


Рис. 2. Вейвлет-разложение отфильтрованного сигнала, где а – отфильтрованный сигнал; б – вейвлет коэффициенты 3 уровня

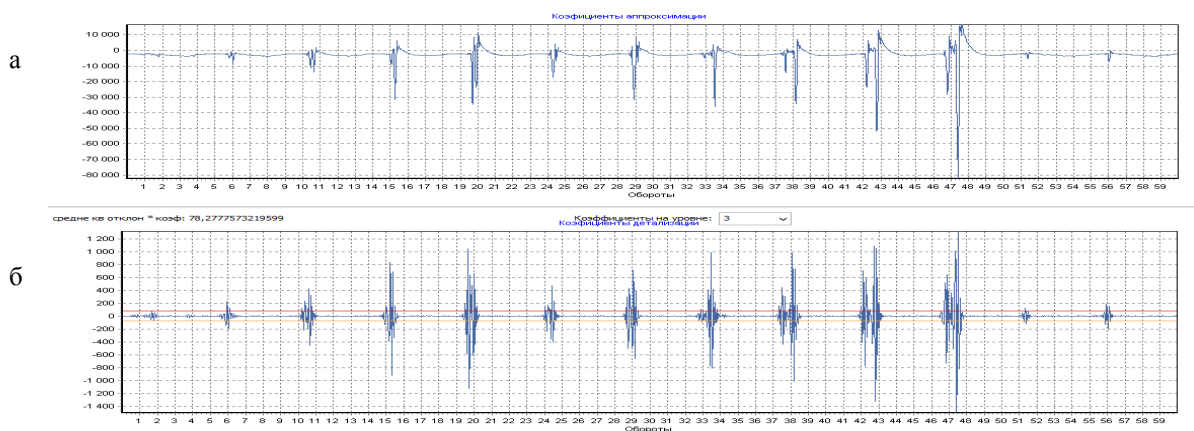


Рис. 3. Выделение дефекта из сигнала, где а – сигнал дефекта; б – коэффициенты детализации дефекта

Текстовый файл сигнала должен соответствовать образцу: «...Поверхность № Канал № 1 2 3 4 5... массив данных из целых чисел размера $m \times n$. Поверхность № Канал № ...», где число строк m является количеством отсчетов сигнала, полученного с вихретокового датчика при его движении по

поверхности детали в течение одного оборота, а n равно количеству оборотов. После открытия файла с сигналом программа заполняет выпадающее меню «Поверхность» найденными в файле названиями поверхности и канала. После загрузки всех данных автоматически выбирается первая поверхность из списка и строится график исходного сигнала (рис. 4).

Имеется возможность просмотра сигнала по оборотам – для этого необходимо установить флаг «Обороты отдельно». После установки флага появятся кнопки управления номером оборота и поле ввода/вывода с номером текущего оборота (рис. 5).

Исходный сигнал содержит шум, для его устранения необходимо нажать на кнопку «Убрать шум». После этого запустится процедура удаления шума из сигнала и график примет вид, показанный на рис. 6.

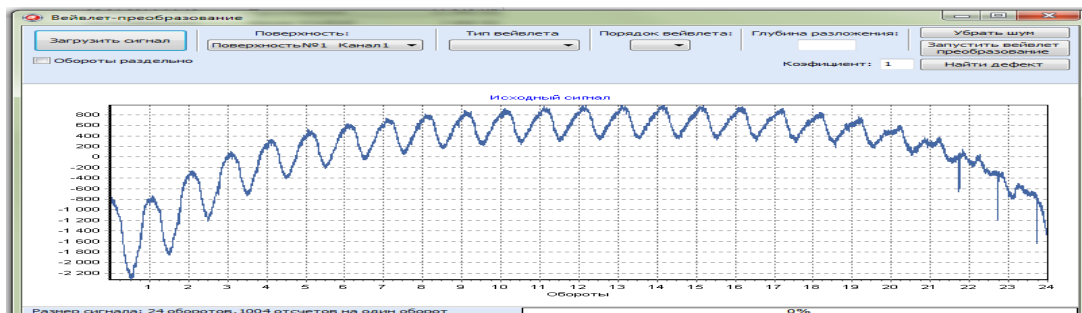


Рис. 4. Главное окно программы после загрузки файла с сигналом

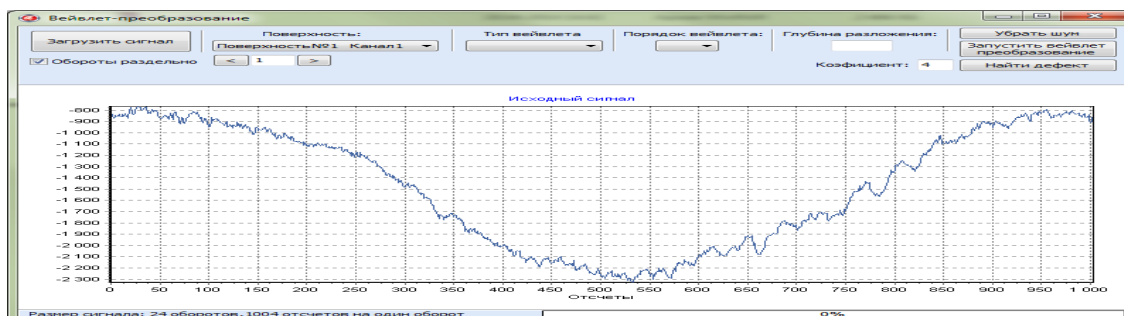


Рис. 5. Просмотр графика исходного сигнала по оборотам

Программа имеет возможность автоматического нахождения дефекта с указанием коэффициента «загрубления». Коэффициент «загрубления» необходим для исключения ложных срабатываний. При нажатии на кнопку «Найти дефект» программа автоматически перебирает типы вейвлетов, очищает сигнал от шума с помощью выбранного вейвлета, делает вейвлет-анализ, рассчитывает среднеквадратическое отклонение и ищет значения сигнала выходящие за пределы среднеквадратического отклонения умноженного на коэффициент «загрубления». Затем рассчитывается отношение дефект/шум. Процедура повторяется по всем вейвлетам и значения отношений сравниваются, вейвлет, получивший максимальное значение отношения признается оптимальным для данного сигнала.

Далее поиск дефекта ведется по оптимальному вейвлету, в конце поиска выдается результат (рис. 7). На главном окне появляется панель управления просмотром выявленных дефектов. Для просмотра дефектов нужно установить переключатель в положение «Только дефекты». Выбор номера дефекта производится кнопками, отображение номера текущего дефекта производится в поле ввода/вывода напротив переключателя (рис. 8).

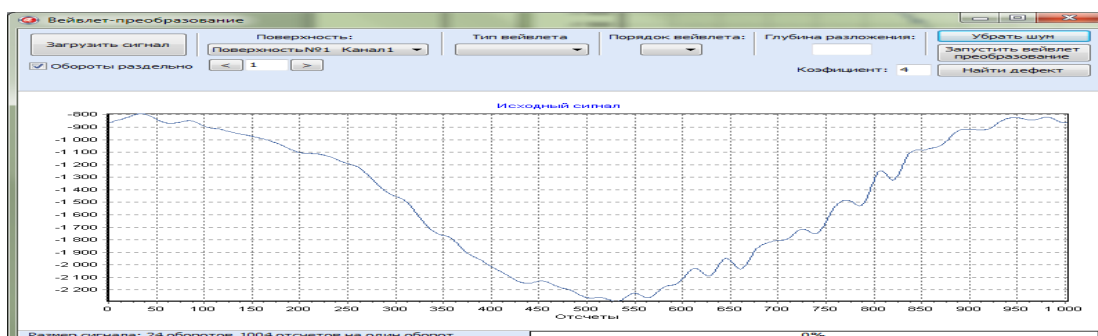


Рис. 6. График сигнала очищенного от шума за оборот

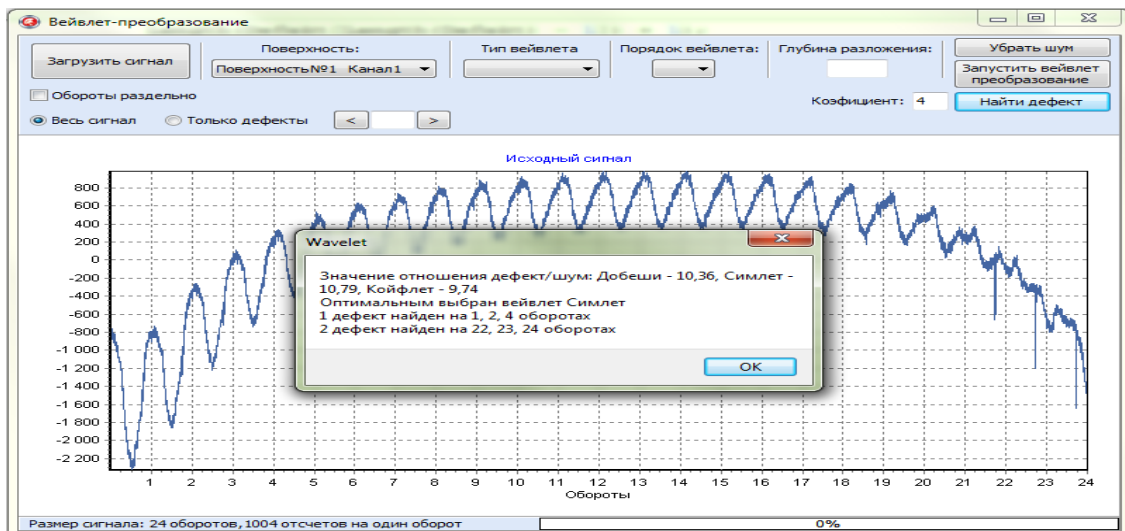


Рис. 7. Результат поиска дефекта в сигнале

Просмотреть график коэффициентов детализации возможно, если нажать на кнопку «Запустить вейвлет-преобразование». В результате откроется вспомогательное окно с графиками коэффициентов аппроксимации и детализации.

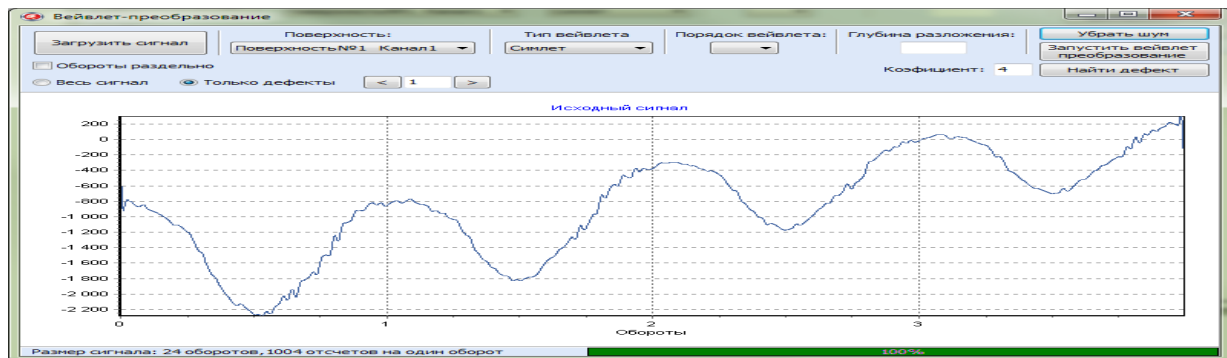


Рис. 8. График первого дефекта в сигнале

Автоматизированная обработка данных о качестве поверхностного слоя деталей подшипников при организации мониторинга позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, обеспечивая эффективность контроля, что позволит снизить или практически исключить брак и обеспечить конкурентное преимущество в борьбе за потребителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А.А. Игнатъев, М.В. Виноградов, В.В. Горбунов и др. Саратов: СГТУ, 2004. 124 с.
2. Игнатъев А.А. Анализ неоднородностей поверхностного слоя деталей подшипников с использованием интеллектуальных технологий / А.А. Игнатъев, Е.М. Самойлова // Вестник СГТУ. 2014. № 74. С. 80-84.
3. Goswami J.C. Fundamentals of Wavelets: theory, algorithms, and applications / Jaideva C. Goswami, Andrew K. Chan.. A Wiley-Interscience Publication, 1999. 306 p.
4. Дорофеев А.Л. Электромагнитная дефектоскопия / А.Л. Дорофеев, Ю.Г. Казаманов. М.: Машиностроение, 1980. 280 с.
5. Игнатъев А.А. Автоматизация распознавания дефектов шлифованных деталей в системе мониторинга технологического процесса производства подшипников / А.А. Игнатъев, А.Р. Бахтеев // Вестник СГТУ. 2006. № 3 (14). Вып. 1. С. 136-142.

Шумарова Ольга Сергеевна – аспирант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga S. Shumarova – Postgraduate Department of Automation, Management, Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Игнатъев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Stanislav A. Ignatyev – Dr. Sc., Professor
Department of Automation, Management and Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Елена Михайловна Самойлова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena M. Samoylova – Ph. D., Associate Professor
Department of Automation, Management, Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.05.14, принята к опубликованию 16.06.14

УДК 620.179.162

С.С. Щеголев, А.Г. Мотков, В.В. Погораздов, М.Ю. Захарченко

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ДЕФЕКТΟΣКОПИИ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ

Рассматривается вопрос автоматизации распознавания дефектов в кольцах подшипников с использованием ультразвукового дефектоскопа УД2-12, подключенного к ПК. Обработка данных происходит на ПК с использованием разработанного ПО, описывается алгоритм работы.

Кольцо подшипника, размер дефекта, положение дефекта, автоматизация метода, ультразвуковой дефектоскоп, компьютерная обработка

S.S. Shchegolev, A.G. Motkov, V.V. Pogorazdov

AN ALGORITHM FOR AUTOMATION OF ULTRASONIC FLAW DETECTION OF BEARING RINGS

The paper considers the issue of automated recognition of defects in the bearing rings using the ultrasonic flaw detector UD2-12 connected to the PC. Data processing is done using the PC and the developed SOFTWARE. The authors describe the algorithm of the operation.

Ring of the bearing, size of the defect, defect position, automation method ultrasonic flaw, computer processing

Автоматический поиск дефектов в любой области промышленности позволяет существенно упростить работу специалистов, уменьшить денежные и временные затраты на процесс обнаружения неоднородностей. В частности, актуальным является рассмотрение вопроса дефектоскопии деталей подшипниковой промышленности. Результатом такого поиска является заключение о разбраковке детали или ее дальнейшем использовании.

Вопросы, связанные с дефектоскопией изделий методами неразрушающего контроля, являются приоритетными и рассматриваются в различной литературе [1]. Перспективными считаются 2 метода обнаружения дефектов: ультразвуковой и виброакустический. Основные результаты их использования были рассмотрены в работах российских [2-4] и зарубежных авторов [5]. При этом не рассматривался вопрос автоматизации методов.

В связи с возникшей задачей автоматизации обнаружения дефектов в кольцах подшипников было разработано специализированное программное обеспечение, необходимое для анализа данных, полученных в результате проверки колец. Предложенное решение возможно применять на ремонтных предприятиях, занимающихся восстановлением колец.

На первом этапе происходит загрузка данных, полученных с дефектоскопа УД2-12 при автоматическом вращении кольца подшипника с постоянной скоростью за счет применяемого в системе шагового двигателя. УД2-12 предназначен для поиска дефектов в различных деталях и изделиях, в частности кольцах подшипников. За счет использования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) происходит запись в массив для обработки на персональном компьютере (ПК). Данные представляют собой последовательность ординат графика, отображаемого на экране осциллографа, записанную через равные промежутки времени. Время записи двух последующих импульсов выставляется программно и ограничено рабочей частотой АЦП. В данном случае, частота равна 500 кГц, откуда период времени T , прошедший между записью двух значений, составит 2 мкс.

В полученном массиве присутствует незначимая информация, замедляющая его обработку. Для ее удаления производится выборка из массива положительных значений ординат.

Ордината зондирующего импульса составляет 160 единиц, но на графике и в массиве она находится в промежутке от 155 до 160 единиц. Это объясняется недостаточной частотой опроса для точной фиксации именно в точке 160 единиц. При этом координата у отраженного импульса даже на дефектах больших размеров (до 4 мм в диаметре поперечного сечения) не превышает 100 единиц. Для определения номеров позиций массива, на которых фиксируются зондирующие импульсы, проводится дополнительная выборка значений, больших 150 единиц.

Следующим шагом является определение номера позиции элемента массива, в котором хранится запись числа, большего 150. Если имеется несколько подряд идущих значений номеров позиций, то производится поиск позиции, в которой хранится максимальное значение ординаты путем сравнения их между собой. Эта позиция будет содержать максимальное значение зондирующего импульса. Определение позиции максимума зондирующего импульса необходимо для последующего поиска отраженного импульса.

Отраженный импульс может находиться в пределах следующих N позиций относительно определенной позиции зондирующего импульса. Число N зависит от толщины исследуемого образца и скорости распространения продольной волны в образце. В программу уже занесено значение скорости распространения волны в стали марки ШХ4.

Для автоматизации процесса выявления дефектов необходимо обеспечить равномерное вращение кольца. Это достигается использованием шагового двигателя или электродвигателя малой мощности с редуктором для понижения количества оборотов в минуту. При задании определенного времени полного оборота кольца и выбрав точку отсчета, по графику определяется момент времени обнаружения дефекта (на графике фиксируется увеличение амплитуды). Исходя из этих данных, вычисляется расстояние, пройденное датчиком от точки отсчета до фиксации дефекта. Как следствие, указывается координата обнаруженного дефекта непосредственно на кольце.

Проводится поиск локальных максимумов в промежутке позиций со значениями, начиная от номера позиции зондирующего импульса с прибавленным промежутком, за который этот импульс достигает значения, близкого к нулю (это необходимо для исключения фиксации самого зондирующего импульса), заканчивая номером позиции, равным номеру позиции зондирующего импульса с прибавленным к нему числом N . Все значения локальных максимумов заносятся в новый массив. По значениям ординат, занесенным в массив, можно однозначно судить о наличии дефекта.

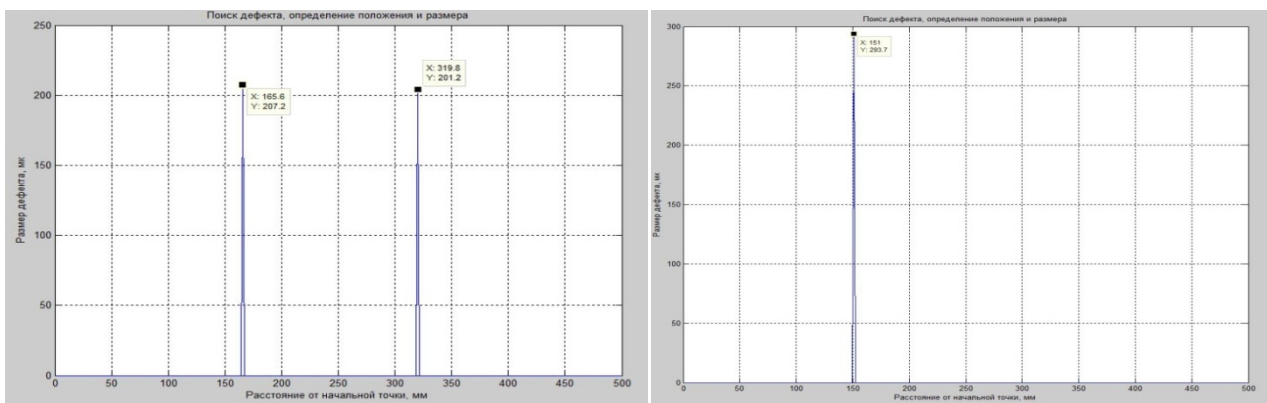


Рис. 1. Графики, характеризующие наличие, положение (166 мм и 320 мм от точки начала сканирования) и размер дефекта (207 мкм и 201 мкм соответственно) в процессе поиска дефектов в материале кольца подшипника

В программе имеется возможность построения графиков, на которых дефект показан с привязкой к моменту его обнаружения. По оси абсцисс таких графиков возможен отсчет значения либо в соответствии с выбранной нулевой координатой, либо с моментом начала поиска дефектов.

После определения координаты дефекта производится определение глубины его залегания в материале кольца. Только зная глубину, можно однозначно указать, является ли это кольцо ремонтно-пригодным или бракуется.

За период времени T зондирующий импульс, пущенный в исследуемый материал, дойдет до дефекта и отразится от него. Впоследствии будет принят пьезоэлектрическим преобразователем, о чем свидетельствует соответствующий импульс, появившийся на осциллографе. Зная время прохождения, производится расчет глубины залегания дефекта.

В результате проведенной автоматизации процесса дефектоскопии колец подшипников, возможна локализация дефекта с определением его размера, координат и глубины залегания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика / В.В. Ключев. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Криворудченко В.Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта / Р.А. Ахмеджанов, В.Ф. Криворудченко. М.: Маршрут, 2005. 436 с.
3. Щеголев С.С. Оценка состояния колец подшипников с применением ультразвукового и акустического методов / С.С. Щеголев, А.Г. Мотков, А.А. Игнатьев // Вестник СГТУ. 2013. № 4 (73). С. 132-135.
4. Щеголев С.С. Экспериментальное обнаружение неоднородностей в строении внешнего кольца подшипника качения колесной пары вагона / С.С. Щеголев, А.Г. Мотков, В.В. Погораздов // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2012. С. 202-207.
5. Drury J.C. Ultrasonic Flaw detection For Technicians / J.C. Drury. 3rd ed., Imex Gr., 2004.

Щеголев Сергей Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey S. Shchegolev – Postgraduate
Department of Automation, Control and Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Мотков Александр Геннадьевич – аспирант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexandre G. Motkov – Postgraduate
Department of Automation, Control and Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Погораздов Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valeriy V. Pogorazdov – Dr. Sc., Professor
Department of Designing Technical and Technological Complexes,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Захарченко Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail Yu. Zakharchenko – Ph. D., Associate Professor
Department of Automation, Control and Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 16.06.14

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.021

А.В. Будыльский, И.Ю. Квятковская

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА КРИТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ РАСПИСАНИЯ С УЧЕТОМ РИСКОВ

Предлагается модификация метода критической цепи при составлении расписания с учетом рисков. Модифицированная методика использует нечеткие множества для расчета временных резервов, закладываемых на покрытие рисков. Объяснена критичность правильного учета рисков для успеха всего проекта. Описаны основные для планирования понятия: риск и управление рисками. Приведена классификация рисков. Приведено краткое описание методики критической цепи. Объяснена актуальность применения нечетких множеств при задании временных оценок длительности задач. В основе измененного алгоритма расчета буферов критической цепи используется понятие «индекс соответствия». Приведен пример решения задачи составления расписания.

Проект, составление расписания, риски, критическая цепь, нечеткие множества, буфер проекта, буфер слияние путей

A.V. Budylskiy, I.Yu. Kvyatkovskaya

MODIFICATION OF THE CRITICAL CHAIN METHOD FOR SCHEDULING UNDER RISKS

The article considers modification of the critical chain method for scheduling under risks. The modified method uses fuzzy sets to calculate the time reservation taking into account the risks. We explain the criticality of correct risk consideration needed for the project success. The work describes the main project entities: risks and risk management. The paper includes classification of risks. The article contains a list of choices for solving the problem. The work contains the brief definition of the critical chain method. We explain the main advantages of using the fuzzy sets approach for tasks estimation. The agreement index is used to calculate buffers of the critical chain. The article includes the example.

Project, project scheduling, risks, critical chain, fuzzy sets, project buffer, feeding buffer

Введение

В настоящее время существует тенденция роста сложности объектов автоматизации предприятий различных сфер деятельности. Это обусловлено тем, что заказчики предъявляют все более специфичные требования к системам для удовлетворения потребностей предприятия. При разработке различных программных систем необходимо уменьшить или свести к минимуму риск неуспешного завершения проекта.

Известно, что большинство проектов по разработке информационных систем сегодня не завершаются в срок, превышают бюджет или сдаются с недостаточной функциональностью для того, чтобы системой можно было пользоваться. Согласно отчету Chaos о положении дел в разработке IT проектов, выполненному компанией Standish Group [1], каждый пятый проект заканчивается неудачно, каждый второй не укладывается в срок, либо выполняется с худшим качеством, либо неполным функционалом.

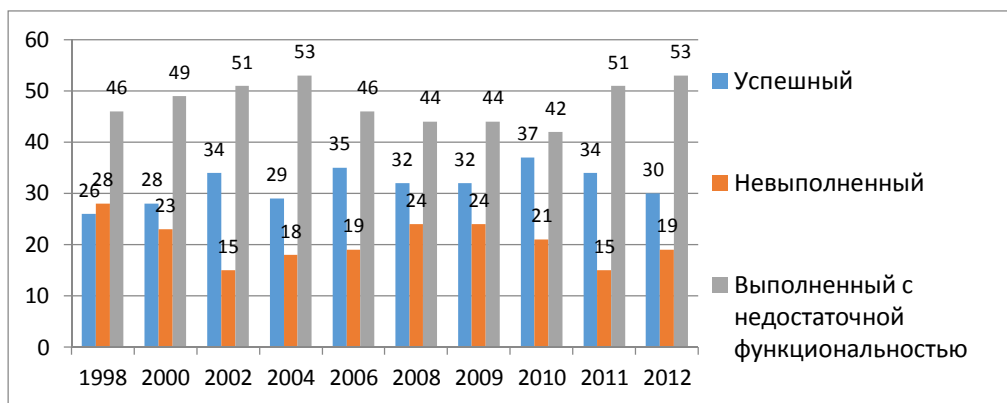


Рис. 1. Характеристика успешности выполнения IT-проектов

Одной из причин сложившейся ситуации является слабый учет рисков при планировании длительности. Так, менеджеры проектов не всегда правильно закладывают и используют подстраховку в длительности задач.

Сегодня уже существует множество работ по учету рисков при оценке задач [2, 3], однако в условиях постоянного роста сложности проекта целесообразно искать новые методы решения проблем, в том числе модифицируя существующие методы, к примеру Метод критической цепи, предложенный Голдраттом [4].

Целью настоящей работы является учет неопределенности при оценке длительности задач при календарном планировании с использованием модифицированного метода критической цепи.

Риски и управление рисками

Согласно [5], риск – это проблема, которая еще не возникла, а проблема – это риск, который уже материализовался. По сути, риск – это то, что может повлиять на проект, а может и не повлиять.

Управление рисками – процесс продумывания корректирующих действий прежде чем возникнет проблема. Управление рисками входит в одну из областей знаний PMBOK [6]. При управлении рисками выделяют пять основных составляющих:

1. Идентификация риска.
2. Анализ воздействия риска: Количественная оценка риска на проект (вероятность наступления и потенциальный ущерб для проекта)
3. Планирование реагирования на риск: Выработка мер по противодействию материализованному риску.
4. Ослабление риска: предварительные действия до наступления риска, направленные на то, чтобы при возникновении риска был выбор дальнейших действий, а также на уменьшение потенциального ущерба и вероятности наступления риска.
5. Мониторинг и управление рисками: отслеживание и выявление материализованных рисков.

Первый шаг является общим для всех, остальные – описываются для каждого риска в отдельности. Обычно выделяют следующие риски [5]:

- некачественное календарное планирование.
- раздувание требований.
- текучесть кадров.
- нарушение спецификаций.
- низкая производительность.

Основным, первичным по отношению к остальным и наиболее часто встречающимся риском является «Некачественное календарное планирование» [5]. Менеджеры проектов могут допускать различные ошибки при планировании, это и неправильное суждение о размерах продукта, неучет использования новых технологий, привлечение нестабильных в производительности разработчиков и агрессивные сроки, переоценка тоже является ошибкой, поскольку здесь имеет место раздувание длительности проекта.

В данной работе будет рассмотрен данный риск, а также меры по его ослаблению.

Метод критической цепи

Настоящим прорывом по управлению с рисками в управлении проектами являлся метод критической цепи, предложенный И. Голдраттом. Данный метод основан на теории ограничений [7], а также законах статистики [8]. В своей работе Голдратт показал, что для борьбы с рисками в проекте, необязательно закладывать подстраховку в каждую задачу, ее необходимо закладывать в сам проект. Для этих целей Голдратт использует буферы:

- Проектный буфер (БП).

– Буфер слияния путей (БСП).

Для всего проекта запас времени называется буфером проекта, он помещается в конец проекта. Для слияния не критических цепей с критической – буфер слияния путей. Для расчета размеров буферов необходимо иметь статистические данные распределения длительности каждой задачи.

Здесь выделяют следующие виды оценок:

- ЕО – минимально возможное время исполнения задачи (оптимистическая оценка);
- ЕМ – наиболее вероятная оценка;
- ЕР – пессимистическая оценка вероятности (все риски реализовались);
- ЕА – оценка с вероятностью исполнения задачи в 50%.

Размер буфера цепочки задач определяется на основании правила суммирования отклонений:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2} \quad (1)$$

где: $s_i = E_M - E_A$; i – номер задачи.

В плане буфер указывается как очередная операция, но не имеющая содержания.

Единственная трудность при использовании данного метода является возможное отсутствие вероятностной оценки задач, вызванной уникальностью проекта, его спецификой, сложностью конкретной задачи, неуверенностью в разработчике и в новой технологии. В этом случае прибегают к использованию оценок по времени экспертов, а также применения нечетких множеств [9, 10, 11]. Нечеткие множества удобны для представления таких оценок, как приблизительно 8 дней, около 6 дней, не более 10 дней, не менее 3 дней.

Предлагаемое решение

Согласно [12], нечетким множеством A на некотором непустом пространстве X , что обозначается как $A \subseteq X$, называется множество пар: $A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\}$, где: $\mu_A : X \rightarrow [0; 1]$.

Особой разновидностью нечетких множеств являются нечеткие числа. Нечеткие числа – нечеткие множества, которые обладают двумя свойствами нормальностью (существуют такие элементы множества, у которых функция принадлежности равна 1) и выпуклостью. Одним из наиболее распространенных видов нечетких чисел является трапецевидное нечеткое число. Оно представляется в виде четверки (a, b, c, d) , где a и d задают границы значения переменной, функция принадлежности a и d равно 0, b и c задают интервал значений, где функция принадлежности принимает значение 1.

Для описания длительности задачи можно использовать трапецевидное нечеткое число, которое характеризуется четырьмя параметрами (a, b, c, d) (рис. 2). При этом для данных параметров выполняется условие

$$0 \leq a \leq b \leq c \leq d \quad (2)$$

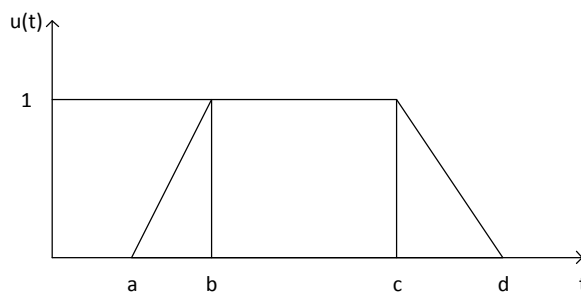


Рис. 2. Представление времени в виде нечеткого числа

Если $b = c$, то имеет место треугольное нечеткое число. Значения функции принадлежности для опорных точек $\mu(t)$ задают эксперты. Значение функции принадлежности для времени t рассчитывается по формуле

$$\mu(t, a, b, c, d) = \begin{cases} \frac{t-a}{b-a}, & t \in [a; b) \\ 1, & t \in [b; c] \\ \frac{d-t}{d-c}, & t \in (c; d] \\ 0, & t \notin [a; d] \end{cases} \quad (3)$$

где t – время исполнения задачи; a – минимально допустимое время исполнения задачи; d – максимально допустимое время исполнения задачи; b, c – наиболее вероятные оценки по времени.

Для расчета времени на основании нечеткого выполняется процедура «дефаззификации» (преобразование нечеткого числа в дискретное значение). Для этих целей используется «индекс соответствия» (AI – agreement index), который был предложен Кауфманном [13]. Индекс соответствия между нечетким событием А и нечетким ожидаемым событием В рассчитывается по формуле

$$AI(A, B) = \frac{\int \mu_C(t) dt}{\int \mu_A(t) dt}, \tag{4}$$

где $\mu_A(t)$ – функция принадлежности множества А; В – нечеткое множество, представляемое в виде трапецевидного числа: $(0, 0, v, v)$; v – «значение соответствия» множеств (agreement value).

$C = A \cap B$ – нечеткое множество, являющиеся пересечением нечетких множеств А и В (рис. 3).

$$\mu_C(t) = \min\{\mu_A(t), \mu_B(t)\}.$$

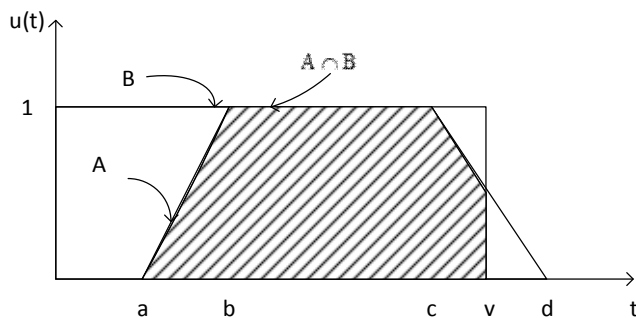


Рис. 3. Пересечение нечетких множеств

Согласно геометрическому смыслу определенного интеграла получаем, что если А задается в виде трапецевидного числа (a, b, c, d) , то

$$\int_a^d \mu_A = S_A = \frac{(d - a) + (c - b)}{2} * \max(\mu_A(t)) \tag{5}$$

где $\max(\mu_A(t))$ – максимальное значение функции принадлежности, принимается за 1.

Очевидно, что $AI \leq 1$ и если $A \cap B = A$, то $AI = 1$.

«Наиболее вероятное» время (high agreement value) v_h определяется на основе задания значения AI: чем больше значение AI – тем больше подстраховки закладывается в задачу.

В зависимости от значения v AI будет вычисляться по формуле

$$AI(v) = \left\{ \begin{array}{l} 0, v \leq a \\ 1, v \geq d \\ \frac{(v - a)^2}{(b - a) * (d - a + c - b)}, a < v \leq b \\ \frac{2v * b - a}{d - a + c - b}, b < v < c \\ \frac{(d - a + c - b) - \frac{(d - v)^2}{(d - c)}}{(d - a + c - b)}, c \leq v < d \end{array} \right. \tag{6}$$

Нахождение значения v необходимо для определения значений буферов проекта и слияния путей.

Размер буфера определяется по формуле

$$ST = \sum_{j=1}^M (v_j - t_j^*)^2, \tag{7}$$

где t_j^* – заявленное время исполнения задачи j-й задачи; v – наиболее вероятное время выполнения j-й задачи в соответствии с заданным значением AI.

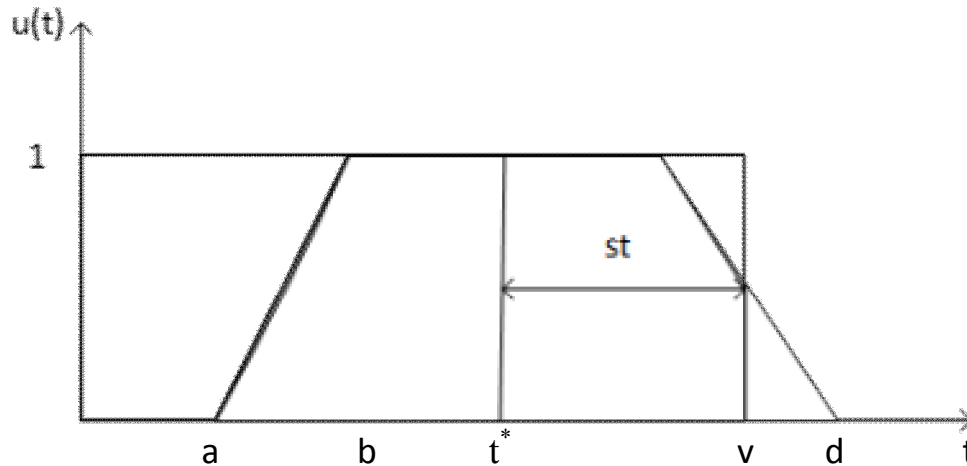


Рис. 4. Разница значений времени

Пример

Рассмотрим пример применения расчета размера буферов проекта, длительность каждой задачи представим в виде трапециевидного нечеткого числа, для простоты будем исходить из того, что никакого конфликта ресурсов нет.

Таблица 1

Список задач проекта

Задача	Предшественники	Длительность
A		(3, 5, 6, 10)
B	A	(1, 2, 3, 5)
C	B	(7, 10, 12, 17)
D		(4, 6, 7, 8)
E	D	(2, 5, 8, 9)

Индекс соответствия примем за 0,2 ($AI = 0,2$), тем самым получим более сжатые сроки. Для расчета значения соответствия исходим из того, что $a < v \leq b$ при $AI = 0,2$.

С использованием (6) получим

Таблица 2

Значения соответствия и длительности задач

Задача	Планируемая длительность	Значение соответствия	Отклонение
A	5,5	4,79	0,71
B	2,5	2	0,5
C	11	9,69	1,32
D	6,5	5,41	1,09
E	6,5	4,45	2,05

В данном примере возникают две цепи задач: (A, B, C) и (D, E), длительности которых соответственно равны $(5,5 + 2,5 + 11 = 19)$ и $(6,5 + 6,5 = 13)$. Критической цепью является цепь задач A, B, C. Поэтому буфер проекта рассчитывается на основании данных задач.

$$БП = \sqrt{0,711145618^2 + 0,5^2 + 1,316718427^2} = 1,577807$$

Цепь задач D и E является некритической, поэтому буфер слияния путей рассчитывается на основании данных задач.

$$БСП = \sqrt{1,085786438^2 + 2,050510257^2} = 2,320242$$

Таким образом мы получаем следующую сетевую диаграмму:

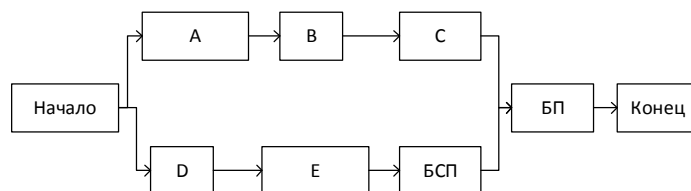


Рис. 5. Итоговая сетевая диаграмма проекта

Заключение

Риски – неотъемлемая часть любого проекта, а их управление является одной из наиболее важных и сложных задач. Наиболее часто встречающимся риском является некачественное расписание. Одной из первых методик, которая имели в себе инструменты для борьбы с рисками является методика критической цепи.

Применение методики критической цепи предполагает наличие статистики выполнения задач, в связи с уникальностью большинства проектов данная информация не всегда имеется в наличии у менеджеров. Предложенная модификация метода позволяет учитывать такие неточности в данных, как «приблизительно», «не более», тем самым позволяет учитывать неопределенность, встречающуюся при оценке задач. Для расчета размеров буферов используются нечеткие числа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт Standish Group [Электронный ресурс]. URL: <http://blog.standishgroup.com/> (дата обращения: 15.06.2013).
2. Moselhi O. Fuzzy Set-based Contingency Estimating and Management [Электронный ресурс] Osama Moselhi, Ahmad Salah. URL: http://spectrum.library.concordia.ca/973994/7/Salah_MASc_F2012.pdf (дата обращения: 14.04.2014).
3. Morovatdar R. Fuzzy Network Analysis for Projects with High Level of Risks – Uncertainty in Time and Structure / R. Morovatdar, A. Aghaie, S. Haji Yakhchali // International Journal of Industrial Engineering & Production Research. 2011. Vol. 22. N 1. С. 73-82.
4. Голдратт Э.М. Критическая цепь / Элияху М. Голдратт. М.: ТОС Центр, 2006.
5. ДеМарко Т. Вальсируя с медведями / Т. ДеМарко, Т. Листер. Компания p.m.Office, 2005. С. 99-111.
6. A Guide to the Project Management Body of Knowledge. 5th ed. Project management institute, 2013.
7. Детмер У. Теория ограничения Голдратта / Уильям Детмер. М.: Альпина Паблишер, 2012. 443 с.
8. Применение статистического анализа в ИТ. [Электронный ресурс]. URL: http://www.omniway.ru/news/primenenie_staticheskogo_analiza_v_it. (дата обращения: 14.04.2014).
9. Moselhi, O Fuzzy vs Probabilistic Scheduling [Электронный ресурс] / O. Moselhi and P. Lorterapong. URL: http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Fuzzy_vs_probabilistic_scheduling.PDF (дата обращения: 14.04.2014).
10. Большаков А.А. Применение теории нечетких множеств к задачам оценки и управления формированием компетенций: описание проблемы и подход к ее разрешению / А.А. Большаков, И.В. Вешнева, Л.А. Мельников // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 174-181.
11. Вешнева И.В. Интеллектуализация информационной системы мониторинга для формирования профессиональных компетенций / И.В. Вешнева, А.А. Большаков, Л.А. Мельников // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 2. С. 81-87.
12. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Данута Рутковская, Мачей Пилиньский, Лешек Рутковский. Горячая Линия – Телеком, 2007. С. 45-122.
13. Kaufman A. Introduction to fuzzy arithmetic, theory and application / A. Kaufman, M.M. Gupta. Van Nostrand Reinhold, 1985, P. 260-280.

Будыльский Александр Викторович – аспирант Астраханского государственного технического университета

Alexandre V. Budylskiy – Postgraduate Astrakhan State Technical University

Квятковская Ирина Юрьевна – доктор технических наук, профессор Астраханского государственного технического университета

Irina Yu. Kvyatkovskaya – Dr. Sc., Professor Astrakhan State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

А.И. Власенко

О МОДЕЛЯХ ДАННЫХ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Предлагается методика формализации медицинских данных. Сбор данных осуществляется из неэлектронных источников для электронной медицинской карты с целью их последующего анализа средствами интеллектуального анализа данных. Методика основывается на формализации медицинских данных в виде таблиц экспериментальных данных.

Модели данных, таблицы экспериментальных данных, электронная медицинская карта, анализ медицинской информации, сбор медицинских данных, структура медицинских данных

A.I. Vlasenko

DATA MODELS FOR MEDICAL INFORMATION SYSTEM

The paper considers a formalization method of the medical data. The aim is to analyze the obtained structures by data mining. The method is based on formalization of the medical data in the experimental data tables.

Data model, experimental data table, electronic health card, analysis of medical information, collection of medical data and structure of medical data

Введение

Мировая практика информатизации медицинской области берет начало с 1994 года [1]. Правительство РФ обсуждает этот вопрос с 2002 года [2]. В январе 2008 года вступил в силу первый национальный стандарт «Электронная история болезни. Общие положения» (ГОСТ Р 52636-2006) – в области медицинской информатики [3]. Тем не менее вопрос информатизации медицинской области в Российской Федерации остается открытым.

Медицинские информационные системы имеют разнообразную направленность: онлайн запись на прием, ведение бухгалтерии, электронная регистратура, электронная медицинская карта пациента и т.п. [3, 4]. Электронные медицинские карты пациентов представляют интерес, поскольку в этом документе сосредоточена вся информация об изменениях в здоровье клиента медицинского учреждения, что позволяет применить методы интеллектуального анализа данных к медицинской области познания. Интеллектуальный анализ подобной информации поможет выявить закономерности в развитии заболеваний, спрогнозировать развитие болезни, осложнения и результаты используемой методики лечения [5].

Работа некоторых медицинских учреждений полностью автоматизирована, другие – имеют частичную информатизацию, а некоторые продолжают работать с «бумажным» документооборотом [1]. То есть при разработке информационной системы для автоматизации работы медицинского персонала исследователи сталкиваются с проблемой сбора данных из неэлектронных источников и формирования адекватной модели данных. Вопросы формирования адекватной модели данных актуальны и для других областей человеческой деятельности [6].

Таким образом, целью исследования является разработка методики формализации медицинских данных. Методика заключается в представлении исходных данных в виде таблиц экспериментальных данных [7]. Содержание таблиц экспериментальных данных зависит от специалиста, проводящего осмотр, и основного диагноза пациента, поэтому формализация медицинской информации требует совместной работы специалиста – медика и технического специалиста. В качестве исходных данных используются записи в медицинских картах амбулаторных больных об осмотре детским ортопедом пациентов, страдающих сколиозом [8].

Основная часть

Основным медицинским документом пациента является медицинская карта. Медицинская карта – это совокупность данных о здоровье человека, введенная или принятая поставщиками услуг здравоохранения [9]. Другими словами, это медицинский документ, в котором лечащими врачами ведётся запись истории болезни пациента и назначаемого ему лечения. Медицинская карта амбула-

торного больного (МКАБ) – это медицинская карта, используемая для амбулаторного приема в поликлинике. Оба рассмотренных документа являются главным источником данных для медицинской информационной системы (ИС) и для анализа данных.

Электронная медицинская карта (ЭМК) является цифровым аналогом медицинской карты. Структура ЭМК базируется на структуре медицинской карты. ЭМК это совокупность данных о здоровье человека, введенная или принятая поставщиком и услуг здравоохранения и хранящаяся в электронном виде [10]. Основным объектом учёта при проектировании ЭМК является субъект ЭМК, который описывается набором идентификаторов [10]. В качестве идентификаторов выступают персональные данные пациента. Субъект ЭМК – это пациент (клиент) медицинского учреждения [10]. Каждый субъект ЭМК связан с медицинскими документами, относящимися к нему. Каждый визит пациента в медицинское учреждение должен быть зафиксирован в ЭМК [9]. Набор документов полностью описывает медицинскую историю субъекта.

Анализ данных рассмотренных документов поможет выявить такие тенденции как динамика заболевания; результаты лечения; риски, которые могут возникнуть после проведения лечения определенного вида и т.п. [5].

Центральная проблема в данном случае – сбор информации из не электронных источников (медицинских документов). Предлагается разработать таблицы экспериментальных данных (ТЭД). ТЭД – это таблица признаков изучаемых объектов [7]. В качестве объекта исследования рассмотрим МКАБ, точнее, записи МКАБ об осмотре пациента различными специалистами. Тогда в качестве признаков объекта выступают данные, заносимые врачом-специалистом в медицинскую карту.

Для выявления конкретных признаков объекта приведем детальный анализ МКАБ. Анализ медицинских карт амбулаторного больного показал, что данный документ имеет структуру, которая включает: краткую информацию о пациенте личного характера (оформляется в виде титульного листа МКАБ) и записи результатов осмотра специалистами.

Титульный лист МКАБ – раздел документа, содержащий личные данные пациента. В большинстве случаев в медицинском учреждении хранится следующая личная информация: название страховой медицинской организации, номер страхового медицинского полиса, код льготы, СНИЛС, ИНН, фамилия, имя, отчество, дата рождения, пол, адрес постоянного места жительства, адрес регистрации по месту пребывания, домашний телефон, рабочий телефон, сотовый телефон, документ, удостоверяющий право на льготное обеспечение, инвалидность, место работы, должность. В проекте структуры электронной медицинской карты [5, 9] предлагается собирать в дополнение к перечисленным данным информацию о пациенте, такую как уровень образования, расовая принадлежность пациента, этническая группа (национальность) пациента, категория учета в трудной ситуации, социальный статус пациента, социально-профессиональная группа пациента.

Каждая запись с результатом осмотра специалистом также имеет структуру. Каждый случай осмотра включает набор обязательных пунктов: информация об осмотре, жалобы, анамнез, данные объективного обследования, основной и дополнительный диагноз, рекомендации (назначенное лечение). Пункты обозначим как признаки объекта исследования.

«Информация об осмотре» – не выделенная каким-либо образом структура данных в записи врача, но обязательная: дата осмотра, фамилия и подпись врача. Остальные пункты осмотра четко выделены в МКАБ. В разделе «жалобы» врач записывает информацию о наличии болей, их дислокацию, визуальные отклонения в развитии, новообразования и т.п. со слов пациента. «Анамнез» – история развития заболевания, особенности развития и образа жизни пациента. «Данные объективного осмотра» зависят от конкретного специалиста, который проводит осмотр. Например, кардиолог заносит данные о состоянии сердечно – сосудистой системы, пульмонолог информацию о состоянии дыхательной системы, ортопед описывает характеристики развития тела пациента и т.п. Результатом осмотра является постановка, в случае повторного обращения – подтверждение основного и сопутствующих диагнозов, а так же рекомендации по проведению лечения.

В осмотр записываются диагнозы, которые относятся к области деятельности конкретного специалиста, осуществляющего осмотр. Диагнозы записываются на русском, латинском языке и в кодировке МКБ – 10. МКБ-10 – Международная классификация болезней 10-го пересмотра. На январь 2007 года является общепринятой классификацией для кодирования медицинских диагнозов, разработана Всемирной организацией здравоохранения. МКБ-10 состоит из 21-го раздела, каждый из которых содержит подразделы с кодами заболеваний и состояний [11]. Подробно описываются рекомендации: какое лечение, сроки проведения лечения, отмечается необходимость особого режима и т.п.

На основании вышеизложенного, структура ТЭД будет иметь следующий вид (табл. 1).

Таблица 1

Структура ТЭД

Признак	Описание признака
Краткая информация о пациенте	Страховая медицинская организация, номер страхового медицинского полиса, код льготы, СНИЛС, фамилия, имя, отчество, дата рождения, пол, адрес постоянного места жительства, адрес регистрации по месту пребывания, домашний телефон, рабочий телефон, сотовый телефон, документ удостоверяющий право на льготное обеспечение, инвалидность, место работы, должность.
Информация об осмотре	Дата осмотра, подпись врача
Жалобы	Жалобы пациента: боли, внешние изменения тела и т.п.
Анамнез	Описание течения заболевания: дата постановки диагноза, причины развития заболевания, особенности развития пациента, вредные привычки, особенности образа жизни
Данные объективного обследования	Набор параметров, описывающий состояние пациента. Зависит от специалиста, который проводит осмотр
Основной диагноз	Русское, латинское название диагноза и код МКБ-10
Дополнительный диагноз	Код МКБ-10
Рекомендации	Рекомендуемое лечение, особенности режима

Из табл. 1 следует, что каждый объект наблюдения характеризуется 7 признаками: информация об осмотре, жалобы, анамнез, данные объективного обследования, основной диагноз, дополнительный диагноз, рекомендации. В результате анализа МКАБ установлено, что некоторые из параметров также имеют определенную структуру. Запись в каждом параметре представляет собой ряд стандартных ответов на вопросы. Другими словами, каждый из выделенных признаков можно детализировать. Варианты детализации этих параметров зависят от специализации врача, проводящего осмотр.

Структура параметра «анамнез» является стандартной и не зависит от конкретного специалиста. Представляет собой краткое текстовое описание истории заболевания и развития пациента (табл. 2).

Таблица 2

Детализация признака «анамнез»

Признак	Описание признака
Особенности развития пациента	Выявляет наличие отклонений в развитии пациента
Особенности образа жизни пациента	Заносится информация о занятиях спортом, режиме дня, вредных привычках и т.п.
Дата проявления заболевания	Примерная дата, когда пациент отмечает первые проявления симптомов заболевания
Дата постановки диагноза	Дата, когда впервые поставлен диагноз
Развитие заболевания	Краткое текстовое описание динамики развития заболевания

Детализация остальных признаков: «жалобы», «данные объективного обследования», «основной диагноз», «дополнительный диагноз», «рекомендации» зависит от специалиста, осуществляющего прием. Рассмотрим пример детализации этих параметров для осмотра, который проводит врач-ортопед. Так, в «жалобах» выделим параметры: болевой синдром, дислокация, визуальные жалобы и комментарий (табл. 3). Выделенные параметры позволяют установить наличие болей у пациента, их расположение, выявить отклонения в развитии тела пациента.

Таблица 3

Детализация признака «жалобы»

Признак	Описание признака
Болевой синдром	Наличие болей
Дислокация	Указание участка тела, на который распространяется болевой синдром
Визуальные жалобы	Наличие жалоб на визуальные изменения тела
Комментарий	Дополнения к жалобам

Параметры «данные объективного обследования», «основной диагноз», «дополнительный диагноз» зависят не только от специалиста, но и от предполагаемого диагноза. Если рассматривать запись о приеме ортопедом пациента, страдающего сколиозом, то данные объективного обследования детализируются следующим образом (табл. 4). Осмотр специалистом-ортопедом предполагает детальное описание состояния опорно-двигательного аппарата. Сколиоз – это сложная деформация позвоночника, при которой происходит боковое искривление его в плоскости спины и скручивающее (торсионное) вращение позвоночника вокруг своей оси [9]. Поэтому особое внимание при осмотре пациента, страдающего сколиозом, уделяется позвоночнику.

Детализация признака «данные объективного обследования»

Признак	Описание признака
Телосложение	Типология человека Кречмера (астеник, пикник, атлетик, диспластик)
Положение головы	Описывает положение головы, отклонения от нормы (правильное или неправильное)
Мышцы шеи	Состояние мышц шеи (напряжены или в норме)
Функции суставов в верхних конечностях	Выявляет наличие ограничения или излишней мобильности в движении суставов верхних конечностей
Функции суставов в нижних конечностях	Выявляет наличие ограничения или излишней мобильности в движении суставов нижних конечностей
Нарушение осанки	Выявляет патологии в осанке пациента
Синдром плоской спины	Выявляет патологии в осанке пациента
Стопы	Выявляет аномалии в развитии стоп
Длина верхних конечностей	Выявляет разницу в длине верхних конечностей
Длина нижних конечностей	Выявляет разницу в длине нижних конечностей
Травмы	Выявляет, какие травмы и в каком возрасте были получены
Пальпация остистых и поперечных отростков	Выявляет боли при пальпации остистых и поперечных отростков позвонков
Область надплечий, лопаток и ключиц	Выявляет наличие асимметрии в области надплечий, лопаток и ключиц
Треугольник талии	Выявляет наличие асимметрии в области талии
Позвоночник в шейном отделе	Выявляет отклонение позвоночника от нормального положения в шейном отделе
Позвоночник в грудном отделе	Выявляет отклонение позвоночника от нормального положения в грудном отделе
Позвоночник в поясничном отделе	Выявляет отклонение позвоночника от нормального положения в поясничном отделе
Реберный горб	Выявляет наличие реберного горба и его дислокацию
Мышечный валик	Выявляет наличие мышечного валика и его дислокацию
Данные рентгенологического обследования	Содержит описание рентгенологического обследования

Признак «диагноз» зависит от конкретного заболевания, поэтому детализация (если она возможна) должна соответствовать диагнозу. Если в качестве примера рассматривать заболевание сколиоз, то основной диагноз можно детализировать и это даст дополнительные информативные признаки (таблица 5). При постановке диагноза сколиоз, ортопед соотносит заболевание по различным существующим классификациям: причины возникновения, возраст диагностирования заболевания, форма искривления и т.п. конечные диагнозы записываются как совокупность классов сколиоза.

Таблица 5

Детализация признака «основной диагноз» для пациентов, страдающих сколиозом

Признак	Описание признака
Причины возникновения	Указывается причина развития заболевания, в случае, если причина не известна, сколиоз относят к классу идиопатический
Возраст диагностирования	инфантильный (1 – 2 год), ювенильный (4 – 6 лет), подростковый (10 – 14 лет)
Форма искривления	Выявляется количество дуг искривления: С – и S – образный
Локализация	Указываются места искривления позвоночника: шейный, грудной, поясничный, комбинированный.
Степень деформации в зависимости от нагрузки	Определяется как разница значений между значениями рентгенологического обследования стоя и лежа
Рентгенологическая классификация	Рентгенологическая классификация (по В. Д. Чаклину): 1 – 4 степень

Прием медицинским специалистом, как правило, не обходится без результатов анализов и дополнительных обследований. Анализы и дополнительные обследования также можно хранить в виде набора параметров. Например, для пациентов, страдающих сколиозом, в качестве дополнительного обследования выступают результаты рентгенологического обследования (табл. 6).

Детализация рентгенологического обследования

Признак	Описание признака
Дата обследования	Дата проведения обследования
Стоя основная дуга	Количество градусов в отклонении от нормального положения
Лежа основная дуга	Количество градусов в отклонении от нормального положения
Стоя компенсаторные дуги	Количество градусов в отклонении от нормального положения
Лежа компенсаторные дуги	Количество градусов в отклонении от нормального положения

В итоге имеем 41 признак, описывающий каждый объект исследования. Все признаки объединяются в итоговую ТЭД. В столбцах ТЭД указываются признаки объекта, а в строках – значения признаков для конкретного объекта.

Результаты

Предложена методика формализации медицинской информации, позволяющая использовать ТЭД для сбора медицинских данных из неэлектронных источников информации и объединения их в ЭМК с целью последующего анализа. Далее предполагается, используя методы интеллектуального анализа данных, решить задачи классификации и прогнозирования. Решение этих задач позволит прогнозировать динамику заболевания; результат проводимого лечения; риски, которые могут возникнуть после проведения лечения, что позволит более тщательно планировать тактику лечения для каждого пациента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова А.В. Информатизация российского здравоохранения: проблемы и пути их решения / А.В. Степанова // Здравоохранение: Журнал для руководителя и главного бухгалтера. 2005. № 5. С. 183-187.
2. Сайт министерства здравоохранения РФ [Электронный ресурс] / 2012–2014 Министерство здравоохранения РФ. – Режим доступа: www.gosminzdrav.ru, свободный. Загл. с экрана. Рус.
3. Зингерман Б.В. Национальный стандарт «Электронная история болезни. Общие положения» и его роль в создании медицинских информационных систем и единого информационного пространства здравоохранения / Б.В. Зингерман, Н.Е. Шкловский-Корди // Врач и информационные технологии. 2008. № 1. С. 44-52.
4. Долинина О.Н. Отладка нейросетевой экспертной системы для офтальмологии / О.Н. Долинина, А.К. Кузьмин // Вестник СГТУ. 2011. № 4 (62) Т. № 4. С. 248-252.
5. Дюк В.А. Информационные технологии в медико-биологических исследованиях / В.А. Дюк, В.Л. Эмануэль. СПб, 2003. 525 с.
6. Шульга Т.Э. Организационные принципы подготовки IT-специалистов / Т.Э. Шульга // Прикладная информатика. 2011. № 3. С. 29-52.
7. Островский К.А. Классификация и тестирование производительности способов хранения таблиц в задачах обработки экспериментальных данных / К.А. Островский // Молодой ученый. 2011. № 6. Т. 1. С. 120-129.
8. Википедия свободная энциклопедия [Электронный ресурс] / 2012-2014 Википедия свободная энциклопедия. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Сколиоз>, свободный. Загл. с экрана. Рус.
9. Федеральный закон Российской Федерации от 2 июля 2013 г. № 185-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации»
10. Концепция развития системы здравоохранения в Российской Федерации до 2020 года [Электронный ресурс] / 2012–2014 Министерство здравоохранения РФ. Режим доступа: <http://www.gosminzdrav.ru/health/zdravo2020>, свободный. Загл. с экрана. Рус.
11. Московский центр ВОЗ. МКБ-10 (Международная статистическая классификация болезней). В 2 т. Т. 1 / Московский центр ВОЗ. М.: Медицина, 2003. 924 с.

Власенко Алена Ивановна – аспирант кафедры «Прикладная информатика и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alena I. Vlasenko – Postgraduate
Department of Applied Computer Science and Software Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 20.06.14

В.С. Дрогайцев, В.А. Ушаков, Р.Е. Куликов

СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

Рассматриваются средства обеспечения эксплуатации электротехнических комплексов по техническому состоянию в процессе исполнения ими заданных функций в условиях влияния внешней среды. Предложены критерии для оценивания работоспособных состояний и обнаружения предотказных ситуаций комплексов, позволяющие представить аналоговые выходные параметры бинарными сигналами. Основой интеллектуальной системы диагностирования источников генерации предотказных состояний комплексов является база данных и знаний.

Техническое диагностирование, интеллектуальная система, базы данных и знаний, предотказное состояние, электротехнический комплекс, выходной параметр, модель диагностирования

V.S. Drogaytsev, V.A. Ushakov, R.E. Kulikov

ENSURING OPERATION OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES ACCORDING TO TECHNICAL CONDITIONS

The paper considers means for ensuring operation of electrotechnical complexes in accordance with technical conditions under the impact of external environment. The proposed criteria can be utilized to estimate efficient conditions and detect pre-failure situations for the complexes which allow simulation analog output parameters by means of the binary signals. The basis of the intelligent system which helps diagnose sources for generating pre-failure conditions of complexes is formed by the database and competence.

Technical diagnosis, intelligent system, database and knowledge base, pre-failure condition, electrotechnical complex, output parameter, diagnosis model

На стадии применения по назначению сложных электротехнических комплексов существует потребность эксплуатации комплексов по техническому состоянию, позволяющей повышать эффективность их применения, направленно регламентировать профилактические и восстановительные виды работ и сокращать эксплуатационные затраты.

В рассматриваемой постановке методика обеспечения эксплуатации электротехнических комплексов по техническому состоянию базируется на основе упреждающего обнаружения, технического диагностирования предотказных состояний комплексов и своевременного формирования управляющих решений по нейтрализации источников генерации предотказных состояний в результате логического анализа средствами информационно-измерительных систем динамики изменения в предыстории числовых значений выходных параметров комплексов в пределах их допусковых ограничений, характеризующих деградацию выходных параметров.

Технология методики обеспечения эксплуатации электротехнических комплексов по техническому состоянию включает решение совокупности взаимосвязанных задач: оценивание работоспособных состояний комплексов; обнаружение и техническое диагностирование источников генерации предотказных состояний в их поведении; синтез аппаратных средств информационно-измерительных и управляющих систем, встраиваемых в структуру комплексов; формирование управляющих решений по нейтрализации источников генерации предотказных состояний комплексов. При этом предполагаются известными перечень факторов внешней среды, допусковые ограничения на выходные параметры комплексов и вход-выходные функциональные зависимости.

В заданных условиях внешней среды и режимах функционирования комплексов средствами информационно-измерительных систем регистрируются функциональные зависимости вида

$$Y(t) = Y_i(t), f_i(U(t), W(t), R(t), S(t)), \quad (1)$$

где U, Y, W, R – векторы управляющих сигналов, выходных параметров, факторов внешней среды, режимов функционирования комплексов; S – перечень предотказных состояний комплексов; t – время.

Оценивание работоспособных состояний и обнаружение предотказных ситуаций комплексов средствами числовых значений выходных параметров, а также представление аналоговых выходных параметров бинарными сигналами осуществляются применением критериев вида:

– при двухстороннем допусковом ограничении i -го выходного параметра электротехнического комплекса

$$K_{i,\{W_g\},\{R_l\}}^{+(-)} = \|\alpha_{ij}^{+(-)}\| = \begin{cases} 1, \text{ при } \left(\frac{\hat{Y}_{i \max}^+ - Y_{i_n}}{Y_{i \max} - Y_{i_n}} + \frac{Y_{i_n} - \hat{Y}_{i \min}^{(-)}}{Y_{i_n} - Y_{i \min}} \right) / 2 > \beta_i^{+(-)}, \\ 0, \text{ при } \left(\frac{\hat{Y}_{i \max}^+ - Y_{i_n}}{Y_{i \max} - Y_{i_n}} + \frac{Y_{i_n} - \hat{Y}_{i \min}^{(-)}}{Y_{i_n} - Y_{i \min}} \right) / 2 \leq \beta_i^{+(-)}, \end{cases} \quad (2)$$

где \hat{Y}_i – измеренные числовые значения выходного параметра; Y_{i_n} – номинальные значения выходного параметра; $Y_{i \max}, Y_{i \min}$ – допусковые ограничения числового значения выходного параметра; β_i – пороговое ограничение уровня деградации выходного параметра в пределах допусковой зоны; $\|\alpha_{ij}\|$ – элемент модели диагностирования источников генерации предотказных состояний; $\{W_g\}$ – перечень критичных факторов внешней среды к состояниям электротехнического комплекса; $\{R_l\}$ – перечень режимов функционирования соответствующего комплекса; «+(-)» – обозначает двухстороннее допусковое ограничение i -го выходного параметра; «+», «(-)» – обозначают максимальное и минимальное допусковые ограничения i -го выходного параметра соответственно.

– при максимальном допусковом ограничении выходного параметра комплекса

$$K_{i,\{W_g\},\{R_l\}}^+ = \|\alpha_{ij}^+\| = \begin{cases} 1, \text{ при } \left(\frac{\hat{Y}_{i \max}^+ - Y_{i_n}}{Y_{i \max} - Y_{i_n}} \right) > \beta_i^+, \\ 0, \text{ при } \left(\frac{\hat{Y}_{i \max}^+ - Y_{i_n}}{Y_{i \max} - Y_{i_n}} \right) \leq \beta_i^+; \end{cases} \quad (3)$$

– при минимальном допусковом ограничении выходного параметра комплекса

$$K_{i,\{W_g\},\{R_l\}}^{(-)} = \|\alpha_{ij}^{(-)}\| = \begin{cases} 1, \text{ при } \left(\frac{Y_{i_n} - \hat{Y}_{i \min}^{(-)}}{Y_{i_n} - Y_{i \min}} \right) > \beta_i^{(-)}, \\ 0, \text{ при } \left(\frac{Y_{i_n} - \hat{Y}_{i \min}^{(-)}}{Y_{i_n} - Y_{i \min}} \right) \leq \beta_i^{(-)}. \end{cases} \quad (4)$$

В качестве исходной информации решения проблемных задач, связанных с оцениванием работоспособных состояний электротехнических комплексов, обнаружением и диагностированием источников генерации предотказных ситуаций используются результаты моделирования состояний комплексов в условиях имитации критичных режимов их функционирования, имитации факторов внешней среды и заданного перечня предотказных ситуаций согласно зависимости вида [1]:

$$Y(\bar{z})|_{\{W_g\},\{R_l\}} = Y_i(\bar{z}), f_i \left(U(\bar{g}), W(\bar{h}), R(\bar{p}), S(t) \right) \rightarrow \left. \begin{matrix} U(\bar{g}) \\ W(\bar{h}) \\ R(\bar{p}) \\ S(t) \end{matrix} \right\} - \text{var}, \quad (5)$$

где $\bar{z}, \bar{g}, \bar{h}, \bar{p}$ – векторы признаков переменных; $S(t)$ – перечень предотказных состояний комплекса.

В процессе моделирования состояний электротехнических комплексов в результате анализа обучающих выборок агрегируются информационно-значимые вход-выходные функциональные зависимости, обладающие обнаруживающими и разделительными свойствами, и выявляются причинно-следственные связи между состояниями выхода и режимами функционирования комплексов, показателями внешней среды и заданным перечнем источников генерации предотказных ситуаций, составляющих информационную основу методов решения проблемных задач обнаружения и диагностирования предотказных ситуаций.

Поскольку решаемые проблемные задачи описываются большими объемами разнородной по природе информации, метод решения проблемной задачи диагностирования источников генерации предотказных состояний в данной постановке поддерживается средствами интеллектуальной системы, база данных и знаний которой определяется условиями вида

$$\forall t, S; \exists U_1(\bar{g}), \dots, U_n(\bar{g}); Y_1(\bar{z}), \dots, Y_m(\bar{z}); W_1(\bar{h}), \dots, W_r(\bar{h}); R_1(\bar{p}), \dots, R_d(\bar{p});$$

$$K_1, \dots, K_l; D_1, \dots, D_m \Rightarrow (\text{следует}) H = \left\{ Y_1(\bar{z}), f_1(U(\bar{g}), W(\bar{h}), R(\bar{p}), S(t)) \right\} \bigcap \dots \bigcap \dots \bigcap Y_j(\bar{z}), f_j(U(\bar{g}), W(\bar{h}), R(\bar{p}), S(t)) \bigcap \dots \bigcap \dots \bigcap Y_m(\bar{z}), f_m(U(\bar{g}), W(\bar{h}), R(\bar{p}), S(t)) \left\} = \langle S_i \rangle_{\{K_i\}, \{D_j\}}, \tag{6}$$

где \forall, \exists – кванторы «для всех», «существует», отражающие перевод данных в знания [2, 3]; H – логическая организация переменных диагностирования заданного перечня источников генерации предотказных состояний электротехнических комплексов; $\{S_i\}, i = 1, 2, \dots$ – перечень диагностируемых предотказных состояний комплекса; $\{K_i\}$ – перечень критериев оценивания работоспособных состояний и обнаружения предотказных ситуаций комплекса; $\{D_j\}$ – перечень допусковых ограничений выходных параметров комплекса.

Технология построения исходной структуры модели диагностирования источников генерации предотказных состояний электротехнических комплексов, представленной в виде матрицы (рис. 1), определяется содержанием причинно-следственных связей между переменными, полученных в результате моделирования состояний комплексов в условиях имитации режимов их функционирования, состояний внешней среды $W_i(t)$ и имитации предотказных состояний в поведении комплексов, где $i = \overline{1, n}$ – число предотказных состояний; $j = \overline{1, m}$ – число выходных параметров соответствующего комплекса; L – критерий оценивания информационной значимости вход-выходных функциональных зависимостей; a, b, c – численные значения, определенные использованием приведенного критерия L ; $S(R)$ – зависимость перечня предотказных состояний от режимов функционирования комплексов; $U_g U_g, U_d U_d, U_r U_r$ – последовательности управляющих сигналов в определенных контрольных точках съема диагностической информации.

Преобразование исходной структуры модели диагностирования (рисунок) к конечному (инженерному) варианту состоит в пошаговом определении по критерию (7) информационно-значимых вход-выходных функциональных зависимостей, состав которых является достаточным для оценивания работоспособных состояний и диагностирования заданного перечня источников генерации предотказных состояний соответствующего электротехнического комплекса.

$W_i(t)$	$U_g U_g$	$U_d U_d$	$U_r U_r$
	$Y_1(\bar{z})$	$Y_j(\bar{z})$	$Y_m(\bar{z})$
$S_1(R_p)$	α_{11}	α_{1j}	α_{1m}
$S_i(R_l)$		α_{ij}	
$S_n(R_k)$	α_{n1}	α_{nj}	α_{nm}
L	a	b	c

Структура модели диагностирования источников генерации предотказных состояний электротехнического комплекса

Критерий оценивания информационно-значимых вход-выходных функциональных зависимостей характеризуется зависимостью вида [4]:

$$L_j = \max_l \frac{\sum_l^n \sum_g^m \left(n_{(ij),l,g}^{(0)} \cdot n_{(ij),l,g}^{(1)} \right)}{h_j^{(0)} + h_j}, \tag{7}$$

где $n_{(ij),l,g}^{(0)}, n_{(ij),l,g}^{(1)}$ – число необнаруживаемых ($\alpha_{ij} = 0$), обнаруживаемых ($\alpha_{ij} = 1$) предотказных состояний соответственно по результатам оценивания числовых значений j -го выходного параметра;

$h_j^{(0)}$ – число необнаруженных предотказных состояний j -м параметром с учетом параметров, включенных в перечень информативных на предыдущих шагах преобразования модели диагностирования; h_j – наибольшее число обнаруженных (не обнаруженных) предотказных состояний j -м параметром в группе на текущем шаге преобразования модели; $l = \overline{1, n}$ – число предотказных состояний; $g = \overline{1, m}$ – число групп диагностируемых предотказных состояний на шагах преобразования исходной структуры модели диагностирования.

Конечный вариант модели диагностирования определяет ограниченные составы входных функциональных зависимостей, режимов функционирования и факторов внешней среды, обладающих разделительными свойствами в плане технического диагностирования заданного перечня источников генерации предотказных состояний соответствующего электротехнического комплекса, что позволяет направлено обеспечивать требуемый уровень достоверности результатов диагностирования источников генерации предотказных состояний электротехнических комплексов и сокращать временной цикл их испытания.

На основе анализа результатов диагностирования источников генерации предотказных состояний эксплуатация электротехнических комплексов по техническому состоянию осуществляется в результате упреждающего парирования источников генерации предотказных состояний путем своевременного устранения причин предотказных состояний, реконфигурации структуры электротехнических комплексов и рационального использования дублирующих средств.

В рассматриваемой постановке предполагается, что при наличии результатов обнаружения и технического диагностирования источников генерации предотказных состояний электротехнических комплексов управляющие решения по реализации мер поддержания работоспособных состояний комплексов формируются экспертами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков В.А. Интегрированная нейросетевая система ситуационного управления процессами обеспечения технических характеристик динамических объектов. Ч. 1. Формальный подход к построению интеллектуальных систем / В.А. Ушаков, Г.С. Говоренко, В.С. Дрогайцев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 7. С. 14–19.
2. Васильев С.Н. Анализ координатных и других преобразований моделей динамических систем методом редукции / С. Н. Васильев, Р. И. Козлов, С. А. Ульянов // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2009. Т. 15. № 3. С. 38-55.
3. Аншаков О. М. ДСМ-метод и модификационные исчисления / О. М. Аншаков // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. № 1. С. 55-79.
4. Системный подход к ситуационному управлению отказоустойчивостью технических объектов в условиях нештатных ситуаций / В.А. Ушаков, Г.С. Говоренко, В.С. Дрогайцев, С.В. Козлов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. № 3. С. 20-27.

Дрогайцев Валентин Серафимович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valentin S. Drogaytsev – Dr. Sc., Professor
Department of Automation, Management and Mechatronics,
Yuri Gagarin Saratov State Technical University

Ушаков Виталий Алексеевич – кандидат технических наук, генеральный директор ОАО «КБ Электроприбор», Саратов

Vitaliy A. Ushakov – Ph. D., Director General
ОАО KB Electropribor, Saratov

Куликов Роман Евгеньевич – аспирант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Roman E. Kulikov – Postgraduate
Department of Automation, Management and Mechatronics,
Yuri Gagarin Saratov State Technical University

Н.В. Яндыбаева, Е.Р. Кожанова, В.А. Кушников

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВЫСШЕГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ**

Представлено описание программного продукта «Модуль для определения эффективности деятельности вуза», разработанного на языке C# в среде Visual Studio. Он позволяет проводить сравнение фактических и пороговых значений показателей эффективности высших учебных заведений и может быть использован в составе системы поддержки принятия решений при оперативном управлении вузом.

Эффективность деятельности вуза, программный модуль, высшая школа

N.V. Yandybaeva, E.R. Kozhanova, V.A. Kushnikov

**DEVELOPING SOFTWARE TO DETERMINE
EFFECTIVENESS OF A HIGHER SCHOOL**

The article describes the software product «A Module to Estimate Effectiveness of a Higher School», developed in C# in the Visual Studio environment. It allows for comparison of real and threshold performance of a higher education institutions and can be used as part of a decision support system for operational management of a higher school.

Effectiveness of a higher school, program module, high school

Проблема подготовки высококвалифицированных кадров является актуальной для нашей страны в свете происходящего реформирования системы высшего образования, перехода вузов на двухуровневую модель обучения, учета работодателями профессиональных компетенций будущих специалистов.

Образовательный процесс в высшей школе рассматривался в трудах С. Богомолова, А. Аганбегяна, Т. Ворониной, В. Байденко [1], О. Виханского, А. Джурицкого [2], В. Захаровой, К. Арджириса, Д. Аркаро, Б. Варда, Э. Деминга [3] и др. Исследования этих авторов посвящены вопросам контроля и управления качеством с позиций общей теории управления и на основе внедрения передовых методик обучения.

Одним из способов решения проблемы оценки качества высшего образования является определение эффективности деятельности вуза, которая осуществляется посредством мониторинга. Целью мониторинга является формирование статистических и аналитических материалов на основе информации об образовательных организациях и показателей оценки эффективности их деятельности для последующего принятия решений в отношении вузов и их филиалов, отнесенных к «группе образовательных организаций, имеющих признаки неэффективности». Мониторинг представляет собой комплекс мероприятий, направленных на формирование аналитических материалов о деятельности вузов и филиалов на основе показателей эффективности деятельности образовательных организаций высшего образования [4].

По результатам мониторинга вузовской сети, проводимого в 2013 г. межведомственная комиссия под председательством главы Минобрнауки признала неэффективными и нуждающимися в реорганизации 130 университетов и 241 филиал. Требующими оптимизации деятельности признаны 23 государственных вуза, 15 филиалов госвузов, а также семь негосударственных вузов. На заседании межведомственной комиссии, состоявшемся в апреле 2013 г. были определены критерии, по которым производится оценка деятельности высшего учебного заведения. Содержание показателей эффективности деятельности вузов и их пороговые значения приведены в таблице.

Принятие решения об отнесении образовательной организации к группе вузов, имеющих признаки неэффективности, принимается в соответствии со следующим правилом: образовательная организация или филиал образовательной организации относится к группе эффективных при достижении пороговых значений для любых трех и более показателей. При невыполнении данного условия вуз относится к группе вузов, имеющих признаки неэффективности.

Показатели оценки эффективности деятельности вузов

Содержание базового показателя	Пороговое значение для головных вузов	
	Москвы/Санкт-Петербурга	Других регионов
1. Образовательная деятельность. Средний балл студентов, принятых по результатам ЕГЭ на обучение по очной форме по программам подготовки бакалавров и специалистов за счет средств бюджетной системы РФ и с оплатой стоимости затрат на обучение физическими и юридическими лицами	63 балла	60 баллов
2. Научно-исследовательская деятельность. Объем НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника	95000 руб./ 75000 руб.	50000 руб.
3. Международная деятельность. Удельный вес численности иностранных студентов, обучающихся по ООП ВПО, в общем числе студентов (приведенный контингент)	3,0%	1,0%
4. Финансово-экономическая деятельность. Доходы вуза из всех источников в расчете на одного НПП	1500 тыс. руб.	1100 тыс. руб.
5. Инфраструктура. Общая площадь учебно-научных помещений в расчете на одного студента (приведенного контингента), имеющих у вуза на праве собственности и закрепленных за вузом на праве оперативного управления	13 кв. м.	11 кв. м.
6. Трудоустройство. Удельный вес численности выпускников вуза, обучавшихся по очной форме обучения, не обращавшихся в службы занятости в течение первого года после окончания обучения в вузе, в общем числе выпускников	Медиана выборки группы вузов Москвы/Санкт-Петербурга	Медиана выборки группы вузов, распределенных по федеральным округам

В связи с обработкой больших объемов статистических данных, сопровождающих процедуру мониторинга, значительное снижение трудоемкости выполняемых работ возможно при использовании в процессе оценки деятельности вуза специализированного программного обеспечения.

В некоторых российских вузах используется подобные специализированные программные продукты для оценки эффективности деятельности вуза. Например, в Северо-Западном государственном медицинском университете им. И. И. Мечникова для оперативности проведения мониторинга и создания базы данных о качестве процесса обучения на кафедрах вуза разработана программа для ЭВМ «Автоматизированная оценка качества учебного процесса в высшем учебном заведении». В ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» (г. Орел) функционирует информационная система поддержки принятия решений и оценки эффективности деятельности основных структурных подразделений и ППС вуза (ИСППР «Рейтинг»), которая состоит из «Базы данных профессорско-преподавательского состава и кафедр ВУЗа», «Подсистемы построения графиков динамики развития вузов» и еще некоторых модулей. В Самарском государственном техническом университете используется информационно-аналитическая система «Наука», которая является интегрированной информационной системой для автоматизированного управления научной деятельностью сотрудников университета. Она позволяет формировать информационный банк научных результатов сотрудников, оценивать результативность работы сотрудников и подразделений университета, подготавливать информацию для формирования отчетов в министерства и для внутреннего использования.

Общими недостатками вышеуказанных информационных систем являются: сложная архитектура систем, нестабильная работа, наличие нескольких модулей и их асинхронная работа, слабо структурированная система импорта данных, сложная структура баз данных.

Таким образом, разработка программного обеспечения для оценки эффективности деятельности вуза для устранения вышеуказанных недостатков является в современных условиях задачей необходимой и актуальной.

Для определения эффективности деятельности вузов в среде *Visual Studio 2010* на языке *C#* был разработан «Модуль для определения эффективности деятельности высшего учебного заведения» (рис. 1).

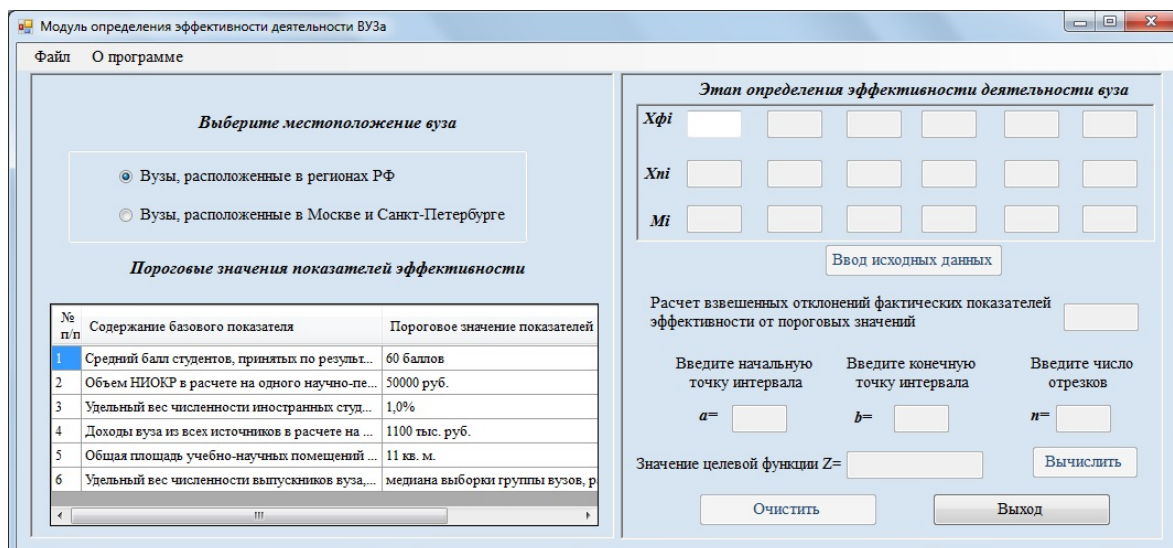


Рис. 1. Интерфейс программы при загрузке

Язык C# по сравнению с другими объектно-ориентированными языками программирования обладает рядом несомненных достоинств. Он хорошо организован, строг, большинство его конструкций логичны и удобны [5]. Развитые средства диагностики и редактирования кода делают процесс программирования достаточно эффективным. Мощная библиотека классов платформы .NET берет на себя массу рутинных операций, что дает возможность решать более сложные задачи, используя готовые строительные блоки [6].

Для описания программного продукта на рис. 2 приведена диаграмма переходов фокусов управления [7]. На диаграмме представлены также основные управляющие компоненты программы.

К основным этапам работы программы можно отнести следующие:

На первом этапе производится выбор местоположения вуза – Москва/Санкт-Петербург или регионы РФ путем использования группы переключателей (рис. 3). Значения пороговых показателей для Москвы и Санкт-Петербурга, а также для регионов приведены в соответствующих базах данных, созданных в Microsoft Access 2007. Добавление подключения баз к программе осуществлялось через поставщика данных .NET Framework для OLE DB.

На втором этапе осуществляется ввод фактических и пороговых значений показателей эффективности, весовых коэффициентов. Значения весовых коэффициентов назначаются экспертами эвристически.

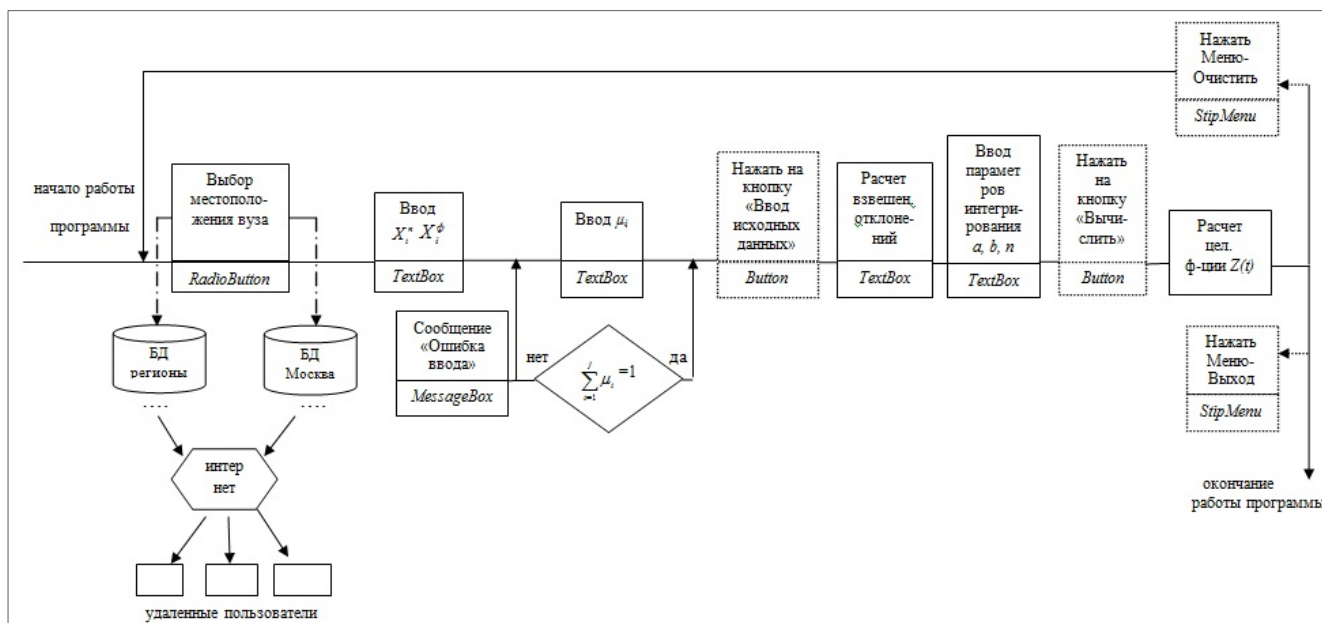


Рис. 2. Диаграмма перехода фокуса управления

The screenshot shows a window titled "Модуль определения эффективности деятельности ВУЗа". It has two main sections:

- Выберите местоположение вуза:** Two radio buttons are present. The second one, "Вузы, расположенные в Москве и Санкт-Петербурге", is selected.
- Пороговые значения показателей эффективности:** A table with 6 rows and 3 columns. The first row is highlighted in blue.

№ п/п	Содержание базового показателя	Пороговое значение показателей
1	Средний балл студентов, принятых по результ...	63 балла
2	Объем НИОКР в расчете на одного научно-пе...	95000/75000 руб.
3	Удельный вес численности иностранных студе...	3,0%
4	Доходы вуза из всех источников в расчете на ...	1500 тыс. руб.
5	Общая площадь учебно-научных помещений ...	13 кв. м.
6	Удельный вес численности выпускников вуза, ...	медиана выборки группы вузов М

On the right side, there is a section titled "Этап определения эффективности деятельности вуза" with input fields for X_i^f , X_i^n , and M_i (each with 6 columns). Below this are buttons for "Ввод исходных данных", "Расчет взвешенных отклонений фактических показателей эффективности от пороговых значений", and input fields for a , b , and n . At the bottom, there is a field for "Значение целевой функции Z=" and buttons for "Вычислить", "Очистить", and "Выход".

Рис. 3. Выбор местоположения вуза

В процессе работы программы производится вычисление взвешенных отклонений значений фактических показателей от пороговых значений (рис. 4) и определяется значение целевой функции (1) – квадратичного критерия, который позволяет осуществлять оперативное управление вузом посредством варьирования значения показателей и весовых коэффициентов:

$$Z(t) = \int_{t_{нач}}^{t_{кон}} \sum_{i=1}^j (X_i^n(t) - X_i^f(t))^2 \cdot \mu_i \cdot dt \rightarrow \min \quad (1)$$

где $i=1 \dots j$ – количество показателей эффективности, μ_i – весовой коэффициент i -го показателя эффективности, X_i^n , X_i^f – пороговое и фактическое значение данного показателя [8]. Вычисление значений функции $Z(t)$ выполняется с использованием численного метода Симпсона.

Для обеспечения необходимой точности расчетов вычисление значений функции $Z(t)$ рекомендуется выполнять 2-мя способами: с использованием численного метода Симпсона и нейронной сети *Cascade forward backprop* – каскадной двухслойной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки [9].

The screenshot shows the same software window as in Figure 3, but now with numerical data entered into the input fields:

- Ввод исходных данных:**
 - X_i^f : 58, 40000, 1, 1000, 9, 0.4
 - X_i^n : 60, 50000, 1, 1100, 11, 0.6
 - M_i : 0.1, 0.2, 0.1, 0.3, 0.15, 0.15
- Пороговые значения показателей эффективности:** The table is updated with new values:

№ п/п	Содержание базового показателя	Пороговое значение показателей
1	Средний балл студентов, принятых по результ...	60 баллов
2	Объем НИОКР в расчете на одного научно-пе...	50000 руб.
3	Удельный вес численности иностранных студ...	1,0%
4	Доходы вуза из всех источников в расчете на ...	1100 тыс. руб.
5	Общая площадь учебно-научных помещений ...	11 кв. м.
6	Удельный вес численности выпускников вуза, ...	медиана выборки группы вузов, р

Рис. 4. Ввод исходных данных

Величины весовых коэффициентов μ_i неизменны на всех временных интервалах и задаются в виде векторов. При определении значений весовых коэффициентов следует учитывать условие:

$$\sum_{i=1}^6 \mu_i = 1. \text{ В случае несоблюдения данного условия программа выдает сообщение об ошибке.}$$

После ввода данных и нажатия клавиши *Enter* фокус управления переходит на кнопку Ввод исходных данных. Производится расчет взвешенных отклонений пороговых и фактических значений показателей эффективности. При проведении расчетов показатели, вводимые в текстовые поля, автоматически нормируются относительно пороговых с тем, чтобы избежать ошибок в единицах измерения при определении средневзвешенных отклонений фактических показателей эффективности от их пороговых значений.

На третьем этапе необходимо ввести параметры интегрирования – начальную a , конечную b точки интервала и число отрезков интегрирования n .

На четвертом этапе производится вычисление значений целевой функции $Z(t)$ - квадратичного критерия (рис. 5).

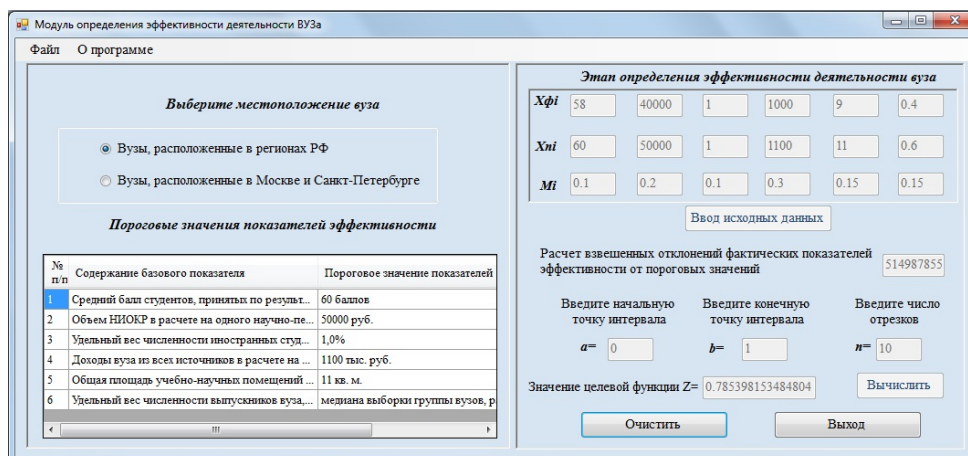


Рис. 5. Расчет взвешенных отклонений и значения целевой функции

После проведения расчетов можно очистить текстовые поля программы для осуществления дальнейших вычислений или выйти из программы, выбрав в Меню команду Выход.

Программа позволяет выполнять сохранение вычисленных значений показателей эффективности в базу данных для дальнейшего применения при проведении анализа деятельности вуза.

Схема организации взаимодействия различных групп пользователей с программой «Модуль для определения эффективности деятельности вуза» приведена на рис. 6.

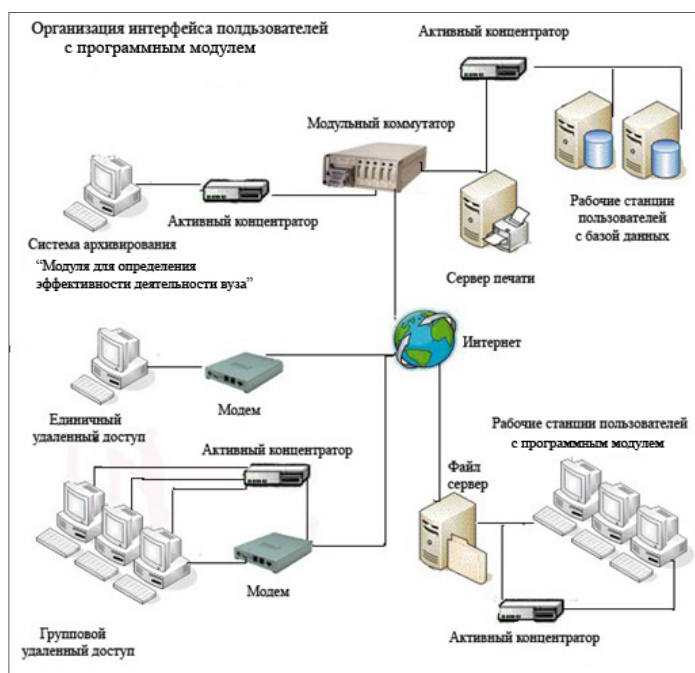


Рис. 6. Организация интерфейса пользователей с программным продуктом «Модуль для определения эффективности деятельности вуза»

На рабочих станциях пользователей программного продукта находятся базы данных с необходимой информацией по вузу: модули, рейтинги, акты самообследования вуза. Предусмотрена система архивирования исходной и расчетной информации. Через Интернет осуществляется доступ удаленной группы пользователей.

Таким образом, разработанный программный продукт может широко использоваться при проведении мониторинга в вузах с целью оценки эффективности деятельности вуза. С его помощью можно проводить сравнение пороговых и фактических показателей эффективности, а также определять образовательную стратегию для конкретного высшего учебного заведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байденко В.И. Основные тенденции развития высшего образования: глобальные и болонские измерения / В.И. Байденко. М.: Исслед. центр проблем качества подготовки специалистов, 2010. 352 с.
2. Джурицкий А.Н. Развитие образования в современном мире: учеб. пособие для вузов / А.Н. Джурицкий. 2-е изд., испр. и доп. М.: Владос, 2004. 239 с..
3. Деминг Э. Выход из кризиса: новая парадигма управления людьми, системами и процессами: пер. с англ. / Э. Деминг. Альпина бизнес букс, 2007. 418 с.
4. Министерство образования и науки [сайт]. Протокол заседания Межведомственной комиссии по проведению мониторинга деятельности государственных образовательных учреждений в целях оценки эффективности их работы и реорганизации неэффективных государственных образовательных учреждений от 29.04.2013. URL: <http://минобрнауки.рф> (дата обращения: 01.06.2013).
5. Троелсен Э. Язык программирования C# и платформа .NET 4.0. 5-е изд.: пер. с англ. / Э. Троелсен. М.: ООО «И. Д. Вильямс». 2011. 1392 с.: ил.
6. Рихтер Дж. CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.0 на языке C# / Дж. Рихтер. 3-е изд. СПб.: Питер. 2012.-928 с.: ил.
7. Кожанова Е.Р. Диаграммы переходов фокуса управления как средство проектирования пользовательского графического интерфейса / Е. Кожанова // Техника и технологии: пути инновационного развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф. 1 июля 2011 г. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2011. С. 80-83.
8. Яндыбаева Н.В. Математическая модель для прогнозирования аккредитационных показателей вуза / Н.В. Яндыбаева, В.А. Кушников // Управление большими системами. Вып. 40. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 314-343.
9. Кушников В.А. Модель Форрестера в управлении качеством образовательного процесса вуза / В.А. Кушников, Н.В. Яндыбаева // Прикладная информатика. 2011. № 3 (33). С. 65-73.
10. Кушников В.А. Управление образовательным процессом вуза на основе модели Дж. Форрестера / Н.В. Яндыбаева, В.А. Кушников // Вестник СГТУ. 2011. № 2 (55). С. 172-176.
11. Яндыбаева Н.В. Оценка качества образовательного процесса в вузе на основе модели Дж. Форрестера / Н.В. Яндыбаева, В.А. Кушников // Вестник СГТУ 2011. № 2 (55). С. 176-181.
12. Kushnikov V.A. Control in man-machine systems with automated correction of objectives / V.A. Kushnikov, A.F. Rezchikov, A.D. Tsvirkun // Meitan Kexun Jishu/Coal Science and Technology (Peking). 1998. T. 26. № 11. С. 168-175.
13. Kushnikov V.A. Control in man-computer systems with computer-aided goal correction / V.A. Kushnikov, A.F. Rezchikov, A.D. Tsvirkun // Automation and Remote Control. 1998. T. 59. № 7. P. 2. С. 1040-1046.

Яндыбаева Наталья Валентиновна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Социально-правовые и прикладные юридические дисциплины» Балаковского филиала Саратовской государственной юридической академии

Natalya V. Yandybaeva
Ph. D. Associate Professor
Department of Socio-legal and Applied
Jurisprudence Disciplines,
Balakovo Branch of Saratov State Law Academy

Кожанова Евгения Романовна кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и автоматизации машиностроения» Балаковского института техники, технологии и управления Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Evgeniya R. Kozhanova
Ph. D. Associate Professor
Department of Technologies and Mechanical
Engineering Automation,
Balakovo Institute of Engineering, Technologies
and Management,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Кушников Вадим Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim A. Kushnikov
Dr. Sc., Professor
Department of Applied Information Technologies,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 625.72

В.А. Гусев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ СВОБОДНОГО ДВИЖЕНИЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Скорость свободного движения – случайная величина и зависит от многих параметров. Чтобы обеспечить безопасность транспортного потока на автомобильной дороге, необходимо знать закон распределения скорости свободного движения легковых автомобилей. Скорость транспортного потока рассчитывают на основе среднего значения скорости свободного движения. Представлены результаты экспериментальных исследований скорости свободного движения, определен закон распределения, которому она подчиняется.

Скорость, скорость свободного движения, интенсивность транспортного потока, дорожные условия, распределение скорости

V.A. Gusev

DEFINING THE DISTRIBUTION LAW FOR THE FREE RUNNING SPEED OF MOTOR VEHICLES

The free running speed is a random variable and depends on many parameters. It is necessary to know the distribution law of the free running speed for cars to ensure traffic safety. The traffic flow speed is calculated by the average free running speed. The article deals with the experimental study of the free running speed for cars and the definition of the distribution law.

Speed, free running speed, traffic flow rate, road conditions, speed distribution

Одним из важнейших показателей, характеризующих дорожное движение транспортного потока, является скорость. График изменения скорости может служить наиболее объективной характеристикой процесса движения автомобилей по дороге. Для оценки состояния безопасности движения на автомобильных дорогах необходимо получать данные об изменении скорости всех транспортных средств на протяжении всего маршрута движения, т.е. непрерывно автоматически записывать скорости для каждого автомобиля и затем их обрабатывать. В настоящее время с развитием информационных технологий и внедрением автоматизированного сбора и обработки различных характеристик движения автомобилей возможно получение данных о скоростях для множества движущихся автомобилей. У нас в стране в крупных городах внедряются программные комплексы интеллектуальных транспортных систем, с помощью которых скорости движения автомобилей устанавливаются автоматически.

При проектировании и реконструкции автомобильной дороги принято оценивать скорость движения транспортных средств мгновенными значениями, зафиксированными в отдельных типичных точках дороги [1].

Водители используют максимально возможную скорость автомобиля лишь кратковременно и в исключительных случаях. Водитель стремится выбрать наиболее целесообразный режим скорости, исходя из двух главных критериев – минимально возможных затрат времени и обеспечения безопасности движения.

Скорость транспортного потока может быть определена в зависимости от скорости свободного движения транспортных средств в конкретных дорожных условиях [2]. Скорость свободного дви-

жения обеспечивается, когда автомобили находятся друг от друга на расстоянии, на преодоление которого требуется не менее 8 секунд. Скорость свободного движения зависит от многих факторов: дорожных условий, состояния дорожного полотна, психофизиологических качеств и поведения самого водителя, метеорологических условий. Все они оказывают существенное влияние на скорость свободного движения.

Для определения: скорости свободного движения, закона ее распределения и для разработки математической модели по оценке риска движения автомобилей в транспортном потоке были проведены исследования на автомобильной дороге федерального значения Р158 Нижний Новгород – Саратов в пределах Саратовской области. Наблюдения проводились в эталонных условиях на перегоне: на горизонтальном, прямолинейном участке автомобильной дороги длиной 100 м в сухую безветренную погоду при температуре 20⁰, геометрическая видимость 750 м, покрытие ровное с шероховатой обработкой, чистое. Неблагоприятные дорожные условия на участке отсутствовали. Измерения свободных скоростей движения легковых автомобилей проводились на одном и том же участке дороги, в одно и то же время с 10 утра до 16 часов дня, в разные дни недели. Было проведено 3 серии испытаний. Подробно описывается статистическая обработка одного испытания.

Для обработки экспериментальных данных применяем методы математической статистики. Составим дискретный ряд распределения свободных скоростей движения легковых автомобилей табл. 1.

Таблица 1

Ряд распределения скорости свободного движения легковых автомобилей

Интервал скоростей, м/с	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32	32-34	34-36	36-38	38-40
Середина интервала, v_i	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
Частота, n_i	1	2	7	12	17	12	10	8	6	3	2

Количество проводимых измерений принимаем не менее числа, определяемого методами математической статистики:

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \tag{1}$$

где t – коэффициент значимости (при доверительной вероятности, равной 95 %, $t=1,96$); σ – среднеквадратическое отклонение измеряемого параметра (скорости свободного движения м/с); Δ – заданная точность для определения средней скорости свободного движения легкового автомобиля, м/с ($\Delta=1,5$ м/с или 5,4 км/ч).

Средняя скорость определяется по формуле

$$v_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \tag{2}$$

где v_i – скорость свободного движения i -автомобиля, м/с; n – количество измерений, $n = \sum_{i=1}^n n_i$.

Среднеквадратическое отклонение вычисляется по формуле

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{cp})^2}{n-1}}, \tag{3}$$

где v_i – скорость свободного движения i -го автомобиля, м/с; v_{cp} – среднее значение скорости свободного движения, м/с.

Расчеты основных статистических показателей: средней скорости свободного движения, среднеквадратического отклонения скорости свободного движения выполнены в Microsoft Excel. При 80 измерениях: $v_{cp} = 27,71$ м/с (99,76 км/ч); дисперсия $\sigma_v^2 = 33,64$ м²/с²; $\sigma_v = \sqrt{33,64} = 5,75$ м/с (20,71 км/ч).

Для сравнения приведены расчеты (см. табл. 2) с использованием мультипликативного метода и метода суммирования для определения средних значений и среднеквадратических отклонений скорости свободного движения легкового автомобиля [1].

Таблица 2

Статистическая обработка наблюдаемых скоростей свободного движения легкового автомобиля на участке дороги Нижний Новгород-Саратов

Разряды интервалов скоростей, м/с	Середина разряда, м/с v_i	Абсолютная частота, m_i	Частичная сумма, S_m	Накопленная частота, T	Середина условного интервала, l_m	$l_m \cdot m_i$	l_m^2	$l_m^2 \cdot m_i$
18-20	19	1	1	1	-5	-5	25	25
20-22	21	2	3	4	-4	-8	16	32
22-24	23	7	10	14	-3	-21	9	63
24-26	25	12	22	36	-2	-24	4	48
26-28	27	17	39	75	-1	-17	1	17
28-30	$29 = v_a$	12	51	126	0	0	0	0
30-32	31	10	61	187	1	10	1	10
32-34	33	8	69	256	2	16	4	32
34-36	35	6	75	331	3	18	9	54
36-38	37	3	78	409	4	12	16	48
38-40	$39 = v_k$	2	80	489	5	10	25	50
		$n=80$	$M=489$	$\Sigma T=1928$		$B=-9$		$A=379$

Получили:

по методу суммирования, при $d=2$ (d – разность между равностоящими вариантами, M – сумма частичных сумм, T – сумма накопленных частот):

средняя скорость свободного движения

$$v_{cp} = v_k - d \cdot \left(\frac{M}{n} - 1 \right) = 39 - 2 \cdot \left(\frac{489}{80} - 1 \right) = 28,78 \text{ м/с};$$

$$\text{дисперсия } \sigma_v^2 = \frac{d^2}{n-1} \cdot \left(2 \cdot \sum T - M - \frac{M^2}{n} \right) = \frac{4}{79} \left(2 \cdot 1928 - 489 - \frac{479^2}{80} \right) = 19,13 \text{ м}^2/\text{с}^2;$$

$$\text{среднеквадратическое отклонение скорости свободного движения } \sigma_v = \sqrt{\sigma_v^2} = 4,37 \text{ м/с}.$$

по мультипликативному методу:

$$\text{средняя скорость свободного движения } v_{cp} = v_a + \frac{d}{n} B = 29 + \frac{2}{80} (-9) = 28,78 \text{ м/с};$$

$$\text{дисперсия } \sigma_v^2 = \frac{d^2}{n-1} \cdot \left(A - \frac{B^2}{n} \right) = \frac{4}{79} \left(379 - \frac{(-9)^2}{79} \right) = 19,13 \text{ м}^2/\text{с}^2;$$

$$\text{среднеквадратическое отклонение скорости свободного движения } \sigma_v = \sqrt{\sigma_v^2} = 4,37 \text{ м/с}.$$

Расчеты статистических параметров по приближенным методам: мультипликативному методу и методу суммирования совпадают.

Коэффициент вариации подсчитываем по формуле

$$C_v^v = \frac{\sigma_v}{v_{cp}}, \quad (4)$$

где σ_v – среднеквадратическое отклонение свободной скорости, м/с, v_{cp} – средняя скорость свободного движения, м/с.

$$C_v^v = \frac{5,75}{27,71} = 0,21.$$

Коэффициент вариации (относительный показатель) применяют не только для сравнительной оценки вариации, но и для характеристики однородности совокупности. Для распределений, близких к нормальному, совокупность считается однородной, если коэффициент вариации не превышает 0,33. В нашем случае коэффициент вариации равен 0,21 – совокупность однородна.

Нормальное, или гауссовское, **распределение** широко применяется во многих областях знаний и прикладных исследованиях. Многие параметры физических величин, вне зависимости от их природы, подчиняются такому распределению.

Выдвигаем гипотезу о том, что скорость свободного движения легкового автомобиля распределена по нормальному закону. Определим степень соответствия экспериментальных данных нормальному закону распределения. Выполним сравнение фактического распределения с законом нормального распределения по критерию согласия Пирсона χ^2 . Для этого подсчитаем теоретические значения и сравним их с эмпирическими (см. табл. 3). Вычисляем χ^2_{ϕ} по формуле

$$\chi^2_{\phi} = \sum_{i=1}^k \frac{(n_s - n_i)^2}{n_i}, \quad (5)$$

где n_s – частота, полученная экспериментально; n_i – теоретическая частота.

Теоретическую частоту вычисляем по формуле

$$n_i = P_i n, \quad (6)$$

где P_i – вероятность появления величины скорости свободного движения.

Для вычисления теоретических частот подсчитаем вероятность P_i по формуле [3]:

$$P_i = \Phi\left(\frac{v_{i+1} - v_{cp}}{\sigma_v}\right) - \Phi\left(\frac{v_i - v_{cp}}{\sigma_v}\right), \quad (7)$$

где $\Phi(u)$ – функция Лапласа; v_i и v_{i+1} – правая и левая границы скоростей свободного движения в интервалах; v_{cp} и σ_v – средняя скорость свободного движения и ее среднеквадратическое отклонение, м/с.

Для использования критерия Пирсона малочисленные частоты первых и последних двух интервалов объединяем.

Сумма последнего столбца определяет фактическую величину критерия Пирсона $\chi^2_{\phi} = 4,08$.

Эта величина сравнивается с предельными значением $\chi^2_{кр}$, значения которого даны в статистической таблице (см. приложение 5 [3]) в зависимости от уровня значимости и числа степеней свободы $k = s - 3$, где s – число групп, на которые разбита выборка.

При использовании критерия Пирсона число степеней свободы вычисляем по формуле $k = s - 1 - m$, где m – число параметров, оцениваемых по выборке. Нормальное распределение определяется двумя параметрами: математическим ожиданием a и средним квадратическим отклонением σ . Т.к. оба этих параметра оцениваются по выборке (в качестве оценки a принимают выборочную среднюю, в качестве оценки σ_v – выборочное среднеквадратическое отклонение), то $m=2$, следовательно $k = 8 - 3 = 5$.

Таблица 3

Сравнение эмпирического распределения скорости свободного движения легковых автомобилей с законом нормального распределения

Разряды интервалов скоростей, м/с	Абсолютная частота, n_s	Вероятность попадания в разряд, P_i	Теоретическое Количество измерений в разряде, n_i ($n_i = P_i n$)	$\frac{(n_s - n_i)^2}{n_i}$
<22	10	0,1191	9,52	0,02
24-26	12	0,1258	10,07	0,37
26-28	17	0,1752	14,02	0,64
28-30	12	0,1930	15,44	0,77
30-32	10	0,1682	13,45	0,89
32-34	8	0,1159	9,27	0,17
34-36	6	0,0632	5,06	0,18
>36	5	0,0397	3,18	1,05
	$\Sigma=80$	$\Sigma=1,0$	$\Sigma=80,0$	$\chi^2_{\phi} = 4,08$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $k=5$, $\chi_{кр}^2 = \chi_{кр}^2(\alpha, k) = \chi_{кр}^2(0,05; 5) = 11,1$. В нашем случае $4,08 < 11,1$, т.е. $\chi_{ф}^2 < \chi_{кр}^2$ – нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальном распределении генеральной совокупности [3]. Эмпирические и теоретические частоты отличаются незначительно, т.е. скорость свободного движения легкового автомобиля подчиняется нормальному закону распределения.

Доверительный интервал нормально распределенной величины определяем по формуле

$$v_{cp} - t_{\gamma} \frac{\sigma_v}{\sqrt{n}} \leq a \leq v_{cp} + t_{\gamma} \frac{\sigma_v}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

где σ_v – исправленное среднее квадратическое отклонение скорости свободного движения м/с; v_{cp} – средняя скорость свободного движения, м/с; $t_{\gamma} = t(\gamma, n)$ находим по таблице (см. приложение 3 [3]), γ – надежность и n – объем выборки.

В нашем случае $t_{\gamma} = t(\gamma, n) = t(0,05; 80) = 1,991 \approx 2,0$.

Тогда $27,71 - 2 \cdot 5,75 / \sqrt{80} \leq a \leq 27,71 + 2 \cdot 5,75 / \sqrt{80}$; $26,41 \leq a \leq 29,00$

С вероятностью 0,95 можно утверждать, что средняя скорость свободного движения в генеральной совокупности находится в пределах от 26,41 м/с до 29,00 м/с (или в пределах от 95,08 км/ч до 104,40 км/ч).

Плотность распределения вероятности случайной величины имеет вид

$$f(v) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

где σ – исправленное среднее квадратическое отклонение; a – математическое ожидание.

В нашем случае при средней скорости свободного движения v_{cp} и среднее квадратическое отклонение σ_v плотность распределения вероятности скорости свободного движения принимает вид

$f(v) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-v_{cp})^2}{2\sigma_v^2}}$. На рис. 1 показана гистограмма распределения и плотность вероятности

распределения. Функция распределения показана на рис. 2.

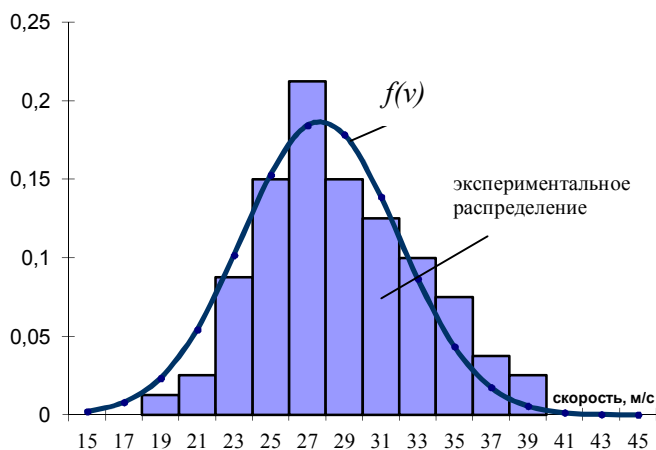


Рис. 1. Гистограмма и плотность вероятности распределения скорости свободного движения

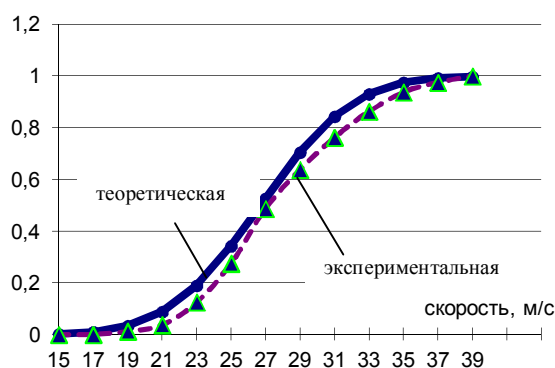


Рис. 2. Функция распределения скорости свободного движения

Выводы. Исследование плотностей распределения скорости свободного движения легковых автомобилей показало, что скорости движения согласуются с гипотезой о нормальном распределении. Следовательно, для вывода основных формул оценки риска по пропуску транспортных потоков можно использовать закон нормального распределения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска: в 2 ч. / В.В. Столяров. Саратов: СГТУ, 1994. Ч. 1. 184 с.; Ч. 2. 232 с.
2. Семенова Н.С. Оценка длин переходно-скоростных полос на транспортных развязках с учётом закономерностей движения транспортных потоков / Н.С. Семенова, В.В. Столяров // Вестник СГТУ. – 2011. – №4 (60). – Вып.2 . – С.181-184.
3. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учеб. пособие для студентов вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш.шк., 2004. – 404 с.

Гусев Владимир Анатольевич –
аспирант кафедры «Транспортное строительство»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir A. Gusev –
Postgraduate
Department of Construction and Transportation
Engineering, Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 625.72: 656.11

В.В. Столяров

**ОЦЕНКА РИСКА ОПЕРЕЖЕНИЯ БЫСТРОХОДНЫМИ
АВТОМОБИЛЯМИ ТИХОХОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
НА ШЕСТИ- И ВОСЬМИПОЛОСНЫХ АВТОМАГИСТРАЛЯХ**

Разработаны математические модели теории риска для существующих дорог с шестью и восьмью полосами движения. Определены требуемые значения ширины покрытия этих дорог при расчетных скоростях движения 33,3 и 38,8 м/с (120 и 140 км/ч).

Автомобильные магистрали с шестью и восьмью полосами движения, математические модели теории риска, критическая ширина покрытия, расчетная скорость

V.V. Stolyarov

**ESTIMATING THE RISK OF OVERTAKING BY HIGH-SPEED CARS
OF LOW-SPEED CARS ON SIX AND EIGHT LANE HIGHWAYS**

The developed mathematical models for the risk theory can be applied for the existing roads with six and eight lanes. The values of the covering width on such roads are defined for the speeds at 120 and 140 km/h.

Highways with six and eight lanes, mathematical models of the risk theory, critical width of a covering, settlement speed

В настоящее время на подходах к крупным областным центрам, некоторым районным городам всё чаще прибегают к строительству автомагистралей с шестью – и восьмью полосами движения.

Такие решения применяют потому, что интенсивность транспортного потока на въездах в крупные города и на кольцевых (объездных) дорогах в часы «пик» превышает пропускную способность четырёхполосных автомагистралей. Поэтому всё острее проявляет себя проблема развития и применения математических моделей теории риска к уже существующим автомагистралям с шестью и восьмью полосами движения.

Для анализа и оценки риска опережения быстроходными автомобилями тихоходных транспортных средств на автомагистралях с шестью и восьмью полосами движения применима формула вида

$$r = P(z > 0) = 1 - P(z < 0) = 1 - \int_{-\infty}^u \left(\int_{-\infty}^z f(z - x_1) \cdot f(x_1) du \right) dv \quad (1)$$

Решая внутренний интеграл выражения (1) по методике, описанной в работе [1] при суммировании нормальных законов распределения, получаем

$$r = 1 - \int_{-\infty}^u f(z) dz = 1 - \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^u e^{-(z-a)^2 / (2 \cdot \sigma_z^2)} \cdot dz, \quad (2)$$

где a – интервал между математическими ожиданиями нормально распределенных величин (в данном случае интервал между средним значением B_{CP} фактической ширины и средним значением критической ширины B_{KP} покрытия, на котором риск столкновения автомобилей равен 50%);

$\sigma_z = \sigma_a = \sqrt{\sigma_{B_{CP}}^2 + \sigma_{B_{KP}}^2}$ – среднеквадратическое отклонение суммарного распределения двух нормально распределенных величин (фактической и критической ширины покрытия).

Заменой переменной $u = (z - a) / \sigma_z$ при $a = 0$ и $dz = \sigma_z \cdot du$ раскрываем внешний интеграл и получаем риск или вероятность нежелательного события (вероятность столкновения) в виде

$$r = P(Z > 0) = 1 - P(Z < 0) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^u e^{-u^2 / 2} \cdot du = 1 - \Phi_u(u) = 1 - \Phi_u(z / \sigma_z). \quad (3)$$

Используя зависимость $\Phi_u(u) = 0,5 + \Phi(u)$ переходим от табулированной функции нормального распределения $\Phi_u(u)$ к табулированной функции Лапласа $\Phi(u)$ и получаем формулу теории риска в общем виде:

$$r = 1 - \Phi_u(z / \sigma_z) = 1 - [0,5 + \Phi(u)] = 0,5 - \Phi(z / \sigma_z). \quad (4)$$

При $z = a = B_{CP} - B_{KP}$ (см. выше) и $\sigma_a = \sqrt{\sigma_{B_{CP}}^2 + \sigma_{B_{KP}}^2}$ окончательно получаем

$$r = 0,5 - \Phi \left(\frac{B_{CP} - B_{KP}}{\sqrt{\sigma_{B_{CP}}^2 + \sigma_{B_{KP}}^2}} \right), \quad (5)$$

где r – риск столкновения автомобилей при опережении со сменой полос движения; B_{CP} – среднее значение фактической ширины покрытия в одном направлении движения на шести- или восьмиполосной автомагистрали, м; B_{KP} – среднее значение критической ширины покрытия в одном направлении движения: на шести- или восьмиполосной дороге, на которой риск опережения со сменой полос движения соответствует 50% ДТП, м; $\sigma_{B_{CP}}$ – среднее квадратическое отклонение фактической ширины покрытия, или допустимое значение среднего квадратического отклонения данной ширины покрытия, м; $\sigma_{B_{KP}}$ – среднее квадратическое отклонение критической ширины покрытия, м; $\Phi(u)$ – табулированная функция Лапласа в зависимости от значения квантили подынтегральной функции $u = (B_{CP} - B_{KP}) / \sqrt{\sigma_{B_{CP}}^2 + \sigma_{B_{KP}}^2}$.

Обосновывают допуск на среднее квадратическое отклонение ($\sigma_{B_{ин}}^{don}$) ширины покрытия в одном направлении движения по формуле (2.90), аналогичной формуле (2.84)

$$\sigma_{B_{ПП}}^{\text{доп}} = 2,45 \cdot \Delta_{\text{доп}} \cdot \left(\frac{B_{ПП}}{d} \right)^2, \quad (6)$$

где $\Delta_{\text{доп}}$ – допустимое отклонение ширины покрытия относительно проектной ширины покрытия ($\Delta_{\text{доп}} = 0,060 \text{ м}$), м; $B_{ПП}$ – проектная или средняя ширина покрытия в одном направлении дороги, м; d – нормированное (допустимое) расстояние между поперечниками (м), через которое измеренное отклонение при приёмке дороги в эксплуатацию ($\Delta_i = B_i - B_{ПП}$) не должно превышать допустимое отклонение ($\Delta_{\text{доп}} = 0,060 \text{ м}$) ширины покрытия. На меньших расстояниях между поперечниками, чем нормированное расстояние d фактические отклонения ширины покрытия от проектной ширины должны быть менее 6 см (0,06 м). Значение параметра d (м) определяется в зависимости от расчётной скорости движения по зависимости, учитывающей влияние на этот параметр числа полос движения:

$$d = k \cdot V_p, \quad (7)$$

где V_p – расчётная скорость движения на автомагистрали (скоростной дороге), км/ч; k – коэффициент, учитывающий число полос движения на автомагистрали:

Количество полос на дороге, шт:	4	6	8	10	12
Коэффициент k	0,104	0,147	0,190	0,232	0,274

Установим основные параметры ($B_{КР}$ и $\sigma_{B_{КР}}$) критического закона распределения для шести- и восьмиполосных дорог, как кинематические параметры, связанные со скоростью движения транспортных средств и их габаритными размерами по методике, описанной в работе [1].

В данной работе было показано, что при смене полосы движения среднеквадратическое отклонение коридора рыскания, при котором риск опережения стремится к 50%, описывается зависимостями:

– для опережаемого автомобиля (движущегося без манёвров)

$$\sigma_{B_{КР(1)}} = \frac{D_1 \cdot V_1}{2160}, \quad (8)$$

– для опережающего автомобиля (меняющего полосу движения)

$$\sigma_{B_{КР(2)}} = \frac{(D_2 + 3,6) \cdot V_2}{2160}; \quad (9)$$

где D_1 и V_1 – длина (м) и скорость (км/ч) опережаемого автомобиля; D_2 и V_2 – то же, опережающего автомобиля.

Интервалы коридора рыскания, при котором риск опережения равен 50%, определяют уравнениями [1]

– для опережаемого автомобиля

$$\delta_{i(1)} = t_{CP} \cdot \sigma_{B_{КР(1)}} = \frac{D \cdot V}{1440}; \quad (10)$$

– для опережающего автомобиля

$$\delta_{i(2)} = t_{CP} \cdot \sigma_{B_{КР(2)}} = \frac{(D + 3,6) \cdot V}{1440}, \quad (11)$$

где индексы i показывают порядковый номер автомобиля слева направо на соответствующих полосах дороги; индексы (1) и (2) указывают на то, что данный автомобиль опережаемый или опережающий.

В работе [1] показано, что в формулах (10) и (11) $t_{CP} = 1,5$. Используя зависимости (10) и (11) можно составить формулы критической ширины покрытия. Решим эту задачу, задавшись какой-либо схемой опережения. Так, для шестиполосной автомагистрали можно рассмотреть следующую схему опережения (рис. 1), которая соответствует реальным и самым опасным перестроениям. По составу движения в этой схеме опережения должны присутствовать в одном поперечном створе легковой автомобиль и автопоезд. Присутствие легкового автомобиля на крайней левой полосе (у центральной разделительной полосы) обязательно потому, что хотя бы один из опережающих автомобилей дол-

жен двигаться с расчётной скоростью (по которой определяются геометрические параметры дороги) или превышать её на 10-15% (учитывается предсказуемое неправильное поведение водителя). Наличие автопоезда следует предусматривать на крайней правой полосе движения. На средней (второй справа или слева) полосе шестиполосной автомагистрали следует учитывать движение туристического автобуса потому, что такой автобус имеет большие габариты и способен развить высокую скорость. Опаснее всего, когда автобус, маневрируя, опережает автопоезд.

Описанная схема соответствует реальным и самым опасным перестроениям на шестиполосных автомагистралях, когда в перестроении участвует крупногабаритное транспортное средство (в нашем случае туристический автобус). Короткая запись расчётной схемы слева направо следующая: легковой автомобиль (или внедорожник) + автобус (маневрирует) + автопоезд. Тогда, основа расчётной формулы, составленная слева направо, будет иметь вид:

$$B_{KP} = 2 \cdot \delta_{1(1)} + \frac{a_1 + c_1}{2} + 2 \cdot \delta_{2(2)} + a_2 + 2 \cdot \delta_{3(1)} + \frac{a_3 + c_3}{2}, \quad (12)$$

где $2 \cdot \delta_{1(1)} + \frac{a_1 + c_1}{2}$ – показатели легкового автомобиля (или полноразмерного внедорожника, кроссовера, пикапа), находящегося на крайней левой полосе данного направления дороги. Этот автомобиль движется со скоростью на 15% выше, чем расчётная скорость или с расчётной скоростью, но он не маневрирует и поэтому не является опережающим; $2 \cdot \delta_{2(2)} + a_2$ – показатели туристического автобуса, находящегося на второй полосе слева и маневрирующего со сменой полосы движения (опережающего автопоезд) в данном створе. Этот автомобиль находится на внутренней полосе автомагистрали и поэтому в расчёт входит только его ширина (a_2); $2 \cdot \delta_{3(1)} + \frac{a_3 + c_3}{2}$ – показатели не маневрирующего автопоезда, находящегося на крайней внешней полосе автомагистрали и поэтому в расчёте участвует как ширина автопоезда, так и его колея.

Критическую ширину покрытия, на которой возникает 50% ДТП, устанавливаем подстановкой формул (10) и (11) в уравнение (12):

$$B_{KP} = \frac{D_1 \cdot V_1}{720} + \frac{a_1 + c_1}{2} + \frac{(D_2 + 3,6) \cdot V_2}{720} + a_2 + \frac{D_3 \cdot V_3}{720} + a_3 \quad (13)$$

где V_1 – скорость движения легкового автомобиля или полноразмерного внедорожника, равная расчётной скорости или превышающая расчётную скорость на 15% (при учёте предсказуемое неправильное поведение водителя), км/ч; V_2 – скорость движения туристического автобуса, совершившего манёвр смены полосы движения. Его скорость должна быть выше скорости автопоезда (но ниже расчётной скорости на автомагистрали), км/ч; V_3 – скорость движения опережаемого автопоезда, км/ч; D_1, D_2, D_3 – длины соответствующих транспортных средств, м; a_1, a_2 и a_3 – ширина транспортных средств, м; c_1 и c_3 – колеи транспортных средств, находящихся на крайних полосах движения, м.

Среднеквадратическое отклонение критической ширины покрытия для шестиполосной автомагистрали (в одном направлении движения):

$$\sigma_{B(KP)} = \sqrt{\sigma_{B_{KP1(1)}}^2 + \sigma_{B_{KP2(2)}}^2 + \sigma_{B_{KP3(1)}}^2}, \quad (14)$$

где индексы 1, 2, и 3 – соответствуют порядковому номеру транспортного средства на поперечнике дороги слева направо; индексы (1) и (2) указывают на то, что данный автомобиль опережаемый или опережающий.

Подстановкой в выражение (14) формул (8) и (9) окончательно получаем:

$$\sigma_{B_{KP}} = \frac{\sqrt{(D_1 \cdot V_1)^2 + (D_2 + 3,6)^2 \cdot V_2^2 + (D_3 \cdot V_3)^2}}{2160}. \quad (15)$$

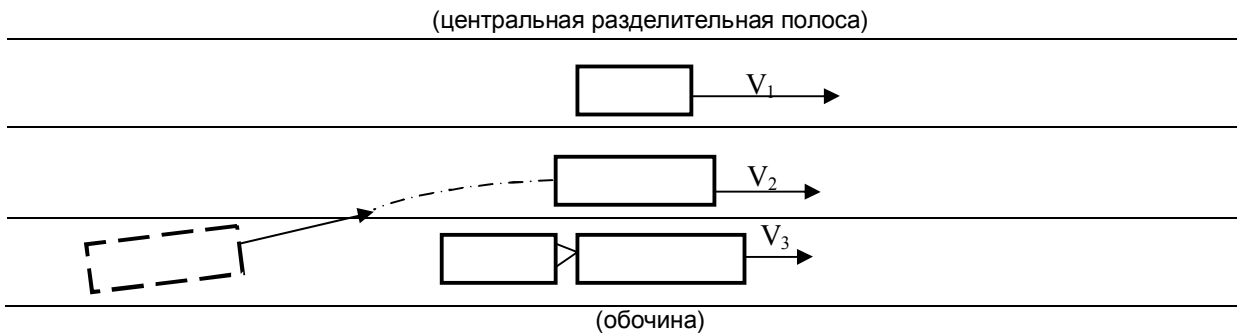


Рис. 1. Расчётная схема движения транспортных средств на шестиполосной автомагистрали

Риск возникновения ДТП на восьмиполосной автомагистрали, определяем по формуле (5).

Для восьмиполосной автомагистрали принимаем следующую расчётную схему движения, составленную слева направо: внедорожник + легковой (маневрирует) + автобус (маневрирует) + автопоезд.

Критическую ширину покрытия устанавливаем по формуле:

$$B_{кр} = \frac{D_1 \cdot V_1}{720} + \frac{a_1 + c_1}{2} + \frac{(D_2 + 3,6) \cdot V_2}{720} + a_2 + \frac{(D_3 + 3,6) \cdot V_3}{720} + a_3 + \frac{D_4 \cdot V_4}{720} + \frac{a_4 + c_4}{2}, \quad (16)$$

где $B_{кр}$ – минимальная (критическая) ширина покрытия, на которой динамические коридоры (коридоры рыскания) взаимодействуют друг с другом, м; V_1 – скорость движения полноразмерного внедорожника, превышающая расчётную скорость на 15% (учитываем предсказуемое неправильное поведение водителя) или равная расчётной скорости, км/ч; V_2 – скорость движения легкового автомобиля (например, ГАЗ-3110 «Волга»); данный автомобиль совершает вынужденный манёвр со сменой полосы движения, так как перед ним появляется маневрирующий при опережении автобус и поэтому скорость легкового автомобиля принимаем равной расчётной скорости, км/ч; V_3 – скорость движения автобуса; так как автобус опережает автопоезд, то его скорость необходимо считать меньше расчётной, км/ч; V_4 – скорость движения опережаемого автопоезда, км/ч; D_1, D_2, D_3 и D_4 – длины соответствующих транспортных средств, м; a_1, a_2, a_3 , и a_4 – ширина транспортных средств, м; c_1 и c_4 – колеи транспортных средств, находящихся на крайних полосах движения, м.

Среднее квадратическое отклонение критической ширины покрытия для восьмиполосной автомагистрали (в одном направлении движения) определяем по формуле:

$$\sigma_{B_{кр}} = \frac{\sqrt{(D_1 \cdot V_1)^2 + (D_2 + 3,6)^2 \cdot V_2^2 + (D_3 + 3,6)^2 \cdot V_3^2 + (D_4 \cdot V_4)^2}}{2160}. \quad (17)$$

Риск возникновения ДТП, определяем по формуле (5).

Исходные данные расчёта следующие.

Для шестиполосной дороги

Типы транспортных средств, находящиеся в одном створе на трёх полосах шестиполосной автомагистрали и их основные габаритные характеристики:

Параметры транспортных средств на участке опережения с перестроением	Легкового на левой полосе движения	Автобуса, совершающего перестроение с опережением	Автопоезда (тягача с двухосным прицепом)
Ширина, м	$a_1 = 1,82м$	$a_2 = 2,50м$	$a_3 = 2,50м$
Колея, м	$c_1 = 1,47м$	-	$c_3 = 2,00 м$
Длина, м	$D_1 = 4,74м$	$D_2 = 9,20м$	$D_3 = 14,80 м$

Примечание. Габаритные характеристики транспортных средств приведены в качестве примера и могут изменяться в соответствии с проектными данными. Длина автопоезда может быть принята равной 20,00 метров, как максимально допустимое значение длины автопоезда на дорогах Российской Федерации.

В данной статье проверим возможность проектирования автомагистралей с шириной внутренних полос движения 3,75 (по действующему нормативу) и 3,50 метра (на основе зарубежного опыта).

Скорости движения транспортных средств:

- легковой автомобиль движется с расчётной скоростью для данной категории шестиполосной дороги ($V_1 = V_p$) или со скоростью $V_1 = 1,15 \cdot V_p$;
- автобус маневрирует со скоростью 80 км/ч [2];
- автопоезд, движется со скоростью, принимаемой в зависимости от проектной ширины полосы движения (ширина внешней полосы 3,75 м):

ширина полосы, м	3,50	3,75
скорость автопоезда, км/ч	65	70

Для восьмиполосной дороги

Типы транспортных средств, находящиеся в одном створе (слева направо) на четырёх полосах восьмиполосной автомагистрали и их основные габаритные характеристики:

Параметры транспортных средств на участке опережения с перестроением	Внедорожника с параметрами	Легкового, совершающего перестроение с опережением	Автобуса, совершающего перестроение с опережением	Автопоезда (тягача с двухосным прицепом)
Ширина, м	$a_1 = 2,063м$	$a_2 = 1,82м$	$a_3 = 2,50м$	$a_4 = 2,50м$
Колея, м	$c_1 = 1,780м$	-	-	$c_4 = 2,00 м$
Длина, м	$D_1 = 4,98м$	$D_2 = 4,74м$	$D_3 = 9,20м$	$D_4 = 15,10 м$

Примечание. Габаритные характеристики транспортных средств могут быть приняты другими, например, легковой автомобиль может быть заменен внедорожником, автопоезд иметь другую длину (в соответствии с проектными данными, но не более 20,00 метров).

Скорости движения транспортных средств:

- внедорожник на крайней внутренней полосе движется с превышением расчётной скорости ($V_1 = 1,15 \cdot V_p$), соответствующей данной категории восьмиполосной дороги, а легковой автомобиль движется маневрируя с расчётной скоростью ($V_2 = V_p$);
- автобус, находящийся на второй справа полосе, на данном участке дороги совершил манёвр перестроения на скорости 80 км/ч [1, 2];

– автопоезд, движется по крайней правой полосе со скоростью, принимаемой в зависимости от проектной ширины полосы движения:

ширина полосы, м	3,50	3,75
скорость автопоезда, км/ч	60	65

В результате расчётов по данным математическим моделям были сделаны следующие выводы.

1. Современные нормативные требования к ширине покрытия позволяют:

– при расчётной скорости 120 км/ч обеспечивать допустимую величину риска $1 \cdot 10^{-4}$ на покрытии с тремя полосами движения в одном направлении дороги. При этом ширина одной (внутренней) полосы движения может быть принята 3,5 метра; ширина средней и внешней полос 3,75 метра; ширина краевых полос: со стороны центральной разделительной полосы 1,0 метра и со стороны обочины 0,75 метра ($1 + 3,5 + 2 \cdot 3,75 + 0,75 = 12,75$ м):

$$r = 0,5 - \Phi \left(\frac{B_{CP} - B_{KP}}{\sqrt{(\sigma_B^{don})^2 + \sigma_{B_{KP}}^2}} \right) = 0,5 - \Phi \left(\frac{12,75 - 10,04}{\sqrt{0,08^2 + 0,72^2}} \right) = 0,5 - \Phi(3,74) =$$

$$= 0,5 - 0,49990 = 0,0001 = 1 \cdot 10^{-4}.$$

Строительство таких дорог даст существенную экономию капиталовложений;

– при расчётной скорости 140 км/ч обеспечивается величина допустимого риска $1 \cdot 10^{-4}$ на шестиполосных автомагистралях с нормированными параметрами поперечного профиля: $1 + 3 \cdot 3,75 + 0,75 = 13,0$ м:

$$r = 0,5 - \Phi \left(\frac{B_{CP} - B_{KP}}{\sqrt{(\sigma_B^{don})^2 + \sigma_{B_{KP}}^2}} \right) = 0,5 - \Phi \left(\frac{13,00 - 10,18}{\sqrt{0,08^2 + 0,74^2}} \right) = 0,5 - \Phi(3,79) =$$

$$= 0,5 - 0,49992 = 8 \cdot 10^{-5} \approx 1 \cdot 10^{-4}.$$

– на восьмиполосных автомагистралях при расчётной скорости 140 км/ч величина допустимого риска $1 \cdot 10^{-4}$ может быть обеспечена в случае увеличения ширины краевых полос на центральной разделительной полосе и на обочине до значений 1,25 м и 1,00 м соответственно (допустимые параметры поперечного профиля $1,25 + 4 \cdot 3,75 + 1 = 17,25$ м):

$$r = 0,5 - \Phi \left(\frac{B_{CP} - B_{KP}}{\sqrt{(\sigma_B^{don})^2 + \sigma_{B_{KP}}^2}} \right) = 0,5 - \Phi \left(\frac{17,25 - 13,94}{\sqrt{0,07^2 + 0,92^2}} \right) = 0,5 - \Phi(3,59) =$$

$$= 0,5 - 0,4998 = 2 \cdot 10^{-4} \approx 1 \cdot 10^{-4}.$$

Все полосы движения при расчётной скорости 140 км/ч должны быть шириной 3,75 м.

Примечание. Увеличение ширины покрытия можно выполнить не по схеме увеличения ширины краевых полос на разделительной полосе и обочине, а по схеме увеличения ширины полос движения. Например, увеличив ширину полос движения до значения 3,95 м и уменьшив ширину краевой полосы на обочине до 0,65 м, получаем ту же величину риска для восьмиполосной автомагистрали при поперечном профиле покрытия $1 + 4 \cdot 3,90 + 0,65 = 17,25$ м в одном направлении дороги.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 1-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения: Изд. офиц. Введ. 01.07.2005. М.: Изд-во стандартов, 2005. 11 с.
2. ГОСТ Р 51898-2002 Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты: Изд. офиц. Введ. 05.06.2002 М.: Изд-во стандартов, 2002. 12 с.
3. ГОСТ Р 52399-2005. Геометрические элементы автомобильных дорог. М.: Стандартинформ, 2006. 87 с.

4. О техническом регулировании: Федеральный Закон № 184-ФЗ. – Введ. 2002–27–12. – Электрон. дан. М., 2011. URL: <http://www.consultant.ru>.
5. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с учётом теории риск: в 2 ч. / В.В. Столяров. Саратов: СГТУ, 1994. Ч. 1. 184 с.; Ч. 2. 232 с.
6. Столяров В.В. Технический регламент «Проектирование автомобильных дорог» (Альтернативный проект) / В.В. Столяров // Дороги. Инновации в строительстве. Санкт-Петербург. 2010. № 5. С. 28-30.

Столяров Виктор Васильевич –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Транспортное
строительство» Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Victor V. Stolyarov –
Dr. Sc., Professor
Head: Department of Construction
and Transportation Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14

ТРАНСПОРТ

УДК 656.135

С.М. Мочалин, Л.В. Тюкина

ПРОБЛЕМЫ МЕЖОРГАНИЗАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ В ПРЯМОЙ ЦЕПИ ПОСТАВОК

Статья посвящена проблемам, возникающим при взаимодействии участников доставки грузов автомобильным транспортом в прямой цепи поставок. Обозначены проблемы и причины, приводящие к ним. Рассмотрены последствия проблем межорганизационного взаимодействия.

Проблемы взаимодействия, транспортировка, цепь поставок (ЦП), грузоотправитель (ГО), грузополучатель (ГП)

S.M. Mochalin, L.V. Tyukina

PROBLEMS OF INTER-ORGANIZATIONAL INTERACTION OF PARTICIPANTS PROVIDING CARGO TRANSPORTATION IN DIRECT SUPPLY CHAINS

The article is devoted to the problems arising at interaction of participants of cargo transportation in direct supply chains. The authors discuss the problems and reasons for these problems, including the implications of the inter-organizational cooperation problems.

Problems of interaction, transportation, supply chain, the shipper, consignee

Цель логистической деятельности можно считать достигнутой, если соблюдены приведенные 6 правил [2]. Причиной недостижения цели логистической деятельности являются проблемы межорганизационного взаимодействия участников ЦП. На практике участниками ЦП являются «три стороны» логистики: 1-я сторона это ГО; 2-я сторона – ГП; 3-я сторона – логистические посредники, в транспортной логистике это грузоперевозчики, экспедиторы, грузовые терминалы, автотранспортные предприятия (АТП). Только тесное взаимодействие трех сторон логистики может обеспечить выполнение условий доставки [5;7]. На транспортный процесс, который осуществляет АТП в ЦП накладываются свои условия и ограничения. Условия и ограничения могут накладываться ГО, ГП и они будут уникальны только для этой ЦП. Главное из таких требований – полнота и своевременность удовлетворения спроса на необходимый конечному потребителю товар [3, 8]. Именно на стыках функциональных областей, основной и сопутствующие потоки нуждаются в организации планирования и управления взаимодействия участников ЦП [6, 10].

Международную практику решения проблем взаимодействия участников ЦП, рассмотрим на примере компании Eyefortransport, которая занималась исследованием данных проблем. Так в 2005 году компанией было проведено исследование, в котором приняли участие более 200 компаний из списка Fortune 500, которые являются ведущими американскими производителями и ретейлерами. В ходе исследования были выявлены следующие проблемы:

- ограниченная пропускная способность грузоперевозчиков;
- порчи и повреждения;
- загруженность каналов поставки;
- нехватка водителей;
- повышение тарифов на перевозки;
- ограничения правительства и систем безопасности;
- интеграция данных;
- непрозрачность цепочки поставок;
- отсутствие взаимодействия с партнерами [1].

С 2008 по 2010 гг. в СиБАДИ были проведены исследования проблем взаимодействия участников ЦП, возникающих в цепях поставок. В исследовании приняли участие более 220 компаний, которые являются ведущими российскими производителями, ритейлерами и провайдером логистических услуг. Обобщение практики взаимодействия участников доставки автомобильным транспортом [1] и проведенных исследований на базе СиБАДИ позволило выявить следующие проблемы взаимодействия и причины их возникновения (табл. 1).

Таблица 1

Проблемы взаимодействия участников доставки грузов и причины их возникновения

Проблемы	Причины
1. Задержка доставки заказанного объема партии	<ul style="list-style-type: none"> - несвоевременное предъявление груза к погрузке (в результате не организованной работы складских операторов); - увеличение времени погрузки (если погрузка осуществляется не погрузочными механизмами, а вручную); - задержка предоставления сопроводительных документов (длительное согласование условий заказа на доставку); - изменение условий заказа (может быть в результате изменения времени доставки груза, предложения по ассортименту груза); - несвоевременная подача автомобиля под погрузку (отсутствие у транспортной организации упорядочения поставки автомобилей под погрузку).
2. Простои транспортных средств в ожидании погрузочно-разгрузочных операций	<ul style="list-style-type: none"> - отсутствие планирования отправки во времени и последовательности (не достаточно организована деятельность компании; не предусмотрен отдел планирования; отсутствие упорядочения прибытия автомобиля в пункты погрузки-разгрузки); - недостаточное количество современных погрузочно-разгрузочных механизмов с соответствующей производительностью, а также не применение современных погрузочно-разгрузочных технологий (проблемы внедрения новых технологий; отсутствие программы обновления погрузочно-разгрузочных механизмов; дефицит свободных площадей; недостаточный бюджет организации для закупки данных механизмов; нахождение данных механизмов на ремонте); - превращение автомобиля в «склад на колесах» с целью применения кросс-докинговых технологий (грузополучателю выгоднее длительный срок держать груз в автомобиле, чем выполнять перегрузочные операции на складе).
3. Преждевременная доставка.	<ul style="list-style-type: none"> - преждевременное предъявление груза к погрузке грузоотправителем (не достаточно организованное планирование); - исполнение транспортных операций в более короткие сроки; - сокращение времени и количества погрузочно-разгрузочных операций (использование более производительных механизмов и современных технологий погрузки-разгрузки); - сокращение количества перевалок груза (использование кросс-докинговых технологий в ЦП).
4. Доставка груза не в соответствии с параметрами заказа (объем, ассортимент).	<ul style="list-style-type: none"> - отсутствие груза у грузоотправителя (в результате сбоев в поставке груза грузополучателю от поставщика); - ошибка в заказе (могут быть перепутаны объемы партии и ассортимент); - потеря груза в пути в результате естественных и других организационных причин (одна перевалка коксующегося угля приводит к потере 30% груза); - ошибка при погрузке (при заявке 3 коробок зеленого чая в результате ошибки могут погрузить 1 коробку черного чая и 2 коробки зеленого чая).
5. Неисполнение регулярности и последовательности поставки.	<ul style="list-style-type: none"> - не учет пропускной способности ЦП (в результате отсутствия возможности рассчитать данную величину, т.к. эта величина является переменной в зависимости от технико-эксплуатационных показателей участников ЦП); - неучет провозных возможностей транспортной организации (недостаточно организованная работа отдела планирования); - изменение количества заказов при неизменном объеме перевозок (1 вариант: годовой объем заказов равен 1000т., объем заказа 100т., частота заказа 10 раз в год; 2 вариант: годовой объем заказов равен 1000т., объем заказа 10т., частота заказа 100 раз в год. Причем, для любого варианта потребуются необходимые транспортные ресурсы)

6. Проблемы качества доставки: - проблема высоких тарифов	- высокие затраты на доставку (применение современных технологий, механизмов, требующих больших финансовых вложений).
- проблема надежности	- несвоевременность доставки (изначально в заявке были неопределенны сроки доставки); - низкий уровень сохранности груза (несоблюдение условий перевозки груза в зависимости от вида груза); - высокий риск (при небрежной транспортировке; отсутствие страхования груза); - несовместимость графика работы ЦП, ГО, ГП, транспортной компании (отсутствие технического взаимодействия – несоответствие используемых технических средств и свойств груза); - низкая репутация участников ЦП (нестабильное выполнение организацией своих обязательств).
- проблема малой гибкости	- неспособность предприятия быстро реагировать на изменение условий заказа (отсутствие предоставления заказчику рассрочки платежа).
- проблема отсутствия комплексного обслуживания	- обслуживание не соответствует в полной мере требованиям к доставке (малый ассортимент предлагаемых услуг, отсутствие склада)
- проблема недостаточной информативности	- недостоверность информации, несоответствие по времени прохождения информационного и грузового потоков (опережение информации, задержка информации).
- проблема доступности	- отсутствие удобств для заказчика при приеме заказа - обработка заказа занимает продолжительное время (продолжительный мониторинг заказов; согласование условий заказа); - неготовность к доставке (не выполнена погрузка груза).

Все эти проблемы приводят к невыполнению одного или нескольких принципов логистики, в результате не достигаются цели логистической деятельности. Наряду с проблемами взаимодействия участников доставки и причин, приводящим к ним, необходимо рассмотреть последствия данных проблем.

В табл. 2 приведены примеры последствий, возникающих в результате выявленных проблем.

Таблица 2

Последствия проблем взаимодействия участников доставки грузов

Проблемы	Последствия
Задержка доставки заказанного объема партии.	- сбой работы грузополучателя; - увеличение количества невыполненных доставок грузоперевозчиком; - потеря деловой репутации.
Простои транспортных средств в ожидании погрузочно-разгрузочных операций.	- увеличение затрат на транспортировку; - потеря заказов; - отсутствие упорядочения приводит к росту времени ожидания и уменьшению пропускной способности пункта; - простой в ожидании погрузки приводит к увеличению времени доставки груза, к несвоевременности подачи автомобиля под разгрузку.
Преждевременная доставка.	- увеличение запаса на складе заказчика; - простой в ожидании разгрузки.
Доставка груза не в соответствии с параметрами заказа (объем, ассортимент).	- в результате доставки неполного объема заказа возникает сбой производства; - в результате доставки завышенного объема заказа происходит увеличение запаса на складе заказчика.
Неисполнение регулярности и последовательности поставок.	- некорректно составленное расписание; - сбой работы всех участников доставки груза.
Проблемы качества доставки: - проблема высоких тарифов	- повышение тарифов на доставку формируют высокую цену товара и соответственно его конкурентно способность на рынке;
- проблема надежности	- несвоевременная доставка груза приводит к убыткам клиента; - возникают дополнительные затраты на хранение дополнительных запасов у грузоотправителей, грузополучателей; - в результате неправильного складирования, небрежности выполнения погрузочно-разгрузочных работ груз может быть поврежден, направлен не по адресу, украден.
- проблема малой гибкости	- уменьшение числа заказов
- проблема отсутствия комплексного обслуживания	- невозможность предоставления определенного набора услуг, что приводит к потере клиентуры.
- проблема недостаточной информативности	- отсутствие уверенности в надежности доставки; - отсутствие возможности изменить условия доставки.

- проблема доступности	- снижение конкурентоспособности транспортной организации в сфере оказания транспортных услуг; - уменьшение числа заказов; - потеря деловой репутации.
------------------------	--

В результате отлаженного взаимодействия участников доставки груза автомобильным транспортом возможно соблюдение такого критерия, как доставка груза «точно в срок», выполнение 6 правил логистики [4;9].

В данной статье:

1. Проанализированы проблемы взаимодействия процессов транспортировки и управления запасами в прямой цепи поставок;
2. Выявлены причины возникновения проблем и их последствия в ЦП;
3. Сформулированы условия и ограничения, которые необходимо принять при формировании модели планирования прохождения материальных и информационных потоков в прямой ЦП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев В.М., Фадеева Е.Ю. Проблемы управления цепочками поставок и пути их преодоления // Интегрированная логистика. Научный информационный журнал. 2012. № 3 С. 18-20.
2. Гаджинский А.М. Основы логистики: учеб. пособие / А.М. Гаджинский. М.: Изд-во ИВЦ «Маркетинг», 2012. 124 с.
3. Уотерс Д. Логистика. Управление цепью поставок: пер. с англ. Серия «Зарубежный учебник» / Д. Уотерс. М.: Изд-во ЮНИТИ – ДАНА, 2003. 530 с.
4. Попков Т., Гарифуллин М. Оптимизация цепочек поставок: транспортные сети: сайт XJ Technologies [Электронный ресурс]. URL: <http://www.xjtek.ru> (дата обращения: 19.12.2014).
5. Корпоративная логистика. 300 ответов на вопросы профессионалов / В.И. Сергеев, Б.Л. Белов, В.В. Дыбская и др. М.: Изд-во Инфра-М, 2005. 976 с.
6. Иванов Д.А. Управление цепями поставок / Д.А. Иванов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 660 с.
7. Миротин, Л.Б. Эффективность логистического управления / Л.Б. Миротин. М.: Экзамен, 2004. 448 с.
8. Лазарев А.А. Теория расписания. Задачи и алгоритмы / А.А. Лазарев, Е.Р. Гафаров. М.: Экзамен, 2011. 213 с.
9. Беспалов Р.С. Транспортная логистика. Новейшие технологии построения эффективной системы доставки / Р.С. Беспалов. М.: Изд-во «Вершина», 2007. 384 с.
10. Транспортная логистика: учебник для транспортных вузов. / под общ. ред. Л.Б. Миротина. М.: Изд-во Экзамен, 2002. 512 с.

Мочалин Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор декан факультета экономики и управления Сибирской автомобильно-дорожной академии

Sergei M. Mochalin – Dr. Sc., Professor
Dean: Faculty of Economics and Management, Siberian Automobile and Highway Academy

Тюкина Людмила Владимировна – аспирант, кафедры «Логистика» Сибирской автомобильно-дорожной академии

Lyudmila V. Tyukina – Postgraduate
Department of Logistics, Siberian Automobile and Highway Academy

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 16.06.14

УДК 330.322

А.А. Изюмский, К.А. Кирий, Т.В. Коновалова, С.Л. Надирян

РОЛЬ ИНВЕСТИЦИЙ В СОЗДАНИИ И РАЗВИТИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрена роль инвестиций в создании и развитии региональных логистических систем, которые являются важной составной частью национальной экономики.

Значение логистической системы определяется её ролью в территориальном распределении средств и предметов труда. Экономическое развитие региона влияет на развитие логистических систем, если эффективность капитальных вложений (инвестиций) достигает требуемого инвестором уровня. Экономическая эффективность транспортно-логистической системы может определяться путем сопоставления доходов и издержек

Транспортно-логистическая система, логистические цепи, инвестиции, экономика, алгоритмы, материальные потоки, финансовые потоки, валовый доход

A.A. Izyumsky, C.A. Kiriya, T.V. Konovalova, S.L. Nadiryan

THE ROLE OF INVESTMENTS IN THE CREATION AND DEVELOPMENT OF REGIONAL LOGISTICS SYSTEMS

The article considers the role of investments in the creation and development of regional logistics systems, which are an important part of the national economy. The value of the logistics system is determined by its role in the territorial distribution of means and objects of labour. The region's economic development influences the development of logistics systems if the efficiency of capital investments (investments) amounts the level required by an investor. Economic efficiency of a transport and logistics system can be determined by comparing the income and expenses.

Transport and logistics system, supply chain, investment, economy, algorithms, financial flows, cash flow, gross profit

Транспортно-логистическая система является важной составной частью национальной экономики. Значение транспортно-логистической системы определяется её ролью в территориальном распределении средств и предметов труда: специализация регионов, их комплексное развитие невозможны без эффективно функционирующей транспортной системы. Транспортный фактор играет значительную определяющую роль в размещении производства. Однако нельзя однозначно говорить о транспорте, как об определяющем факторе размещения производительных сил. Экономическое развитие региона может влиять на развитие транспортных систем, если эффективность капитальных вложений (инвестиций) достигает требуемого инвестором уровня.

Экономическая эффективность транспортно-логистической системы может определяться путем сопоставления доходов и издержек. При этом обычно применяются два подхода. В первом случае экономическая эффективность рассчитывается в среднем за определенный интервал времени путем сравнения валовых доходов и издержек. Во втором случае – методом сопоставления предельных затрат и предельных издержек [1].

Рассмотрим возможности эффективного внедрения транспортно-логистической системы в региональную транспортную систему. Обычно региональная транспортная система характеризуется устойчивым материалопотоком, который достаточно точно прогнозируем во времени и пространстве. Однако, представляется возможным увеличить перспективный материалопоток при эффективном его распределении с учетом внедрения транспортно-логистической системы. Алгоритм оценки оптимального значения материального потока для внедрения транспортно-логистической системы представлен на рис. 1.

Если при определенной величине материального потока размер дополнительного валового дохода, получаемого в результате внедрения транспортно-логистической системы, превышает размер затрат на создание и реализацию этой системы, то можно продолжать работу. Изменяя масштабы материального потока и изучая размер достигаемого при этом эффекта, можно вывести оптимальный с точки зрения эффективности объем материального, финансового, информационного потока [2,3].

Сложность оценки влияния конкретных инвестиций в определенном звене (цепи) транспортно-логистической системы на эффективность системы в целом заключается в недостатке информации о логистических потоках во всех звеньях и подсистемах логистической системы региона. Так, например, увеличение инвестиций в пути сообщения на 15% может повысить финансовый поток на выходе в торговых организациях на 27-30%. Поэтому целесообразно рассматривать инвестиции, как метод управления финансовыми потоками во всех звеньях логистической цепи.

Финансовые потоки на отдельных стадиях логистической деятельности, представлены на рис. 2. При этом финансовые потоки невозможно рассматривать обособленно.

Использование свойств корреляции финансовых, материальных и информационных потоков на практике возможно путем согласованного управления ресурсопотоками в местах их наложения.

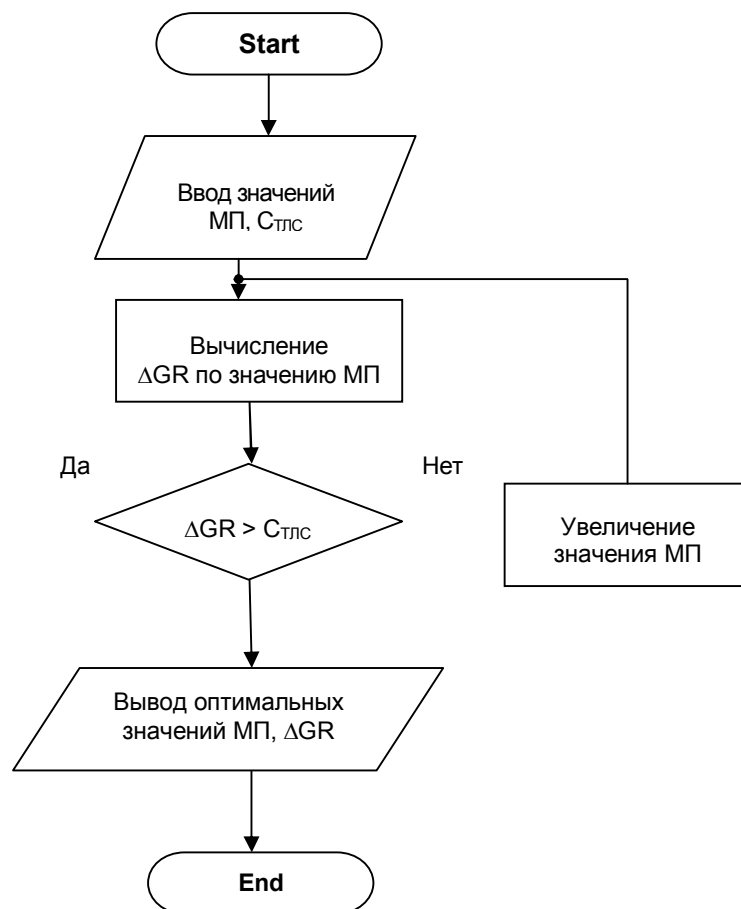


Рис. 1. Алгоритм оценки оптимального значения материального потока для внедрения транспортно-логистической системы/ Сокращения: МП – материальный поток; ΔGR - дополнительный валовой доход; С_{ТЛС} – затраты на создание и введение транспортно-логистической системы



Рис. 2. Стадии финансовых потоков

Определив узел, как место пересечения ресурсопотоков, можно утверждать, что воздействие в узлах является наиболее эффективным на всех этапах логистической деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние транспорта на инвестиционную привлекательность региона. Надирян С.Л., Дудник Д.Ю., Гибашева А.О. Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 5. С. 146-150.
2. Влияние инвестиций в основной капитал транспорта на развитие экономики региона. Коновалова Т.В., Надирян С.Л. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. Т. 2. № 2с (71). С. 333-336.
3. Оптимизация инвестиций транспортно-логистическую деятельность предприятия. Коновалова Т.В., Надирян С.Л. Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2013. № 3. С. 208-210.

Изюмский Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент «Организации перевозок и дорожного движения» Кубанский государственный технологический университет

Alexandre A. Izyumsky– Ph. D., Associate Professor
Department of Transportation Road Traffic Organization,
Kuban State Technological University

Кирий Консуэлла Алексеевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладной математики», Кубанский государственный технологический университет

Consuella A. Kiriya– Ph. D., Associate Professor
Department of Applied Mathematics,
Kuban State Technological University

Коновалова Татьяна Вячеславовна – кандидат экономических наук, доцент, Заведующая кафедрой «Организации перевозок и дорожного движения» Кубанский государственный технологический университет

Tatyana V. Konovalova– Ph. D., Associate Professor
Head: Department of Transportation Road Traffic Organization,
Kuban State Technological University

Надирян София Леоновна – ассистент кафедры «Организации перевозок и дорожного движения» Кубанский государственный технологический университет

Sofiay L. Nadiryana– Assistant Lecturer
Department of Transportation Road Traffic Organization,
Kuban State Technological University

Сенин Иван Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Организации перевозок и дорожного движения» Кубанский государственный технологический университет

Ivan S. Senin– Senior Lecturer
Department of Transportation Road Traffic Organization,
Kuban State Technological University

Статья поступила в редакцию 17.02.14, принята к опубликованию 20.06.14

СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

УДК 37.01:001.8

В.П. Жуковский, Л.А. Скворцова

ОТВЕТСТВЕННОСТЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Статья посвящена рассмотрению теоретических аспектов проблемы ответственности в деятельности руководителей образовательных учреждений. Проведен теоретико-методологический междисциплинарный анализ сущности понятия «ответственность», рассмотрены подходы к оценке данного феномена. Авторы акцентируют внимание на концепции Роттера, посредством которой анализируют понятие «ответственность» через призму локуса контроля.

Личность, ответственность, концепция Дж. Роттера, локус контроля

V.P. Zhukovsky, L.A. Skvortsova

RESPONSIBILITY OF THE HEAD OF AN EDUCATIONAL INSTITUTION: THEORETICAL ANALYSIS OF THE PROBLEM

The article is devoted to the theoretical aspects of the problem relating responsibility of the head of an educational institution. An interdisciplinary theoretical-methodological analysis is performed to find out the essence of the notion «responsibility», and to discuss the approaches regarding the assessment of the phenomenon. The authors focus on the Rotter concept which is used to analyze the concept «responsibility» through the prism of control locus.

Personality, responsibility, the Rotter concept, locus of control

Модернизация российского образования в современных социокультурных условиях предполагает повышение требований к руководителям образовательных учреждений как в профессиональном, так и в личностном аспектах. Действия руководителя в процессе выполнения им управленческих функций должны быть научно обоснованными; своевременными и оперативными, способствующими решению выявленных проблем в педагогической деятельности; нормативными (соотнесенными с функциональной зоной ответственности каждого из участников педагогической деятельности, с требованиями нормативных положений, ценностными ориентирами, средствами педагогического взаимодействия) [1].

Важными характеристиками управленческой деятельности руководителя являются: выявление и типологизация проблем, которые влияют на систему образования и все ее структуры и подсистемы (в том числе подсистему деятельности других субъектов), включая и все виды факторов (социокультурную среду, развивающуюся систему образования и внутренние личностные состояния субъектов системы образования); видение системы и взаимодействия отдельных элементов педагогической системы в процессе ее функционирования и развития.

Управленческая деятельность руководителя предполагает не только достижение им высоких профессиональных результатов, не только эффективность и успешность профессионально-педагогических воздействий, но и непереносимое наличие психологических компонентов – внутреннего отношения личности к управленческой деятельности, эмоциональной включенности в нее, позитивной Я-концепции, которая отражает все особенности сознания, психики, развитие личностных качеств, черт характера, раскрытие творческого потенциала личности, нравственное совершенствование и постоянное стремление к самосовершенствованию. Сегодня общество испытывает потребность в управленческих кадрах системы образования, обладающих самостоятельностью, активностью в решении социальных и педагогических проблем, способностью к установлению горизонтальных и вер-

тикальных управленческих связей, используя внутренние ресурсы собственной личности, и нести ответственность за эффективность управленческих воздействий.

Проблема ответственности личности является одним из направлений многочисленных исследований ученых различных областей как исторически складывающегося научного знания о человеке, так и современного человекознания (философов, психологов, педагогов, социологов и т.д.). Она находится в ряду вечных проблем, порожденных самим ходом исторического развития цивилизации. Еще древние мыслители, философы, такие как Аристотель [2], И. Кант [3] и другие поднимали вопросы об ответственности. Категория ответственности в той или иной степени получила освещения в различных метатеориях: 1) феноменологическая концепция (Э. Гуссерль, М. Шелер); 2) экзистенциальная концепция (К. Ясперс); 3) герменевтическая концепция (Х.-Г. Гадамер); 4) дискурсивно-коммуникативная концепция (К.-О. Апель, Ю. Хабермас); 5) постструктуралистическая концепция (М. Фуко) и др.

Термин «ответственность» восходит к латинскому глаголу *respondere* (отвечать). Понадобились многие столетия, прежде чем достаточно часто стали употреблять образованные от данного глагола сначала соответствующее прилагательное и лишь потом, во второй половине XIX века, существительное. Русское «ответственность», немецкое «*verantwortlichkeit*», английское «*responsibility*» по смыслу означают «держат ответ», «давать отчет», «быть притянутым к ответу» [4].

В «Словаре современного русского литературного языка» ответственность определяется как «возлагаемое на кого-либо или взятое кем-либо обязательство отчитываться в каких-нибудь своих действиях и принять на себя вину за возможные их последствия» [5].

Из приведенных определений видно, что в понятии «ответственность» четко выделяются субъективные и объективные стороны, вне зависимости от того какие бы стадии деятельности субъекта ни описывало данное понятие и из каких бы социальных отношений оно ни возникало. Полагаем в этой связи справедливой мысль, высказанная С.Ф.Анисимовым, по мнению которого «Моральная ответственность имеет широкий социологический аспект анализа ответственность как совокупность объективных требований, предъявляемых обществом к отдельным своим членам, коллективам в виде моральных принципов, норм, выражающих общественную необходимость. Она может быть представлена и в субъективном, психологическом содержании - ответственность как состояние сознания (в форме сознания и чувства ответственности, долга, совести и т.д.)» [6].

Весьма интересно в этой связи понимание ответственности с позиции этики ответственности, которая придает категории ответственности статус принципа, т.е. как первое и основное положение этики. Х. Ленк отмечал, что «...в постоянно изменяющемся мире этика не может быть чем-то статическим, а должна соответствовать все возрастающей области искусственно созданного: новые возможности активных действий актуализируют более широкие и модифицированные ответственности...». Он полагал, что «...человек – это существо, способное к ответственности и к принятию ее на себя. То обстоятельство, что он выступает носителем ответственности отличало его ранее, как и поныне» [7].

Х. Йонас рассматривает ответственность в качестве принципа; он настаивает на переосмыслении этики ценностей и превращение ее в этику ответственности, которая является более совершенной и отвечающей современным реалиям [8]. Согласно М. Веберу, «мы должны уяснить себе, что всякое этически ориентированное действие может подчиняться двум фундаментально различным, непримиримо противоположным максимам: оно может быть ориентировано либо на «этику убеждения», либо на «этику ответственности. Когда действуют по «этике убеждения», то не держат отчет за их результаты; когда человек поступает по максиме «этики ответственности», то надо расплачиваться за (предвидимые) последствия своих действий...» [9]. Иными словами, ответственность в понимании М. Вебера – это этический акт, взятый в единстве всех его моментов, выражающий всю полноту объективных и субъективных отношений.

По мнению Н.А. Минкиной, «ответственность представляет собой аспект любых отношений, в которых реально находятся люди, реализующие как субъекты сознательных действий объективно возлагаемые на них обязанности»; в категориальном отношении Н.А.Минкина определяет ответственность как «...философско-социологическую категорию, которая отражает объективно необходимые взаимоотношения между личностью, коллективом, обществом, выражающие исторический характер их взаимных обязанностей, реализующихся в сознательном и волевом поведении и деятельности» [10].

Здесь следует отметить, что вне зависимости от того, что отношения ответственной зависимости фиксируются как аспект объективных связей, само понятие ответственности может быть применимо только к анализу таких объективных связей, в которые вступают субъекты сознательных действий.

При этом ответственность предполагает наличие контроля за деятельностью субъекта на разных ее этапах, характеризуя ответственность либо с позиции общества (внешние санкции), либо с позиции самого субъекта ответственности (внутренняя ответственность). В первом случае ответственность выступает как средство внешнего контроля и внешней регуляции деятельности личности, которая выполняет должное вопреки своему желанию. Во втором случае речь идет об ответственности, которая отражает отношение к должному самого субъекта, его активность и готовность осуществлять должные действия (ответственность служит здесь средством внутреннего контроля и внутренней регуляции (саморегуляции) деятельности личности, которая выполняет должное сознательно и добровольно.

А.С. Прангишвили данный аспект проблемы ответственности анализирует в связи с установкой личности и проблемой воли: «...установка, лежащая в основе волевого ответственного поведения, возникает в результате создания мыслимой, воображаемой ситуации и размышлений относительно основных потребностей, интересов и целей. Установка при этом является результатом активности человека и поэтому волевое ответственное поведение всегда выступает и переживается как самоактивность и самоответственность. А сама установка в данном случае выступает как показатель «готовности к активности и ответственности» [11].

Приведенные выше соображения показывают, что высшей формой ответственности субъекта является ответственность перед самим собой (внутренняя ответственность) за те или иные действия (или бездействие), которые он выполняет в процессе осуществления деятельности и включения в те или иные социальные отношения, что объективно подразумевает наличие активной жизненной позиции личности и усиление демократизации общества.

Отношения ответственной зависимости вытекают из обязанностей субъекта, возлагаемыми на него общественными условиями жизни и деятельности, и поэтому они объективны, актуализируются и реализуются в поведении и деятельности социальных субъектов только тогда, когда они направляются сознанием и чувством ответственности, а субъекты ответственных отношений действуют свободно, на основе осознания необходимых объективных связей и отношений. В этой связи целесообразно различать, с одной стороны, объективные отношения ответственной зависимости, вытекающие из общественных условий жизни и социальных приоритетов и возлагающие на каждого субъекта этих отношений определенные обязанности, и, с другой стороны, сознание и чувство ответственности как выражение этих отношений, носителем которых является конкретный субъект, реализующий их в своем ответственном поведении и деятельности.

Ответственность в этой связи есть проявление взаимодействия людей, выражающее понимание общественных требований и выполнение установленных обществом требований разума, права и нравственных норм, долга человека и гражданина, вины за выбор цели и поступков, за принимаемые решения, совершаемые действия, их результаты и последствия. Она выступает как форма самоконтроля человеком своего поведения, саморегуляции деятельности, соблюдения нравственных императивов и правовых норм, принесенной пользы или вреда.

В этой связи для нашего исследования представляет интерес понятие «локус контроля» (лат. locus – место, местоположение), введенное в научный оборот Дж. Роттером из теории «социального научения». Лocus контроля – качество, характеризующее склонность человека приписывать ответственность за результаты своей деятельности либо внешним силам, обстоятельствам (экстернальный locus контроля), либо самому себе, своим способностям и усилиям (интернальный locus контроля). По мнению Дж. Роттера, интернальность и экстернальность локуса контроля являются устойчивыми свойствами личности, сформированными в процессе ее социализации [12].

В психологии существует ряд концепций, схожих с позицией Дж. Роттера, и в той или иной степени выходящие на понимание локуса контроля: 1) типология социального характера (Рисман (типы, «направляемые изнутри» (inner-directed) и «направляемые другими» (other-directed); 2) концепция компетенции Уайта, концентрирующую внимание на способности человека эффективно влиять на свое социальное окружение; 3) концепция Уиткина, дифференцирующая людей по когнитивному стилю на «поле-зависимых» и «поле-независимых» (люди в своем восприятии дифференцируются в зависимости от перцептивного поля); 4) фрустрационная теория Розенцвейга (в различных ситуациях люди склонны реагировать на трудности по-разному: одни обвиняют себя («интрапунитивная реакция»), другие приписывают ответственность внешним обстоятельствам («экстрапунитивная реакция»), третьи придерживаются примирительной позиции, не обвиняя ни себя, ни других («импунитивная реакция») и др.

К. Муздыбаев на основании эмпирических исследований делает вывод о том, что лица с интернальным локусом контроля более последовательны в своем поведении, опираются на четкое целеполагание, связывая результат своей деятельности и ответственность за него со своей личностью; лица с экстер-

нальным локусом контроля зачастую снимают проблему целеполагания и ответственность за результат своей деятельности связывают с внешними обстоятельствами, тем самым снимая ее с себя [13].

Полагаем, что изучение локуса контроля весьма важно в процессе оценки ответственности личности (особенно в сфере управленческой деятельности) для того, чтобы направить его в сторону интернальности, поскольку интернальный тип характеризуется эмоциональной стабильностью, моральной нормативностью, нравственной устойчивостью, общительностью, высокой силой воли; экстернальный же тип, напротив, характеризуется подозрительностью, тревожностью, агрессивностью, авторитарностью, беспринципностью, склонностью к обману.

С учетом приведенных выше теоретико-исследовательских рассуждений относительно феномена «ответственность» полагаем, что ответственность руководителя представляет интегральную категорию, отражающую весь спектр взаимосвязей личности руководителя и других субъектов деятельности на основе их сознательного и продуктивного эмоционально-волевого поведения, фокусирующая свое внимание на соблюдении нравственно-этических и профессионально-правовых норм и правил в процессе реализации управленческих функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмина Н.В. Профессионализм педагогической деятельности / Н.В. Кузьмина, А.А. Реан. СПб., 1993. 172 с.
2. Аристотель. Большая этика / Аристотель // Соч.: в 4 т. Т. 1. М.: Мысль, 1984. С. 295-374.
3. Кант И. Основы метафизики нравственности / И. Кант // Соч.: в 6 т. Т. 4. Ч. 1. М.: Мысль, 1965. С. 219-310.
4. Канке В.А. Этика ответственности / В.А. Канке. М., 2003. 340 с.
5. Словарь современного русского литературного языка. М., 1959. Т. 8. 1840 стб.
6. Анисимов С.Ф. Мораль и поведение / С.Ф. Анисимов. М., 1979. 142 с.
7. Lenk H. Ueber Verantwortungsbegriffe und das Verantwortungsproblem in der Technik // Lenk H., Ropohl G. (Hrsg). Technik und Ethik. Stuttgart, 1993. S. 112-148.
8. Jonas H. Warum die Technik ein Gegenstand fuer die Ethik ist; Fuenf Gruende // Lenk H., Ropohl G. (Hrsg.) Technik und Ethik. Stuttgart, 1993. S. 81-91.
9. Вебер М. Политика как призвание и профессия / М. Вебер // Избр. произведения. М.: Прогресс, 1990. С. 644-706.
10. Минкина Н.А. Воспитание ответственностью: учеб. пособие / Н.А. Минкина. М.: Высш. шк., 1990. 144 с.
11. Прангишвили А.С. Исследования по психологии установки / А.С. Прангишвили. Тбилиси, 1967. С. 192.
12. Rotter J. B. Social learning and clinical psychology / J. B. Rotter. N. Y., 1954. 466 p.
13. Муздыбаев К. Психология ответственности / К. Муздыбаев; под ред. В.Е. Семенова. Л.: Наука, 1983. 240 с.

Жуковский Владимир Петрович – доктор педагогических наук, профессор проректор по научной работе, заведующий кафедрой профессионального образования Государственного автономного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования (повышения квалификации) специалистов «Саратовский институт повышения квалификации и переподготовки работников образования»

Скворцова Лариса Анатольевна – кандидат педагогических наук, доцент, редактор первой категории Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir P. Zhukovsky – Dr. Sc., Professor, Vice-Rector, Head: Department of Vocational Education, State Autonomous Educational Institution of Additional Professional Education for Professionals of Saratov Institute for Further Training and Continuing Education

Larisa A. Skvortsova – Ph. D., Associate Professor Editor at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ю.В. Карпов

ОБРАЗ ГОРОДА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ САРАТОВА

Раскрыт потенциал социокультурного исследования коммуникативного аспекта городской архитектуры или другими словами изучены образы города и представления горожан о застройке. Дана характеристика методологических подходов и предложен методический инструментарий (конкретные исследовательские вопросы, гипотезы, допущения). Намечены направления исследования, даны обоснования их актуальности и представлен анализ эмпирических данных, полученных в ходе двух фокус-групп с жителями Саратова. Концепция социокультурного исследования коммуникативного эффекта архитектуры строится на допущении того, что городская застройка является индикатором социально-экономических трансформаций.

Социология архитектуры, культура городской застройки, дискурс-анализ, городские исследования

Ju.V. Karpov

THE IMAGE OF A CITY AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF CITY BUILDING IN SARATOV

The article reveals the potential for the socio-cultural study of the communicative aspects in the city architecture, or the images of a city and views of the citizens relating city housing. The author presents methodological approaches and suggests a methodological Toolkit (specific research questions, hypotheses, assumptions, and sample question guides). Additionally, the author gives an outline of the specific research areas, a justification of the urgency and analysis of empirical data obtained in the course of the two focus groups with Saratov residents. The concept of socio-cultural study of the communicative effect in architecture is based on the assumption that the urban area is an indicator of socio-economic transformations.

Sociology, architecture, culture, urban development, discourse analysis, urban studies

Введение

Город как социальный феномен был интересен еще классикам социологии. Городская архитектура служила иллюстрацией, примером и эмпирическим материалом для множества исследований, носивших преимущественно обобщенный социально-философский характер (А. Лефевр, Ж. Бодрийяр, М. Кастельс). К настоящему времени написано достаточное количество работ, посвященных проблемам градостроительства и городского планирования [1], культурологических эссе [2] на тему идеология в застройке и исследований города глазами чужака-фланера [3]. С недавнего времени растет интерес к общественным движениям в защиту архитектурного наследия [4; 5] и новым площадкам массового потребления в постсоветских городах [6; 7].

В тени исследовательского интереса остаются вопросы, связанные с восприятием горожанами архитектурных изменений. Анализ представлений горожан о застройке зачастую игнорируется, обходится стороной как некая величина известная по умолчанию и не нуждающаяся в исследовании.

В настоящей статье будет раскрыт потенциал социокультурного исследования коммуникативного аспекта городской архитектуры или другими словами изучены образы города и представления горожан о застройке. Будет дана характеристика методологических подходов и предложен методический инструментарий (конкретные исследовательские вопросы, гипотезы, допущения). Мы наметим направления исследования, дадим обоснования их актуальности и предложим анализ эмпирических данных, полученных в ходе двух фокус-групп с жителями Саратова.

Городская застройка в тисках глобализации

Изменение современного города происходит в контексте глобализационных процессов, растущей конкуренции между урбанизированными центрами за капиталы, людей и ресурсы [8]. Постсоветский транзит российского общества, продолжающийся последние 20 лет, сопровождается модернизацией социалистической городской застройки. Встраивание отечественной экономики в глобальную является основным фактором форматирования облика городов. Застройка, сформированная в советский период, становится полигоном градостроительного экспериментирования в капиталистическом ключе.

В советский период заводы являлись градообразующими предприятиями, подверстывающими городскую застройку под обеспечение собственных потребностей. После распада СССР новые экономические и культурные формы стали утверждаться в первую очередь с освоения производственных пространств, разорившихся предприятий [9]. Вокруг заводов и промышленных комплексов советской застройки возникали мелкие субцентры с дворцами культуры, продовольственными и промтоварными магазинами. На сегодняшний день вокруг оставшихся на плаву производственных предприятиях формируются «маленькие арбаты» и появляются бизнес-точки, предлагающие специализированные услуги, и имитирующие центр города [10].

В постиндустриальный этап общественного развития все большее значение приобретают информационные и наукоемкие технологии, а также сфера потребления и услуг. Расширение роли частного капитала в сфере городского развития и застройки создает давление на городскую среду и, особенно, на исторический центр советских индустриальных городов.

Социальные ученые, работающие в критической парадигме, негативно оценивают неолиберальные тенденции, проявляющиеся в градостроительной политике. Харви Молоч был одним из первых, кто стал критиковать популярное мнение о полезности для всех горожан максимального извлечения прибыли из всего, что возведено в городе [11]. Ольга Вендина защищает данный тезис, утверждая, что экономический рост без учета интересов и жизненных траекторий горожан сам по себе не гарантирует процветание [12].

Пожалуй, основной тенденцией капиталистического переустройства города является уничтожение социальной однородности советских городов. Обращение внимания на особенности городской застройки позволяет ввести в оборот идеи классиков Чикагской школы, утверждавших значимость для социального взаимодействия понятия конкуренции между индивидами за ограниченные пространства (привлекательные в качестве места для жилья и расположения бизнеса). Данная концепция созвучна с идеями П. Бурдьё о физическом пространстве как своеобразном капитале борьбы индивидов в социальном пространстве, результаты которой и воплощаются в утверждении социальной однородности того или иного района. Другими словами социальные структуры проецируются в физический мир и в реальном пространстве воссоздают существующие социальные дистанции.

Методология исследования

Концепция социокультурного исследования коммуникативного эффекта архитектуры строится на допущении того, что городская застройка является индикатором социально-экономических трансформаций. Изучение динамики восприятия облика города позволяет глубже понять рефлексию, рецепцию горожанами, происходящих изменений. Можно задать вопрос, как различные категории саратовцев воспринимают воздействие глобализации на облик города, материально воплощающееся, например, в строительстве торгово-развлекательных центров?

Социологическое исследование культуры застройки актуализируется критическим неомарксистским подходом и предполагает расшифровку различных дискурсов, существующих в обществе по поводу современного городского развития. Вот некоторые исследовательские вопросы. Как к изменениям в городской застройке относятся разные социальные группы? Почему возможны различные точки зрения на превращение старых промышленных объектов в офисы и строительство новых бизнес и торговых центров? Насколько чувствительно городское сообщество к проявляющемуся в архитектуре конфликту между глобальным (разнообразие, креативность, изменчивость) и локально-индустриальным (традиции, крепкие социальные связи, сильная локальная идентичность)? Какова символическая значимость застройки? Какое коммуникативное воздействие она производит на горожан?

Теоретическое обоснование подобного исследования ценностного основания коммуникативных практик застройки можно найти в работе Й. Фишер, рассматривающего архитектуру как сложное средство социальной коммуникации [13]. Коммуникация и взаимодействие происходит внутри застроенного «жизненного пространственного мира», под который подстраиваются социальные субъекты. Самоидентификация индивидов зачастую создается и поддерживается теми или иными типами

архитектурных коммуникационных предложений. Социальность архитектуры в первую очередь проявляется в ее специфической функции через создание физических пространственных границ, определяющих формы и способы коммуникации.

Методологические вопросы. Архитектура как текст и возможность его прочтения

На сегодняшний момент все большую актуальность приобретает исследование дискурсивных и концептуальных структур, формирующих власть, городской опыт, субъективность человека. Социальные отношения конструируются текстом, а значит, для их понимания следует социальную реальность представить как дискурс и совершить его расшифровку. Городской ландшафт может быть представлен в виде текста, репрезентирующего социальные отношения через пространство и визуальные символы. В данном случае дискурс-анализ текста городского пространства будет означать определение, что говорит городской ландшафт, какие ценности и смыслы он репрезентирует, и как его понимают горожане и гости. Интерес к пространству как к тексту отражает влияние М. Фуко и Ж. Дерриды, в чьих теориях часто используются архитектурные метафоры.

Текст городского пространства (наряду с картографией, этнографией, историей, журналистикой, литературой) способен закладывать фундамент для абстрактного чувства пространства и места и способствовать возникновению национальных и географических идентичностей (или «воображаемых сообществ», выражаясь языком Б. Андерсона). Пионерским исследованием, в котором масштабные социальные процессы, связанные с советской модернизацией, были рассмотрены и через призму городского планирования, является книга С. Коткина «Магнитная гора: Сталинизм как цивилизация». Государственная власть, обладая монополией на публичный дискурс, объясняла гражданам, что значит быть советским человеком, используя, в том числе и архитектурные образы социалистической застройки города. Вслед за С. Коткиным и другие исследователи (например, Е. Добренко) заинтересовались проблемами пространственно-символического кодирования идеологии, субъектности, идентичности и власти. Следует помнить, что архитектурное пространство является палимпсестом, отмеченным наличием нескольких текстовых слоев, репрезентирующих различные эпохи, идеи. При этом данные слои не обладают однозначными смыслами и их прочтение зависит от эпохи и социального опыта реципиента. Таким образом, городская застройка обладает способностью к коммуникации с индивидами и целыми сообществами. Архитектура вписывается в рамки такого широкого понятия как локальный текст, который может быть написан, прочтен и переосмыслен.

Групповые интервью в исследовании городской застройки

Настоящее исследование будет направлено на изучение мнений простых саратовцев. Методологическая основа базируется на феноменологическом осмыслении образа города, что предполагает следующий круг вопросов для беседы на фокус-группах. Удовлетворены ли граждане новой застройкой? Есть ли пожелания к развитию города? Какие районы можно выделить в городе? Изменились ли представления горожан о престижности тех или иных районов в связи с трансформацией застройки? Как горожане определяют престижность того или иного района? Какие объекты наиболее важны для определения центра города? Существует ли в Саратове исторический центр? Деловой центр? Развлекательный и рекреационный центр?

Таким образом, интервью и опросы позволяют выявить значимые городские объекты, специфику и критерии престижности тех или иных районов города, а также логику зонирования Саратова в восприятии отдельных социальных групп [14]. Немаловажное значение имеют декларированные причины выделения горожанами престижных и непрестижных районов и последующий поиск связи между престижностью и качеством застройки.

В результате мы определили значимость архитектурного облика города в представлениях его жителей; а также выяснили, как горожане воспринимают и оценивают бурное развитие Саратова за последние 5-6 лет, каким видят будущее города. Эмпирической основой анализа стали материалы двух фокус-групп, проведенных летом 2013. В первую фокус-группу попали 3 мужчин и 3 женщин 20-29 лет. Во вторую группу вошли 3 мужчин и 3 женщины от 40 до 59 лет.

Изучение постсоциалистических городских пространств выходит за традиционные дисциплинарные рамки, требует выработки новых теоретических подходов к изучению эмпирического материала. В центре исследовательского интереса оказываются сложные отношения, благодаря которым создаются пространства, а также точка зрения общества на процессы городской застройки. В современный период мозаика пространственных форм является продуктом глобализации (особой системы конфигурации отношений производства). Падение коммунистических режимов в Европе вызвало изменение социальных отношений, а значит, были запущены процессы реконструирования городских пространств.

Но за пределами исследовательского внимания обычно остаются следующие важные вопросы: как оценивают ситуацию сами граждане, осознают ли они, что вокруг привычного городского пространства разворачиваются конфликты, связанные с неподвижностью городского облика и стремлением капитализма к пространственному развитию.

Иными словами исследование пространства – это анализ того, как городская архитектура структурирует и конструирует способ переживания мира. Осознание горожанами сути происходящих изменений в облике города позволяет понять их отношение к общим трансформационным процессам. Выяснение восприятия горожанами пространства, способов жить в нем, говорить о нем позволит прочесть социальные процессы сквозь пространственную оптику.

Облик Саратова в сознании горожан

В начале беседы информанты называли новые здания, построенные в Саратове. Как это неудивительно, но первое что вспоминали в обеих группах – это новые жилые здания и активно строящиеся микрорайоны. Пожалуй, наибольшей популярностью по упоминаниям пользовались высотка на Предмостовой площади, угрожающе нависшей над мостом через Волгу и два разноцветных небоскреба («свечки-башни») почти в самом центре города.

Три вышеназванных высотных здания можно назвать символами новой архитектуры Саратова, которые привлекают внимание и наделяются определенными смыслами. Строительство новых жилых многоэтажных домов отдельными информантами осуждается, другими же одобряется. Дело в том, что эти здания являются и знаком развития, обновления города, а также и жупелом социального неравенства, доминирования одной социальной группы над другой. Вторым по популярности ответом на вопрос о новых зданиях является упоминание строительства ТЮЗ. Его открытия горожане ждали свыше десятилетия, и его современный дизайн радует и молодых и зрелых информантов.

Кроме жилищного строительства в Саратове расширяется сеть торговых и деловых центров. Однако торгово-развлекательные или офисные центры вспоминались информантами реже: молодежью лишь после наводящего вопроса. Можно предположить, что для молодых появление новых зданий является обыденностью, рутиной; для старших знаком обновления города, а значит важным событием. Информанты и молодого и зрелого возраста отмечают развитие в городе капиталистического типа застройки без ярко выраженного негативного подтекста. Город развивается – и это хорошо.

Будущее исторического центра Саратова

В западной исследовательской литературе, в практике общественных городских движений все больше актуализируется вопрос, связанный с правом на город. Кто же должен определять будущий облик городов. Конфликт завязывается вокруг столкновения интересов крупного капитала, рассматривающего город как средство извлечения прибыли и городского сообщества, заинтересованного в сохранении комфортности и привлекательности среды городского обитания. Данные споры являются актуальными для общественности российских провинциальных городов, однако во время фокус-групп было выяснено, каким представляется город его рядовым жителям? Каким они видят его будущее, что для них означает удобный город и как относятся к влиянию неолиберализма и глобализации на городской ландшафт?

Культурной доминантой провинциального города можно считать купеческую архитектуру, взлет которой пришелся на конец 19 – начало 20 вв. Следует отметить особую роль стиля модерн, игравший важную роль в формировании архитектурного облика Саратова [15]. Информантам задавался вопрос, какими они видят перспективы исторического центра в связи с давлением современной застройки. Ответы молодежи были прагматичны (если не циничны), для них старая архитектура – это прошлое. *«Архитектура, которая существует сейчас будет уходить как мне кажется в прошлое»*. В ответах старшего поколения наряду с сентиментальными нотами сожаления об утрате дореволюционного облика, присутствует и понимание того, что городская архитектура будет развиваться в соответствии с рыночной логикой. *«Будет больше свечек и торговых центров, может быть что-то из старого фонда будет перестраиваться...»*. Рынок же в том числе заинтересован в сохранении старых красивых зданий или же в создании новоделов (копирующих стиль «старинь»). *«Может быть выгодно просто отреставрировать старое»*. Перспективы утраты старого дореволюционного купеческого Саратова, хотя и кажется неизбежным, вызывает у старшего поколения протест. Таким образом, известная консервативность мировоззрения проявляется и во взгляде на городскую застройку.

Для молодых информантов капиталистическое переустройство Саратова, приводящее к возникновению несуразных контрастов старого и нового, описывается в успокоительных выражениях: «все идет своим чередом», и «ничего страшного в этом нет»... *«Жутко забавная будет у нас застройка, которая уже проявляется во многих вещах. Ну вот Парус, под ним стоит одноэтажный*

домик. На Мичурина есть архитектурный комплекс – стоит два многоэтажных здания, а справа-слева от него стоят деревянные здания, деревянный частный сектор. Вот такой у нас будет город. Город контрастов и соответственно контраст будет усиливаться. Будет больше современных домов». Необходимо отметить, что единственным оценивающим эпитетом в данной цитате о будущем города является прилагательное «забавное», которое иронически оттеняется наречием «жутко». Создается впечатление, что информант относится к архитектурному контрасту с известной долей цинизма. Остальные участники молодежной фокус-группы продемонстрировали скорее даже большую долю безразличия.

Например, другой информант заявляет, что «старые дома подвергнут сносу и на их месте построят офигенно дорогие квартиры». Выражение «офигенно дорогие», отражает насмешку и в то же время некоторую зависть и уважение к тем, кто будет жить в этих домах. Таким образом, молодежь не испытывает боль или утрату связанную со сносом старых домов и потерей Саратовом своего архитектурного облика.

Молодежь почти без наводки смогла назвать и указать примерное расположение новых деловых центров, которые, с их точки зрения, являются свидетельством развития города. Бурное строительство связывается с процветанием города и данный факт, возможно, примеряет с несуразностью вида деловых новостроек центра, окруженные старой застройкой и их явное противоречие с архитектурным контекстом города.

Информанты зрелого возраста демонстрируют спокойно-отстраненное отношение к новым бизнес-центрам и дорогим новостройкам, воспринимая их как объективную данность. «Жилищная застройка будет в любом случае, а вот вопрос будет ли это красиво или нет. Ну в центре должно быть красиво, на окраинах будет так как сейчас есть...». Таким образом, демонстрируется покорность к неизбежному влиянию рынка на изменение городской застройки. «Люди у которых есть деньги и средства будут в это вкладываться. Они будут смотреть, как им будет выгодно. Может, будет выгодно просто подреставрировать старое». Однако, мнения зрелых информантов разделились, одна часть сожалеет о потери Саратовом традиционного архитектурного облика, другая часть высказывает иную точку зрения. «Разрушенные ветхие купеческие дома хорошо было бы по кирпичику воссоздать, но их снос не вызывает жалости».

Многих молодых информантов характеризует согласие на полное забвение исторического центра, ведь зато «будут появляться новые бутики». Цинизм проявляется в заявлениях о том, что останутся здания, на которые можно просто посмотреть и насладиться и красивым видом. Таким образом, можно сформулировать основной принцип отношения молодых саратовцев к старым зданиям: если они красивы, то их следует сохранить. «А исторически ценные здания, пока еще, наверное, останутся. Некоторые очень хорошо отреставрируются». При этом упускается из виду, что для полноценного восприятия красоты и целостности облика исторических зданий необходим соответствующий контекст, в который новостройки и бизнес-центры совершенно не вписываются.

Саратов: перспективы развития

Город – это аккумулятор социокультурной памяти. Различные элементы городской застройки несут в себе определенные значения и смыслы, которые будучи связаны в социальной памяти с определенными историческими событиями и процессами оказываются актуальны и значимы для определенных горожан или социальных групп. Городская архитектура является одним из оснований и ресурсов консолидации городского сообщества на основе знания и понимания истории места своего проживания. Процесс осмысления тех или иных элементов городской застройки можно рассматривать как своеобразную культурную практику освоения городского пространства [16]. Архитектура дает возможность для свершения своеобразного коммуникативного действия, когда элементы городского ландшафта оказывают, то или иное воздействие на индивида. Следует подчеркнуть, что символичность данного воздействия носит дуалистическую природу. Городская застройка способна и создавать целый комплекс значений и смыслов, который в то же время в общественном сознании постоянно подвергается процессам переинтерпретации, переосмысления.

Какие элементы городской застройки Саратова становятся тем, что Марк Оже называл «местами, формирующими идентичность» (anthropological places)? Как различными социальными группами воспринимается архитектурное переформатирование символического пространства города? В какой мере циркулирующие на микроуровне образы города преемственны или, напротив конкурируют с образами, вынесенными из прошлого?

Итак, можно констатировать, что молодые информанты поддерживают ускорение архитектурного преобразования города; старшее поколение демонстрирует более сдержанное отношение. Прагматизм и цинизм молодого поколения в основном проявляется лишь в рассуждениях о будущем

Саратова, в которых отражаются мечты о бурном коммерческом развитии регионального центра. Однако жизнь разворачивается в старых декорациях, которые пока и формируют имидж города, и наиболее важными зданиями Саратова и молодые, и зрелые информанты называют именно те, что были построены на рубеже 19 и 20 веков.

Какой же Саратов в сознании горожан? Какой имидж города ему приписывается и почему? Любопытно, что имидж города чаще всего в ответах информантов связывается с культурными объектами. Данный факт тем более примечателен, если мы вспомним, что в советское время город считался закрытым центром секретной оборонной промышленности. Кроме того для молодого поколения оказалось важным подчеркнуть также и значимость образа Саратова как делового центра. Для старшего поколения большее значение имеет ни деловая репутация, а скорее развлекательная.

Жизнь информантов разворачивается в декорациях старого города, поэтому и в качестве символов Саратова во время фокус-групп назывались культурные объекты, и дореволюционного и советского периода. Здания 19 и 20 века и сегодня продолжают оставаться основными объектами-ориентирами, являющимися своеобразными субцентрами, к которым тяготеют районы города. Наиболее популярными архитектурными объектами в ответах информантов выступают университетские городки (СГУ и СГТУ), старые рынки (Сенной, Крытый, на 3-й дачной) и как это неудивительно промышленные предприятия: Жировой комбинат, Крекинг, район аэропорта.

И старшее, и младшее поколения предлагают на гипотетическую открытку с достопримечательностями города музеи, театры, Крытый рынок, тем самым проявляя потребительское отношение к памятникам архитектуре. Цинизм к судьбе исторического центра со стороны горожан оказывается помноженным на демонстрацию культурности и хорошего воспитания. Однако фокус-группа показала, что старая архитектура не утратила своей значимости. Информанты, определяя границы городского центра, в качестве ориентиров называли именно памятники архитектуры. Тем самым подчеркивая, что новые торгово-развлекательные комплексы пока не являются объектами-ориентирами в городе, или же серьезными факторами в вопросе разграничения районов. Главным элементом, определяющим границы городского центра, остается историческая застройка.

Парадоксально, но молодежь спокойно относится к перспективам утраты Саратовом купеческого облика. Свой прагматизм и цинизм информанты объясняют, ссылаясь на эклектичность саратовской архитектуры. *«Все считают, что город придерживается определенного стиля. Хотя Саратов никогда никакого стиля не придерживался. Все строят, что хотят. Единого стиля нет»*. Смещение стилей оправдывает возможность строительство новых зданий, так как ярко выраженное архитектурное лицо города отсутствует как таковое. *«Мне кажется, это нормально для большинства российских городов. Когда единого стиля не наблюдается»*. Возникает парадокс: с одной стороны, наши информанты не проявляли видимого почтения к саратовской архитектуре, но с другой стороны – уверены, что город привлекает туристов.

Рассуждая о восприятии городской застройки, стоит отметить, что саратовчане разделяют современные взгляды на городское проектирование. Например, в качестве наиболее престижных районов для проживания назывались территории с экологически благоприятными условиями. Основной угрозой для будущего города информанты называют возрастание социальной нагрузки в первую очередь на центр. В беседе указывалось, что сокращение мест для парковок, парковой зоны, недостаток детских садов, пробки сопровождают уплотнительную застройку и строительство коммерческих зданий в центре. Осознание данных проблем является доказательством современности мировосприятия саратовчан и поводом приравнять город к ведущим мировым мегаполисам, если не по размерам, то хотя бы по качеству проблем. Модернизация российского общества невозможна без создания доступной среды, в которой будут воплощены идеи гуманизации социального пространства [17].

Однако молодые информанты демонстрируют гораздо более адаптированный и приближенный к реалиям глобализации образ будущего Саратова, который разнообразнее и конкретнее, нежели у старшего поколения. Варианты будущего широко варьируются от: «старые дома будут сносить, никакого ретро не останется», и до смягченного варианта, предполагающего, что архитектура исторического центра будет гармонично интегрирована в современную застройку. Молодые проникнуты новыми постмодернистскими ценностями: такими как важность экологии, восхищение коттеджной застройкой и понимание перспектив новых строящихся районов на Периферии.

Равнодушие к судьбе исторического центра сочетается у молодых информантов с более резкой и прочувственной (чем у зрелых информантов) критикой уплотнительной застройки. Правда, старшее поколение более чувствительно к проявлению в городской застройке процессов социальной поляризации общества. *«Строительство высоток это момент демонстрации: смотрите все какой*

я успешный, и эта демонстрация накладывает негативный отпечаток на эстетику постройки». В будущем недовольство нарастающей закрытостью и социальным разделением будет лишь четче осознаваться и увеличиваться. «Современные здания ограждаются и имеют свой дворик – там кодовый замок, там, у детей своя песочница, то есть общество расслаивается. Там живут люди, которые далеки от мира и им наплевать, и на исторический центр, и на старую застройку». Эти проблемы волнуют социально ориентированное старшее поколение.

Социокультурное осмысление городской застройки предполагает выяснение ценностных основ реформирования бывшего социалистического в город капиталистический. Эмпирическое исследование представлений горожан позволит прописать типовую модель городского территориального развития [18]. О различных проблемах капиталистической реконструкции центров городов, созданных еще в социалистическое время, писал В.Л. Глазычев. Ответ на вопрос, какие изменения в застройке осознаются горожанами и как оцениваются, позволит учесть мнение общественности в градостроительном планировании, а значит, придаст спорам экспертов с властью осмысленный характер. Что, в свою очередь, позволяет осознанной подходить к проблемам городского планирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сассен С. Глобальные города: постиндустриальные производственные площадки // Прогнозис. 2005. № 4.
2. Абрамян Л. Ереван. Память и забвение в организации пространства постсоветского города // Антропологический форум. 2010. №12. С. 248-271.
3. Запорожец О., Лавринцев Е. Прятки, городки и другие исследовательские игры (Urban Studies: в поисках точки опоры) // Communitas. 2006. № 1.
4. Гладарев Б. Культура вместо политики: рождение петербургской общественности из духа города // Пути России: будущее как культура: прогнозы, репрезентации, сценарии. Доклады участников XVII междунар. Симпозиума / под ред.: М.Г. Пугачевой, В.С. Вахштайна. М.: НЛО, 2011. С.440-457.
5. Закирова М.М. “Вот здесь видно все”: самопрезентация городского общественного движения // Журнал исследований социально политики. 2008. Т. 6. № 2. С. 217–240.
6. Иванов П. Потребление как агент лёгкой социальности в городском пространстве // Журнал социологии и социальной антропологии. 2011. № 5.
7. Китайцева О.В., Ирсетская Е.А. Торгово-развлекательный комплекс как «идеальная» площадка для потребления в российском мегаполисе // Журнал социологии и социальной антропологии. 2011. № 5.
8. Визгалов Д. Маркетинг города. М. Фонд «Институт экономики города», 2008.
9. Макарова К. Постиндустриализм, джентрификация и трансформация городского пространства в современной Москве // Неприкосновенный запас. 2010. №2.
10. Карпов А.Е. Имплотация городского пространства: проблема существования центра в городах современной России // Российское городское пространство: попытка осмысления: науч. докл. М. : МОНФ, 2000. С. 92-112.
11. Molotch H.R. The City as a Growth Machine: Toward a Political Economy of Place // American Journal of Sociology. 1976. Vol. 82. № 2. P. 309-355.
12. Вендина О. Можно ли увидеть четкие перспективы в туманном будущем городов? // Неприкосновенный запас. 2010. №2.
13. Фишер И. Шедевры современной архитектуры и дизайна. М.: АСТ, 2009.
14. Бреславский А. С. «Город окраин»: территориальная сегрегация и ее (вос)производство в постсоветском Улан-Удэ // Лабиринт. 2012. № 3.
15. Волошинов А.В., Лосин Д.О. Купеческая архитектура и культурный облик современного провинциального города // Вестник СГТУ. 2011. № 2. Вып. 1. С. 207-213.
16. Абашеев В.В. Неосвязаемое тело города. Опыт работы со смыслом // Антропологический форум исследования города. 2010. № 12.
17. Наберушкина Э.К. Перспективы создания доступной среды // Вестник СГТУ. 2012. № 1. Вып. 1. С. 205-208.
18. Корнев Н.Р., Мищенко А.С., Тихонов А.В., Травин И.И. Социокультурные трансформации в контексте социальных изменений // Россия в глобальных процессах: поиски перспективы / Отв. ред. член-корреспондент РАН М.К. Горшков. - М.: Институт социологии РАН, 2008. С. 119-135.

Карпов Юрий Владимирович –
аспирант кафедры «Менеджмент туристического
бизнеса» Саратовского государственного
технического университета

Yuri V. Karpov –
Postgraduate
Department of Tourist Business Management

Статья поступила в редакцию 12.04.14, принята к опубликованию 20.06.14

УДК 32.001

К.А. Кузнецова

ИССЛЕДОВАНИЯ СОЦИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ, ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В ТРАДИЦИЯХ БРИТАНСКОЙ СОЦИОЛОГИИ

В работе рассматриваются характерные для британской социологии традиции в области исследования социальной структуры, организации и управления, представлена научно-практическая перспектива осуществленного анализа.

Британская социология, социологические исследования, социальная структура, менеджмент, социальная организация, управление

K.A. Kuznetsova

RESEARCH INTO THE SOCIAL STRUCTURE, ORGANIZATION AND MANAGEMENT IN TRADITIONS OF BRITISH SOCIOLOGY

The paper discusses indicative traditions in the British sociology relating the research in the field of social structure, organization and management, including the research and practice perspectives of the carried out analysis.

British sociology, sociological research, social structure, management, social organization, administration

Актуальность работы определяется в связи с необходимостью социологической рефлексии концепций управленческого процесса как особого типа социального взаимодействия, обладающего устойчивыми и регулятивными формами в контексте глобальных и локальных трансформаций современного общества. По мнению экспертов [1, с. 7], противоречивая природа глобализации делает актуальным внимание социологической науки к аналогиям в эволюции и деятельности институтов управления, формирующих глобальные нормы, ценности и стандарты социальных механизмов и способов управленческого воздействия на общество, его отдельные сферы, социальные группы и организации, на сознание и поведение людей. Наряду с этим отмечается [2, с. 18], что в контексте российских преобразований возрастает значимость социологического анализа концептуальных моделей социального управления отдельных государств в аспектах их содержания, системной организации, исторического опыта и особенностей функционирования в условиях специфических локальных социальных практик и противоречий, внутренних факторов общественных изменений.

В этой связи определенный научный и практический интерес представляет анализ британской социологической традиции исследования социальной структуры, организации и управления. Великобритания в числе первых встала на путь развития капиталистического общества, который наиболее информативен из всего мирового опыта. С точки зрения экспертов [3, с. 28], в нем достаточно полно представлена панорама информированности о характере закономерностей, присущих структуре, организации, функционированию и развитию современного общества, а также содержанию проблем социального управления и механизмах их решения. Не случайно поэтому, что многие новаторские исследовательские практики социальной структуры, организации и управления, позволяющие особым образом заострить проблемный характер этих феноменов и удовлетворяющие сложившиеся здесь потребности общества, появились именно в британской социологии.

В истории британской социологии выделяют три этапа – начальный, классический и современный, на каждом из которых ученые внесли определенный вклад в исследование социальной

структуры, управления и организаций. Так, при своем становлении британская социология опиралась на важнейшие интеллектуальные традиции своего общества: политэкономический подход, связанный прежде всего с именами Т.Р. Мальтуса, Дж.С. Милля, Д. Риккардо и получивший наивысшее развитие в трудах Адама Смита; идею амелиоризма – стремление практической деятельностью улучшить положение в обществе, наиболее образно выраженную в социальных науках лордом Э.К. Шефтсбери [4, с. 189].

Огромный импульс развитию социологии, как и специальных социологических теорий, дал, по мнению экспертов [5, с. 7], осуществленный А. Смитом анализ капитализма как экономической системы. Одним из основных элементов этой системы, по Смиуту, является управление – социальная деятельность по организации производства с целью получения максимальной прибавочной стоимости. В соответствии с этой концепцией управление является такой формализованной структурой рациональной экономической системы, которая приспособлена для достижения технической эффективности средствами координации человеческих ресурсов. В рамках такого подхода управление рассматривается как рационально спроектированный и оформленный в технологию механизм для реализации желаемых инструментальных ценностей, в числе которых преобладает индивидуальное стремление к благополучию, а также присущее каждому индивиду желание добиться более высокого положения в социальной структуре общества [6, с. 327-329].

Начальный этап также связывается с ранее зародившейся в Великобритании традицией эмпирических исследований, восходившей к семнадцатому веку. В рамках эмпирической «предсоциологии» осуществлялся анализ довольно широкого спектра социально-демографических данных, который в дальнейшем использовался как важное управленческое приложение теоретических и практических знаний, приводящее к успеху в различных сферах общественной жизни. Пионерами в этой области считаются представители школы политической арифметики: Э. Галлей, Д. Граунт, Г. Кинг, В. Петти. Политическая арифметика – направление социальных исследований, основанное на сборе и анализе эмпирической информации, преимущественно данных официальной статистики, для целей управления и администрирования общественными процессами [7, с. 123-127].

Английская школа политической арифметики сформировалась в 17 веке, прежде всего, благодаря работам Джона Граунта, опубликовавшего в 1662 году «Естественные и политические наблюдения, упомянутые в прилагаемом перечне и сделанные на основе бюллетеней смертности Джоном Граунтом гражданином Лондона в отношении к правительству, религии, занятиям, росту, воздуху, болезням и различным изменениям названного города». Он изучил еженедельные бюллетени смертности за 33 года и отобрал для анализа 299 250 записей о случаях и причинах смерти за 20 лет, в которых достоверность причины смерти не вызывала сомнений. Граунт показал, что некоторые причины смертности имеют постоянный характер, что смертность в городе выше, чем в сельской местности, среди мужчин выше, чем среди женщин, что очень высок ее уровень в ранних годах жизни. Ученый также дал оценку величины населения Лондона, что в целом отражало существующую социальную реальность, а полученные данные объективно показывали, что необходимы определенные перемены, которые требовали соответствующих управленческих решений [8, р. 92-98].

Собственно сам термин «политическая арифметика» был введен в научный оборот Вильямом Петти в книге под таким же названием. Полное название этого труда звучит так: «Политическая арифметика, или рассуждения относительно размеров и стоимости земли, людей, строений, сельского хозяйства, мануфактур, торговли, рыбной ловли, ремесленников, моряков, солдат; относительно государственных доходов, процентов, налогов, способов повышения доходов, регистрации банков; относительно определения ценности людей, увеличения числа моряков; относительно полиции, портов, положения страны, кораблей, могущества на море. Все это рассматривается в отношении территорий Его Величества Короля Великобритании и территорий его соседей – Голландии, Зеландии и Франции». В основном работа написана языком цифр, классифицированных и обобщенных социальных данных, выраженных количественно. В. Петти одним из первых определил роль статистических методов в изучении закономерностей общественной жизни, исследовании взаимосвязей между стратификационными процессами и решением управленческих проблем, подчеркнул необходимость строить статистические таблицы и вычисления, основываясь на всестороннем учете анализируемых явлений. Он дал свой вариант общей теории политической арифметики и обосновал практическое значение такого подхода для различных областей социального управления [9].

Еще одним известным представителем школы политической арифметики был Грегори Кинг. В 1696 году он написал монографию «Естественные и политические наблюдения и выводы о социальном положении в условиях Англии», в которой дал оценку численности и структуры населения, используя метод экстраполяции. В результате применения данного метода значительно возросли

объективность и надежность полученных данных, практическая значимость соответствующих теоретических выводов и управленческих решений. Своей работой он более чем на столетие определил перепись населения, состоявшуюся в стране лишь в начале 19 века. Эта работа также сыграла значительную роль в плодотворном развитии эмпирических исследований их социально-управленческой функции. Так, например, Кинг обнаружил взаимосвязь между управленческими изменениями цен на зерно и урожайностью зерновых, и эта закономерность получила в науке название «закона Грегори Кинга» [10, р. 70-72].

В плеяде представителей классической политической арифметики видное место занимает великий ученый Эдмунд Галлей, астроном и математик, описавший, в частности, закономерности появления знаменитой кометы, названной его именем. На основе изучения социальной динамики населения города Бреславля он опубликовал две работы: «Оценка степеней смертности человечества, выведенная на основании любопытных таблиц рождений и погребений города Бреславля с попыткой установить цену пожизненных рент» и «Несколько дальнейших замечаний по поводу Бреславльских бюллетеней смертности». Анализируя массовые эмпирические данные социальной структуры, Галлей одним из первых осмыслил и применил действие закона больших чисел, сопоставив данные о смертности по годичным возрастным группам, что позволило установить случайные статистические погрешности и отклонения в этом массиве. В отличие от своих предшественников, Галлей составил полную таблицу смертности, построенную на основе гипотезы стационарного населения, а также ввел понятие вероятной продолжительности жизни в зависимости от возраста, что получило впоследствии широкое применение в страховании и демографической практике социального управления [10, р. 13-14].

Работы политических арифметиков открыли путь для широкого развития демографии и социальной статистики, эмпирических исследований, позволяющих не только понять, что происходит в обществе и государстве, но и использовать полученные знания в целях эффективного управления социальными процессами. Для своего времени эти работы стали своеобразным образцом социологического анализа, сочетающего широкие и многогранные возможности. Это отражение реального состояния социальных явлений, процессов и определение факторов, воздействующих на их изменение; выявление ведущих тенденций развития общественных отношений и нахождение оптимальных путей и средств их совершенствования; обоснование управленческих решений и оценка эффективности их реализации. Это, наконец, и действенный контроль в социальной сфере, прогнозирование социальных ситуаций на основе соединения детальных эмпирических данных с концептуальным анализом и стремлением объяснить приводимые факты с помощью их теоретической интерпретации. В частности, было показано, что достижение таких социальных целей, как высокий уровень здравоохранения, адекватная система образования, гарантии достойных условий существования для инвалидов, больных, престарелых, остро нуждающихся во многом может быть достигнуто посредством эффективно-социального управления с учетом обоюдных потребностей государства и общества.

Согласно мнению экспертов [11, р. 24-26], британская школа политической арифметики имела не только национальное, но и общеевропейское значение для социальной мысли XVII века и породила многих последователей в других странах. Так, например, исследованиями в традициях политической арифметики занимались С. Де Вобан и А. Декарсье во Франции, И.П. Зюсмилх в Германии, П.В. Варгентин в Швеции. В России эти традиции развивались благодаря работам ученых-статистиков Ю.Э. Янсона и А.А. Чупрова. Известный русский социолог М.М. Ковалевский, отмечая влияние политических арифметиков на развитие отечественной социологии на раннем этапе, полагает, что важнейшей заслугой этих ученых было осознание необходимости анализа массовых данных как неперемennого обязательного условия для получения устойчивых, доказательных выводов. Они в числе первых стали использовать средние величины в социальном анализе. Широкий резонанс результаты представителей этой школы приобрели и потому, что их исследования были посвящены актуальным социальным, экономическим, политическим проблемам, решение которых имело определяющее значение для практики социального управления [12, с. 104-106].

Историки социологии отмечают [13], что труды политических арифметиков являются важными не только для развития европейского обществознания, но также оказали определенное влияние на формирование отличительных особенностей социологии США - особый упор на эмпирические методы и прагматизм. Эти отличия проявляются в том, что преобладающими в американской социологии являются эмпирические исследования, направленные на решение конкретных социальных проблем и сориентированные на непосредственные управленческие действия, ведущие к желаемым результатам. Столь важная роль эмпирических исследований, ориентированных на практическое применение

и достижение реального социального эффекта, способствовала становлению многих частных научных дисциплин и специальных социологических теорий, изучающих технико-организационные и социальные аспекты управления общественным производством. К наиболее значимым из них, как в содержательном плане, так и по своим последствиям для развития социологии, на наш взгляд, следует отнести: промышленную социологию, теорию менеджмента, социологию организаций и управления.

Таким образом, вполне обоснованным представляется вывод о том, что сложившееся в школе политической арифметике традиции положили начало многим направлениям и подходам, которые являются ведущими в современной социологии и теории социального управления. Представители данной школы одними из первых в мире обратились к эмпирическому анализу социальных явлений и процессов, который традиционно отличался прагматической направленностью на решение острых общественных проблем и поиском необходимых для их решения механизмов социального управления. Эти исследования давали не только широкое статистическое описание различных социальных групп и общества в целом, но и имели большую управленческую ценность, диагностическое значение. Дополняя и конкретизируя статистическую информацию реалистичными данными они способствовали более глубокому изучению социальных явлений и процессов и тем самым позволяли целенаправленно вести научное обеспечение социального управления. Работы политических арифметиков нашли широкий отклик в общественном мнении и способствовали принятию эффективных управленческих решений, направленных на преодоление социальных проблем в различных сферах жизнедеятельности общества. По мнению экспертов, политическая арифметика знаменовала в истории социального познания переход от простого описания общественных явлений к систематическому наблюдению и количественному выражению их порядка и последовательности и сыграла заметную роль в становлении и развитии классической социологии [14, с. 123-127].

Классический этап охватывает начальный период британской социологии с момента ее зарождения в середине XIX века и до Второй мировой войны. Этот период характерен тем, что ученые пытались найти главный, решающий фактор развития общества, социальной организации и управления. Наиболее широкое распространение в британской социологии в это время получили, в частности, следующие теоретические направления: органицизм, социогеография, социальный дарвинизм, различные психологические концепции. Ключевой фигурой в возникновении классической социологии был выдающийся английский ученый Герберт Спенсер, который не только сформулировал основные положения этой науки, но и проанализировал эволюцию ряда социальных институтов на конкретных эмпирических материалах. Тем самым он не только заложил теоретико-методологические основы эволюционного подхода в социологии, но и дал практический образец его применения в социологическом анализе различных общественных явлений и процессов. Согласно Спенсеру, чем более дифференцированы социальные функции, тем более актуальной становится необходимость существования управляющего механизма, способного регулировать и координировать различные структуры. В частности, анализируя так называемую «регулятивную систему» общества, Спенсер привлек внимание к механизмам социального контроля, эффективную работу которых призваны осуществлять, прежде всего, институты политического управления [15, p. 112-114].

В Англии наиболее известными современниками Г. Спенсера, разрабатывающими свои концепты социального управления, считаются Генри Бокль и Уолтер Бэджгот [16, p. 18]. Так, Г. Бокль, в своей работе «История цивилизации в Англии» [17], демонстрирует стремление открыть универсальные законы социальной структуры, организации и управления посредством статистических методов и социогеографического анализа исторического развития конкретных стран. Эти законы подобны законам природы и зависят от внешних, физических причин – климата, почвы и ландшафта. Их влияние детерминирует социально-демографические особенности народонаселения того или иного региона, которые, в свою очередь, определяют несколько типов управления, являющихся результатом двоякого действия: действия внешних явлений на дух человека и духа человеческого на внешние явления. При этом характер местности, ландшафт он считал ведущим из географических факторов, влияющих на социально-исторические процессы управления, ведя полемику по этому поводу с Ш. Монтескье, отдававшего предпочтение при определении различных форм государственного устройства и управления климату [18, с. 339].

Значительное влияние на развитие британских социологических концепций управления оказал У. Бэджгот – социальный ученый, чьи идеи объединяли экономический, политологический, психологический и социологический подходы. В частности, используя синтез идей Г. Спенсера и Ч. Дарвина, он пытался доказать, что в основании развития общества и социальной структуры управления, лежат природные способности человека. Любое социальное положение не должно противоречить естественно-научным законам, управляющим человеческой природой. Развивая стратификационную

теорию общества, основанную на естественном равновесии, Бэдджот использовал тезис о «борьбе за существование» для обоснования принципов и объяснения механизма сохранения социально-управленческой иерархии путем правильного распределения в ней «наиболее приспособленных» [19, с. 147-149].

Вторая половина XIX века характерна для мирового обществоведения появлением нового жанра – социального обследования. Стремительная индустриализация Великобритании, которая одной из первых вступила на путь капиталистического развития, не только принесла стране успехи в политике и экономике, но и породила ряд острейших социальных проблем. Потребность в их решении привела к созданию новой исследовательской процедуры, имеющей целью не только понять, что происходит в обществе и государстве, но и использовать полученные знания в целях эффективного управления социальными процессами. Приоритет здесь также принадлежит англичанам и связан, прежде всего, с именем Чарльза Бута, опубликовавшим во второй половине XIX века классическую в этой области работу «Жизнь и труд народа Лондона» [20]. В работе освещены следующие области: бедность, промышленность и религиозные влияния. В четырехтомной серии, посвященной бедности, Бут разбил 4-миллионное население Лондона на восемь социальных классов по уровню доходов и пришел к заключению, что 30% населения находилось «ниже черты бедности». В пятитомной серии, посвященной промышленности, население было сгруппировано по двум критериям: скученности, измеряемой числом людей, проживающих в одной комнате, если речь шла о низших классах; и числом слуг, если речь шла о высших классах. Источником этих данных были результаты переписи населения 1891 года. В результате была составлена полная картина экономической организации города в терминах демографических характеристик для каждого вида занятости. Примечательно, что локус каждой профессии, а также места проживания лиц, занятых данной профессией, были проанализированы в терминах «внутренних» и «внешних» подразделений кварталов города.

В завершающем томе «Заметки о социальных влияниях и выводы» дан статистический анализ соотношений между рождаемостью и смертностью, с одной стороны, и бедностью и скученностью, с другой. Здесь вместо 30 переписных округов он сконструировал 50 районов, «адекватно удобных для сравнения». Полученная в результате «Индексная карта Лондона», которую он окрасил в соответствии со «средними социальными условиями» жителей, была лишь одной из серии карт, раскрывающих пространственные распределения различных аспектов социальной организации и функционирования английской столицы. Хотя первоначально намерением Бута было отразить существующую социальную реальность, полученные данные объективно показывали, что необходимы определенные перемены, которые требовали соответствующих управленческих решений. Поэтому в финальном томе Бут часто отказывается от простой констатации социальных фактов и предлагает выводы и обобщения в адрес субъектов государственного управления.

По мнению американского историка социологии Гарольда Пфаутца, труды Ч. Бута являются важными не только для развития европейского обществознания, но также оказали непосредственное влияние на становление социологии в США, в особенности Чикагской социологической школы. Его эмпирические обобщения относительно социальной и пространственной структур современного городского поселения, а также многие из его нововведений в области методологии, методики и техники исследования, вряд ли были превзойдены американскими социологами-урбанистами и поколение спустя [21, р.125].

В плеяде представителей классической британской социологии видное место занимают Беатриса и Сидней Вебб, с именами которых связывают развитие социально-инженерной функции социологических исследований управления и организаций [22, с. 33-34]. Наиболее известными результатами их сотрудничества являются труды «История тред-юнионизма» (1894 г.) и «Промышленная демократия» (1897 г.). В этих работах, посвященных британскому рабочему движению, профсоюзы рассматриваются как маленькие демократии, эволюционирующие от «примитивной» к «представительной» форме, а процесс выработки политики и принятия управленческого решения, при этом, переходит из рук непосредственных членов к представительным органам и организациям. Книги содержат методологические положения описательного анализа социальной структуры, организации и управления с использованием метода наблюдения.

Согласно мнению экспертов [23, р. 54-57], для своего времени эти работы стали удивительным образцом социологического анализа, сочетающего детальные эмпирические данные с концептуальным анализом и стремлением объяснить приводимые факты с помощью их теоретической интерпретации. Авторы пришли к выводу, что достижение таких социальных целей, как высокий уровень здравоохранения, адекватная система образования, гарантии достойных условий существования для

инвалидов, больных, престарелых, остро нуждающихся не под силу ни кооперативу, ни профсоюзам, ни коммерческим предприятиям. Эти проблемы могут быть решены только органами местного управления с учетом социальных потребностей. Вот почему исследователи решили в 1898 году изучить структуру и функции системы британского местного управления. Результаты осуществленного анализа публиковались с 1906 года по 1929 год в десяти томах общим объемом свыше четырех тысяч страниц. Большую популярность также завоевал их учебник «Методы социального исследования» (1932 г.), где, в частности, дан детальный анализ метода включенного наблюдения и методов анализа документов.

В истории британской социологии отмечается [24, p.182] прямая преемственность от Г. Спенсера и его современников к настоящему социологической науки. В ней сохраняется тот же акцент на изучение общества как единого целого, эволюции социальных институтов, проблем социального управления. Своеобразие современного этапа развития британской социологии также состоит в том, что в отличие от других стран, ряд социально-управленческих проблем, структурных и организационных отношений, наиболее плодотворно и эффективно исследовался в междисциплинарном предметном поле психологии, политологии, экономической науки, социальной антропологии, отражая возрастающую функциональную взаимосвязанность различных областей и институтов общественной жизни.

Наиболее значительное влияние на развитие ряда современных концептов социальной структуры, организации и управления в Великобритании оказала социальная антропология – особая теоретическая дисциплина со своим специфическим предметом и методологическим инструментарием. Примером крупнейших английских ученых в мировом обществоведении здесь могут служить имена А.Р. Рэдклифф-Брауна и Б.К. Малиновского, сформировавших концептуальные основы исследования кросскультурного разнообразия жизненного опыта людей в различных социальных группах, обществах и культурах. На первый план здесь выдвигаются идеи о том, что каждая культурная группа по-своему трактует понятия возраста, статуса, пола, определяя то, каким образом интерпретируются человеческое тело и возможности личности, как в той или иной группе распределяются власть и социальные ресурсы управления. Все эти образцы культурных практик, социальных взаимодействий и символических средств коммуникации могут существенным образом различаться у культурных групп, оформляясь под влиянием определенной системы культуры и, в свою очередь, изменяя образцы социальных отношений, правил и установлений социального порядка и управления. Исследования в рамках социальной антропологии значительно повлияли на концептуальное осмысление практик управления инновационным потенциалом организации. Социальная антропология организаций, применяющая теоретический аппарат и качественные методы социальной антропологии, активно развивается как в России, так и за рубежом. Социально-антропологическое исследование управления включает концепции организационной символики, репрезентации, социальной практики. Получили развитие и новые теоретические направления, в фокусе которых находится организационная культура, специфически детерминирующая процесс управления инновационными изменениями. Для авторов, работающих в русле данного подхода, организационная культура является отражением формальных корпоративных ценностей и способов инновационной деятельности. Именно эти свойства организации как социального института признаются культурными и являются объектом управления [25, с. 3-5].

В XX веке управление в Великобритании сформировалось в особый социальный институт и получило логическое завершение в виде социальной страты управленцев. Неослабевающий интерес ученых к менеджерской революции стимулировал развитие взаимосвязанных теорий, оценивающих положение и функции менеджмента в современном обществе. В этот период концепции управления в британской социологии исторически формируются в контексте классических исследований феноменов менеджмента и организаций. В исследованиях М. Буравого, Дж. Вудворта, С. Клегга и Д. Данкерли, Э. Петтигрю, Дж. Пфедфера, Х. Хэрриса, Р. Эдвардса было установлено, что эти феномены представляют собой неотъемлемую часть инновационной деятельности и становятся самостоятельным фактором фундаментальных общественных изменений. По мнению экспертов, эти исследования носили в большей степени поисковый характер и осуществлялись по многим теоретическим направлениям: они охватили большое число различных и часто изолированных друг от друга уровней и стилей анализа. Вместе с тем, возрастающий интерес ученых к поиску инновационных решений в различных сферах жизнедеятельности социума привел к развитию взаимосвязанных управленческих концепций, интегрирующих многогранные теоретические аспекты современного менеджмента [26].

Английские исследователи П. Томпсон и Д. Мак-Хью полагают, что поворот к современной исследовательской парадигме управления и организациями в британской социологии произошел в

связи с результатами эксперимента, осуществленного в 1950-х годах учеными Манчестерского университета. Руководил экспериментом Макс Глюкман, один из основоположников Английской школы антропологии организаций, ставшей известной не только методом детального этнографического описания, но и определенным подходом к анализу социальной ситуации. Эта категория рассматривается как средство понимания и критического теоретизирования более широких аспектов социальной организации. В числе основных задач эксперимента ставилась проверка гипотезы: приведет ли к повышению эффективности производства внедрение организационных и управленческих нововведений или, наоборот, повлечет за собой негативные последствия, снизит эффект ранее внедренных и прижившихся форм организации труда. Посредством полевых методов исследования трудовых отношений на уровне конкретного предприятия, ученые пытались найти объяснение тому, как взаимосвязаны новые технологии и организационные структуры, инновационная политика и стратегии управления [27, р. 23].

В русле этих идей цех промышленного предприятия в Манчестерских исследованиях предстал тем фокусом, в котором сходятся основные проблемы социальной жизни Великобритании. Были сформулированы несколько последовательных подходов к концептуализации полученных в ходе исследования данных. Первый подход позволил связать особенности социальной организации на уровне цеха и макросоциальные процессы, характеризующие структуру промышленности. Вторым подходом к теоретическому объяснению стал анализ различных моделей приспособления в отношении между рабочими и управленцами в контексте классовой структуры Великобритании. Третий подход рассматривает цех как отражение социальной структуры окружающего сообщества. Таким образом, Манчестерские исследования расширили представления о предприятии как о закрытой системе. Была сделана попытка соединить анализ конкретной ситуации на уровне цеха и контекст социальных структур и процессов, происходящих в обществе. Манчестерские исследования значительно повлияли на современные этнографические исследования в организациях. Так, с конца 1960-х годов стали появляться этнографии интернациональных промышленных предприятий, функционирование которых рассматривается в контексте глобализации мировой экономики, а также влияния национальных бюрократий, международных организаций и фирм на политику конкретного региона. В работах 1980-х годов стали выходить на передний план социокультурные подходы к развитию организационных систем, формируются два наиболее значимых направления в этнографических исследованиях организаций: этнография работы и этнография профессий. В новом тысячелетии представители британской социологии все шире охватывают своими исследованиями различные сферы управления и организаций. Многие из этих исследований носят прикладной характер и направлены на разработку управленческих методов, ведущих к желаемым результатам в решении конкретных социальных проблем [28, с. 108-112].

Основоположник классической теории менеджмента П. Дракер, обобщая существующие в мировой практике концепции управления, отмечает [29, р. 373], что сложившаяся в этой области британская традиция стимулировала дальнейший рост исследовательского интереса к социологической концептуализации различных управленческих аспектов процесса реализации новых идей и знаний с целью их практического использования. Сформировавшиеся на ее основе концептуальные модели изменили организационные и управленческие императивы этого процесса и, как следствие, затронули внутреннюю логику современного менеджмента и трансформацию его институтов.

Потребность в таких концептуальных моделях особенно остра в современном российском обществе, где происходят процессы модернизации социальной системы в целом и ее отдельных структурных элементов, вызывающие перемены в социальном объекте управления. Поиск инновационных форм, методов и технологий социального управления непосредственно взаимосвязан с общим проблемным полем научных исследований в этой сфере, изменением методологических ориентиров теории управления и эволюцией социального знания в целом. Сегодня создается новая, опирающаяся на накопленный в мире бесценный тезаурус интеллектуальных богатств открытая культура всей социальной науки, которая придает принципиально новое качество социологии управления. Формирование новой системы взглядов включает переход от построения детерминистской, обобщающей и абстрактной теоретической модели управления к изучению реально действующих управленческих концепций, которые в идеале адекватны реалиям рыночной экономики, принципам и целям демократического общества и тем критериям, которые сложились в международной практике.

Актуализация управленческих измерений в современном российском обществе предполагает дальнейшее, более тщательное изучение зарубежного опыта, наряду с осмыслением теоретико-методологических, концептуальных оснований социального управления. В центр исследовательского

интереса необходимо поместить зарубежные социологические концепции управления, органически сочетающие научные знания, методологию, методики и могли бы быть применимы к разным сферам и уровням социальной реальности. На повестке дня стоит задача формирования нового качества исследовательской практики в мировом пространстве обществоведческих культур, основанных на иностранных языках и послуживших становлению социологии как самостоятельной научной дисциплины. Как показывает практика, успешное социальное управление затруднительно в отсутствие знания определенных концепций, доказавших свою эффективность в развитой системе рыночных отношений.

Наконец, историко-социологический анализ проблемы показывает, что для универсальной общемировой системы социального знания важное значение имеют не только достижения в области фундаментальной теории, но и уникальный национальный опыт реализации социальных знаний в практике социального управления. Эта практика, несмотря на определенную общность закономерностей, имеет у различных народов специфическое своеобразие и особенности. Есть народы, оптимально пользующиеся имеющимися для прогресса возможностями, другие демонстрируют собой, что случается при неблагоприятных внешних обстоятельствах и внутренних факторах. Истоки, содержание и движущие силы этих событий и тенденций нельзя в должной степени понять, не обратившись к социальной рефлексии, которая в наиболее концентрированном виде выражена в социологическом знании. Социальная ценность этого знания во многом определяется социокультурным фактором – принадлежностью ученых к определенной языковой культуре и связанным с ней традициям научного поиска [30, с. 75].

Как показал проведенный анализ, британская социология имеет богатые научные традиции, которые внесли определенный вклад в общий тезаурус мирового обществоведения. Эти традиции значительно повлияли на формирование методологии, методики и практики проведения современных прикладных социологических исследований, развитие их социально-инженерной и управленческой функций. Работы британских социологов были важным этапом изучения и обобщения закономерностей, форм и методов целенаправленного воздействия на социальные структуры и процессы, которые имеют место в государстве и обществе. Они также содействовали развитию социологии как самостоятельной дисциплины, укреплению ее, многоаспектного характера, представленного различными многочисленными специализациями, удовлетворяющими разные научные и практические интересы. Все это послужило становлению социального знания в новом, современном качестве, а его теоретическая значимость и практическая польза значительно возросли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Култыгин В.П., Клементьев Д.С. Глобализация социальных процессов в Европе: социологическое измерение. М.: МАКС Пресс, 2008. 148 с.
2. Жуков В.И. Российские преобразования: социология, экономика, политика. М.: Союз, 2003. 164 с.
3. Култыгин В.П., Кузнецов А.Г. Общая социология. М.: Научная книга, 2004. 282 с.
4. Култыгин В.П. Классическая социология. М.: Наука, 2000. 526 с.
5. Хрестоматия по общей социологии. Составители: В.П. Култыгин, А.Г. Кузнецов. М.: Научная книга, 2004. 212 с.
6. Смит А. Исследования о природе и причинах богатств народов. СПб.: Питер, 2012. 410 с.
7. Кузнецов А.Г. Политическая арифметика социального управления // Вестник ПАГС. 2012. № 1 (30). С. 123-127.
8. Bulmer M. Development of sociology and of empirical social research in Britain // Essays on the history of British sociological research. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. P. 92-98.
9. Петти В. Экономические и статистические работы. М.: Прогресс, 1990. 518 с.
10. International Encyclopedia of the Social Sciences. N.Y.: Humanities Press, 1968. 680 p.
11. Kent R. A History of British Empirical Sociology. L.: New Left Books Press, 1981. 522 p.
12. Ковалевский М.М. Социология. СПб.: Питер, 2000. 498 с.
13. Батыгин Г.С., Подвойский Д.Г. История социологии. М.: Наука, 2007. 382 с.
14. Воронцов А.В., Громов И.А. История социологии XIX – начало XX века. Часть 1. Западная социология. М.: Наука, 2005. 260 с.
15. Spencer H. The Principles of Sociology. L.: Polity Press, 1904. 670 p.
16. Abrams Ph. The Origins of British Sociology: 1834-1914. Chicago: Aldine, 1968. 592 p.
17. Bucle H. The history of civilization in England. L.: Polity Press, 1900. 702 p.
18. Социологическая энциклопедия / Под ред. В.Н. Иванова. М.: Мысль, 2013. 988 с.

19. Бэджгот В. Государственный строй Англии. СПб.: Питер, 2013. 612 с.
20. Booth C. The life and Labour of the people in London. L.; Tavistoc Books, 1903. 1012 p.
21. The Classical Tradition in Sociology. L.: Polity Press, 1997. 668 p.
22. Энциклопедия социального управления / Под ред. А.И. Кравченко. М.: Трикта, 2012. 898 с.
23. Krause E. Sociology in Britain: A Survey of Research. N.Y.: Humanities Press, 1969. 474 p.
24. Abrams Ph. The Origins of British Sociology: 1834-1914. Chicago: Harper, 1968. 390 p.
25. Ярская-Смирнова Е.Р., Романов П.В., Михель Д.В. Социальная антропология современности: теория, методология, методы, кейс-стади. Саратов: Научная книга, 2004. 335 с.
26. История менеджмента / Под ред. Д.В. Валового. М.: ИНФРА-М, 2007. 312 с.
27. Thompson P., Mc Hugh D. Work Organizations. A Critical Introduction. L.: New Left Books Press, 1995. 362 p.
28. Романов П.В. Социологические интерпретации менеджмента: исследования управления, контроля и организаций в современном обществе. Саратов: СГТУ, 2000. 216 с.
29. Drucker P. The Practice of Management. N. Y.: Harper, 2000. 510 p.
30. Здравомыслов А.Г. Национальные социологические школы в современном мире // Общественные науки и современность. 2007. № 5. С. 75-86.

Кузнецова Кристина Андреевна - аспирант кафедры экономической социологии, рекламы и связей с общественностью Саратовского государственного социально-экономического университета

Kristina A. Kuznetsova - Postgraduate Department of Economic Sociology, Advertising and Public Relations, Saratov State Social and Economic University

Статья поступила в редакцию 21.02.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 316.774:654.1

Н.И. Мельникова

ИНДЕКС ГОТОВНОСТИ К СЕТЕВОМУ ОБЩЕСТВУ В ПЛЕНУ У ЭКСПЕРТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Одним из критериев успешного выполнения федеральной целевой программы «Информационное общество (2011-2020 годы)» является вхождение России в число 20 ведущих стран мира по рейтингу NRI. Анализ его показателей выявил превалирование экспертных показателей для ранжирования стран, что не может исключить пристрастность оценки тех или иных стран экспертами. На экспертные показатели затруднительно повлиять проектной деятельностью в научно-технической сфере. Проблема перемещения на более достойные позиции в рейтинге NRI требует дальнейшего анализа источников исходных данных для оценивания экспертных показателей, а также рассмотрения взаимосвязей различных индексов Всемирного экономического форума.

Федеральная целевая программа, информационное общество, индекс готовности к сетевому обществу, NRI

N.I. Melnikova

NETWORK READINESS INDEX IN CAPTIVITY OF EXPERT INDICATORS

The entry into the top 20 countries of the world by NRI is one of criterions of the successful fulfilling of federal program of the Russian Federation «The Information Society (2011-2020)». The analysis revealed a predominance of expert indicators for ranking countries on the NRI, it cannot rule out bias in regard to those or other countries. It is difficult to influence on expert indicators via the project activities in science and technology. Moving up in the ranking of NRI requires the analysis of the source of input data for

estimation of expert variables and also consideration of interrelations of various indexes of the World Economic Forum.

Federal Program, Information Society, Network Readiness Index, NRI

Международные оценки оказывают значительное воздействие на планомерную деятельность государств. В 2011 г. началась реализация федеральной целевой программы «Информационное общество (2011-2020 годы)» [5]. Критерием её успешного выполнения, в числе прочих, является улучшение рейтинга страны по некоторым международным индексам, включая: Network Readiness Index (NRI) - индекс готовности к сетевому обществу; ICT Development Index - индекс развития информационных и телекоммуникационных технологий; E-Gov - индекс развития электронного правительства. По оценкам за 2011 год положение России здесь таково: по индексу NRI – 78 место из 155 стран; по индексу ICT - 47 из 152; по индексу E-Gov – 59 из 184. В результате выполнения ФЦП «Информационное общество» рейтинг России по этим индексам к 2020 г. должен улучшиться следующим образом: по индексу NRI войти в число 20 ведущих стран (начиная с 2015 г.); по индексу ICT войти в число 10 ведущих стран; по индексу E-Gov войти в число 20 ведущих стран мира.

Индекс NRI является одним из старейших и уважаемых в мире, его данные публикуются с 2001 г. в документах «The Global Information Technology Report» в рамках Всемирных экономических форумов (World Economic Forum) [8-16]. Сводные данные по индексу NRI в графическом виде представлены на портале Всемирного экономического форума [17]. Основной целью индекса NRI является оценка и надёжная научная интерпретация состояния и перспектив использования информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в глобальном масштабе.

За годы подсчета индекса NRI в число двадцатки лидеров входили 25 стран. Постоянными лидерами являются: Австралия; Великобритания; Германия; Гонконг; Дания; Исландия; Канада; Нидерланды; Норвегия; Сингапур; США; Тайвань; Финляндия; Швейцария; Швеция. Кроме них, в числе лидеров в разные годы были: Япония - 8 раз; Корея - 7 раз; Австрия - 6 раз; Израиль и Франция - 5 раз; Ирландия, Эстония и Люксембург - 3 раза; Новая Зеландия - 2 раза; Бельгия - 1 раз. Конкуренция за пребывание в двадцатке лидеров велика - 15 стран не покидали эту двадцатку, а выпадали из неё даже такие страны, как Франция и Япония. Так, в рейтинге 2008-2009 Япония впервые выпала за указанные пределы, заняв 21 место, но уже в рейтинге 2010-2011 вернулась в двадцатку лидеров, вытеснив оттуда Австрию. США занимали первое место в рейтингах до 2005 г., но, начиная с рейтинга 2006-2007, первенство захватили страны Северной Европы. Первоначально это была Дания (рейтинги 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009), затем Швеция (рейтинги 2009-2010, 2010-2011). В последних двух рейтингах США занимают 5-ое место, пропустив вперед Швецию, Сингапур, Финляндию и Швейцарию.

В паспорте ФЦП «Информационное общество» точкой отсчёта взят рейтинг 2008-2009, где Россия занимала 74 позицию. К началу выполнения программы вышли еще два рейтинга, в которых Россия имеет позиции 80 (рейтинг 2009-2010) и 78 (рейтинг 2010-2011). Необходимо выявить причины отставания и возможность достижения целей, указанных в ФЦП «Информационное общество» - ближайшей, вхождения в 70 лучших, и конечной, вхождения в двадцатку лучших стран – в результате выполнения предусмотренных программой технических проектов в области информационно-коммуникационных технологий.

Всемирный экономический форум для расчета индекса NRI использует информацию из нескольких источников: данные международных организаций, данные национальных источников, а также данные собственных опросов Executive Opinion Survey [7]. Опросы являются инструментом для получения информации, недоступной другим способом на глобальном уровне. Таким образом, используемые для расчета индекса NRI показатели можно разделить на две категории: вычисляемые и экспертные. Для расчета индекса NRI за 2010-2011 годы использовался 71 показатель, из которых только 28 являются вычисляемыми на основании представленных данных, а значения остальных 43 определялись субъективным мнением экспертов Всемирного экономического форума, которое фиксировалось в опросных листах.

Пример экспертно-оцениваемых показателей из опросного листа для расчета рейтинга 2010-2011 приведен на рис 1:

Отметим, что по показателю 5.06 «В какой степени бизнес и университеты сотрудничают в области научных исследований и разработок (НИОКР) в стране?» Россия получила экспертную оценку 3.56 (среднее значение по всем странам равно 3.71) и заняла по этому показателю 61 место - вслед

за султанатом Бруней. Оценка спорная, и таких спорных экспертных оценок достаточно много, а повлиять на их улучшение реализацией технических проектов в области ИКТ проблематично.

5.05 How would you assess the quality of scientific research institutions in your country?

Very poor

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

 The best in their field internationally

5.06 To what extent do business and universities collaborate on research and development (R&D) in your country?

Do not collaborate at all

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

 Collaborate extensively

Рис. 7. Executive Opinion Survey. Фрагмент

Значения вычисляемых показателей определяются на основе документированных данных. Рассмотрим эти показатели по порядку и, поскольку Россия претендует на то, чтобы попасть в число лидирующих стран, сравним полученные значения со значениями стран-лидеров.

Показатель «Общая налоговая ставка». Для России его значение равно 46.5%. По этому показателю Россия занимает 91 место в общем списке. В странах-лидерах наименьшую общую налоговую ставку имеет Люксембург (21.1%), а максимальную – Франция (65,0%). Средняя общая налоговая ставка для стран-лидеров составляет 38.2%, а медианное значение – 37.4%. Но шесть стран-лидеров имеет общую налоговую ставку, превышающую аналогичный показатель в России: США (46.5%), Австралия (47.9%), Германия (48.2%), Япония (48.6%), Швеция (54.6%) и Франция (65.8). Таким образом, ряд стран, с которыми Россия традиционно сравнивает свои достижения (США, Франция, Германия), имеют большую налоговую ставку, а это означает, что данный показатель не является критичным для вхождения в число лидеров. К тому же изменение общей налоговой ставки невозможно в результате проектной деятельности в области ИКТ.

Показатель «Количество дней, требуемых для открытия бизнеса». Для России его значение равно 30 дням. По общему списку Россия занимает 96 место. Наибольшее значение для стран-лидеров составляет 23 дня (Япония), среднее же значение для стран лидеров равно 10.2 дням. Аналогично обстоит дело и с показателем «Количество процедур, требуемых для открытия бизнеса». Для России значение его значение равно 9, среднее значение для стран-лидеров составляет 4.8. Только в Германии из 20 стран-лидеров такое же количество процедур, как в России, а у всех остальных стран значение этого показателя существенно меньше. Это и обуславливает нахождение России на 92 месте в общем списке по этому показателю. Для изменения значений этих показателей требуются не проекты в области ИКТ, а тщательный пересмотр процессов, которые происходят при открытии бизнеса.

Показатель «Количество процедур для обеспечения соблюдения контрактов». Для России его значение равно 30 и обеспечивает 65-е место в общем списке. Среднее значение для стран-лидеров составляет 9.5, а наибольшее - равно 20 (Швейцария). Очевидно, что количество процедур для обеспечения соблюдения контрактов в России слишком большое по сравнению со странами-лидерами. Но уменьшить значение этого показателя только проектной деятельностью в области ИКТ невозможно.

Показатель «Время исполнения контракта» в трактовке NRI означает количество дней, требуемых для разрешения спора с момента подачи иска в суд и до оплаты. Значение его для России составляет 281 день. Это намного меньше, чем среднее значение для стран-лидеров (358 дней). Наименьшее значение этого показателя у Сингапура (150 дней), а наибольшее у Канады (570 дней). Медианное значение этого показателя составляет 384.5 и только пять из двадцати стран (Сингапур, Новая Зеландия, Гонконг, Корея и Норвегия) имеют меньшее значение этого показателя, чем Россия. Работать над улучшением значения этого показателя, безусловно, надо продолжать, но в настоящий момент его значение не оказывает отрицательное воздействие на позицию России в индексе NRI.

Существует ряд показателей, которые связаны со стационарной телефонной связью: «Количество телефонных линий»; «Стоимость установки телефона для жителей»; «Ежемесячная подписка на телефон для жителей»; «Тарифы фиксированной телефонной связи»; «Стоимость установки телефона для бизнеса»; «Ежемесячная подписка на телефон для бизнеса», которые являются второстепенными для оценки готовности к сетевому миру, но по которым у России очень плохие значения. Таким удивительным образом отставание в телефонных проводных коммуникациях, которое было в России в 80-х г.г. прошлого века, влияет на страну в эпоху совершенно других коммуникаций. Целевая направленная деятельность в области ИКТ вряд ли уже улучшит значения этих показателей.

Показатель «Охват мобильной связью» оценивает процент людей, использующих мобильную связь, от общего числа населения. Для России его значение равно 95%, причём, как указано в отчёте, это является значением 2006 г. Очевидно, что за прошедшие годы это значение не ухудшилось. У большинства стран-лидеров охват населения мобильной связью также приближается к 100%, наименьшее значение у Новой Зеландии (97%). Но никакая проектная деятельность в области ИКТ не нужна для приближения значения показателя к 100%. Более того, логично предположить, что 100% покрытие мобильной связью вряд ли будет достигнуто как в нашей стране, так и в странах, меньших по размеру. Например, для США значение этого показателя равно 99.6%, а для Швеции – 99%.

Показатель «Безопасные Интернет-серверы» оценивает количество безопасных Интернет-серверов на миллион населения. Значение его для России удручающе мало – 10,5 серверов на миллион населения, здесь Россия занимает 75 место. Для стран-лидеров среднее значение составляет 902.2, медианное значение – 997.6, наименьшее значение – 209.8 (Франция), наибольшее значение – 1711.3 (Исландия). Разница между Россией и лидерами составляет 2-3 порядка. Это не просто разница, а пропасть. Но все же это чисто техническая задача, для решения которой понятно - наращивать количество безопасных серверов.

Показатель «Международный Интернет-трафик» оценивает международный Интернет-трафик (Мб/с) на 10 000 населения. У России его значение 5.7, что значительно меньше, чем у стран-лидеров. Наибольшее значение здесь имеет Люксембург (70301.7), а наименьшее - Новая Зеландия (45.4). Среднее значения для стран-лидеров без Люксембурга составляет 587.5, а медианное – 293.6. Причина такого отставания, вероятно, все же скорее образовательная. К сожалению, знание иностранных языков в нашей стране является недостаточно высоким. В Интернете традиционные границы неэффективны, никто не задерживает пользователя Интернета в его национальном сегменте. Интернет является не просто технологическим продуктом или коммуникативным устройством, а создаёт новую географию, когда полностью сняты все запреты на использование зарубежных информационных ресурсов. Но выхода за пределы национального сегмента Интернета у российских нетсерферов практически нет, и проектная деятельность в области ИКТ вряд ли сможет изменить сложившиеся стереотипы их поведения.

Показатель «Производство электроэнергии» оценивает производство электроэнергии (кВтч) на душу населения. Значение его для России составляет 7 131.6. Для стран-лидеров среднее значение составляет 12 492.5, медианное значение - 9 728.0, наименьшее значение - 5 624.1 (Гонконг), наибольшее значение – 38 441.3 (Исландия). Проектная деятельность в области ИКТ также не может повлиять на значение этого показателя, поскольку влияют на него, конечно же, генерирующие мощности, а не компьютерные сети и сервисы.

Показатель «Валовый показатель охвата третичным образованием». Третичное образование включает ступени 5B (обучение в учреждениях среднего профессионального образования на базе полной школы), 5A (обучение в высших учебных заведениях) и 6 (обучение в аспирантуре и докторантуре) [1]. Значение показателя для России составляет 77,2%, что обеспечивает 20-е место в общем рейтинге. Среднее значение для стран-лидеров составляет 64.7%, медианное значение 66.6%, наименьшее значение – 10% (Люксембург), наибольшее значение – 98.1% (Корея). Охват третичным образованием в России превышает среднее значение стран-лидеров, но уступает 6 странам (Новая Зеландия, Дания, США, Тайвань, Финляндия, Корея). Потенциал ИКТ в российском образовании не задействован полностью, несмотря на многочисленные разрозненные успехи на этом поприще. Пределы роста использования ИКТ в образовании находятся на дальнем горизонте, и проектная деятельность может способствовать охвату третичным образованием в России значительно большего количества людей, снимая тем самым социокультурные барьеры на пути модернизации национальной молодежной политики [4]. Таким образом, улучшение значения данного показателя может быть обусловлено проектной деятельностью в области ИКТ и, прежде всего, на основе продуктивного использования этих технологий непосредственно в образовании.

Показатель «Уровень грамотности взрослых». Тут мы опережаем все страны-лидеры - незначительно, но опережаем. Доля грамотных взрослых людей в России составляет 99.5%. Для подавляющего большинства стран-лидеров значение этого показателя составляет 99%, меньше оно только у двух стран: Сингапур (94.5%) и Тайвань (97.8%). Также необходимо отметить, что Россию по этому показателю опережают бывшие республики Советского Союза и страны Восточной Европы: Эстония (99.8%); Латвия (99.8%); Грузия (99.7%); Казахстан (99.7%); Литва (99.7%); Словения (99.7%); Таджикистан (99.7%); Украина (99.7%). Одинаковый показатель с Россией имеют Азербайджан, Армения, и Польша. По этому показателю России совершенствоваться фактически невозможно, поэто-

му проектная деятельность существенного влияния на улучшение позиции России здесь оказать не может.

Показатель «Тарифы мобильной связи» оценивает среднюю стоимость минуты различных типов мобильных сотовых звонков по паритету покупательной способности в долларах США. Для России его значение равно 0.27. Значения стран-лидеров изменяются в диапазоне 0.01 (Гонконг) – 1.27 (Япония). Среднее значение этого показателя равно 0.37, а медианное 0.33. Медианное значение показывает, что по этому показателю Россия попадает в первую десятку стран-лидеров.

Показатель «Тарифы широкополосного доступа в Интернет» оценивает ежемесячную стоимость подписки на кабельный широкополосный Интернет по паритету покупательной способности в долларах США. Для России его значение равно 27.45. Значение этого показателя для стран-лидеров изменяется в диапазоне 15.71 (Тайвань) – 37.09 (Германия). Среднее значение равно 26.09, а медианное – 25.45. По этому показателю Россия попадает в число двадцати стран-лидеров.

Показатель «Компьютеры, связь и другие услуги импорта» оценивает долю компьютеров, средств связи и других услуг от общего коммерческого импорта услуг. По этому показателю Россия со значением 44.8% занимает 25 место. Для стран лидеров среднее значение составляет 41.4%, медианное значение – 42.6%, наименьшее значение – 26.7% (Гонконг), наибольшее значение – 62.4% (Финляндия). Конечно, импорт ИКТ в Россию весьма внушителен, но он меньше, чем у таких стран, как Корея, Япония, Нидерланды, Швеция и Финляндия. Потенциал России в развитии ИКТ и сервисов на их основе достаточно велик, поэтому шансы продвижения вверх по этому показателю на 2-3% процента до уровня Франции (40.8%) и Великобритании (42.9%) вполне реалистичны. Улучшение значение этого показателя возможно в рамках проектной деятельности в области ИКТ.

Показатель «Подписка на мобильную связь» оценивает количество подписок на мобильную связь на 100 человек. По этому показателю Россия находится в числе самых передовых стран со значением 163.60 подписок на 100 человек. Диапазон изменения значений этого показателя для стран лидеров составляет 70.9 (Канада) – 179.40 (Гонконг). Среднее значение этого показателя равно 119.17, а медианное – 119.50. Россия обходит по этому показателю 19 из 20 стран-лидеров, пропустив вперёд только Гонконг. Степень насыщения мобильной связью, по-видимому, наступила, и проектная деятельность в области ИКТ существенно повлиять на значение этого показателя уже не сможет.

Показатель «Сотовая подписка с доступом к данным» определяет процент сотовой связи с широкополосным доступом к данным. По этому показателю Россия имеет значение 20.1%. Для стран-лидеров диапазон изменения этого показателя составляет 5.8% (Исландия) до 100% (Финляндия и Швеция). Среднее значение показателя равно 45.5%, а медианное значение – 39.0%. Т.е. российское значение ниже среднего, но при этом Россия опережает четыре страны-лидера по этому показателю (Исландия, Канада, Нидерланды и Норвегия). Улучшить значение этого показателя на основе проектной деятельности в области ИКТ вполне возможно.

Показатель «Домохозяйства с персональными компьютерами» определяет количество домохозяйств, оснащённых персональными компьютерами. В России только 50% домохозяйств имеют персональные компьютеры. Это меньше, чем в странах-лидерах, где количество компьютеров в домохозяйствах изменяется в диапазоне 69.2% (Франция) – 98.6% (Норвегия). Средний процент домохозяйств, оснащённых компьютерами, равен 82.7%, а медианное значение составляет 81.6%. Разница в оснащении компьютерами в России и странах-лидерах существенна, но она не может быть преодолена посредством проектной деятельности в области ИКТ.

Показатель «Подписка на широкополосный Интернет» измеряет количество подписчиков на широкополосный Интернет на 100 жителей. По этому показателю Россия со значением 9.2. занимает 51 место. Среднее значение для стран-лидеров составляет 29.9., минимальное значение у Тайваня (21.4), а максимальное значение у Дании (37.9). Проекты в области ИКТ повлиять на значение этого показателя не могут.

Показатель «Пользователи Интернета» измеряет количество пользователей Интернета на 100 жителей. В России приходится 29 пользователя Интернета на 100 жителей, по данным международного союза электросвязи (МСЭ). По этому показателю Россия находится на 74 месте. Среднее значение для стран-лидеров составляет 80.9, медианное значение – 80.8, наибольшее значение – 93.5 (Исландия), наименьшее значение – 68.3 (Сингапур). Однако компания comScore, которая является мировым лидером по измерению цифрового мира и надёжным источником данных цифрового рынка, представила в сентябре 2011 года отчёт по использованию Интернета в Европе, согласно которому количество пользователей Интернета в России составляет 50.8 млн. уникальных посетителей сети старше 15 лет. Это результат является лучшим результатом среди европейских стран [6]. Количество

пользователей Интернета в России растёт, но целенаправленная деятельность в этой области, конечно же, нужна. Цифровое неравенство очень велико в старших возрастных группах. По данным comScore, среди людей старше 55 лет только 50% используют Интернет, а среди старше 65 лет - только 16%. Образовательная деятельность в области ИКТ для людей третьего возраста позволит вовлечь значительные слои населения в компьютерную сетевую деятельность. Проектная деятельность в этой области необходима, поскольку для людей третьего возраста типичны патерналистские ожидания [3]. Тем самым может произойти улучшение значения этого показателя у России.

Показатель «Использование местного патентного бюро» показывает количество патентных заявок, поданных гражданами страны в национальное патентное ведомство на миллион населения. В России на миллион населения согласно данным рейтинга NRI подавалось 180.6 патентных заявок. Это значительно ниже, чем среднее значение (644.4) и медианное значение (258.3). Тем не менее, Россия занимает 19 место по этому показателю. Наибольшее значение этого показателя у Тайваня (3392.1), а наименьшее – у Гонконга (21.3). Проекты в области ИКТ вряд ли смогут изменить значение этого показателя. Причины, по которой в России сравнительно низка патентная деятельность, является предметом дополнительного исследования.

Показатель «Применение договоров на патентные заявки» показывает количество международных патентных заявок, поданных в рамках Договора о патентной кооперации на миллион населения. Для России значение этого показателя очень низкое – 3.9, что обуславливает 46 место. Среднее значение составляет 226.4, а медианное значение – 206.2. Наибольшие значения у Люксембурга (500.1) и Швейцарии (467.1), а наименьшее значение имеет Новая Зеландия (63.6). Удивительно, но в числе лидеров по этому показателю попал Барбадос (332.2), заняв 5-е место среди всех стран по этому показателю. Проектная деятельность в области ИКТ и изменение в положительную сторону значения этого показателя коррелируют достаточно слабо.

Показатель «Высокотехнологичный экспорт» определяет процент высокотехнологичных товаров от общего объема экспорта товаров. У России доля высокотехнологического экспорта составляет всего лишь 1.3%. Среднее значение для стран-лидеров равно 16.5%, а медианное – 13.7%. Наибольшую долю высокотехнологического экспорта имеет Тайвань (42.2%), а наименьшую – Новая Зеландия (2.1%). Развитие ИКТ, безусловно, может внести свой вклад в увеличение доли высокотехнологического экспорта, но довести её до уровня США (15.8) нереалистично. Для такого рывка требуются структурные изменения в экономике, которые бы задействовали сохранившийся научно-технический потенциал.

Таким образом, из рассмотренного списка вычисляемых показателей по 18 мы уже не только в числе 70, но в числе 35 лучших стран. Еще по 4 показателям значения могут быть улучшены по результатам прямой проектной деятельности в области ИКТ – это «Валовый показатель охвата третичным образованием», «Пользователи Интернета», «Компьютеры, связь и другие услуги импорта», «Сотовая подписка с доступом к данным». Оставшиеся вычисляемые показатели либо не зависят, либо в малой степени зависят от проектной деятельности в области ИКТ.

Сводное распределение мест по вычисляемым и экспертным показателям приведено на рис. 2. Черным цветом показаны места, занимаемые Россией по вычисляемым показателям, а серым – по экспертным. Горизонтальными линиями показаны фактическое значение рейтинга России на 2011 г. (78 место), и желаемое – на 2015 год (войти в число двадцатки стран-лидеров). Приведенные графики показывают, что по тем показателям, которые связаны с измерениями чего-либо, у России вполне достойное место. При этом, как уже указывалось выше, ряд связанных со стационарной связью показателей является объективно устаревшими, но именно эти показатели дают положительные экстремумы, как видно из рис. 2, т.е. очень сильно ухудшают позицию России. Указанные на рис. 2 экстремумы соответствуют показателям «Стоимость установки телефона для жителей» (135 место) и «Стоимость установки телефона для бизнеса» (133 место) и не способствуют выявлению действительного уровня развития и использования ИКТ в стране.

В среднем по вычисляемым показателям Россия занимает 56 место и, если отбросить два отмеченных на рис. 2 показателя, даже входит в 50 лучших. В то же время по экспертным показателям в среднем позиция России почти в два раза хуже – только 88 место. Столь явный разрыв в значениях вычисляемых и экспертных показателей подвергает сомнению обоснованность экспертных оценок. Складывается впечатление, что в большей степени индекс NRI является инструментом психологического давления на страны, чем инструментом, стимулирующим деятельность по продвижению информационно-коммуникационных технологий во все сферы жизнедеятельности. В связи с этим представляется интересным и продуктивным уяснение взаимосвязи исследуемого феномена с социальным и личностным контекстом субъектов исторического процесса в меняющейся ситуации [2].

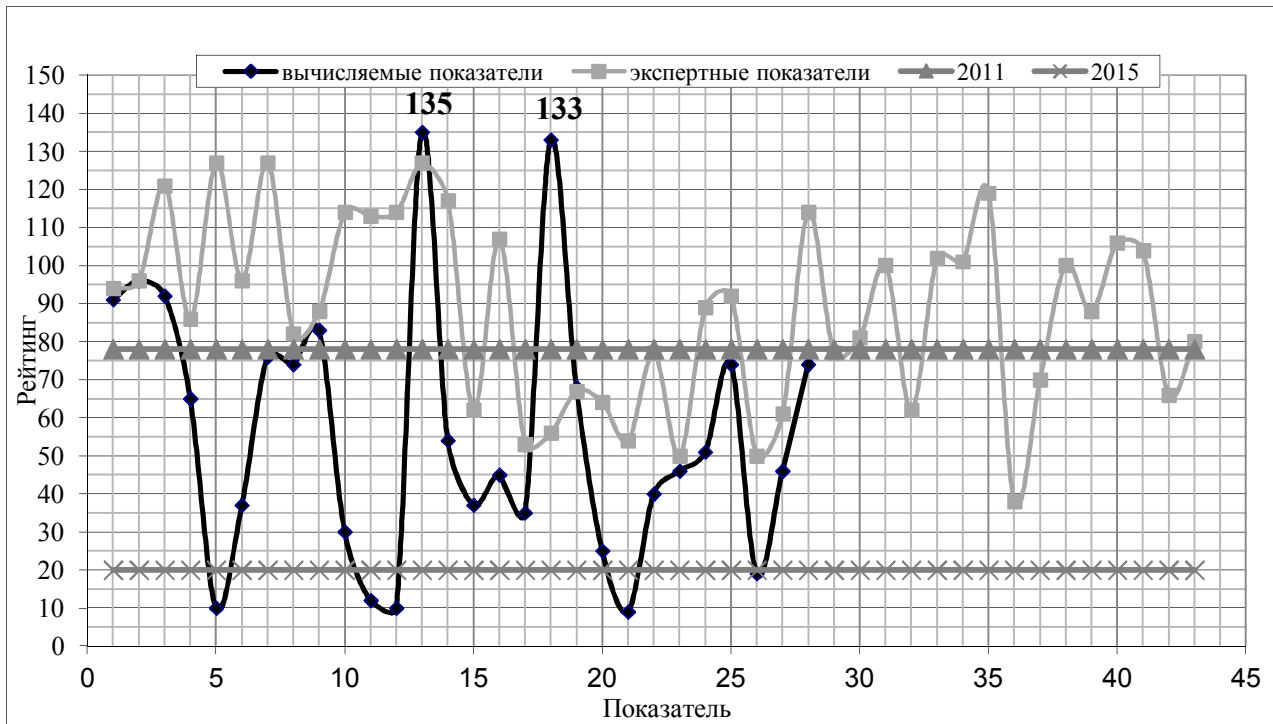


Рис. 2. Распределение мест вычисляемых и экспертных показателей NRI

Индекс NRI находится во взаимной связи с другими мировыми индексами, например с индексом глобальной конкурентоспособности (Global Competitiveness Index, GCI), признанным мировым инструментом оценки уровня конкурентоспособности стран, их слабых и сильных сторон. Взаимосвязь NRI и GCI проявляется, например, в экспертном показателе «Индекс конкуренции секторов Интернета и телефонии», показывающий уровень конкуренции на Интернет-услуги, международные услуги на дальние расстояния, а также услуги мобильной телефонной связи. Значение этого показателя в индексе NRI просто заимствуется из индекса GCI, где он формируется мнением экспертов. Его значение для 18 из 20 стран-лидеров равно 6 из 6 возможных баллов, только Дания имеет значение этого показателя равное 5, а по Гонконгу сведения отсутствуют. В то же время значение этого показателя для России составляет 3, в общем рейтинге Россия стоит на 107 месте по этому показателю, пропустив вперед всех, кого только возможно. Положительное изменение значения этого показателя может лишь частично быть связано с техническими аспектами, в большей же степени оно связано с особенностями развития рынка телекоммуникаций.

Перемещение России на более достойные позиции в рейтинге NRI требует дальнейшего анализа источников исходных данных для оценивания экспертных показателей, а также рассмотрения взаимосвязей различных индексов Всемирного экономического форума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агранович М. Л., Полетаев А.В., Фатева А.В. Российское образование в контексте международных показателей. М.: Аспект Пресс, 2005. 76 с.
2. Лобачева Г.В., Карабут А.К. Методология исторического знания: новые подходы // Вестник СГТУ (Гуманитарные науки). 2009. № 3(41). С. 346-348.
3. Темаев Т.В., Бексаева Н.А., Трифонова И.В. Социальный портрет группы третьего возраста // Вестник СГТУ 2006. № 2 (13). Вып. 2. С. 198-203.
4. Ярская В.Н., Ловцова Н.И. Молодежная политика: разные и пока не равные // Журнал исследований социальной политики. 2010. №2. Т. 8. С. 151-165.
5. ФЦП «Информационное общество (2011 - 2020 годы)». Доступен: <http://fcp.economy.gov.ru/cgi-bin/cis/fcp.cgi/Fcp/ViewFcp/View/2012/369> (Дата обращения 19.12.012) comScore Releases Overview of European Internet Usage in September 2011. Доступен: http://www.comscore.com/Press_Events/

Press_Releases/2011/11/comScore_Releases_Overview_of_European_Internet_Usage_in_September_2011 (Дата обращения 19.12.012)

6. Executive Opinion Survey 2009. The Global Competitiveness Report 2011-2012 Доступен: <http://www.weforum.org/issues/global-competitiveness> (Дата обращения 19.12.012)
7. The Global Information Technology Report 2001-2002: Readiness for the Networked World. Oxford University Press, USA, 2002. 408 с.
8. The Global Information Technology Report 2002-2003: Readiness for the Networked World. Oxford University Press, USA, 2003. 350 p.
9. The Global Information Technology Report 2003-2004: Towards an Equitable Information Society. Oxford University Press, USA, 2004. 376 p.
10. The Global Information Technology Report 2005-2006: Leveraging ICT for Development. Palgrave Macmillan, 2006. 352 p.
11. Soumitra Dutta, Irene Mia. Global Information Technology Report 2006-2007: Connecting to the Networked Economy. Palgrave Macmillan, 2007. 320 p.
12. Soumitra Dutta, Irene Mia. The Global Information Technology Report 2007-2008: Fostering Innovation through Networked Readiness. Palgrave Macmillan, 320 p. 376 p.
13. The Global Information Technology Report 2008–2009. Mobility in a Networked World. Доступен: <https://members.weforum.org/pdf/gitr/2009/gitr09fullreport.pdf> (Дата обращения 19.12.012)
14. The Global Information Technology Report 2009–2010. ICT for Sustainability Доступен: http://www3.weforum.org/docs/WEF_GITR_Report_2010.pdf (Дата обращения 19.12.012)
15. The Global Information Technology Report 2010–2011. Transformations 2.0. Доступен: <http://reports.weforum.org/global-information-technology-report/> (Дата обращения 19.12.012)
16. World Economic Forum - The Great Transformation - Network Readiness Index
Доступен: <http://www.weforum.org/issues/global-information-technology/the-great-transformation/network-readiness-index> (Дата обращения 19.12.012)

Мельникова Нина Ивановна –
доктор социологических наук, профессор
кафедры социологии, социальной антропологии и
социальной работы
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Melnikova Nina Ivanovna –
Dr. Sc, Professor
Department of Sociology, Social Anthropology
and Social Work,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.01.14, принята к опубликованию 15.05.14

УДК 316.353

Е.П. Федотова-Антонова

ДЕТСКИЙ ТРУД: ПЛЮРАЛИЗМ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОНЯТИЯ И МЕРЫ СОЦИАЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ

Проведено определение содержания понятий «детский труд» и «детская занятость» в социологическом поле исследования; проанализировано отношение к феномену детского труда, которое менялось с развитием представлений о детстве, правах детей, допустимых и легитимных способах воспитания и перевоспитания; проанализирована специфика гендерной социализации и идентификации в контексте легальной и неформальной форм детской занятости сквозь призму актуального фактологического материала: включенное наблюдение, полужформализованное интервью, вторичный анализ данных; проанализированы меры социальной политики, направленные на поддержку детей и защиту их от эксплуатации и включения несовершеннолетних в нелегальные формы занятости.

Детский труд, плюрализм, легальные формы занятости, эксплуатация, меры социальной политики

E.P. Fedotova-Antonova

**CHILD LABOR: PLURALISM IN THE DEFINITION AND CONCEPTS,
AND MEASURES OF SOCIAL POLICY**

The author defines the concepts of «child labor» and «child employment» in sociological research. The analysis refers the attitude to the phenomenon of child labor which has changed with the development of childhood understanding, children rights, valid and legitimate methods of education and re-education; it includes analysis as to the specificity of gender socialization and identification in the context of legal and informal forms of child labor through the prism of relevant factual data materials including monitoring, semiformal interviews, and secondary data analysis. Additional focus is made on the measures of social policy directed on the support of children and their protection against exploitation, as well as inclusion of minors in illegal forms of employment. .

Child labor, pluralism, legitimate forms of employment, exploitation, measures of social policy

Период глубоких социальных и экономических трансформаций, переживаемых Россией в последние десять лет, стимулировал в стране распространение такого явления, как детская занятость. Растёт число детей, которые по разным причинам вынуждены самостоятельно обеспечивать своё существование. На рынке труда они являются самой дешёвой и незащищённой рабочей силой, причём, по данным Международной организации труда, значительная часть детей втягивается в противоправные сферы деятельности. Проводимая в нашей стране социальная политика должна сфокусировать своё внимание на причинах, которые способны заставить ребёнка выбирать между дальнейшим образованием и трудовой деятельностью в пользу последней, предотвратить вовлечение детей и подростков в наихудшие виды труда, стимулировать и развивать адекватные формы занятости несовершеннолетних.

Новое поколение россиян проходит этапы своей социализации, приобщаясь к труду в изменяющихся структурных условиях, характеризующих современные процессы в сфере семьи, образования, занятости. Трудоустройство подростков, с одной стороны, стало актуально и востребовано для многих семей, для которых главным итогом реформ последнего десятилетия явилось резкое снижение их уровня жизни вплоть до обнищания. Напряжённый ритм жизни, высокий уровень бедности домохозяйств с несовершеннолетними детьми, трудности с поиском работы для взрослых, новые формы социального исключения в сфере образования, расширение сегмента теневого занятости, рост эксплуатации и дискриминации в трудовой сфере относятся к группе факторов, выталкивающих несовершеннолетних на рынок труда несовершеннолетних и нарушению их прав. С другой стороны, изменение системы ценностей молодого поколения россиян обуславливает способы самовыражения посредством демонстративного престижного потребления. Оплачиваемая занятость становится средством повышения статуса и материальной состоятельности несовершеннолетних из разных социальных групп.

На современном рынке труда наблюдаются противоречивые тенденции. С одной стороны, они привели к многообразию форм занятости и мест приложения энергии и умений, увеличили возможности для самореализации человека. С другой стороны, эти тенденции подвергли основную часть населения обнищанию и как следствие отдельные категории оказались наиболее уязвимыми в отношении дискриминации, массовых нарушений основных прав и свобод человека в сфере занятости. По-прежнему в наиболее неблагоприятной ситуации остаются семьи с детьми, семьи социального риска, семьи безработных и незанятых. Особенно актуально это для сельской местности, отличающейся неблагоприятными, по сравнению с городскими, условиями жизни, более напряжённой ситуацией на рынке труда.

В сложившихся условиях занятость несовершеннолетних из социально уязвимых групп – это не только отвлечение их от улицы, но и приобщение к труду, форма социальной защиты подростков и подспорье для семейного бюджета. Не менее актуальной является проблема трудоустройства подростков из благополучных семей, которые не менее уязвимы в отношении их вовлечения в наихудшие формы труда. Переходное и во многом кризисное состояние социальных отношений в России обусловило пестроту форм подросткового труда: от легальных, организуемых при содействии обра-

зовательных учреждений, социальных служб и органов занятости, до маргинальных, в частности, связанных с вовлечением детей в криминальный бизнес. Государству и обществу не следует пассивно ожидать самонастройки подросткового рынка труда: требуется научно обоснованная политика регулирования подростковой занятости. С этой целью необходимо всесторонне оценить опыт, накопленный нашей страной и мировым сообществом в области занятости несовершеннолетних и защиты детей от различных форм эксплуатации.

Понятие «детский труд» многозначно: это и неоплачиваемый вклад детей в функционирование домохозяйства, и стихийная самозанятость, направленная на заработок, и оплачиваемая деятельность, организованная работодателем, и самообеспечение, например, как в 20-е годы в коммунах Макаренко). Отношение к феномену детского труда менялось с развитием представлений о детстве, правах детей, допустимых и легитимных способах воспитания и перевоспитания. В эпоху индустриализации многие виды промышленности в Европе, Японии и США развивались за счет привлечения наиболее дешевой и незащищенной рабочей силы – женщин и детей. В 1950-х годах в обществе растет озабоченность жестокой эксплуатацией детского труда, которая вела к высоким рискам заболеваемости, инвалидности и смертности среди работающих детей и подростков. Именно в это время движения в защиту детей от эксплуатации стали появляться в Соединённых Штатах Америки и Великобритании, а в странах Африки и Азии эти движения только сейчас набирают силу, что привело к принятию таких международно-правовых актов, как Конвенция ООН о правах ребёнка (1990), Всемирная декларация об обеспечении выживания, защиты и развития детей (1993), Конвенция МОТ № 138 о минимальном возрасте для приёма на работу (1973) и Конвенция № 182 «О запрещении и незамедлительных мерах по искоренению наихудших форм детского труда» (1992), а также национального законодательства: президентские программы «Дети России» (2003-2006), «Профилактика безнадзорности и правонарушений детей» (2003-2006), федеральные законы «О занятости населения в Российской Федерации» (1999), «Об образовании» (2000), «Об основах системы профилактики безнадзорности и правонарушений несовершеннолетних» (от 24 июня 1999 года № 120-ФЗ). Ужесточение законодательства и резко возросшие требования к несовершеннолетним работникам привели к тому, что многие формы детского труда были вытеснены в теневые сектора экономики.

Сегодня вовлечение детей в трудовую занятость трактуется в соответствии с законодательством как привлечение несовершеннолетних к выполнению работ, не наносящих вред их физическому, психологическому и нравственному здоровью, с целью приобщения к труду, получения профессиональных навыков, адаптации к трудовой деятельности (Федеральный закон от 24 ноября 1995 года № 182-ФЗ). Выделяют допустимые, легитимные формы занятости несовершеннолетних, к которым относятся благоустройство городов и сёл, охрана природы, уборка скверов и парков, а так же помощь пожилым людям в устройстве их быта, - и нелегитимные: мытье машин, услуги на автозаправках и в автомастерских, подсобные работы в магазинах, разгрузка, охрана товаров запрещенные формы занятости [1]. Международная организация труда акцент делает на негативной стороне детского труда, прежде всего на его последствиях, которые сокращают шансы взрослеющего поколения на образование и социальную мобильность. Спонсируемые государством программы занятости детей и подростков основаны на предположении о том, что занятость подростков – это существенное подспорье для малообеспеченных семей, а для детей это приобщение к общественно полезному труду.

В нашем исследовании мы рассматривали несколько видов детского труда, в том числе, стихийная занятость подростков на мойке машин и спонсируемая и организованную государством деятельность т.н. отрядов «Милосердие». Рассмотрим особенности гендерной идентичности детей и подростков.

Особенности гендерной идентичности

«Мойщики машин»: важно, что все работающие на автомойке – мальчики [2]. В отношении девушек подростки часто в своей речи допускают пренебрежительные высказывания. Взрослое ведение переговоров в сфере бизнеса является специфической ареной для конструирования гендера. Ведя переговоры с клиентами, которые всегда старше, ребята самоутверждаются, и чем грубее и непреклонней строится разговор между подростком и водителям, тем «круче» работник. Для парней наиболее доступным ресурсом для конструирования маскулинности является жёсткое ведение бизнеса: строгий отбор работников, силовое поддержание дисциплины, полное отсутствие снисхождения ко всем, как к «своим», так и пришлым.

Девочки среди «профессионального сообщества» мойтехов отсутствуют, хотя могут быть исключения: за время существования детской «профессии», было всего две девчонки, которые пытались с ними работать. Тогда же пацаны с автомойки пришли к выводу, что женщины сами по себе являются менее дееспособными, нежели мужчины, а всё женское ассоциируется с неудачей или с

чем-то несущественным и не достойным внимания. Подавление проявления женской активности можно рассматривать как тактику конструирования мужественности.

Мойтехи отзываются на клички, которые не являются производными от имени или фамилии, чаще всего от манеры поведения или способов самопрезентации себя другим: «Я», «Череп», «Танцор», имена эти взяты из телесериала «Бандитский Петербург», который полностью построен на стереотипах маскулинности: настоящий мужчина должен быть сильным, иметь много денег, свой бизнес, связанный зачастую с теневой экономикой.

Отряды «Милосердие»: гендерные различия детей в восприятии данного вида занятости воспринимались нами как социально сконструированные. Мальчики идут работать с большой неохотой, стыдятся своей работы и воспроизводя гендерные стереотипы [3]. Реконструируя свою мужскую идентичность, подростки стремятся завоевать авторитет в среде сверстников. Если мальчики дают резко негативную оценку труду, считая выполняемую работу женской, унижительной, то девочки ничего зазорного в данной занятости не видят, что свидетельствует о том, что реконструируются и поддерживаются гендерные мифы «женской» работы.

Каждая из сложившихся форм детской занятости для исследователя представляет интерес. Например, такие на первый взгляд, безобидные, формы трудовой деятельности подростка, как продажа газет, книг, напитков, а также мойка машин могут быть связаны с незаконным оборотом наркотиков, хулиганством, мелкими грабежами. В подобных случаях социализация подростка приобретает кризисный и противоречивый характер. С одной стороны, ранняя трудовая деятельность способствует ускоренному вхождению его во взрослый мир, раскрытию потенциала, расширению кругозора. С другой, это деятельность нередко граничит с нарушением закона, что может привести к драматичным поворотам на жизненном пути.

Стратегия занятости рассматривается как способ и характер реализации потребностей и интересов личности в социально-трудовой сфере. На уровне повседневной деятельности стратегия занятости представляет собой набор поведенческих моделей, связанный с поиском, трудоустройством и реализацией трудового потенциала. Основа для выделения стратегий занятости подростков: опасения работодателей, связанных с приемом на работу несовершеннолетних. Некоторые льготы и запреты в новом социальном контексте приобрели совершенно иной смысл с точки зрения работающего подростка и общества и могут оказываться дискриминирующими по отношению к тем людям, чьи интересы призваны защищать. Поэтому мы считаем необходимым разработку законодательства таким образом, чтобы учесть все категории работающих подростков и прописать все типичные ситуации с точки зрения его актуально смысла.

Подходит ли категория «плюрализм» для точного описания существующей системы, поскольку за этим понятием может скрываться господство определённых интересов - вопрос, ответ на который ещё предстоит найти. Стратегии занятости несовершеннолетних разнообразны и их выбор зависит от ряда факторов: пола ребёнка, его психологических особенностей, места проживания и ряда других.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меркулова Н.Б. Детский труд // Социологические исследования. 1997. № 5. С. 90.
2. Ковалёва Т.В. «Подростки смутного времени» (к проблеме социализации старшеклассников) // Социологические исследования. 1998. № 8. С. 57.
3. Ярская В.Н., Ярская-Смирнова Е.Р. «Не мужское это дело...» гендерный анализ занятости в социальной сфере // Социологический исследования. 2002. № 6. С. 76.

Федотова-Антонова Екатерина Петровна – доцент кафедры «Социология, социальная антропология и социальная работа» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina P. Fedotova-Antonova – Associate Professor
Department of Sociology, Social Anthropology and Social Work,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.14, принята к опубликованию 15.05.14