

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Июнь 2013 г.

**ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2013

**№ 2 (70)
Выпуск 1**

*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
Зам. 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 24.05.13
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 32,0 Уч.-изд. л.16,38
Тираж 500 экз. Заказ 127
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 1-е полугодие 2014 г.)

**VESTNIK
SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

2013

**№ 2 (70)
Issue 1**

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 Professor I.R. Plevе
Editor-in-chief assistant Professor A.A. Sytnik
Executive secretary 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. Plevе (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: 24.05.13
Format 60×84 1/8 Paper offset.
Apr. tp. l. 32,0 Acc.-pbl. 16,38
Edition 500 psc. Order 127
Printed in publishing house of SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054,
Russia

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

| | |
|---|----|
| Выгодчикова И.Ю. О методе аппроксимации многозначного отображения алгебраическим полиномом | 7 |
| Загниборода Н.А., Добрян В.В., Жигалов М.В., Крысько А.В., Крысько В.А. Хаотическая динамика гибких криволинейных балок Бернулли-Эйлера (Часть 1) | 12 |
| Загниборода Н.А., Добрян В.В., Жигалов М.В., Крысько А.В., Крысько В.А. Хаотическая динамика гибких криволинейных балок Бернулли-Эйлера (Часть 2) | 20 |
| Мочалин А.А. Устойчивость неоднородной цилиндрической оболочки от неравномерной радиальной нагрузки..... | 28 |
| Павлов С.П., Пальков Р.С. Математическое моделирование эффектов усиления волокнистых нанокompозитов с трубчатыми включениями и неоднородным межфазным слоем | 32 |
| Краюхин В.И., Попов В.С., Могилевич Л.И. Динамика сдавливаемого слоя вязкой несжимаемой жидкости при пропитке изделий из специальных бетонов..... | 37 |
| Сапунков Я.Г., Молоденков А.В. Решение задачи оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота космического аппарата в классе конических движений..... | 42 |

ФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

| | |
|--|----|
| Ермолаев И.А., Шаповалов А.С., Байбури В.Б. Моделирование смешанных конвективных течений в каналах систем охлаждения методом конечных элементов | 49 |
| Копичева А.А. О выборе предпочтительной разновидности алгоритмов функционирования бесплатформенной инерциальной системы ориентации на основе кинематических уравнений Эйлера с введенными членами горизонтальной коррекции в условиях движения объекта с большими углами тангажа..... | 53 |
| Навов Н.С. О показателях потенциальной различимости сигналов, принимаемых на фоне помех | 59 |
| Щербаков А.А., Голембиовский Ю.М. Анализ аппаратных и стоимостных затрат при реализации автономного инвертора напряжения с амплитудной модуляцией | 64 |

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

| | |
|--|----|
| Конюшков В.Г., Вязовский В.В. Исследование газопроницаемости электровакуумных материалов в режимах механической нагрузки и обработки по режиму диффузионной сварки | 73 |
| Островская Л.Ю., Могила А.П., Ханина А.И., Бейбулатов Г.Д., Катханова Л.С., Резанов А.В. Использование молекулярных маркеров в исследовании пациентов с патологией пародонта | 80 |
| Петухова Е.С., Савина М.Е. Способы модификации полиэтиленов ПЭ80Б и ПЭ2НТ11 | 86 |
| Рамазанов К.Р. Моделирование каталитического алкилятора получения прекурсора для синтеза различных полимеров..... | 91 |
| Седелкин В.М., Потехина Л.Н., Чиркова О.А., Машкова Д.А., Олейникова Е.В. Структура и свойства ацетатцеллюлозных растворов для формирования наноструктурированных фильтрационных мембран..... | 98 |

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| Бржозовский Б.М., Янкин И.Н. Использование метода фазовых диаграмм при оценке динамических процессов при механической обработке..... | 106 |
| Мальцев П.Н., Никифоров И.П. Кинематический анализ кривошипно-коромыслового механизма изменения скорости резания | 109 |
| Муромцев Д.Н., Пичхидзе С.Я. Оценка вибродемпфирующих свойств мастики на основе этиленпропиленового каучука | 114 |

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

| | |
|--|-----|
| Калякин А.М., Чеснокова Е.В. Учет неравномерности в гидравлических расчетах потерь на трение..... | 119 |
| Лункин В.Н., Озеров Н.А. Методика оценки эксплуатационной надежности холодильника стекловаренной печи..... | 123 |
| Медведева О.Н., Фролов В.О. Определение основных параметров хладоносителя и природного газа в цикле производства СПГ | 127 |
| Симонов В.Ф., Морев А.А. Исследование влияния характеристик сернистого сланца карьерной добычи на габаритные размеры реакторов полукоксования в псевдооживленном слое | 132 |

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Алешкин В.В. Влияние инструментальных погрешностей инерциального измерительного блока на точность алгоритмической компенсации методических погрешностей | 142 |
|--|-----|

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Астапович Ю.М., Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П. Гибкая система управления объединенными по выходу преобразовательными агрегатами..... | 147 |
|--|-----|

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

| | |
|---|-----|
| Чуркин Г.М., Великанов А.М., Тырин Е.А. К вопросу о выборе средств автоматизации АСУ ТП | 151 |
| Шабалина О.А. Модель процесса обучения и ее интерпретация в обучающей компьютерной игре..... | 158 |
| Эрдниева Н.С. Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования показателей эффективности передачи сообщений мультипроцессорной архитектуры..... | 167 |

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

- Овчинников И.И.** Модели деформирования и замедленного разрушения материалов
в водородсодержащей среде 178
- Овчинников И.И.** Моделирование поведения длинного полого цилиндра в водородсодержащей среде,
диффузионные характеристики которой зависят от напряженного состояния 183

ТРАНСПОРТ

- Любимов И.И., Буйлов Ю.А.** Исследование связи увода колес автомобиля с жесткостью подвески 192
- Любимов И.И., Буйлов Ю.А.** О влиянии загруженности автомобиля на качество подрессоривания 195

ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

- Зеленкина С.В.** Проблема конечности человеческого бытия в условиях трансформации культурных оснований
общества 201
- Михель Д.В.** Изучая культуру, здоровье и болезнь: медицинская антропология как область знания 205
- Моисеева Е.Н.** Организованный туризм и самостоятельные путешествия в последней трети XIX века:
французы в Северной Африке 217
- Ручин В.А.** Синтез культурных кодов в эпоху глобализации: Россия и Китай 220
- Сметанина Е.С.** О научных обоснованиях концепции государственной семейной политики 226
- Тищенко Н.В.** Тюремная субкультура: понятие, характеристика, особенности 229
- Шиленко А.А.** Сравнительный анализ структуры функционирования зарубежных профессиональных союзов
на примере системы американских профсоюзов 233
- Шиленко А.А.** Проблематика системного взаимодействия российских профсоюзов в регулировании
законодательной базы относительно социально-трудовых процессов 238

ЭКОНОМИКА

- Грудкина Т.И.** Эффективность и конкурентоспособность молочных комплексов
на основе модернизации: сравнительный анализ 242
- Евсеева Ю.В.** Подходы к определению транснациональной корпорации 250
- Злобина И.В., Ангелюк В.П.** Аспекты оценки экономической эффективности использования муки нута
на предприятиях общественного питания 253

CONTENTS

MATHEMATICS AND MECHANICS

| | |
|---|----|
| Vigodchikova I.Yu. On the method of multivalued mapping's approximation by algebraic polynomial | 7 |
| Zagniboroda N.A., Dobriyan V.V., Zhigalov M.V., Krysko A.V., Krysko V.A. Chaotic dynamics of flexible curvilinear Bernoulli-Euler beam (Part 1) | 12 |
| Zagniboroda N.A., Dobriyan V.V., Zhigalov M.V., Krysko A.V., Krysko V.A. Chaotic dynamics of flexible curvilinear Bernoulli-Euler beam (Part 2) | 21 |
| Mochalin A.A. Stability of non-uniform cylindrical shell from uneven radial load | 29 |
| Pavlov S.P., Palkov R.S. Mathematical modeling of strengthening effects of fibrous nano composites with tubular inclusions and non-uniform interphase | 32 |
| Krayukhin V.I., Popov V.S., Mogilevich L.I. Dynamics of the squeezed layer of the viscous incompressible fluid when impregnated with a special rubber concrete | 37 |
| Sapunkov Ya.G., Molodenkov A.V. Solution of the minimum energy loss problem for the turn of a spacecraft of the conical motion class | 42 |

PHYSICS, RADIOTECHNICS AND ELECTRONICS

| | |
|--|----|
| Ermolaev I.A., Shapovalov A.S., Baiburin V.B. Simulation of mixed convection flows in the cooling system channels by a finite elements method | 49 |
| Kopicheva A.A. On the choice of the preferable algorithms for strapdown inertial orientations systems on the basis of kinematic eulers equalizations by entering members of horizontal correction under motion with high pitch angles | 53 |
| Navoev N.S. Potential discernability indicators of signals, received with the background of noise | 59 |
| Scherbakov A.A., Golembiovsky Yu.M. Analysis of hardware outlays and cost of autonomous voltage inverter with amplitude modulation | 64 |

CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES

| | |
|--|----|
| Konyschkov V.G., Vyazovsky V.V. Analysis of gas permeability in the vacuum materials under mechanical loading and treatment by diffusion welding | 73 |
| Ostrovskaya L.U., Mogila A.P., Chanina A.I., Beybulatov G.D., Kathanova L.S., Rezanov A.V. Using molecular markers for patients developing periodontal pathology | 80 |
| Petukhova E.S., Savvinova M.E. Methods of PE2NT11 PE80B and polyethylene modification | 86 |
| Ramazanov K.R. Modeling of a catalytic alkylator for a precursor for synthesis of various polymers | 91 |
| Sedelkin V.M., Potekhina L.N., Chirkova O.A., Mashkova D.A., Oleynikova E.V. Structure and properties of cellulose acetate solutions for moulding nanostructured filtration membranes | 99 |

ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

| | |
|---|-----|
| Brzhozovskiy B.M., Yankin I.N. The phase diagram method for monitoring dynamics of machining | 106 |
| Maltsev P.N., Nikiforov I.P. Kinematic analysis of crank-and-rocker cutting mechanism for speed change | 109 |
| Muromtsev D.N., Pichhidze S.Ya. Evaluation of vibration damping properties based on mastic EPDM | 115 |

POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

| | |
|--|-----|
| Kalyakin A.M., Chesnokova E.V. Uneven hydraulic calculation of friction losses | 119 |
| Lunkin V.N., Ozerov N.A. A technique for assessment of operational reliability of the glass furnace refrigerator | 123 |
| Medvedeva O.N., Frolov V.O. Defining the key parameters of refrigerants and natural gas in the production of lng cycle | 127 |
| Simonov V.F., Morev A.A. Research of effect characteristic of sulfur mining oil shale to dimensions of reactor semi coking in a fluidized bed | 133 |

MEASURING EQUIPMENT AND INSTRUMENTATION ENGINEERING

| | |
|--|-----|
| Aleshkin V.V. Instrumental errors in the inertial measurement unit as the algorithm accuracy factor of the modeling errors compensation | 142 |
|--|-----|

AUTOMATION AND CONTROL

| | |
|--|-----|
| Astapovich Yu.M., Mityashin N.P., Mirgorodskaya E.E. Flexible control system of conversion units united in output | 147 |
|--|-----|

INFORMATION TECHNOLOGIES

| | |
|--|-----|
| Churkin G.M., Velikanov A.M., Tyrin E.A. The problem of selecting automation for the automated process control system | 151 |
| Shabalina O.A. Educational games development: learning process model and its integration into the game context .. | 158 |
| Erdnieva N.S. Using the artificial neural network for predicting the efficiency for transmitting the multiprocessor architecture data | 167 |

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

| | |
|---|-----|
| Ovchinnikov I.I. The models for deformation and delayed fracture of materials in hydrogenous environment | 178 |
| Ovchinnikov I.I. Simulation of the long hollow cylinder behaviour in the hydrogenous environment with diffusive characteristics depending on the tension | 184 |

TRANSPORT

| | |
|--|-----|
| Lyubimov I.I., Buylov Yu.A. A research on the connection of the automobile wheel slip with rigidity in the suspension bracket | 192 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| Lyubimov I.I., Buylov Yu.A. The impact of the automobile loading on the springing quality | 196 |
| PHILOSOPHY, SOCIOLOGY AND CULTUROLOGY | |
| Zelenkina S.V. Issues of human existence finiteness under the transformation of cultural foundations in society..... | 201 |
| Mikhel D.V. Studying culture, health and illness: medical anthropology as a field of knowledge..... | 206 |
| Moiseeva E.N. Organized tourism and independent travel in the last third of the XIX century: the French in North Africa..... | 217 |
| Ruchin V.A. Synthesis of culturul codes in the era of globalization: Russia and China..... | 221 |
| Smetanina E.S. Scientific analysis of the concept of state family policy | 226 |
| Tishchenko N.V. Prison culture: the concept, characteristics, and features..... | 229 |
| Shilenko A.A. Comparating the structure of foreign trade unions with the system of american trade unions | 233 |
| Shilenko A.A. Issues of interaction between the trade unions in Russia on the legal framework relating social and labour processes | 239 |
| ECONOMY | |
| Grudkina T.I. The effectiveness and competitiveness of the dairy complexes on the basis of modernization: comparative analysis | 242 |
| Evseeva Yu.V. Approaches to defining the transnational corporation..... | 250 |
| Zlobina I.V., Angelyuk V.P. Assessment of economic efficiency for utilisation of chick pea flour at public food service establishments..... | 253 |

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 517.518.826

И.Ю. Выгодчикова

О МЕТОДЕ АППРОКСИМАЦИИ МНОГОЗНАЧНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ
АЛГЕБРАИЧЕСКИМ ПОЛИНОМОМ

Рассматривается задача наилучшего приближения многозначного отображения алгебраическим полиномом. Предложен новый метод решения задачи, основанный на обобщении известного метода П.Л. Чебышева на случай многозначных отображений.

Математическое моделирование, наилучшее приближение, многозначное отображение

I.Yu. Vigodchikova

ON THE METHOD OF MULTIVALUED MAPPING'S APPROXIMATION
BY ALGEBRAIC POLYNOMIAL

The article considers the problems of optimal approximation of multivalued mapping. The new method of the problem decision is based on the generalization of the existing P.L. Chebyshev method for the multivalued mapping.

Mathematical modeling, optimal approximation, multivalued mapping

1. Свойства решения непрерывной задачи. Следующая задача является обобщением задачи П.Л. Чебышева о наилучшем приближении функциональной зависимости исследуемой характеристики моделируемого объекта от момента времени фиксации значения зависимого показателя или оценки другого независимого показателя в данный момент алгебраическим полиномом [1]. Пусть $y_1(t)$ и $y_2(t)$ – скалярные функции, определённые и непрерывные на отрезке $[a; b] \neq \emptyset$ и $y_1(t) \leq y_2(t)$, $\forall t \in [a; b]$, $\Phi(t): R \rightarrow 2^R$ – многозначное отображение (м.о.), образом которого в каждой точке отрезка $t \in [a; b]$ является отрезок $\Phi(t) = [y_1(t); y_2(t)]$, $p_n(A, t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n$ – алгебраический полином степени не выше n с вектором коэффициентов $A = (a_0, a_1, \dots, a_n) \in R^{n+1}$. Рассмотрим задачу

$$\rho(A) := \max_{t \in [a; b]} \max \{ y_2(t) - p_n(A, t), p_n(A, t) - y_1(t) \} \rightarrow \min_{A \in R^{n+1}} \quad (1.1)$$

Функция $F(A, t) = \max \{ y_2(t) - p_n(A, t), p_n(A, t) - y_1(t) \}$ непрерывна по всем своим аргументам и выпукла по A на R^{n+1} при каждом $t \in [a; b]$. Целевая функция $\rho(A)$ задачи (1.1) также непрерывна и выпукла.

Обозначим $\mathfrak{R} = \{ A \in R^{n+1} : \rho(A) = \rho^* \}$ – множество решений задачи (1.1), где $\rho^* = \min_{A \in R^{n+1}} \rho(A)$.

Ввиду [2], $\mathfrak{R} \neq \emptyset$.

Полиномом наилучшего приближения задачи (1.1) назовём алгебраический многочлен $p_n(A, t)$ с вектором коэффициентов $A \in \mathfrak{R}$.

Положим $F_i(A, t) = (-1)^{i+1}(p_n(A, t) - y_i(t))$, $i = 1, 2$.

Базисом назовём упорядоченное множество $(n+2)$ точек отрезка $[a; b]$ вида $\sigma = \{t_0 < t_1 < \dots < t_{n+1}\} \subset [a; b]$. Обозначим $y_{i,k} = y_i(t_k)$, $i = 1, 2$.

Амплитудными на базисе σ назовём функции, определяемые формулами:

$$\varphi_k^i(\sigma) = \begin{cases} i y_{2,k} + (1-i)y_{1,k}, & k - \text{чётно}, \\ i y_{1,k} + (1-i)y_{2,k}, & k - \text{нечётно}, \end{cases} \quad k = \overline{0, n+1}, \quad i = \overline{0, 1}. \quad (1.2)$$

Сформулируем для амплитудных функций дискретные задачи П.Л. Чебышева ([1]):

$$\begin{aligned} \rho_i(A, \sigma) &:= \max_{k=\overline{0, n+1}} |\varphi_k^i(\sigma) - p_n(A, t_k)| \longrightarrow \min_{A \in R^{n+1}}, \\ \rho_i^*(\sigma) &:= \min_{A \in R^{n+1}} \rho_i(A, \sigma) = \rho_i(A_i(\sigma), \sigma), \quad i = 0, 1. \end{aligned} \quad (1.3)$$

По критерию решения дискретной задачи П.Л.Чебышева ([1]) для задач (1.3) однозначно определены числа $h_0(\sigma)$ и $h_1(\sigma)$, удовлетворяющие равенствам:

$$h_i(\sigma) = (-1)^{k+i} \left(y_{1.5+0.5(-1)^{k+i}}(t_k) - p_n(A_i(\sigma), t_k) \right), \quad k = \overline{0, n+1}, \quad i = 0, 1. \quad (1.4)$$

Положим $\tilde{m} := \max_{t \in [a; b]} \frac{y_2(t) - y_1(t)}{2}$, $\tilde{M} := \left\{ t \in [a; b] : \frac{y_2(t) - y_1(t)}{2} = \tilde{m} \right\}$, $|\tilde{M}|$ – количество

элементов множества \tilde{M} .

Из (1.1), (1.3) вытекают неравенства:

$$\rho(A) \geq \tilde{m}, \quad \rho(A) \geq \rho_i(A, \sigma), \quad \forall A \in R^{n+1}, \quad i = 0, 1. \quad (1.5)$$

В [2] получен критерий решения задачи 2.1. Уточним вопрос о единственности решения и его крайних точках [3].

Теорема 1.1. Для того чтобы вектор $A^* \in R^{n+1}$ являлся единственным решением задачи (1.1), достаточно, чтобы выполнялось хотя бы одно из условий:

$$(a) \rho(A^*) = \tilde{m} \text{ и } |\tilde{M}| \geq n + 1,$$

(б) существует базис $\sigma : \rho(A^*) = \max \{h_0(\sigma), h_1(\sigma)\}$.

Доказательство. Из (а) очевидно вытекает единственность решения задачи. Пусть выполняется условие (б) теоремы. Не ограничивая общности в рассуждениях, считаем, что $h_0(\sigma) \geq h_1(\sigma)$.

Применяя (1.4) и критерий решения дискретной задачи П.Л. Чебышева для $\varphi_k^0(\sigma)$, сравниваем значения полинома с вектором коэффициентов A^* со значениями «предполагаемого второго полинома наилучшего приближения» во всех узлах базиса, приходим к выводу о том, что их разница является тождественно нулём, то есть другого решения быть не может.

Применяя определение крайней точки выпуклого множества и свойства алгебраического полинома, несложно показать следующее утверждение.

Теорема 1.2. Пусть для вектора $A^* \in R^{n+1}$ выполняется условие

$$\rho(A^*) = \tilde{m},$$

причём $1 \leq |\tilde{M}| < n + 1$ и существует система точек $\{t_0 < t_1 < \dots < t_n\} \subset [a; b] : f(A^*, t_k) = \tilde{m}, \quad k = \overline{0, n}$,

то A^* является крайней точкой \mathfrak{R} .

2. Приёмы решения дискретной задачи. Рассмотрим задачу минимизации по всем узлам дискретной сетки $T = \{t_0 < t_1 < \dots < t_N\}$ уклонения образов многозначного отображения (м.о.) $\Phi(\cdot)$ от значений алгебраического полинома:

$$\rho(A) := \max_{k \in \overline{0, N}} \max \{y_{2,k} - p_n(A, t_k); p_n(A, t_k) - y_{1,k}\} \longrightarrow \min_{A \in R^{n+1}}, \quad (2.1)$$

где $\Phi(t_k) = [y_{1,k}; y_{2,k}]$, $y_{2,k} \geq y_{1,k}$, $k \in \overline{0, N}$, $A = (a_0, a_1, \dots, a_n) \in R^{n+1}$, $p_n(A, t_k) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n$. Для избегания тривиального случая сведения к алгебраической интерполяции считаем $N \geq n+1$.

Функция

$$f(A, k) := \max \{y_{2,k} - p_n(A, t_k); p_n(A, t_k) - y_{1,k}\},$$

называемая далее *амплитудным модулем*, является непрерывной и выпуклой по A , но не является всюду дифференцируемой. Такими же свойствами обладает и целевая функция в задаче (2.1). Поэтому задача (2.1) относится к задачам недифференцируемой оптимизации.

Заметим, что задача (2.1) обобщает известную задачу П.Л. Чебышева о наилучшем приближении дискретной функции $y(\cdot)$ алгебраическим полиномом заданной степени

$$\max_{k \in \overline{0, N}} |y_k - p_n(A, t_k)| \longrightarrow \min_{A \in R^{n+1}}, \quad (2.2)$$

где $y_k = y(t_k)$, $k \in \overline{0, N}$.

Для решения задачи (2.1) можно воспользоваться следующими приёмами:

1. Решать задачу приближёнными методами, заложенными в стандартных прикладных программах (например, «Поиск решения» MS Excel).
2. Использовать метод решения задач линейного программирования после соответствующих преобразований исходных ограничений и цели.
3. Применять аппарат перебора базисов, обобщающий алгоритм Валле-Пуссена решения задачи (2.2) [1, 4, 5, 7].

Отметим некоторые недостатки применения первых двух приёмов и рассмотрим третий вариант.

Очевидно, что задача (2.1) сводится к задаче линейного программирования:

$$\rho \rightarrow \min,$$

$$y_{2,k} - a_0 - \dots - a_n t_k^n \leq \rho, \quad a_0 + \dots + a_n t_k^n - y_{1,k} \leq \rho, \quad k = \overline{0, N}.$$

Последняя задача содержит $(n+2)$ переменных – компоненты вектора A и ρ и $2(N+1)$ ограничений, причём могут возникнуть проблемы с нахождением начального базисного плана, поэтому решать подобные задачи традиционным симплекс-методом нецелесообразно. Для решения таких проблем в прикладных программах используются методы регуляризации, которые позволяют с хорошей точностью найти заданное решение, однако не дают ответа на вопрос о его однозначности. Кроме того, влияние исходных программных установок на точность результата существенно может исказить реальную картину, а ответить, насколько точным получилось решение, без изучения его свойств невозможно.

На рис. 1 представлены исходные данные и на рис. 2 результат применения прикладной программы для решения задачи.

| t | y1 | y2 |
|---|----------------|----------------|
| 1 | 0,000000001000 | 0,000000003000 |
| 2 | 0,000000001000 | 0,000000001000 |
| 3 | 0,000000001000 | 0,000000003000 |
| 4 | 0,000000001000 | 0,000000001000 |

Рис. 1. Исходные данные для 4 сегментов на сетке $T=\{1,2,3,4\}$.
Решение задачи (2.1) для $n=1$ очевидно $\rho(t)=0,000000002$

Снижение допустимого уровня погрешности в настройках программы позволяет получить более точный результат, однако по-прежнему не позволяет выяснить, будет ли он однозначным.

Как уже было отмечено, методы регуляризации не позволяют найти все решения или даже сделать вывод о наличии ситуации неединственности, поскольку ищут лишь приближенно вершину полиэдра.

Альтернативный метод, основанный на фактах [4-8], оперирует с матрицами размерности $(n+2)$ и позволяет однозначно идентифицировать найденное решение и сделать вывод (и описать всё

множество как выпуклую оболочку крайних точек) для случая неединственности. Эти фундаментальные свойства решения задач исследуемого класса получены впервые и именно они позволяют разработать новый алгоритм решения задач такого класса, имеющий принципиальные отличия от существующих и легко перекладываемый на любой язык программирования, для примера создан комплекс программ на языке Turbo Pascal (рис. 3).

| t | y1 | y2 | | | | |
|------|-------------|-------------|----|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1 | 0,000000001 | 0,000000003 | | | | |
| 2 | 0,000000001 | 0,000000001 | | | | |
| 3 | 0,000000001 | 0,000000003 | | | | |
| 4 | 0,000000001 | 0,000000001 | | | 0,00000000399999951708 | |
| | лп | | | 0,000000005999999850041 | -0,000000001999999898333 | 0,000000003 |
| | | | a0 | | a1 | ro* |
| | | | | | цель | 0,000000002999999846266710000 |
| огр1 | -1 | -1 | 1 | -0,000000001000 | >= | 0,000000 |
| огр2 | 1 | 1 | 1 | 0,000000007000 | >= | 0,000000 |
| огр3 | -1 | -2 | 1 | 0,000000001000 | >= | 0,000000 |
| огр4 | 1 | 2 | 1 | 0,000000005000 | >= | 0,000000 |
| огр5 | -1 | -3 | 1 | 0,000000003000 | >= | 0,000000 |
| огр6 | 1 | 3 | 1 | 0,000000003000 | >= | 0,000000 |
| огр7 | -1 | -4 | 1 | 0,000000005000 | >= | 0,000000 |
| огр8 | 1 | 4 | 1 | 0,000000001000 | >= | 0,000000 |

Рис. 2. Применение «Поиск решения» MS Excel привело к следующему результату (p(t)=0,000000005999999850041-0,000000001999999898333t):

Исходные данные: n=1;
 t0= 1.00 ; Y10= 2.00 ; Y20= 2.00;
 t1= 3.00 ; Y11= 1.00 ; Y21= 4.00;
 t2= 5.00 ; Y12= 3.00 ; Y22= 3.00;
 t3= 7.00 ; Y13= 2.00 ; Y23= 3.00.

```

Поиск крайней точки...
ds= 4.00
КРАЙНЯЯ ТОЧКА = РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ = < 1.75 ; 0.25 >
РЕШЕНИЕ ПОЛУЧЕНО НА МНОЖЕСТВЕ delta
t1= 3.00 ; t3= 7.00 ;
Ro= 1.50
Решение = < 1.75 ; 0.25 >
    
```

Рис. 3. Фрагменты решения задачи (найдена крайняя точка, получен вывод о наличии многих решений)

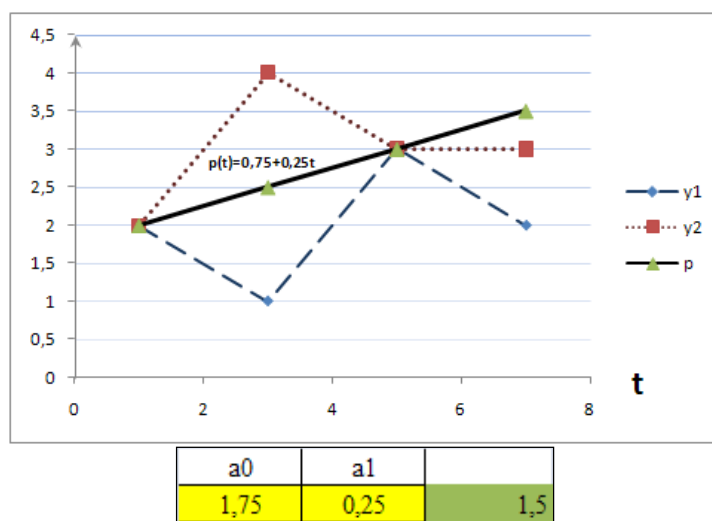


Рис. 4. Визуализация решения (минимальное значение целевой функции 1,5)

Если использовать для решения прикладную программу «Поиск решения» MS Excel, то вывода о наличии множества решений не получено, кроме того, результат решения сильно зависит от на-

чальных значений; так, если начинать решение с нулевых значений неизвестных, решение искажается (рис. 5), иногда решение достигается (рис. 6), то есть не обладает устойчивостью от входных параметров.

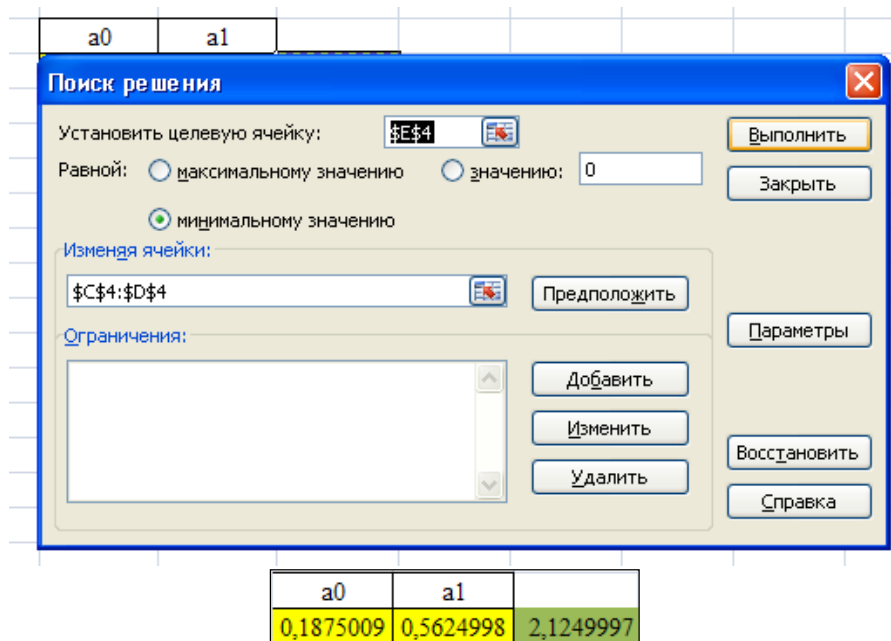


Рис. 5. Визуализация решения «Поиск решения», начальное приближение (0,0), минимальное значение целевой функции 2,125 (получено неточное решение)

| a0 | a1 | |
|-----------|-----------|-----------|
| 1,8922287 | 0,2025904 | 1,5000001 |

Рис. 6. Визуализация решения «Поиск решения», начальное приближение (2,1), минимальное значение целевой функции 1,5

3. Эвристический алгоритм решения непрерывной задачи. Для численного решения задачи (1.1) можно заменить отрезок $[a, b]$ дискретной сеткой $T = \{a = t_0 < t_1 < \dots < t_N = b\}$. В данном случае основной вопрос заключается в том, насколько точным получится решение.

Решая дискретную задачу (2.1) на данной сетке в предположении, что выполняется условие (б) теоремы 1.1, получаем полином наилучшего приближения дискретной задачи (или один из множества решений). Вычисляем уклонение этого полинома от исходного многозначного отклонения. В том случае, если эта величина больше, чем минимальное значение целевой функции дискретной задачи, *дополняем* сетку T всеми точками, в которых этот максимум достигается (по непрерывности, такая точка существует). Процесс заканчивается, как только разница между уклонением и минимальным значением целевой функции текущей дискретной задачи не будет меньше заданной погрешности.

Если на каком-то этапе найти точку, уклонение полинома в которой больше минимального значения целевой функции текущей дискретной задачи, не удалось, то делаем вывод, что решение непрерывной задачи проходит через середины самых широких сегментов (в непрерывном случае в отличие от дискретного это ещё не гарантирует неединственности решения, даже если сегментов максимальной ширины менее, чем $n+1$).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 13-01-00175).

ЛИТЕРАТУРА

1. Демьянов В.Ф. Введение в минимакс / В.Ф. Демьянов, В.Н. Малоземов. М.: Наука, 1972.
2. Выгодчикова И.Ю. О наилучшем приближении непрерывного многозначного отображения алгебраическим полиномом / И.Ю. Выгодчикова // Математика. Механика: сб. науч. тр. Вып. 2. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2000. С. 13-15.
3. Выгодчикова И.Ю. Свойства решения задачи о наилучшем приближении непрерывного м.о. алгебраическим полиномом / И.Ю. Выгодчикова // Математика. Механика: сб. науч. тр. Вып. 8. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2006. С. 27-31.

4. Выгодчикова И.Ю. О единственности решения задачи наилучшего приближения многозначного отображения алгебраическим полиномом / И.Ю. Выгодчикова // Математика. Механика: сб. науч. тр. мех.-мат. фак. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2005.

5. Выгодчикова И.Ю. Об алгоритме решения задачи о наилучшем приближении дискретного многозначного отображения алгебраическим полиномом / И.Ю. Выгодчикова // Математика. Механика: сб. науч. тр. Вып. 4. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002. С. 27-31.

6. Выгодчикова И.Ю. О крайних точках множества решений задачи о наилучшем приближении многозначного отображения алгебраическим полиномом / И.Ю. Выгодчикова // Математика. Механика: сб. науч. тр. Вып. 5. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. С. 15-18.

7. Выгодчикова И.Ю. О монотонном алгоритме решения задачи приближения многозначного отображения алгебраическим полиномом / И.Ю. Выгодчикова // Математика. Механика: сб. науч. тр. Вып. 6. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2004. С. 27-30.

8. Выгодчикова И.Ю. О единственности решения задачи наилучшего приближения многозначного отображения алгебраическим полиномом / И.Ю. Выгодчикова // Известия Саратовского ун-та. Новая серия. 2006. Т. 6. Вып. (1). 2. Серия: математика. Механика. Информатика. С. 11-19.

Выгодчикова Ирина Юрьевна –
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры «Математическая экономика»
Саратовского государственного университета
им. Н.Г. Чернышевского

Irina Yu. Vigodchikova –
Ph. D., Associate Professor
Department of Mathematical Economy
Chernyshevsky Saratov State University

Статья поступила в редакцию 17.04.13, принята к опубликованию 15.05.13

УДК 534.1

Н.А. Загниборода, В.В. Добриян, М.В. Жигалов, А.В. Крысько, В.А. Крысько

ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ГИБКИХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ БАЛОК БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА (ЧАСТЬ 1)

Работа посвящена теории хаотической динамики гибких криволинейных балок Бернулли-Эйлера. Построена математическая модель, сформулированы дифференциальные уравнения для области, границы и начальные условия. В основу математической модели положены гипотезы Бернулли-Эйлера, учитывается геометрическая нелинейность в форме Т. Кармана, и приняты условия пологости криволинейных балок в форме В.З. Власова. Разработаны численные методы сведения уравнения в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям (конечных разностей 2-го порядка точности и конечных элементов). Задача Коши решается методом Рунге-Кутты 4-го и 6-го порядков точности. Построены карты характера колебаний для ряда значений k_x , карты появления упругопластических деформаций, карты зон динамической потери устойчивости в зависимости от величины амплитуды и частоты вынуждающих колебаний.

Хаотические колебания криволинейной балки Эйлера-Бернулли, аттракторы, бифуркации, фазовые портреты, показатели Ляпунова, хаос, хаос-гиперхаос, пространственно-временной хаос

N.A. Zagniboroda, V.V. Dobriyan, M.V. Zhigalov, A.V. Krysko, V.A. Krysko

CHAOTIC DYNAMICS OF FLEXIBLE CURVILINEAR BERNOULLI-EULER BEAM (PART 1)

The work is devoted to the theory of chaotic dynamics of flexible curvilinear Euler-Bernoulli beam. A mathematical model was constructed. Differential equations for the area, boundaries and initial conditions have been formulated. The basis of the mathematical model is based on the Euler-Bernoulli hypothesis, the geometric nonlinearity in the

form of Karman is taken into account, and the conditions of flatness curvilinear beams in the form of V.Z.Vlasov are accepted. The numerical methods for converting partial differential equations to ordinary differential equations (finite difference method of second-order accuracy and finite elements method) have been developed. The Cauchy problem is solved by the Runge-Kutta fourth and second order accuracy. The maps of the character of oscillations for a range of values k_x , the appearance of elastic-plastic deformation maps, and the maps of dynamic instability, depending on the amplitude and frequency of compelling vibration have been build.

Chaotic oscillations curvilinear beams, attractors, bifurcation, phase portraits, Lyapunov exponents, chaos, chaos-hyperchaos, spatio-temporal chaos

Введение

Анализ хаотической динамики гибких криволинейных балок Бернулли-Эйлера с позиции распределенных систем с бесконечным числом степеней свободы проводится впервые. Достоверность получаемых результатов обеспечивается решением задач несколькими методами: конечных разностей и конечных элементов для пространственной аппроксимации (для сведения к задаче Коши), и решением задачи Коши двумя методами Рунге-Кутты 4-го и 6-го порядков точности. Статья разбита на две части. В первой части осуществляется постановка задачи, приводятся методы её решения, а также осуществляется количественный анализ (исследуются различные виды карт). Во второй части производится качественный анализ, исследуется сценарий перехода колебаний тонкой криволинейной балки от гармонических к хаотическим, производится анализ колебаний с помощью показателей Ляпунова.

1. Математическая модель и метод решения

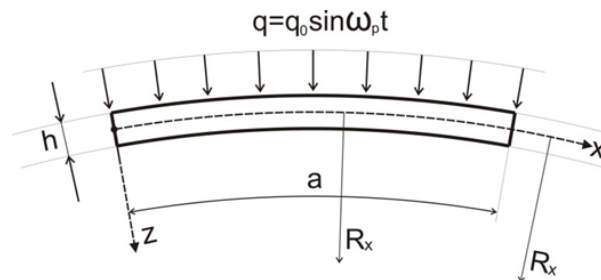


Рис. 1

В работе рассматриваются гибкие однослойные, тонкие криволинейные балки с длиной a , высотой h и геометрической кривизной $k_x = \frac{1}{R_x}$, где R_x – радиус кривизны. Балка нагружается распределенной по ее поверхности нагрузкой $q(x, t)$, действующей в направлении нормали к срединной поверхности балки (рис. 1).

Построенная математическая модель балки основывается на следующих гипотезах:

- любое поперечное сечение, нормальное к срединной поверхности до деформации, остается после деформации прямым и нормальным к срединной поверхности, вместе с тем высота сечения не изменяется;
- инерция вращения элементов балки не учитывается, однако учитываются силы инерции, отвечающие за перемещения вдоль нормали к срединной поверхности и вдоль балки;
- внешние силы не меняют своего направления при деформации балки;
- геометрическая нелинейность учитывается в форме Г. Кармана [1];
- тонкая криволинейная балка обладает свойствами пологости [2].

Приведенные выше гипотезы основаны на идеях Бернулли-Эйлера и считаются математической моделью первого приближения, но она является достаточной точной для анализа тонких криволинейных балок [3, 4].

Математическая модель балки описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Эти выражения представляют собой уравнения движения элемента балки с учетом диссипации энергии, записанные в перемещениях и в безразмерном виде [3]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - k_x \frac{\partial w}{\partial x} + L_3(w, w) - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \\ \frac{1}{\lambda^2} \left\{ -\frac{1}{12} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + k_x \left[\frac{\partial u}{\partial x} - k_x w - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - w \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] + L_1(u, w) + L_2(w, w) \right\} + q - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \varepsilon_1 \frac{\partial w}{\partial t} = 0, \end{array} \right. \quad (1.1)$$

$$L_1(u, w) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad L_2(w, w) = \frac{3}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad L_3(w, w) = \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

где $L_1(u, w)$, $L_2(w, w)$, $L_3(w, w)$ – нелинейные операторы, $w(x, t)$ – прогиб элемента в направлении нормали; $u(x, t)$ – перемещение элемента в продольном направлении; ε_1 – коэффициент диссипации окружающей среды; E – модуль Юнга; h – высота поперечного сечения панели; γ – удельный вес материала; g – ускорение свободного падения; k_x – геометрическая кривизна балки; t – время; $q = q_0 \sin(\omega_p t)$ – внешняя нагрузка, q_0 – амплитуда внешней нагрузки, ω_p – частота воздействия внешней нагрузки.

Безразмерные параметры введены следующим образом:

$$\lambda = \frac{a}{h}; \quad \bar{w} = \frac{w}{h}; \quad \bar{u} = \frac{ua}{h^2}; \quad \bar{x} = \frac{x}{a}; \quad \bar{t} = \frac{t}{\tau}; \quad \tau = \frac{a}{p}; \quad p = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}; \quad \bar{\varepsilon} = \frac{a}{p}; \quad \bar{q} = \frac{qa^4}{h^4 E}; \quad \bar{k}_x = \frac{k_x a}{\lambda}. \quad (1.2)$$

Черточка над безразмерными параметрами в уравнениях (1.1) для простоты опущена.

К уравнениям системы (1.1) следует присоединить одно из граничных условий

1. Оба конца балки имеют жесткую заделку ($x = 0$, $x = a$)

$$w(0, t) = w(a, t) = u(0, t) = u(a, t) = w'_x(0, t) = w'_x(a, t) = 0; \quad (1.3)$$

2. Оба конца балки закреплены шарнирно-неподвижно ($x = 0$, $x = a$)

$$w(0, t) = w(a, t) = u(0, t) = u(a, t) = w''_{xx}(0, t) = w''_{xx}(a, t) = 0; \quad (1.4)$$

3. Один конец шарнирно-неподвижен ($x = 0$), а другой имеет жесткую заделку ($x = a$)

$$w(0, t) = w(a, t) = u(0, t) = u(a, t) = w'_x(a, t) = w''_{xx}(0, t) = 0; \quad (1.5)$$

4. Один край имеет жесткую заделку ($x = 0$), а другой свободен ($x = a$)

$$w(0, t) = w'_x(0, t) = u(0, t) = 0; \quad M_x(a, t) = N_x(a, t) = Q_x(a, t) = 0; \quad (1.6)$$

$$M_x(a, t) = N_x(a, t) = Q_x(a, t),$$

и начальные условия:

$$w(x, 0) = \dot{w}(x, 0) = u(x, 0) = \dot{u}(x, 0) = 0. \quad (1.7)$$

Далее приведены численные экспериментальные данные для граничных условий типа (1.5) и начальных условий (1.7) при воздействии внешней знакопеременной нагрузки $q = q_0 \sin(\omega_p t)$.

Следует отметить, что систему уравнений (1.1)-(1.7) невозможно решить аналитически, и мы будем решать её численно, сводя распределенную систему по пространственной координате x методом конечных разностей второго порядка точности к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для сведения системы уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно временной координаты используем конечноразностные аппроксимации, применяя разложение в ряд Тейлора в окрестности точки x_i . Рассмотрим сеточную область

$$G_N = \{0 \leq x_i \leq 1, x_i = i/N, i = 0..N\}.$$

Введем следующие разностные операторы при аппроксимации $O(c^2)$, где c – шаг по пространственной координате [5]:

$$\Lambda_x(\cdot)_i = \frac{(\cdot)_{i+1} - (\cdot)_{i-1}}{2c}; \quad \Lambda_{x^2}(\cdot)_i = \frac{(\cdot)_{i+1} - 2(\cdot)_i + (\cdot)_{i-1}}{c^2};$$

$$\Lambda_{x^4}(\cdot)_i = \frac{(\cdot)_{i+2} - (\cdot)_{i+1} + 6(\cdot)_i - (\cdot)_{i-1} + (\cdot)_{i-2}}{c^4}.$$

Тогда дифференциальные уравнения системы (1.1) в частных производных, сведем к обыкновенным дифференциальным уравнениям второго порядка по временной координате

$$\begin{cases} \ddot{u}_t = \Lambda_{x^2}(u_i) - k_x \Lambda_x(w_i) + \Lambda_x(w_i) \Lambda_{x^2}(w_i), \\ \ddot{w}_t + \varepsilon \dot{w}_t = \lambda^2 \left\{ -\frac{1}{12} \Lambda_{x^4}(w_i) + k_x \left[\Lambda_x(u_i) - k_x \Lambda_x(w_i) - \frac{1}{2} \Lambda_{x^2}(w_i) \right] + \right. \\ \left. + \Lambda_{x^2}(u_i) \Lambda_x(w_i) + \Lambda_{x^2}(w_i) \Lambda_x(u_i) + \frac{3}{2} (\Lambda_x(w_i))^2 \Lambda_{x^2}(w_i) \right\} + q. \end{cases} \quad (1.8)$$

Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка (1.8) с соответствующими граничными и начальными условиями, записанными после применения конечно-разностной аппроксимации второго порядка точности, методом замены переменных сводим к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которую решаем методом Рунге-Кутта четвертого порядка точности – классический метод Рунге-Кутта, или методом Бутчера – метод Рунге-Кутта 6-го порядка [6].

Проверки достоверности результатов численного решения задачи была реализована двумя методами – методом конечных разностей (МКР) и методом конечных элементов (МКЭ). Сравнение сигналов, спектров мощности Фурье и материнских вейвлетов Морле для результатов полученных МКР и МКЭ показало, что они качественно сходятся. На практике МКР показал себя значительно экономичнее МКЭ, поэтому для дальнейших исследований использовался он. При использовании МКР для решения системы уравнений (1.8) применялся классический метод Рунге-Кутта 4-го порядка точности. Метод Бутчера 6-го порядка точности давал те же результаты, при вдвое больших затратах по времени. Подробнее о сходимости результатов можно узнать в [7].

Для исследования нелинейной динамики гибких тонких криволинейных балок авторами разработаны алгоритмы и пакет программ, с помощью которого можно на основе решений задач динамики строить и анализировать сигнал, спектр мощности, фазовый портрет, модальный портрет, сечение Пуанкаре, автокорреляционную функцию и показатели Ляпунова. Также был разработан программный комплекс, который для каждого набора значений q_0, ω_p , позволяет определять различные типы колебаний (гармонические, бифуркаций удвоения периода, колебания на независимых частотах и хаос и др.). Графической интерпретацией результатов анализа служат карты режимов колебаний в зависимости от управляющих параметров q_0, ω_p .

2. Количественный анализ (карты) характера колебаний криволинейной балки

Рассмотрим криволинейную балку с параметрами $n = 120, \lambda = 100, k_x = 48, \varepsilon_1 = 1$.

Карты режимов колебаний отражают характер нелинейного динамического процесса, позволяя ориентироваться в пределах исследуемых зон. На картах представлена зависимость режима колебаний от управляющих параметров – частоты ω_p и величины вынуждающей силы q_0 . Оптимальное число узлов n сетки, которая накладывается на исследуемую конструкцию, количество разбиений интервала частоты ω_p возбуждающей силы и величины внешней нагрузки q_0 было определено в предшествующей работе [7].

В табл. 1 приведены карта режимов колебаний для данной криволинейной балки, а также условные обозначения режимов колебаний криволинейной балки для построенных карт зависимости характера колебаний от управляющих параметров $\{\omega_p, q_0\}$.

Кроме режима колебаний балки, нас также интересует ряд количественных характеристик колебательного процесса. Так, существенную ценность имеет карта предельных прогибов. Для её построения у каждого сигнала определяется максимальный по модулю прогиб. Ниже (табл. 2) приведены две карты предельных прогибов. Первая карта содержит абсолютные прогибы, полученные при моделировании, вторая карта является производной от первой.

Черный цвет соответствует минимальному прогибу, белый – максимальному, градации серого отражают промежуточные значения.

Другой важной характеристикой является предельное растяжение, которому подвергается криволинейная балка. Для построения карты (табл. 3) предельных растяжений в каждом эксперименте определяется максимальное растяжение криволинейной балки.

Таблица 1

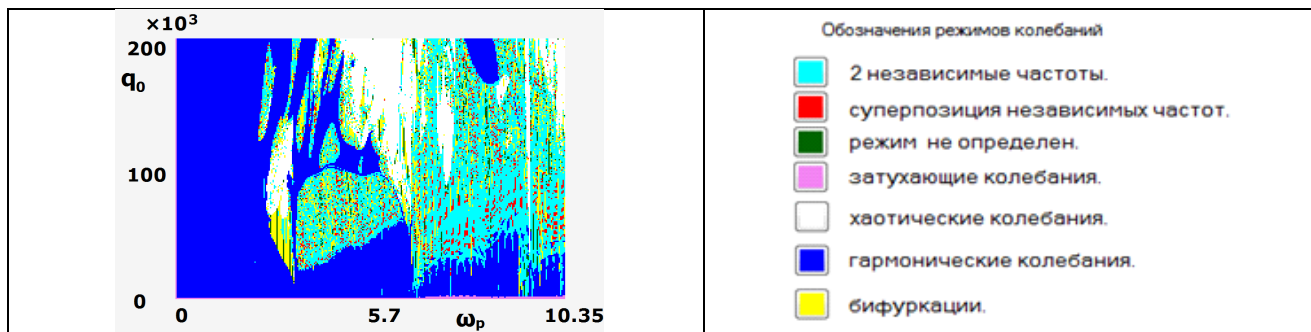


Таблица 2

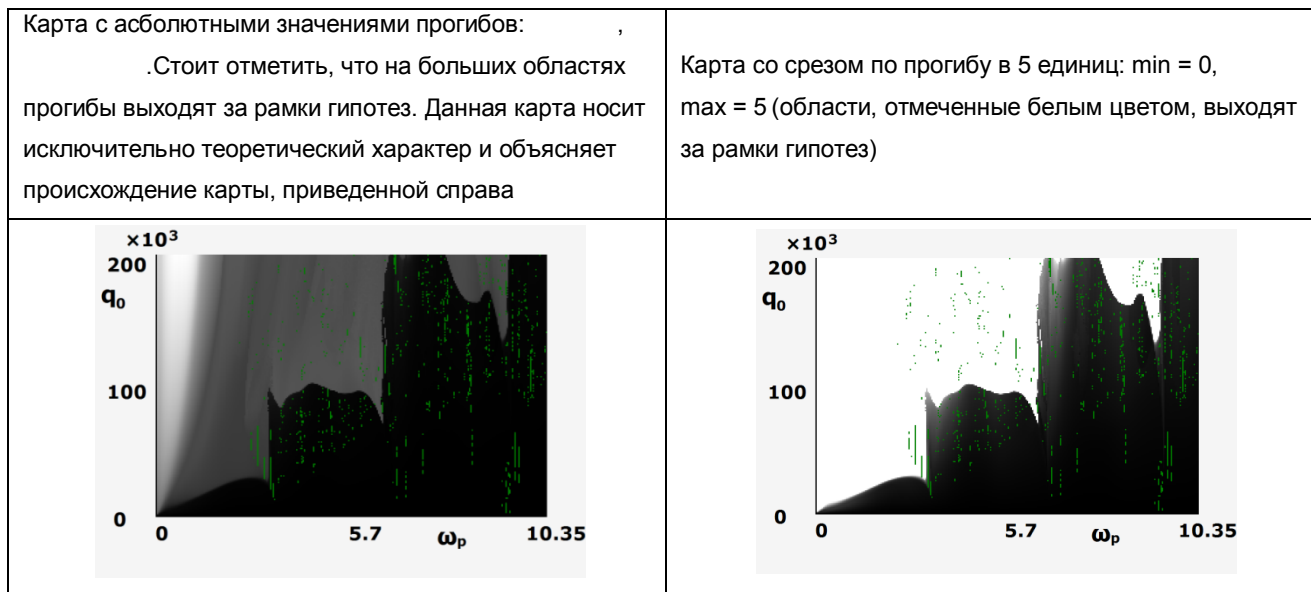
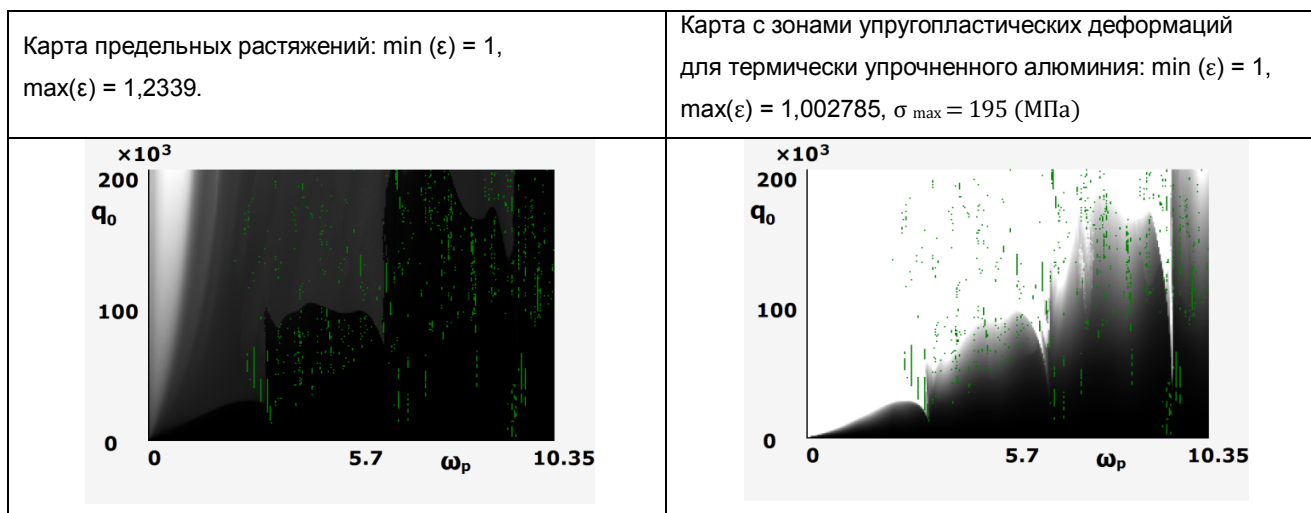


Таблица 3



Данная характеристика позволяет выявить зоны упругопластических деформаций. Так, если ввести относительное удлинение балки ϵ , то закон Гука в относительных единицах примет вид $\sigma = E\epsilon$, где E – модуль упругости. Зная предельные деформации для конкретных материалов, можно построить карты с зонами упруго-пластических деформаций. В табл. 3 приведены карты предельных растяжений и карта с зонами упругопластических деформаций для термически упрочненного алюминия 1915Т [8] (данный материал был выбран из-за высокого порога пластических деформаций). Черный цвет соответствует минимальному растяжению, белый – максимальному, градации серого отра-

жают промежуточные значения. Белая зона – зона пластических деформаций, градации серого цвета и черный цвет – зоны упругих деформаций.

Средний прогиб за период моделирования позволяет определить смещение срединной линии. На рис. 2 приведена карта средних прогибов. Оттенки серого цвета соответствуют максимальному смещению с положительным прогибом, черный цвет отражает отсутствие смещения. Вкрапления серого цвета на черном фоне – результат моделирования не определен.

Как видно из приведенной карты, на определенной границе наблюдается резкое смещение срединной поверхности. Можно сделать вывод о том, что в данных местах наблюдается динамическая потеря устойчивости.

Другим способом определения нелинейности колебаний может служить величина расхождения сигналов выраженная графически в виде карты. Она строится следующим образом. Пусть a_i и b_i – последовательности прогибов для сигналов a и b соответственно. Тогда можно определить расстояние между сигналами по формуле $S = \sum_{i=1}^M |a_i - b_i|$, где M – количество точек в сигнале. Результатом будет скалярная величина, характеризующая расхождение или различие рядов между собой, фактически это метрика, заданная на множестве сигналов с одной частотой вынуждающих колебаний. Чтобы не работать с абстрактной величиной (расстояние между рядами), перейдем к формуле $S = (\sum_{i=1}^M |a_i - b_i|)/M$. Таким образом, будет получено среднее расстояние (в прогибах) между точками рядов a и b . Если расстояние стремится к нулю, то сигнал a сходится к сигналу b , если расстояние равно нулю – это один и тот же сигнал.

Если криволинейная балка (система уравнений) ведет себя линейно, то равномерное увеличение нагрузки приведет к равномерному расхождению между сигналами. От обратного, если линейное расхождение не наблюдается, то фиксируется область с нелинейным поведением.

Зависимость строится для нагрузки. Нагрузка отвечает за энергию, поступающую в систему. Построение зависимости для частоты затруднено по двум причинам: 1) частота отвечает за режим или способ передачи энергии в систему, это качественно другая система 2) в формулу нагрузки частота входит под тригонометрической функцией (заведомо нелинейная зависимость). Таким образом, при построении карты осуществляется проход по вертикали (снизу и вверх), текущий сигнал сравнивается с предыдущим, фиксируется расхождение.

В табл. 4 приведены карты расхождения сигналов в абсолютном выражении и со срезами по максимуму в 2, 0,5, и 0,25 единиц прогиба (белый цвет – расхождение выше максимума, градации серого – расхождение ниже максимума, вкрапления серого цвета – результат моделирования не определен).

В табл. 5 для наглядности приведены вместе карта режимов колебаний и карта расхождения сигналов со срезом по максимуму в 0,25 единиц.

На основе результатов, приведенных в табл. 4, 5, можно сделать следующие выводы:

1. Карта режимов колебаний и карта расхождения сигналов взаимосвязаны и отлично дополняют друг друга.

2. При разработке математической модели использовался ряд гипотез. Одна из гипотез предполагает предельные допустимые прогибы в размерах 5-6 единиц от толщины балки. Таким образом, ограничив предельные прогибы, мы можем определить область применения данной математической модели. Анализ результатов моделирования за пределами области определения носит исключительно теоретическую ценность.

3. Карта предельных растяжений позволяет построить зоны упругопластических деформаций для различных материалов. В табл. 3 приведена такая карта для термически упрочненного алюминия 1915Т. На карте видно, что зона упругих деформаций почти совпадает с областью определения математической модели. Таким образом, можно говорить о практической ценности данной модели.

4. Карта средних прогибов позволяет определить смещение срединной поверхности в центральной точке. Как видно, значительное смещение срединной поверхности наблюдается за областью определения. Однако, учитывая несимметричные граничные условия, можно говорить о смещении срединной поверхности именно в центральной точке. Предельные для всей балки амплитуды колебаний, скорее всего, будут наблюдаться не в центральной точке.

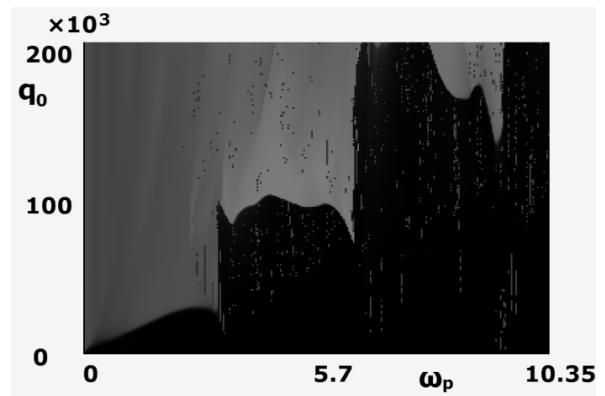


Рис. 2. Карта средних прогибов,
 $min = -0.22, max = 10.69$

5. Для эффективного отображения карты подобия среза определяется эмпирически.

Таблица 4

| | |
|---|---|
| <p>Карта расхождения сигналов (абсолютная), min = 0, max = 9,95</p> | <p>Карта расхождения сигналов (срез по 1 единице среднего прогиба расхождения), min = 0, max = 1.</p> |
| | |
| <p>Карта расхождения сигналов (срез по 0,5 единицы среднего прогиба расхождения), min = 0, max = 0,5.</p> | <p>Карта расхождения сигналов (срез по 0,25 единицы среднего прогиба расхождения), min = 0, max = 0,25.</p> |
| | |

Таблица 5

| | |
|--------------------------------|---|
| <p>Карта режимов колебаний</p> | <p>Карта расхождения сигналов (срез по 0,25 единицы среднего прогиба расхождения)</p> |
| | |

Ниже приведены результаты исследований влияния кривизны балки k_x на режимы колебаний, величины предельных прогибов, величины расхождения сигналов. В табл. 6 для сравнения приведены карты режимов колебаний с параметрами криволинейной балки $n = 120$, $\lambda = 100$, $\varepsilon_1 = 1$, с кривизной $k_x = 0, 12, 48$ соответственно (при $k_x = 0$ речь идет об обычной балке).

Вывод: увеличение кривизны балки приводит к увеличению области с гармоническими колебаниями. Увеличение кривизны приводит к увеличению жесткости конструкции, что сказывается на увеличении зоны гармонических колебаний.

В табл. 7 приведены карты предельных прогибов (срез по 5 единицам).

Вывод: увеличение кривизны балки приводит к уменьшению области применимости математической модели. Кроме того, граница применимости становится четко различимой, что говорит о резкой смене режима колебаний, наблюдается динамическая потеря устойчивости.

В табл. 8 приведены карты расхождения сигналов (срез по 0,25 единицы среднего прогиба расхождения). Данные карты позволяют обнаружить зоны динамической потери устойчивости.

Таблица 6

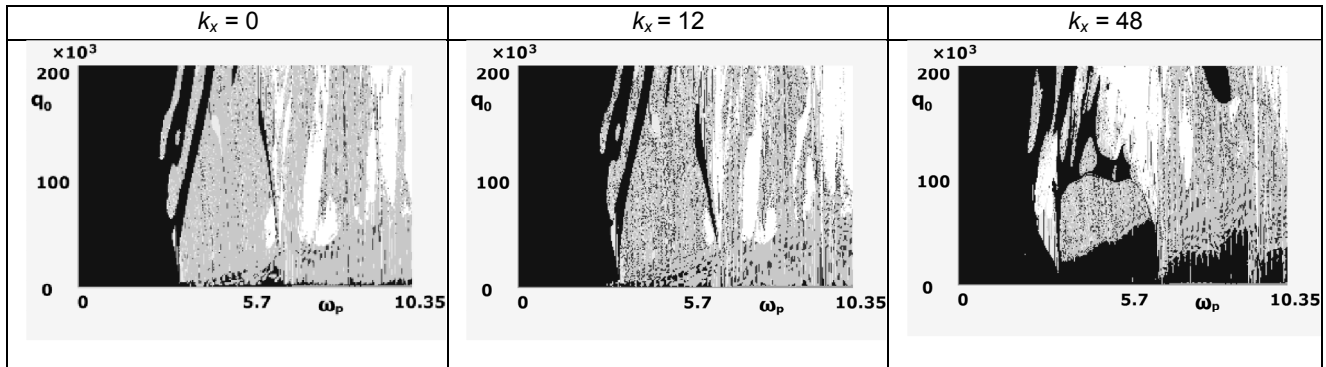


Таблица 7

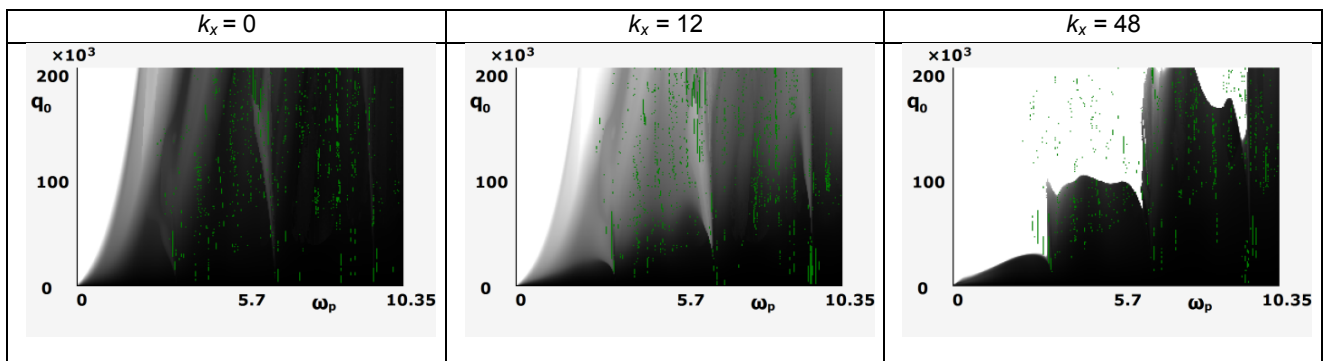
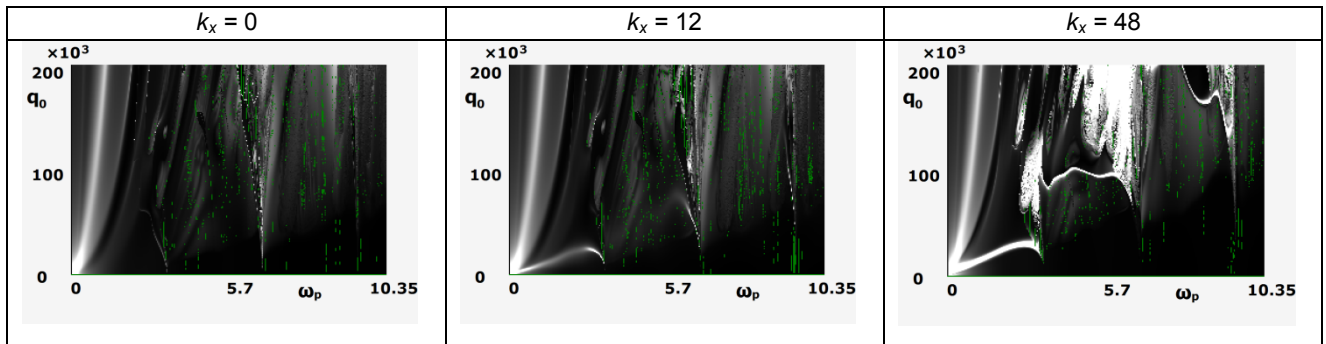


Таблица 8



Вывод: увеличение кривизны балки приводит к увеличению областей, в которых наблюдается динамическая потеря устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Karman Th. Festigkeitsprobleme in Maschinebau / Th. Karman // Encykle D. Math. Wiss. 1910. Vol. 4. № 4. P. 311-385.
2. Власов В.З. Общая теория оболочек / В.З. Власов. М.: Гостехиздат, 1949. 784 с.
3. Вольмир А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А. С. Вольмир. М.: Наука, 1972. 432 с.
4. Euler L. Sur la force des colones / L. Euler // Memories de L'Academie de Berlin. 1757. Vol. B. P. 252-282.

5. Самарский А.А. Введение в численные методы / А.А. Самарский. М.: Наука, 1987. 459 с.
6. Grehard E. Hairer Solving ordinary differential equations I: Nonstiff problems? Second edition / E. Hairer Grehard, Wanner Syvert, Paul Norsett. Berlin: Springer Verlag, 1993.
7. Analysis of chaotic vibrations of flexible plates using fast Fourier transforms and wavelets / J. Awrejcewicz, A.V. Krysko, I.E. Kutepov, N.A. Zagniboroda, M.V. Zhigalov, V.A Krysko // Int. J. Str. Stab. Dyn., DOI:10.1142/S0219455413400051.
8. СНиП 2.03.06-85. М.: Госстрой СССР, 1988.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № НК 12-01-31204.

Загниборода Николай Александрович – аспирант кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikolai A. Zagniboroda – Postgraduate
Department of Applied Mathematics and System Analysis
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Добриян Виталий Вячеславович – аспирант кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vitaly V. Dobriyan – Postgraduate
Department of Applied Mathematics and System Analysis
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Жигалов Максим Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Maksim V. Zhigalov – Ph. D., Associated Professor,
Department of Mathematics and Modeling,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Крысько Антон Вадимович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика и механика» Энгельского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton V. Krysko – Dr. Sc., Professor,
Head: Department of Higher Mathematics and Mechanics
Engels Institute of Technology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Крысько Вадим Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim A. Krysko – Dr. Sc., Professor,
Head: Department of Mathematics and Modeling,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.04.13, принята к опубликованию 20.02.13

УДК 534.1

Н.А. Загниборода, В.В. Добриян, М.В. Жигалов, А.В. Крысько, В.А. Крысько

ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ГИБКИХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ БАЛОК БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА (ЧАСТЬ 2)

Задача рассматривается как распределенная, с бесконечным числом степеней свободы. Нелинейная динамика гибких криволинейных балок Бернулли-Эйлера изучается с позиции качественной теории дифференциальных уравнений: анализируются сигналы, сечение Пуанкаре, фазовый и модальный портреты, автокорреля-

ционные функции, $w(x)$, $w(x, t)$, 2-d и 3-d вейвлет спектры Морле, спектры мощности Фурье, построенные на основании быстрого преобразования Фурье, а также знак четырех показателей Ляпунова, полученных с помощью метода Вольфа. Обнаружены такие явления как гармонические колебания, хаотические колебания, гиперхаос, гипер-гиперхаос и, названный нами, глубокий хаос – данное явление обнаружено впервые. Построены карты ляпуновских показателей в зависимости от величины амплитуды и частоты вынуждающих колебаний.

Хаотические колебания криволинейной балки Эйлера-Бернулли, аттракторы, бифуркации, фазовые портреты, показатели Ляпунова, хаос, хаос-гиперхаос, пространственно-временной хаос

N.A. Zagniboroda, V.V. Dobriyan, M.V. Zhigalov, A.V. Krysko, V.A. Krysko

CHAOTIC DYNAMICS OF FLEXIBLE CURVILINEAR BERNOULLI-EULER BEAM (PART 2)

The problem is considered as distributed with an infinite number of degrees of freedom. Nonlinear dynamics of the flexible curvilinear Euler-Bernoulli beam is studied from the perspective of qualitative theory of differential equations. We have analyzed the signals, Poincare section, modal and phase portraits, the autocorrelation function, $w(x)$, $w(x, t)$, 2-d and 3-d Morlet wavelet spectra, the Fourier power spectra constructed on the basis of fast Fourier transformation, and also the sign of the four Lyapunov exponents obtained by the Wolf method. The phenomena such as harmonics, chaotic fluctuations, hyper-chaos, hyper-hyper-chaos and «deep chaos» as we called it, have been observed for the first time. The maps of the Lyapunov exponents as the functions of the amplitude and frequency of compelling vibration were build.

Chaotic oscillations curvilinear beams, attractors, bifurcation, phase portraits, Lyapunov exponents, chaos, chaos-hyper chaos, spatio-temporal chaos

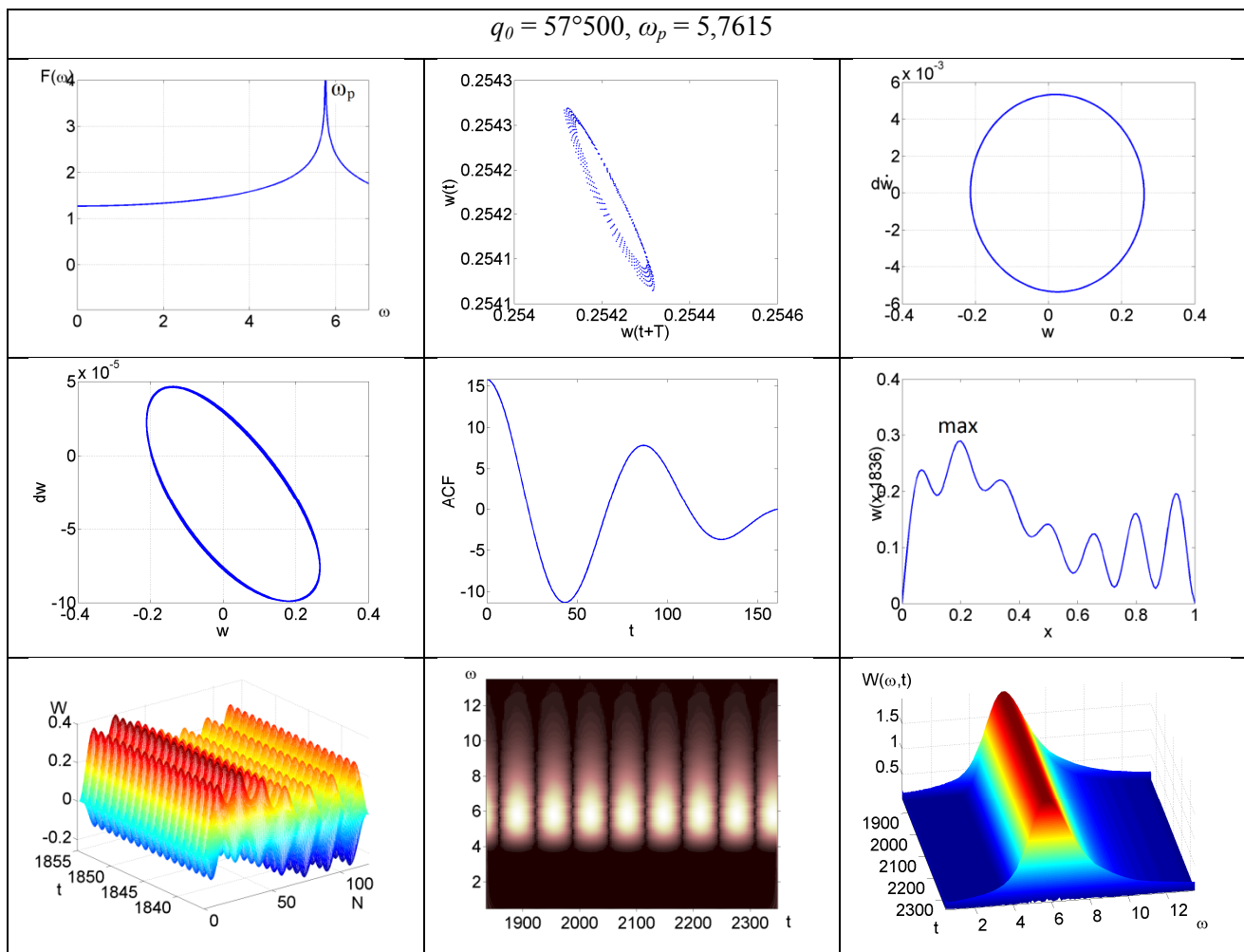
Введение

В первой части работы проведен анализ карт динамических процессов, построенных для различных типов исследуемых параметров. В первом пункте второй части осуществляется качественный анализ (исследуются сигналы, сечение Пуанкаре, фазовый и модальный портреты, автокорреляционные функции, $w(x)$, $w(x, t)$, 2-d и 3-d вейвлет спектры Морле, спектры мощности Фурье, построенные на основании быстрого преобразования Фурье), определяется сценарий гармонических колебаний системы в хаотический режим. Во втором пункте производится анализ колебаний с помощью показателей Ляпунова (исследуется эволюция значений показателей Ляпунова в зависимости от амплитуды вынуждающих колебаний, а также впервые строятся карты показателей Ляпунова в зависимости от величины амплитуды и частоты вынуждающих колебаний).

1. Качественный анализ криволинейной балки

Для дальнейшего анализа была выбрана балка с коэффициентом кривизны $k_x = 48$ и параметрами моделирования $n = 120$, $\lambda = 100$, $\varepsilon_1 = 1$. Анализ проводился при фиксированной частоте ($\omega_p = 5,7615$) возбуждающих колебаний и различных значениях амплитуды внешней нагрузки. В табл. 1-7 ячейки описывают следующие характеристики соответственно: 1) спектр мощности Фурье сигнала ($t \in [1836, 2348]$ модельного времени; $x = 0.5$, т.е. центр балки), 2) псевдоотображение Пуанкаре, 3) фазовый портрет, 4) модальный портрет, 5) автокорреляционная функция, 6) эпюра прогиба балки в момент времени $t = 1836$, 7) эпюра прогиба балки во времени $t \in [1836, 1852]$, 8) вейвлет Морле 2-d, 9) вейвлет Морле 3-d.

Анализ данных, приведенных в табл. 1-7, позволяет сделать следующие выводы. При амплитуде вынуждающей нагрузки $q_0 = 57\,500$ мы наблюдаем гармонические колебания. На модальном портрете заметно появление аттрактора, однако его масштаб настолько мал, что не отражается на фазовом портрете и не оказывает влияния на спектр мощности Фурье.



Относительно небольшое увеличение амплитуды нагрузки до $q_0 = 62^{\circ}500$ приводит к появлению независимой и множества зависимых частот, на фазовом портрете проявляется аттрактор, модальный портрет распадается, сечение Пуанкаре фиксирует аттрактор. Для диапазона амплитуд $q_0 = 64^{\circ}500 - q_0 = 83^{\circ}000$ ситуация, в целом, сохраняется, хотя и заметны изменения в виде сечения Пуанкаре, а также в распределении энергии по частотам на спектре мощности.

При амплитуде $q_0 = 85^{\circ}000$ наблюдается распад сечения Пуанкаре, распад аттрактора на фазовом портрете, и скачкообразный переход системы в гармоническое состояние при амплитуде $q_0 = 86^{\circ}000$. Однако данное состояние оказывается нестабильным, и уже на интервале $q_0 = 86^{\circ}500 - q_0 = 87^{\circ}000$ наблюдается переход в хаос (на 2-d вейвлете Морле заметна перемежаемость частот, на 3-d вейвлете виден переход энергии колебаний на низкие частоты, сечение Пуанкаре распадается в аттрактор, на фазовом и модальных портретах наблюдается аттрактор, автокорреляционная функция резко ниспадает). Важно отметить, что изменение касается не только характера колебаний, но и такой характеристики как максимальный прогиб.

При амплитуде $q_0 = 86^{\circ}500$ он равен 1,75, а при $q_0 = 87^{\circ}500$ равен 10,5 (это отчетливо видно на эпюре прогиба). При этом максимум прогиба перемещается по координате к центру, и система перестает быть чувствительной к несимметричным граничным условиям. Фактически тонкая криволинейная балка прохлопывает и теряет возможность сопротивляться внешней нагрузке, это хорошо заметно на построенной во времени эпюре прогиба.

Дальнейший анализ носит исключительно теоретический характер, так как прогиб криволинейной балки превысил допустимые гипотезой границы. Для всех амплитуд внешней нагрузки, приведенных далее, на фазовых портретах отчетливо различим аттрактор Лоренца. Аттрактор на сечении Пуанкаре постепенно распадается до облака точек. Автокорреляционная функция резко ниспадает. Спектр мощности Фурье постепенно зашумляется, и в последних таблицах мы наблюдаем сплошной пьедестал и глубокий хаос.

Таблица 2

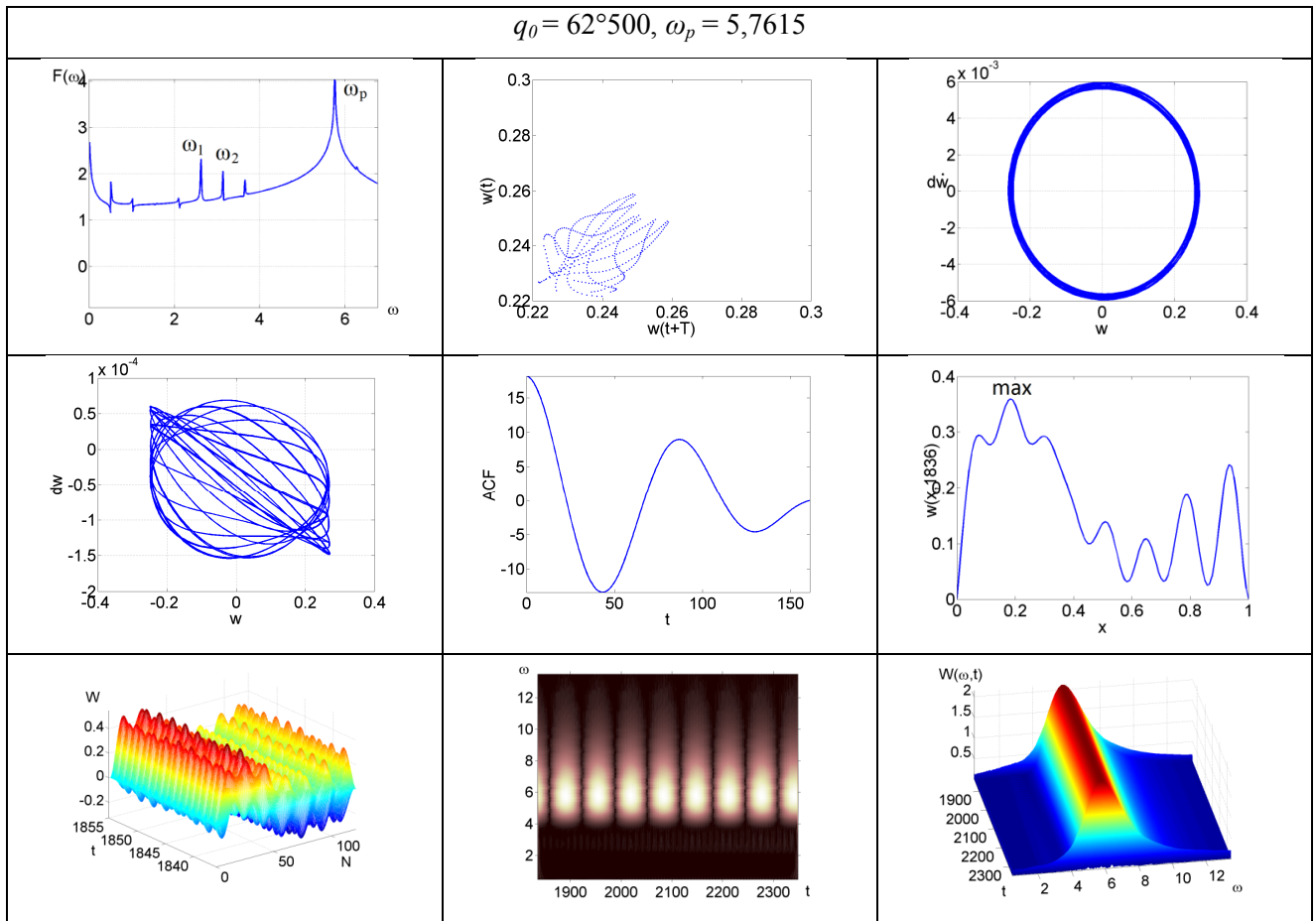
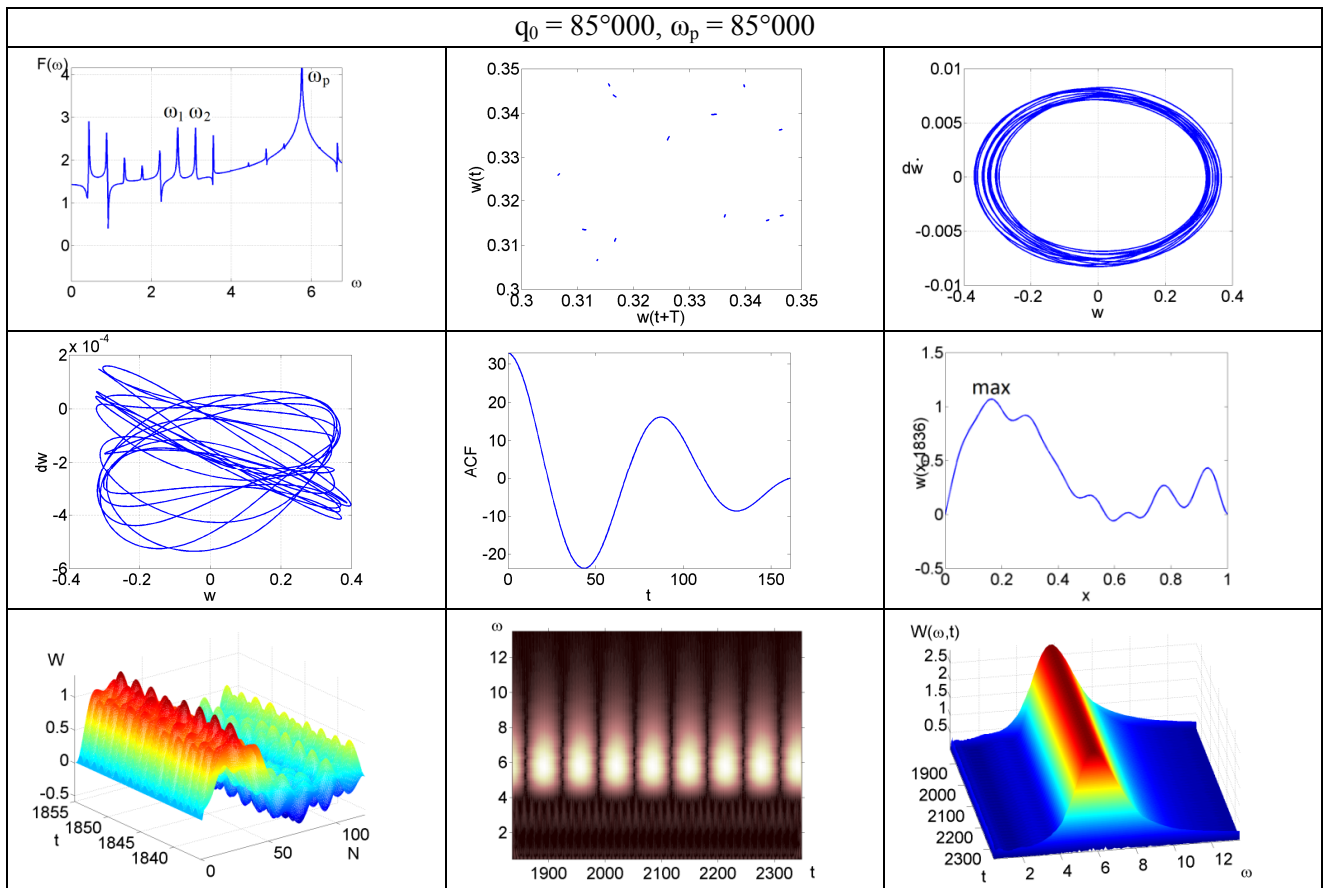


Таблица 3



Анализ спектра мощности Фурье позволяет выделить следующие сценарии перехода системы в хаос. При амплитуде вынуждающей нагрузки, меньшей, чем $q_0 = 57^{\circ}500$ наблюдаются гармонические колебания на частоте вынуждающих колебаний $\omega_p = 5,7615$. При увеличении амплитуды появляется частота $\omega_1 = 2,614$ несоизмеримая с основной, и практически одновременно с ней появляется линейно зависящая частота $\omega_2 = \omega_p - \omega_1$. Процесс продолжается далее, и мы наблюдаем сценарий Рюэля-Таккенса-Ньюхауза. Это отчетливо видно при амплитуде вынуждающей нагрузки $q_0 = 62^{\circ}500$. Сценарий сохраняется до нагрузки $q_0 = 86^{\circ}000$, когда система возвращается в гармонический режим колебаний с одной частотой. При увеличении нагрузки от $q_0 = 86^{\circ}500$ до $q_0 = 87^{\circ}000$ возникает явление перемежаемости (это заметно на 2-d вейвлете Морле), что приводит к сильному зашумлению спектра, однако, на нем можно различить частоты $\omega_1 = 2,405$, $\omega_2 = \omega_p - \omega_1$, и тот же сценарий Рюэля-Таккенса-Ньюхауза. В чистом виде данный сценарий сохраняется до амплитуды $q_0 = 87^{\circ}500$. При большей амплитуде система начинает вести себя необычно – в ней наблюдаются одновременно 2 сценария. Так, при амплитуде $q_0 = 88^{\circ}500$ мы можем наблюдать основную частоту ω_p , две частоты ω_1 и $\omega_2 = \omega_p - \omega_1$ из предыдущего сценария Рюэля-Таккенса-Ньюхауза, и частоты $\omega_3 = \omega_p/2 = 2,884$, $\omega_4 = \omega_p/4 = 1,424$, $\omega_5 = 3/4\omega_p = 4,308$.

Как видно из значений частот $\omega_3, \omega_4, \omega_5$, это бифуркации Хопфа, т.е. наблюдается сценарий Фейгенбаума перехода системы в хаос. Система продолжает пребывать в этом двойственном состоянии.

Однако при амплитуде $q_0 = 95^{\circ}500$ система перестраивается, и мы наблюдаем частоту $\omega_1 = \omega_p/2 = 2,884$, а также частоты $\omega_2 = 1,387$, $\omega_3 = 1,497$, $\omega_4 = 4,271$, $\omega_5 = 4,369$. Важно отметить, что частоты ω_2, ω_3 группируются возле частоты $\omega_p/4 = 1,436$, а частоты ω_4, ω_5 возле частоты

, т.е. наблюдаются бифуркации Хопфа в скрытой и явной форме, и затухающий сценарий Рюэля-Таккенса-Ньюхауза. При подобном анализе колебаний криволинейной балки на интервале внешней нагрузки от $q_0 = 95^{\circ}000$ до $q_0 = 96^{\circ}000$ выяснилось, что система скачкообразно перестраивалась в это и в предыдущее состояние несколько раз. Двойственное поведение системы сохраняется и при более высоких значениях q_0 , пока не вырождается в глубокий хаос со сплошным пьедесталом на спектре мощности Фурье.

Таблица 4

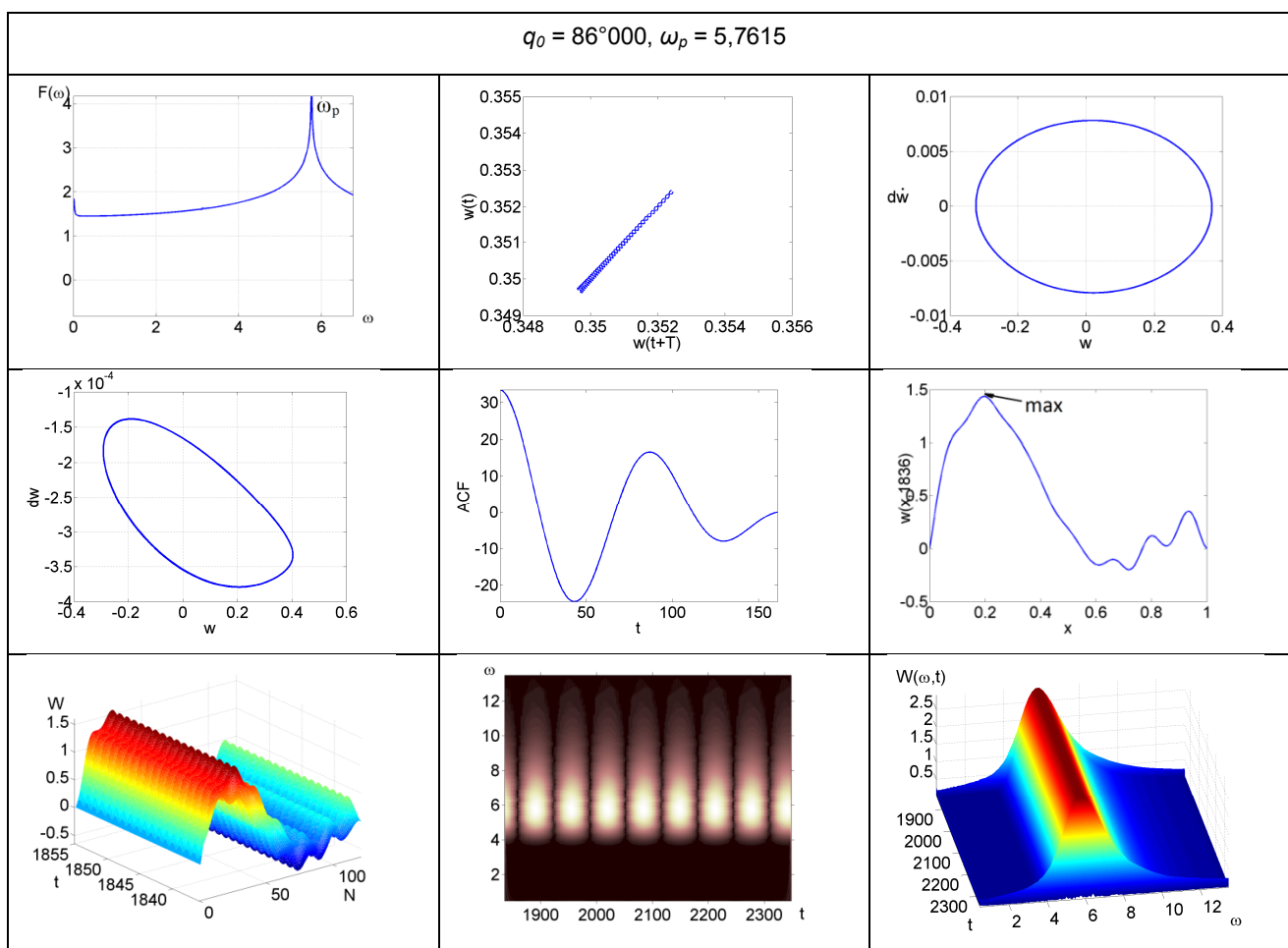


Таблица 5

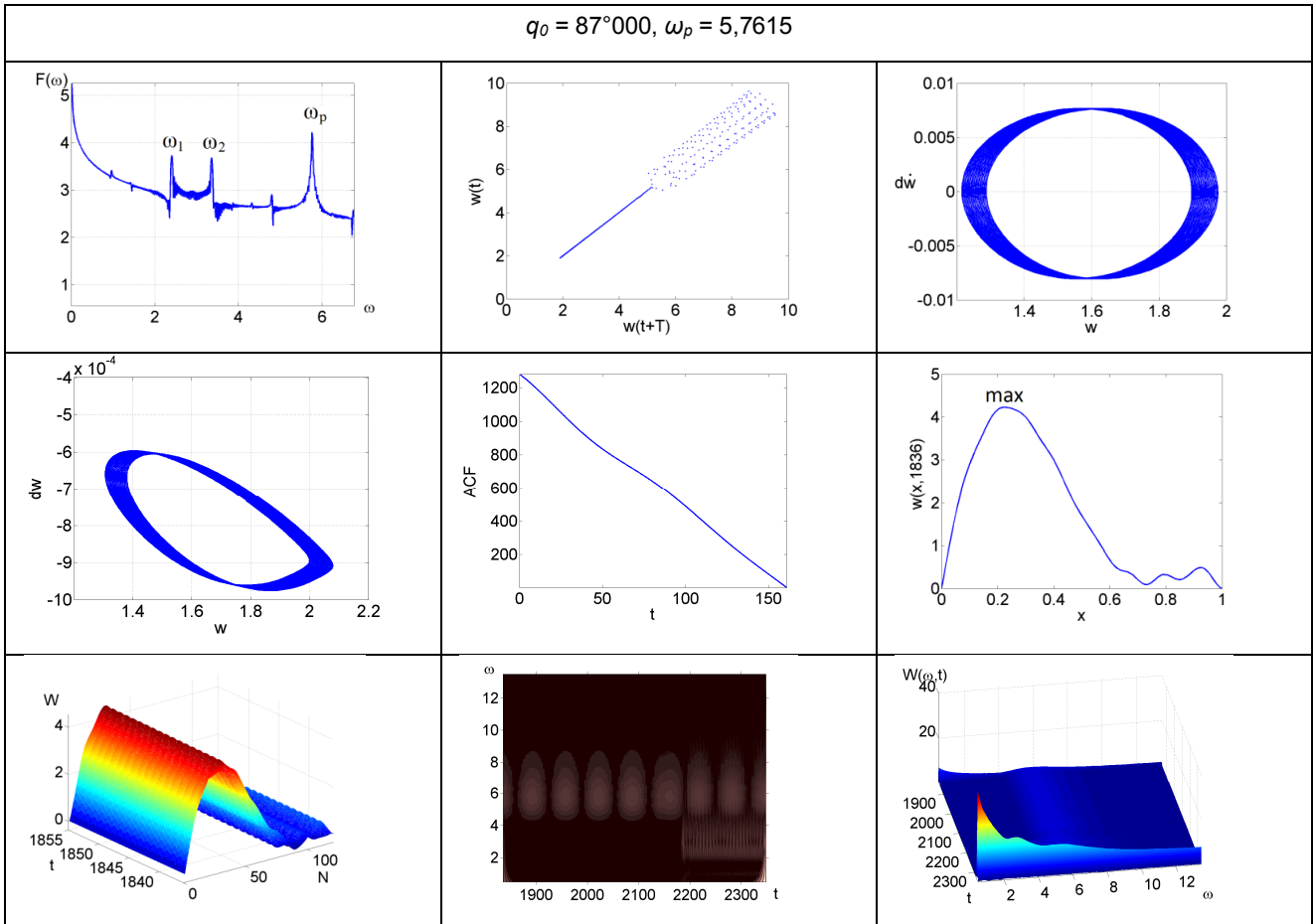
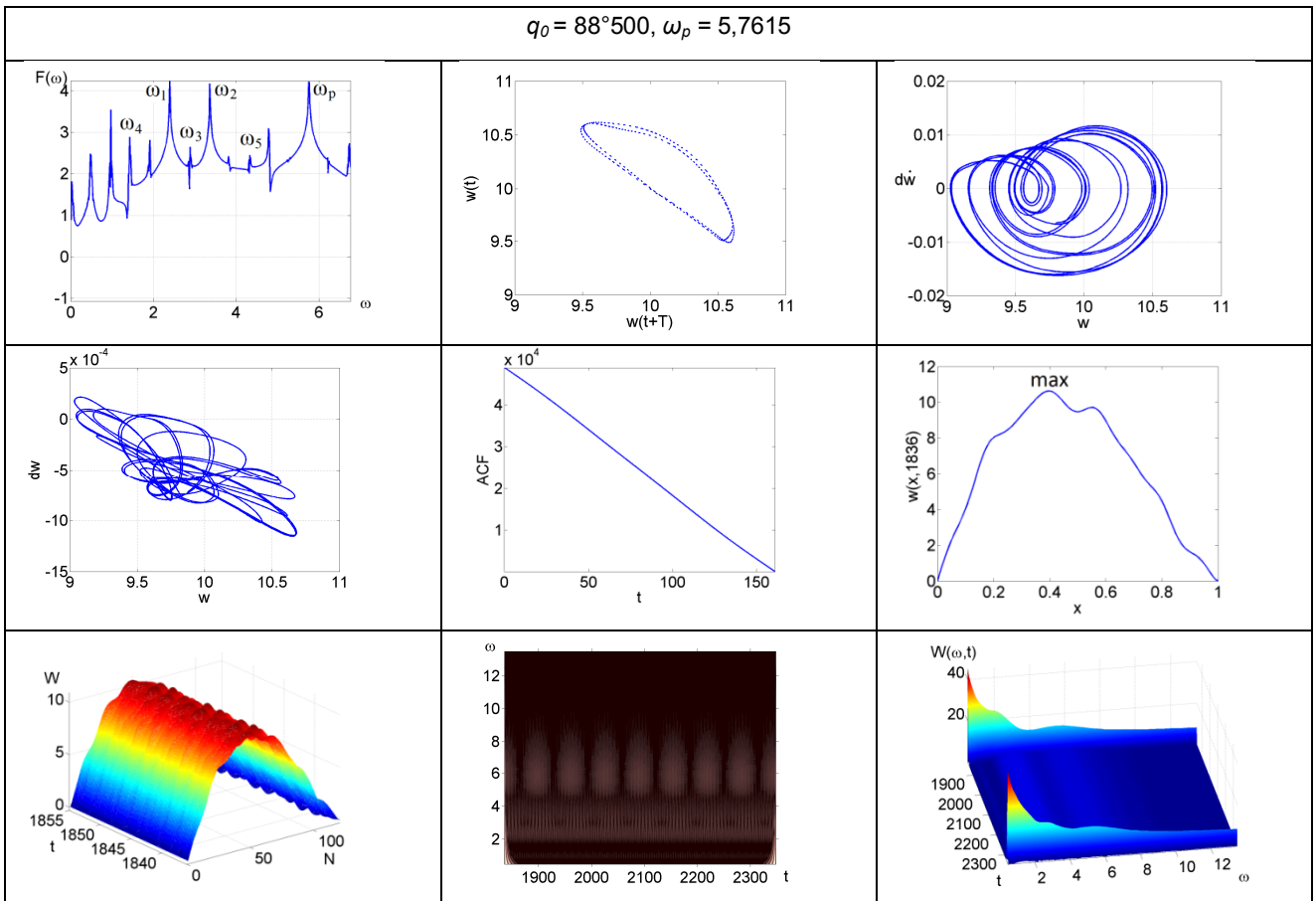
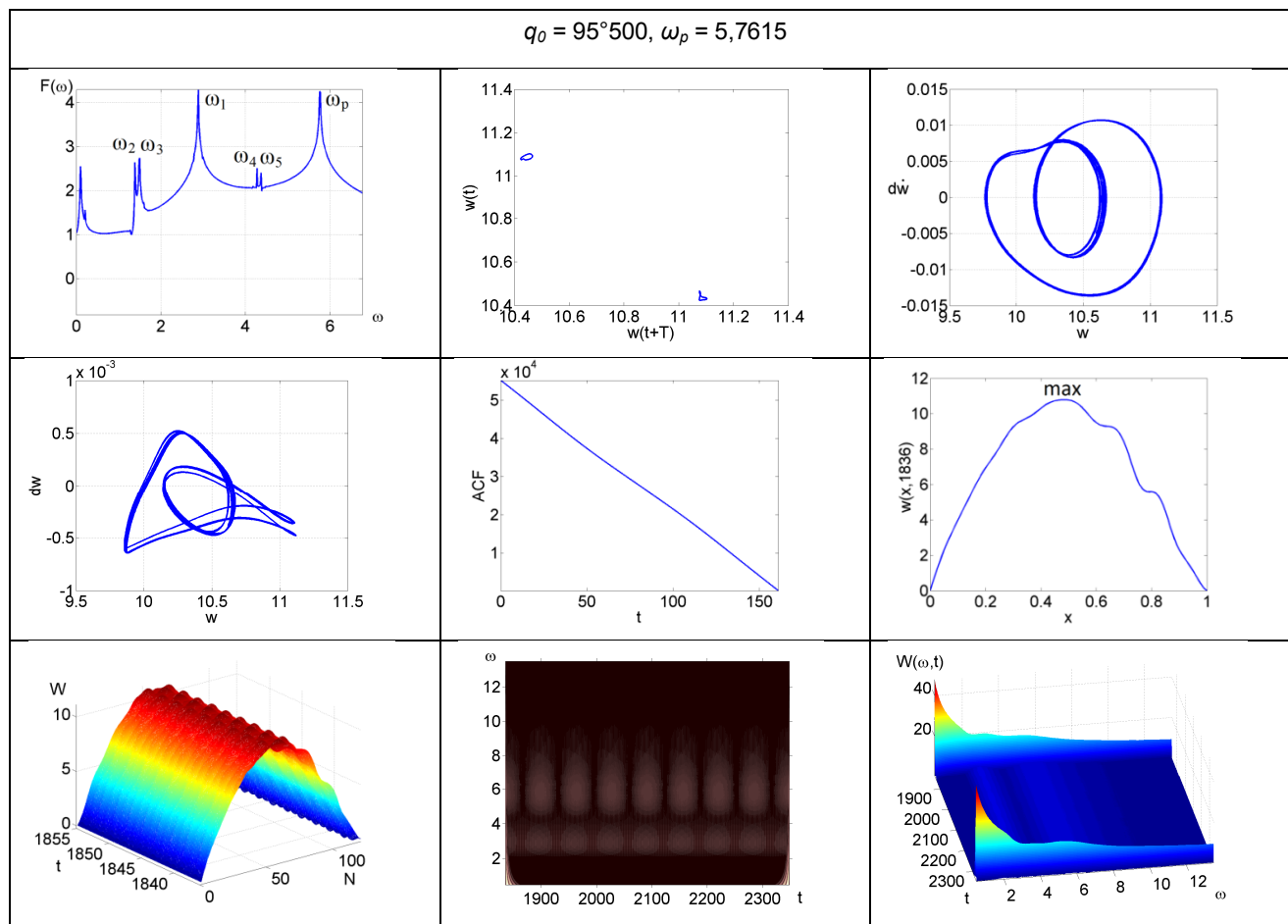


Таблица 6





2. Анализ колебаний тонкой криволинейной балки с помощью показателей Ляпунова

Показатели Ляпунова – количественная характеристика, которая позволяет оценить степень хаотичности движения системы. Количество показателей Ляпунова зависит от количества уравнений, описывающего систему. Каждому уравнению ставится в соответствие один показатель Ляпунова. Если показатель Ляпунова отрицательный, то имеет место гармоничный процесс, если показатель положительный, то можно говорить о наличии хаотической компоненты в траектории движения. Существуют различные методы определения ляпуновских показателей. В данной работе для их определения использовался метод Вольфа.

Метод рассчитывает старший показатель Ляпунова по выборке из единственной координаты и используется, когда неизвестны уравнения эволюции системы, и нельзя измерить все её фазовые координаты.

Пусть имеется временной ряд $x(t)$, $t = \dots$ измерений одной координаты хаотического процесса, произведённых через равные промежутки времени. Методом взаимной информации определяют временную задержку τ , а методом ближайших ложных соседей – размерность пространства вложения m . В результате реконструкции получается набор точек пространства R^m :

$$R^m = \{x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\}, \quad (2.1)$$

где $i = \dots$

Выберем из последовательности (2.1) точку и обозначим её x_0 . Просматривая последовательность (2.1), найдём точку x_k , такую, что выполняется соотношение $\|x_k - x_0\| < \epsilon$, где ϵ – это фиксированная величина, значительно меньшая, чем размер реконструированного аттрактора. Также необходимо, чтобы точки x_0 и x_k были разделены во времени. После этого отслеживается эволюция этих точек на реконструированном аттракторе до тех пор, пока расстояние между ними не превысит заданную величину ϵ . Обозначим полученные точки x_0 и x_k , расстояние между точками – d , а промежуток времени эволюции – t . После этого снова рассматривается последовательность (2.1) и находится точка x_l , близкая к x_0 , такая, что выполняется равенство $\|x_l - x_0\| < \epsilon$. Векторы

и должны иметь, по возможности, одинаковое направление. Далее процедура повторяется для точек и .

Повторяя описанную процедуру большое количество раз M , старший показатель оценивают как

$$(2.2)$$

Подробное описание метода Вольфа можно найти в [1].

С применением метода Вольфа были определены показатели Ляпунова для сигналов в центральной точке балки при разных значениях амплитуды вынуждающей нагрузки (исследовался диапазон , с шагом в 500 единиц). Результаты приведены на рис. 1.

Из приведенного графика видно, что система проходит зону гармонических колебаний (все показатели меньше либо равны нулю), зону постоянных перестроений системы (третий и четвертый показатель постоянно меняют свои значения и большую часть этого интервала больше нуля), и переходит в зону глубокого хаоса, когда все показатели больше нуля. Эти данные полностью согласуются с анализом, приведенным в предыдущей главе.

Помимо этой формы анализа, был осуществлен более широкий анализ – были построены карты показателей Ляпунова. Как и в картах, приведенных в первой части статьи, карты показателей Ляпунова строятся в зависимости от управляющих параметров $\{\omega_p, q_0\}$, на тех же интервалах значений. В табл. 8 приведены карты показателей Ляпунова и обозначения для карт.

Таблица 8

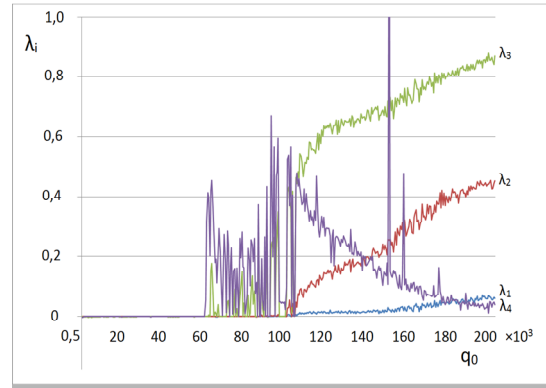
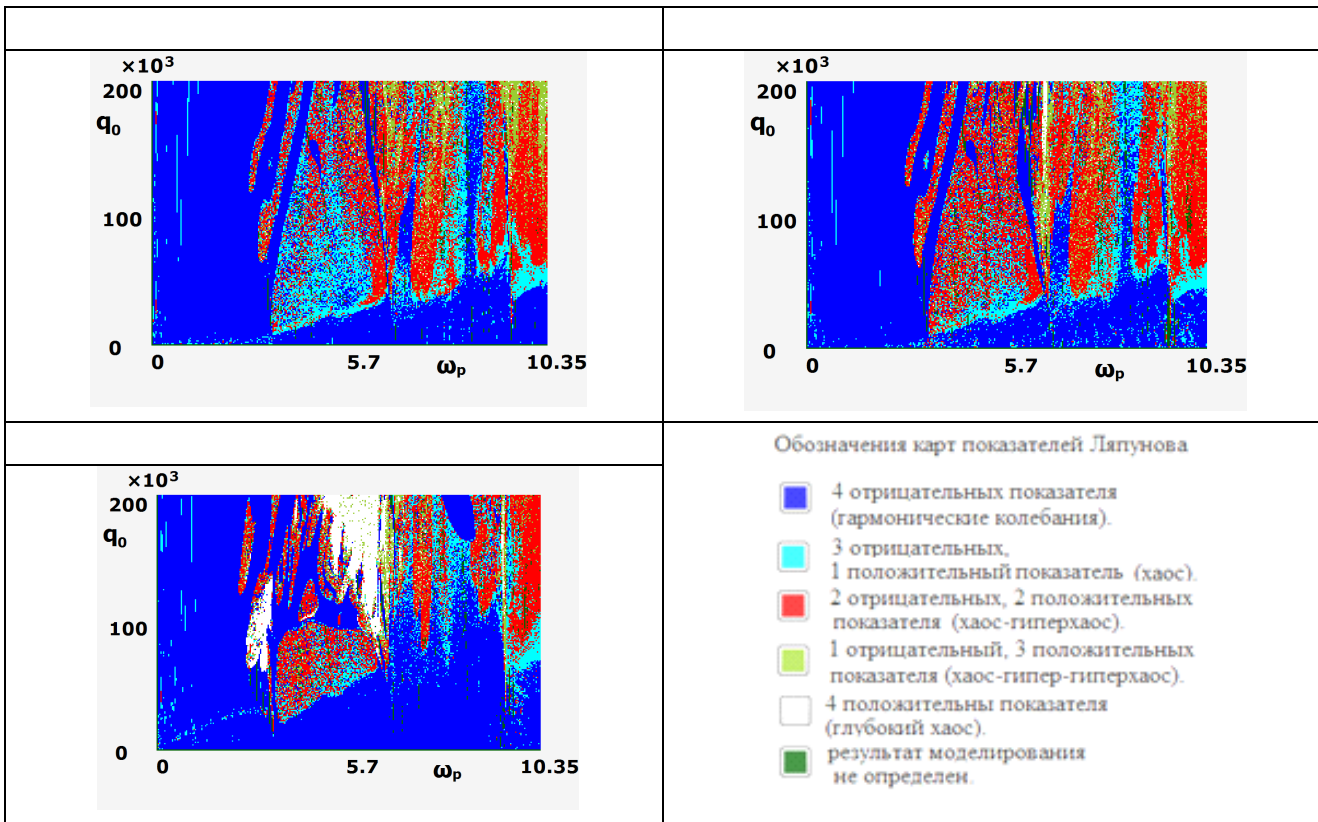


Рис. 1. Зависимость $\lambda_i(q_0)$



Сравнение табл. 8 с табл. 6 и 7 из первой части статьи показывает отличную сходимость разных видов анализа. При этом каждый вид карты отражает свои аспекты динамического процесса, а совместное их использование дает достаточно полное понимание все картины целиком.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № НК 12-01-31204.

ЛИТЕРАТУРА

1. Determining Lyapunov exponents from a time series / A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney, J.A. Vastano // Physica. 1985. V. D16. P. 285-317.

Загниборода Николай Александрович – аспирант кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikolai A. Zagniboroda – Postgraduate
Department of Applied Mathematics and System Analysis
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Добриян Виталий Вячеславович – аспирант кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vitaly V. Dobriyan – Postgraduate
Department of Applied Mathematics and System Analysis
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Жигалов Максим Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Maksim V. Zhigalov – Ph. D., Associated Professor,
Department of Mathematics and Modeling,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Крысько Антон Вадимович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика и механика» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton V. Krysko – Dr. Sc., Professor,
Head: Department of «Higher Mathematics and Mechanics»
Engels Institute of Technology (branch)
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Крысько Вадим Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim A. Krysko – Dr. Sc., Professor,
Head: Department of Mathematics and Modeling,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.04.13, принята к опубликованию 20.02.13

УДК 539.3

А.А. Мочалин

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕОДНОРОДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ОТ НЕРАВНОМЕРНОЙ РАДИАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

На базе полубезмоментной теории В.З. Власова рассматривается задача об устойчивости цилиндрической изотропной оболочки, переменной вдоль образующей толщины, при действии осесимметричного изменяющегося вдоль оси оболочки радиального давления. При одном соотношении изменения толщины и давления получено точное решение для нахождения одной из величин в законе изменения давления, при которой происходит потеря устойчивости оболочки.

Цилиндрическая оболочка, теория оболочек, устойчивость оболочек, радиальная нагрузка, критическое давление, толщина оболочка, теория упругости

А.А. Мочалин

STABILITY OF NON-UNIFORM CYLINDRICAL SHELL FROM UNEVEN RADIAL LOAD

The problem of stability of the cylindrical isotropic shell with thickness variation along the generatrix under the varied along the axis symmetry in the presence of the axisymmetric radial loading is considered on the basis of the half-momentless Vlasov theory. In the case of validity of certain changes between the values of thickness and radial loading the accurate solution for a certain parameter in the pressure variation law that corresponded to appearance of shell instability was produced.

Cylindrical shell, theory of shells, stability of shells, radial loading, critical pressure, shell thickness, the theory of elasticity

Исследования устойчивости оболочки от действия неравномерного давления, по-видимому, начинаются с работ Б.О. Элмроса [1] и В.И. Моссаковского [2]. Решения некоторых задач для неоднородных оболочек с переменной радиальной нагрузкой имеются в [3, 4]. Но в них решались задачи отдельно от влияния неоднородности оболочки и отдельно от действия переменной нагрузки. Рассмотрим задачу о получении зависимостей для расчета критического давления с учетом неоднородности оболочек и нагрузок.

В линейной теории цилиндрических оболочек широкое применение нашла полубезмоментная теория В.З. Власова [4], учитывающая особенности напряженного состояния оболочек, длина которых находится в пределах $D < l < 8D$, где D – диаметр оболочки, l её длина. В основе этой теории лежат две гипотезы: статическая и геометрическая, позволяющие существенно упростить уравнения, описывающие состояние устойчивости оболочки. Считается, что удлинение в окружном направлении и углы сдвига в срединной поверхности равны нулю, полагаются равными нулю перерезывающая сила и изгибающий момент в осевом направлении, а также крутящий момент.

Такого же результата, что и с помощью статической и геометрической гипотез В.З. Власова, можно достичь, как показал В.В. Новожилов [5], применяя менее сильный, но более глубокий и общий принцип, заключающийся в следующем. В длинной цилиндрической оболочке все функции, описывающие напряженно-деформированное состояние, вдоль образующей цилиндрической оболочки изменяются значительно более плавно, чем в направлении направляющей. Поэтому производные по продольной координате намного меньше, чем по окружной координате, и первыми по сравнению со вторыми можно пренебречь.

Однако из-за наглядности и простоты выкладок будем использовать подход, предложенный В.З. Власовым. Учитывая допущения этой теории, уравнение совместности деформаций запишется в виде

$$R \frac{\partial^4 \varepsilon_1}{\partial y^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \varepsilon_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial x^2}, \quad (1)$$

а уравнения равновесия после несложных преобразований можно записать одним уравнением вида

$$R \frac{\partial^4 M_2}{\partial y^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = P, \quad (2)$$

$$P = -\frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} - R \frac{\partial^2 q_n}{\partial y^2},$$

где x – координата, откладываемая по образующей, y – координата, откладываемая по дуге поперечного круга цилиндра.

Соотношения упругости с учетом допущений полубезмоментной теории В.З. Власова запишутся в форме

$$T_1 \approx Eh\varepsilon_1, \quad M_2 = D\alpha_2.$$

Введем новые переменные $\xi = x/l$, $\theta = y/R$ (l – длина оболочки) и функцию Φ соотношениями

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{l} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial \xi \partial \theta^2}, & v &= \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2}, & w &= \frac{1}{R} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \theta^4}, \\ \varepsilon_1 &= -\frac{1}{l^2} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \xi^2 \partial \theta^2}, & \alpha_2 &= -\frac{1}{R^3} \left(\frac{\partial^4 \Phi}{\partial \theta^4} + \frac{\partial^6 \Phi}{\partial \theta^6} \right), \\ T_1 &= -\frac{Eh}{l^2} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \xi^2 \partial \theta^2}, & M_2 &= -\frac{D}{R^3} \left(\frac{\partial^6 \Phi}{\partial \theta^6} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \theta^4} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Подстановкой последних соотношений в уравнение (1) оно тождественно удовлетворяется, а подставляя их в уравнение (2), приходим к следующему уравнению:

$$\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \left[h(\xi) \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} \right] + \frac{D1^4}{ER^6} \Omega \Omega \Phi + \frac{1^4}{E} \int_0^\theta \int_0^\theta P^* d\theta d\theta = 0. \quad (4)$$

Здесь

$$P^* = -\frac{1}{1} \frac{\partial q_1}{\partial \xi} + \frac{1}{R} \left(\frac{\partial q_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 q_n}{\partial \theta^2} \right), \text{ а } \Omega = \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(1 + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) - \text{дифференциальный оператор В.З. Власова.}$$

Уравнением (4) будем пользоваться при исследовании устойчивости цилиндрических оболочек средней и большой длины. Его следует интегрировать при граничных условиях, зависящих от способа закрепления *торцов оболочки*.

2. Пусть оболочка находится под действием неравномерной радиальной нагрузки $q = q_0(1 + \alpha\xi)^{-6}$. Компонента нагрузки q_n в этом случае определится выражением $q_n = -q_0 R \alpha^2 (1 + \alpha\xi)^{-6}$, где параметр q_0 подлежит определению.

Выбирая функцию Φ в форме $\Phi = X(\xi) \sin k\theta$, где k – число волн вдоль окружности оболочки при потере устойчивости, и задавая закон изменения толщины в виде $h(\xi) = h_0(1 + \alpha\xi)^{-2}$, приходим к уравнению

$$\frac{d^2}{d\xi^2} \left[(1 + \alpha\xi)^{-2} \frac{d^2 X}{d\xi^2} \right] - \lambda^4 (1 + \alpha\xi)^{-6} X = 0, \quad (5)$$

где $\lambda^4 = \frac{q_0 k^4 1^4}{ER^3 h_0} (k^2 - 1) - \frac{1^4 h_0^2 (k^2 - 1)^2 k^4}{12 R^6 (1 - \nu^2)}$.

Это уравнение после введения новой переменной $z = \ln(1 + \alpha\xi)$ и новой функции $W(z)$ соотношением $X = W(1 + \alpha\xi) \cdot e^{-\frac{z}{6}}$ может быть приведено к дифференциальному уравнению четвертого порядка с постоянными коэффициентами, которое записывается в форме

$$W^{(4)} - \frac{10}{3} W^{(3)} + \frac{25}{6} W^{(2)} + \frac{89}{54} W' - \left(\frac{\lambda^4}{\alpha^4} - \frac{145}{1296} \right) W = 0. \quad (6)$$

Решение этого уравнения будем разыскивать в виде $W = e^{\delta z}$. Результат подстановки приводит к следующему характеристическому уравнению:

$$(\delta^2 + a\delta + c)(\delta^2 + b\delta + d) = 0,$$

а величины a, b, c, d определяются из следующих соотношений

$$a + b = -\frac{10}{3}, \quad ab + c + d = \frac{25}{6}, \quad bc + da = \frac{89}{54}, \quad cd = \frac{145}{1296} - \frac{\lambda^4}{\alpha^4}.$$

Их значения таковы:

$$a = b = -\frac{5}{3}, \quad c = \frac{25\alpha^2 \mp \sqrt{600\alpha^4 + 1296\lambda^4}}{36\alpha^2}, \quad d = \frac{25\alpha^2 \pm \sqrt{600\alpha^4 + 1296\lambda^4}}{36\alpha^2}.$$

Выражение для функции $X(\xi)$ примет вид

$$X(\xi) = (1 + \alpha\xi)^{2/3} \left(C_1 \sin(\delta \cdot \ln(1 + \alpha\xi)) + C_2 \cos(\delta \cdot \ln(1 + \alpha\xi)) + C_3 \sin(\delta \cdot \ln(1 + \alpha\xi)) + C_4 \cosh(\delta \cdot \ln(1 + \alpha\xi)) \right), \quad (7)$$

где $\delta = \frac{\sqrt[4]{600\alpha^4 + 1296\lambda^4}}{6\alpha}$.

Решение задачи проведем для двух видов граничных условий: жесткого закрепления и свободного опирания краёв оболочки.

В случае жесткого закрепления краёв граничные условия имеют вид [6]

$$u = 0, \quad v = 0 \text{ при } \xi = 0, \quad \xi = 1$$

или $X(\xi) = 0, \quad \frac{dX(\xi)}{d\xi} = 0 \text{ при } \xi = 0, \quad \xi = 1.$

Если края оболочки свободно оперты, то следует удовлетворять условиям вида

$$u = 0, \quad T_1 = 0 \text{ при } \xi = 0, \quad \xi = 1$$

или $X(\xi) = 0, \quad \frac{d^2 X(\xi)}{d\xi^2} = 0 \text{ при } \xi = 0, \quad \xi = 1.$

Подчиняя общее решение уравнения граничным условиям и требуя совместности системы однородных уравнений, получаем соотношения для определения собственных значений в форме:

$$1 - \cos(\delta \ln(1 + \alpha)) = 4.73 \text{ для жесткого закрепления и}$$

$$\sin(\delta \ln(1 + \alpha)) = \pi \text{ в случае свободного опирания краёв.}$$

Для очень длинных оболочек ($\frac{R}{l} \rightarrow 0$) имеем независимо от способа закрепления краёв величину параметра q_0 в виде

$$q_0 = \frac{E h_0^3 (k^2 - 1)}{R^3 12 (1 - \nu^2)}.$$

После минимизации по k^2 ($k^2 \gg 1$ для оболочек средней длины) получаем формулу для вычисления критического давления

$$q_0^* = \sqrt[4]{\beta_0} E (h_0/R)^{5/2} \frac{R}{l} \frac{\sqrt{6}}{9(1-\nu^2)^{3/4}}, \quad (8)$$

где величина $\beta_0 = \left(\frac{4.73 \alpha}{\ln(1+\alpha)}\right)^4 - \frac{75}{162} \alpha^4$ в случае жесткого закрепления, и

$\beta_0 = \left(\frac{\pi \alpha}{\ln(1+\alpha)}\right)^4 - \frac{75}{162} \alpha^4$ – для свободного опирания краёв.

Формулу (8) можно переписать для жесткого закрепления краев в форме

$$q_0^* = 4.73E K(\alpha) (h_0/R)^{5/2} \frac{R}{l} \frac{\sqrt{6}}{9(1-\nu^2)^{3/4}}, \quad (9)$$

а для свободного опирания торцов соответственно в виде

$$q_0^* = \pi E K(\alpha) (h_0/R)^{5/2} \frac{R}{l} \frac{\sqrt{6}}{9(1-\nu^2)^{3/4}}. \quad (10)$$

Значения коэффициента $K(\alpha)$ для некоторых значений α приведены в нижеследующей таблице.

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|------|
| α | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,2 | -0,1 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| $K(\alpha)$ | 0,750 | 0,798 | 0,847 | 0,888 | 0,950 | 1 | 1,049 | 1,093 | 1,136 | 1,173 | 1,20 |

На основании полученных результатов можно сделать следующий вывод.

Значения критического давления неоднородной цилиндрической оболочки под действием неравномерного давления, изменяющегося по закону изменения жесткости, пропорциональны критическому давлению оболочки постоянной толщины с коэффициентом пропорциональности $K(\alpha)$, и при увеличении отношения толщин $\frac{h_1}{h_0}$ на концах оболочки критическое давление уменьшается, а при его уменьшении критическое давление увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Элмрос Б.О. Выпучивание цилиндрической оболочки, подверженной действию неравномерного внешнего давления / Б.О. Элмрос // Прикладная механика: Тр. Америк. общества инженеров-механиков. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. № 4. С. 27-31.
2. Моссаковский В.И. Некоторые вопросы устойчивости цилиндрической оболочки под действием неравномерного давления / В.И. Моссаковский, Л.В. Андреев, В.А. Зюзин // I Всесоюз. конф. по теории пластин и оболочек: тез. докл. М.: Наука, 1965. С. 47-51.
3. Антоненко Э.В. Устойчивость цилиндрической оболочки переменной толщины при действии наружного давления / Э.В. Антоненко, Н.С. Хлопцева // Тр. XXI Междунар. конф. по теории оболочек и пластин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2005. С. 7-13.
4. Власов В.З. Общая теория оболочек / В.З. Власов. М.: ГИТТЛ, 1949. 784 с.
5. Новожилов В.В. Теория тонких упругих оболочек / В.В. Новожилов. М.: Судпромгиз, 1962. 431 с.
6. Штейнберг М.В. Расчет круговых цилиндрических оболочек с толщиной переменной в направлении образующей / М.В. Штейнберг // Прикладная механика. 1965. Т. 1. № 7.

Мочалин Алексей Алексеевич –
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры «Прикладная математика и системный
анализ» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexey A. Mochalin –
Ph. D., Associate Professor
Department of Applied Mathematics
and System Analysis
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

С.П. Павлов, Р.С. Пальков

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ УСИЛЕНИЯ
ВОЛОКНИСТЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ С ТРУБЧАТЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ
И НЕОДНОРОДНЫМ МЕЖФАЗНЫМ СЛОЕМ**

Проводится исследование зависимости механических характеристик композиционного материала от характеристик межфазного слоя. Данное исследование проводится с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Композиционный материал, межфазный слой, метод конечных элементов

S.P. Pavlov, R.S. Palkov

**MATHEMATICAL MODELING OF STRENGTHENING EFFECTS OF FIBROUS NANO
COMPOSITES WITH TUBULAR INCLUSIONS AND NON-UNIFORM INTERPHASE**

The aim of the research is to assess the dependence of mechanical characteristics of the composite material on the interphase characteristics. The given research is conducted with the help of the finite element method (FEM).

Composite material, interphase, finite element method

На сегодняшний день наиболее распространенным способом модификации свойств полимеров является введение в их состав различных наполнителей (включений). Главной задачей, как правило, является изменение физико-механических свойств композита. Для прогнозирования свойств композита требуется умение теоретически определять эффективные параметры композита в зависимости от свойств входящих в его состав матрицы и включений. Между матрицей и включением образуется межфазный слой с особыми свойствами. Подтверждением существования межфазного слоя является различие между экспериментальными значениями модуля Юнга E и его значениями, рассчитанными без учета переходного слоя.

Наличие межфазного слоя существенно усложняет применение численных методов для определения эффективных характеристик композитов. Кроме того, параметры самого межфазного слоя, как правило, являются неоднородными по толщине. По сравнению с проблемой, связанной с неоднородностью межфазных слоев, в случае однородного покрытия определение эффективных характеристик гораздо легче. Для однородных слоев в некоторых случаях получены явные решения для сферических частиц и цилиндрических волокон [1-3]. В случае неоднородного межфазного слоя, как правило, требуется решать дифференциальные уравнения для задачи теории упругости с бесконечной матрицей, содержащей одну частицу или волокно с межфазным слоем.

В работе приводятся результаты исследования зависимости эффективных механических характеристик композиционного материала как при изменении внешнего и внутреннего радиусов включения, так и от толщины неоднородного межфазного слоя, модуль Юнга которого является переменным по толщине. Для упрощения считается, что характеристики межфазного слоя постоянны по толщине и совпадают со средними их значениями. В дальнейшем используется метод представительной ячейки, как и в [4], однако соответствующие краевые задачи решаются методом не граничных, а конечных элементов (МКЭ). Во всех случаях определялись эффективные упругие свойства в направлении, перпендикулярном к плоскости массива и, таким образом, необходимо было рассматривать только двумерные задачи упругости.

На рис. 1 приведена структура поперечного сечения композитного материала, а также контур расчетной области для включений в виде длинных трубок круглой формы. Представительная ячейка – это прямоугольник $2a \times 2a$ в безразмерных значениях. Трубочатые включения радиуса R показаны на рисунке штриховкой. Начало прямоугольной системы координат разместим в центре ячейки.

Материалы матрицы и включений считаем изотропными. Обозначим соответствующие эффективные двумерные модули в поперечном направлении как k_e , G_e , ν_e , E_e . Двухмерный объемный модуль k_e и модуль сдвига G_e были вычислены после решения двух следующих фундаментальных краевых задач.

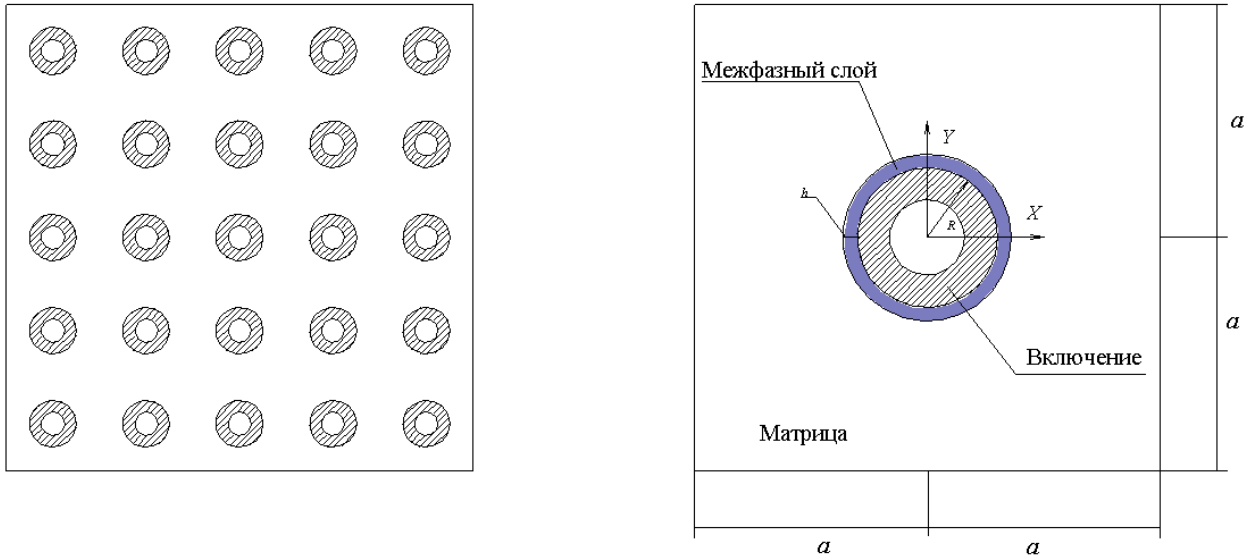


Рис. 1. Структура композитного материала и контур представительной ячейки

Для плоской деформации соотношения между напряжениями и деформациями имеют вид [5]

$$\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22}), \sigma_{22} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\nu\varepsilon_{11} + (1-\nu)\varepsilon_{22}], \sigma_{12} = 2G\varepsilon_{12}. \quad (1)$$

Первую краевую задачу для представительной ячейки определим следующим образом. Зададим постоянные деформации, для чего положим перемещение в направлении оси OX $u_1 = 0$, а перемещение в направлении оси OY $u_2 = y$. Отсюда тогда следует, что деформации в поперечном направлении определяются следующими выражениями:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0; \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) = 0; \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial y} = 1. \quad (2)$$

Поэтому $\sigma_{12} = 0$ и теперь легко вычислить напряжение:

$$\sigma_{22} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\nu \cdot 0 + (1-\nu) \cdot 1] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = k_e + G_e. \quad (3)$$

Таким образом, для первой краевой задачи имеем следующие граничные условия:

$$u_2(x, a)/a = -u_2(x, -a)/a = 1, \quad u_1(-a, y) = u_1(a, y) = 0, \quad (4)$$

$$\sigma_{12}(x, a) = \sigma_{12}(x, -a) = \sigma_{12}(-a, y) = \sigma_{12}(a, y) = 0, \quad (5)$$

Используя уравнения равновесия в напряжениях и теорему о дивергенции, можно показать, что среднее напряжение $\bar{\sigma}_{22}$ может быть выражено как

$$\bar{\sigma}_{22} = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a \sigma_{22}(x, a) dx. \quad (6)$$

Таким образом, (3) сводится к соотношению для суммы между эффективной объёмной жесткостью и модулем сдвига:

$$k_e + G_e = \bar{\sigma}_{22}. \quad (7)$$

Во второй задаче положим перемещение в направлении оси OX $u_1 = x$, а в направлении оси OY $u_2 = 0$. Тогда $\varepsilon_{11} = 0$, $\varepsilon_{22} = 0$, $\varepsilon_{12} = 1/2$, откуда следует $\sigma_{12} = 2G \cdot \frac{1}{2} = G_e$.

Граничные условия для второй задачи имеют вид

$$u_1(x, a)/a = -u_1(x, -a)/a = 1, \quad u_2(-a, y) = u_2(a, y) = 0, \quad (8)$$

$$\sigma_{22}(x, a) = \sigma_{22}(x, -a) = \sigma_{11}(-a, y) = \sigma_{11}(a, y) = 0, \quad (9)$$

Средние напряжения сдвига могут быть выражены при помощи интеграла по границе

$$\bar{\sigma}_{12} = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a \sigma_{12}(x, a) dx. \quad (10)$$

Поэтому

$$G_e = \bar{\sigma}_{12}. \quad (11)$$

Зная G_e , из формулы (7) теперь легко вычислить k_e .

Значения ν_e и E_e определялись из формул

$$\nu_e = \frac{k_e - G_e}{k_e + G_e}, \quad \frac{4}{E_e} = \frac{1}{k_e} + \frac{1}{G_e}. \quad (12)$$

В литературе приводятся различные законы изменения модуля Юнга по толщине межфазного слоя для различных теорий его возникновения. В работе принято, что модуль Юнга межфазного слоя изменяется по экспоненциальному закону [6]. Обозначим E_1 – модуль Юнга матрицы, E_2 – модуль Юнга включения $E_i(r)$ – модуль Юнга межфазного слоя. Если принять, что модуль Юнга слоя $E_i(r)$ изменяется по толщине от значения E_2 при $r = r_0$ до E_1 при $r = r_0 + h$ по экспоненциальному закону, то

$$E_i(r) = E_2 e^{-k(r-r_0)}. \quad (13)$$

Из условия

$$E_1 = E_2 e^{-kh}, \quad (14)$$

где h – толщина межфазного слоя, находим значение неизвестного коэффициента k

$$k = -\frac{1}{h} \ln \frac{E_1}{E_2}. \quad (15)$$

Подставим k в (14) и получим

$$E_i(r) = E_2 e^{\frac{1}{h} \ln \frac{E_1}{E_2} (r-r_0)}. \quad (16)$$

Найдем среднее значение величины $E_i(r)$

$$\bar{E}_i = \frac{1}{h} \int_0^h E_2 e^{-kt} dt = -\frac{E_2}{h} \cdot \frac{1}{k} \cdot e^{-kt} \Big|_0^h = -\frac{E_2}{kh} \cdot (e^{-kh} - 1). \quad (17)$$

Таким образом, окончательно получаем

$$\bar{E}_i = \frac{E_2}{\ln \frac{E_1}{E_2}} \cdot (e^{\ln \frac{E_1}{E_2}} - 1) = \frac{E_2}{\ln \frac{E_1}{E_2}} \left(\frac{E_1}{E_2} - 1 \right). \quad (18)$$

Как видно из выражения (18), среднее значение модуля Юнга межфазного слоя при данном законе изменения его по толщине слоя не зависит от его толщины, а зависит только от значений E_1, E_2 .

Для численного анализа толщина межфазного слоя принималась равной 0,2 от внешнего радиуса включения [7]. Исходные данные, использованные при математическом моделировании, приведены ниже:

– матрица имеет модуль Юнга $E_1 = 1.53 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0.45$;

– волокна имеют Юнга $E_2 = 10^{12}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu_2 = 0.27$.

Среднее значение модуля Юнга межфазного слоя теперь получается из (18)

$$\bar{E}_i = \frac{E_2 - E_1}{\ln \frac{E_2}{E_1}} = \frac{998.47 \cdot 10^9}{6.48} = 154 \cdot 10^9. \quad (19)$$

Как видно, это значение существенно отличается от среднего арифметического значения, равного $507,65 \cdot 10^9$ Па, в меньшую сторону. Коэффициент Пуассона слоя тем не менее определялся как среднее арифметическое коэффициентов матрицы и включения.

Далее приведем результаты исследования для заданной толщины межфазного слоя $h = 0,2r_0$ и различных значений отношения внешнего и внутреннего радиусов кольца, причем концентрация включений остается неизменной и равной 20%. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

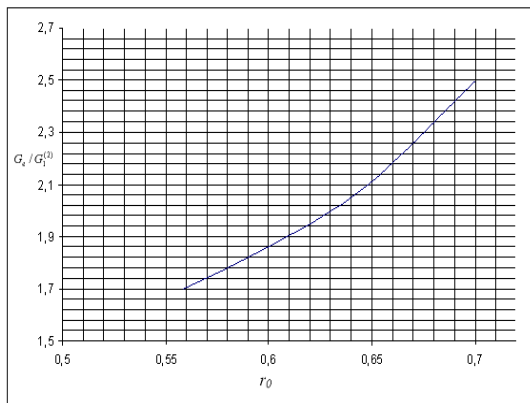
Таблица 1

Результаты исследования для различных внешних радиусов

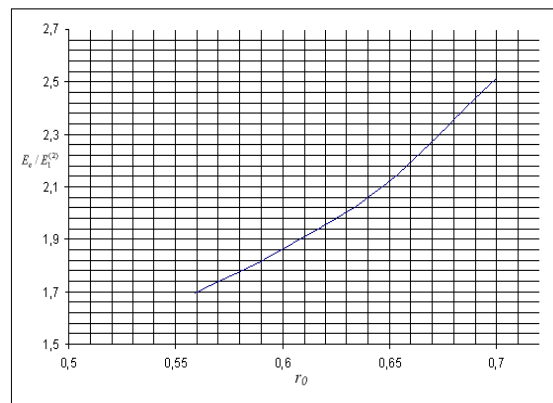
| Внешний радиус | $E_e / E_1^{(2)}$ | $G_e / G_1^{(2)}$ | $k_e / k_1^{(2)}$ | ν_e |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|
| $r_0=0,56$ | 1,6968 | 1,6983 | 1,6818 | 0,8166 |
| $r_0=0,6$ | 1,8622 | 1,8600 | 1,8837 | 0,8203 |
| $r_0=0,65$ | 2,1036 | 2,0956 | 2,1878 | 0,8252 |
| $r_0=0,7$ | 2,5128 | 2,4961 | 2,6926 | 0,8303 |

Здесь $E_e / E_1^{(2)}$, $G_e / G_1^{(2)}$, $k_e / k_1^{(2)}$ – отношение эффективного модуля Юнга к двумерному модулю Юнга основного материала (матрицы), отношение эффективного модуля сдвига к двумерному модулю сдвига основного материала (матрицы), отношение эффективного объемного модуля к двумерному объемному модулю основного материала (матрицы), ν_e – эффективный коэффициент Пуассона.

Из табл. 1 видно, что с увеличением внешнего радиуса трубки происходит увеличение модуля сдвига G_e и модуля Юнга E_e . На рис. 2 приведены графики зависимости $G_e / G_1^{(2)}$ и $E_e / E_1^{(2)}$ от внешнего радиуса трубки, соответственно.



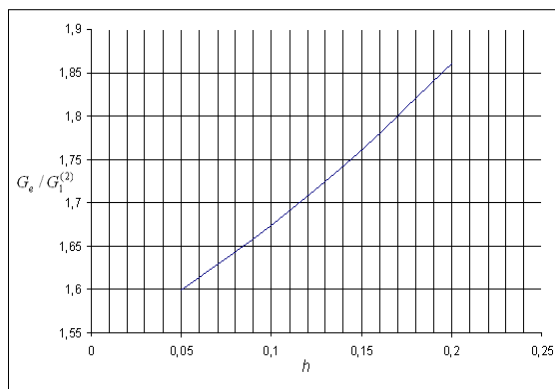
а – график зависимости $G_e / G_1^{(2)}$ от внешнего радиуса трубки



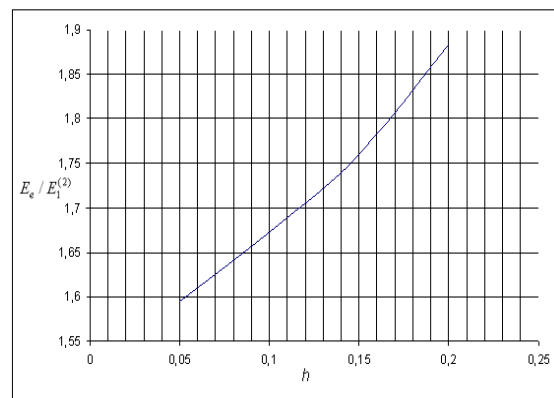
б – график зависимости $E_e / E_1^{(2)}$ от внешнего радиуса трубки

Рис. 2

Далее было проведено исследование влияния толщины межфазного слоя на эффективные механические характеристики композиционного материала $E_e / E_1^{(2)}$, $G_e / G_1^{(2)}$. Толщина межфазного слоя h варьировалась от $0,05r_0$ до $0,2r_0$. Результаты для $r_0 = 0,6$ приведены на рис. 3. На рис. 4 приведены распределения интенсивностей напряжений в матрице, включениях и межфазном слое.



а – график зависимости $G_e / G_1^{(2)}$ от толщины межфазного слоя (конц. 20%)



б – график зависимости $E_e / E_1^{(2)}$ от толщины межфазного слоя (конц. 20%)

Рис. 3

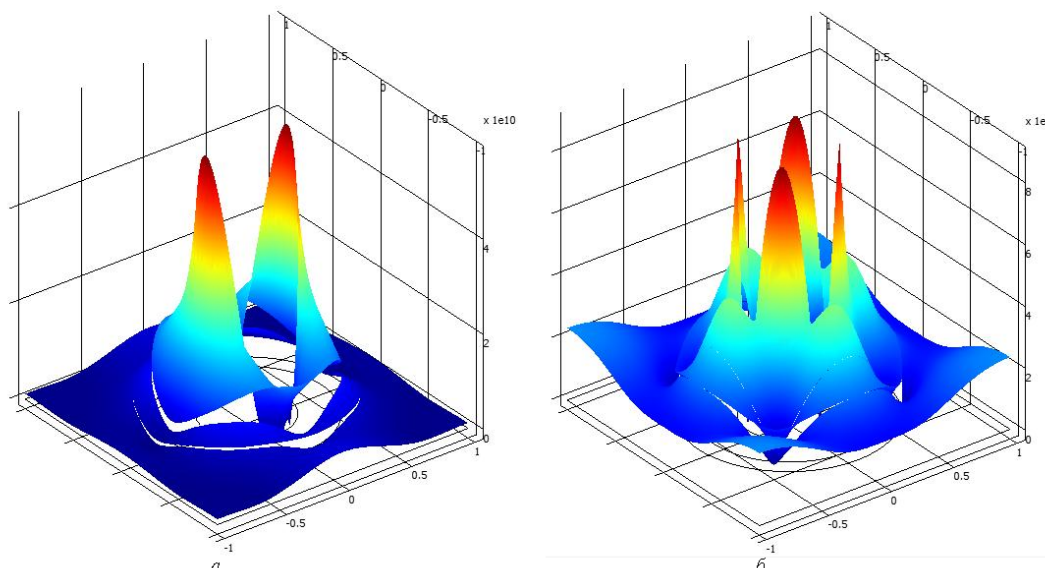


Рис. 4. Распределение интенсивностей напряжений в матрице, включении и межфазном слое а – для первой краевой задачи; б – для второй краевой задачи

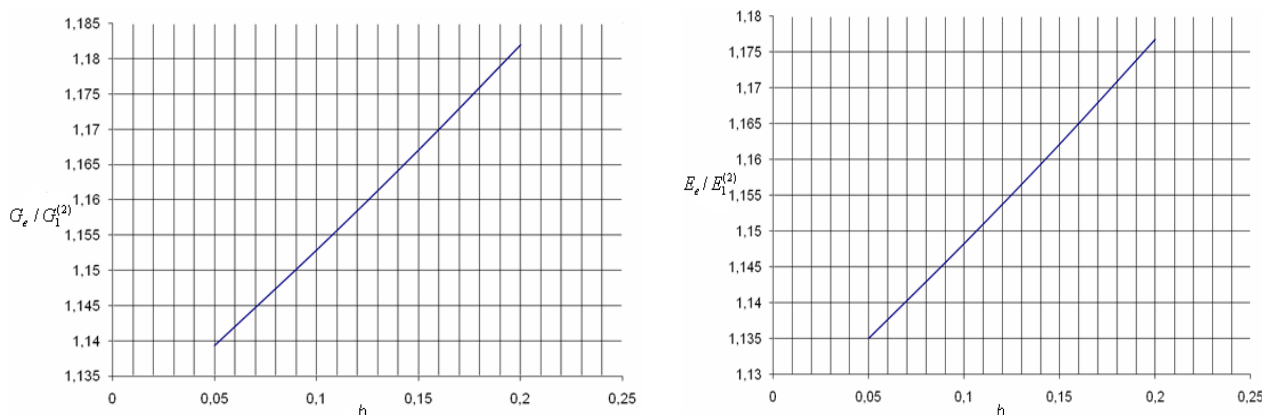
Аналогичные исследования были проведены для концентрации включения 5%. Сохраняя пропорции для трубки с радиусом $r_0 = 0,6$, получим, что в этом случае должно быть $r_0 = 0,3$. Для $h = 0,2r_0$ результаты приведены в табл. 2.

Результаты исследования для концентрации 5%

Таблица 2

| Внешний радиус | $E_e / E_1^{(2)}$ | $G_e / G_1^{(2)}$ | k_e/k_1 | ν_e |
|----------------|-------------------|-------------------|-----------|---------|
| $r=0.3$ | 1.7168 | 1.1819 | 1.1274 | 0.8102 |

Так же как и для концентрации 20%, было проведено исследование влияния толщины межфазного слоя на эффективные механические характеристики композиционного материала $E_e / E_1^{(2)}$, $G_e / G_1^{(2)}$. Толщина межфазного слоя h варьировалась от 0,05 до 0,2 от радиуса включения. Результаты приведены на рис. 5.



а – график зависимости $G_e / G_1^{(2)}$ от толщины межфазного слоя (конц. 5%)

б – график зависимости $E_e / E_1^{(2)}$ от толщины межфазного слоя (конц. 5%)

Рис. 5

Из проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Данные, приведенные в табл. 1, достаточно наглядно показывают, что при изменении внешнего радиуса трубки от 0,56 до 0,7 мы наблюдаем увеличение эффективных упругих характеристик ($G_e / G_1^{(2)}$ и $E_e / E_1^{(2)}$) композиционного материала в 1,48 раза при неизменной концентрации включений 20%. Таким образом, трубки большего радиуса и меньшей толщины оказывают больший эффект усиления.

Кроме того, по мере увеличения толщины h межфазного слоя эффективные упругие модули упругости композиционного материала E_e , G_e также увеличиваются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hill R. Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials: I. Elastic behavior / R. Hill // J. Mech. Phys. 1964. Solids 12. 199-212.
2. Hashin Z. The elastic module of fiber-reinforced materials / Z. Hashin, B.W Rosen // J. Appl. Mech. 1964. 31. 223-232.
3. Qiu Y.P. Elastic module of thickly coated particle and fiber-reinforced composites / Y.P. Qiu, G.J. Weng // ASME J. Appl. Mech. 1991. 58. 388-398.
4. Пальков Р.С. Определение и прогнозирование упругого поведения материала АКП-1ПК методом граничных элементов / Р.С. Пальков, С.П. Павлов, Т.В. Бабенкова // Труды ФГУП «НПЦ АП». 2012. № 4. С. 42-50.
5. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. М.: Наука, 1975. 576 с.
6. Основы теории межфазного слоя / И.Ф. Образцов, С.А. Лурье, П.А. Белов и др. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2004. Вып. 4. С. 596-612.
7. Люкшин Б.А. Влияние свойств межфазного слоя на напряженно-деформированное состояние полимерного композита в окрестности включения / Б.А. Люкшин, П.А. Люкшин // Механика композиционных материалов и конструкций. 1998. Т. 4. № 2. С. 56-68.

Пальков Роман Сергеевич – аспирант кафедры «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Roman S. Palkov – Postgraduate Department of Mathematics and Modelling, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Павлов Сергей Петрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey P. Pavlov – Dr. Sc., Professor Department of Mathematics and Modelling, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.01.13, принята к опубликованию 20.02.13

УДК 532.516

В.И. Краюхин, В.С. Попов, Л.И. Могилевич

ДИНАМИКА СДАВЛИВАЕМОГО СЛОЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ПРОПИТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ БЕТОНОВ

Исследуется гидродинамическая реакция тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости, сдавливаемого твердыми стенками. Приводится постоянная составляющая распределения давления в слое жидкости при выраженных течениях пропитывающей жидкости-системы между вибратором и статором.

Вязкая несжимаемая жидкость, вибрация, пропитка, гидродинамическое давление, постоянная составляющая давления

V.I. Krayukhin, V.S. Popov, L.I. Mogilevich

DYNAMICS OF THE SQUEEZED LAYER OF THE VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID WHEN IMPREGNATED WITH A SPECIAL RUBBER CONCRETE

Hydrodynamic response of a thin layer of viscous incompressible liquid pressed by solid walls is investigated. The constant pressure component in the layer of viscous incompressible liquid has been found.

Viscous incompressible liquid, vibration, soak, hydrodynamic pressure, constant component of pressure

Жаростойкие бетоны и конструкции из них применяются с 60-х годов XX столетия и зарекомендовали себя как надежные элементы сооружений, печей, агрегатов, дымовых труб и т.д. Легкий жаростойкий бетон с объемной массой до 1000 кг/м^3 и прочностью $50\text{-}75 \text{ кг/см}^2$ ($5\text{-}7,5 \text{ МПа}$) часто используется в конструкциях сводовых и стеновых панелей печей нефтепереработки. Панели свода размером $(2,2\text{+}2,5) \times (1,5 \times 2,0)$ и толщиной 20-25 см выполняются на металлическом кожухе с армирующими «усами» и обрамлением из швелла №10 с монтажными отверстиями для подвесных «тяг». По мере эксплуатации в течение до 25 лет и более (на примере Саратовского НПЗ) происходит образование сетки трещин, проходят процессы эрозии, сублимации и десублимации.

Одним из эффективных способов «лечения» этих дефектов служат методы пропитки бетонов различными видами пропиточных составов и их способностями вписываться в общую схему конструктивных элементов из специальных бетонов и технологию проведения ремонтных работ на объектах. Обычно требуется теоретическое обоснование проведения этих реконструкций и составление плана проведения подобного вида работ. Способ лечения трещин в бетонах и конструкции пропиточными, пропиточно-тампонажными композициями на основе фосфатных составляющих их повышает надежность и долговечность конструкций. При вибрационном воздействии на пропитываемое тело и пропиточную массу создаются условия передачи энергии от вибрационных механизмов на пропитываемую систему. Математическое моделирование данного процесса требует рассмотрения процессов динамики взаимодействия вязкой несжимаемой жидкости с вибрирующими стенками канала. Данной проблематике посвящены работы [1-10]. При этом в ряде работ рассматриваются вопросы исследования законов движения твердых стенок, образующих канал [1, 3, 4], при решении уравнений тонкого слоя жидкости методом возмущений, в [2, 5-10] осуществляется учет упругой податливости стенок канала, а также их геометрической нерегулярности и многослойности. В предлагаемой работе основное внимание сосредоточено на исследовании гидродинамической реакции слоя вязкой несжимаемой жидкости, сдавливаемой твердыми стенками, и учету нелинейности силы инерции движения жидкости, что позволяет определить постоянную составляющую при гармоническом законе вибрации одной из стенок канала – вибратора. Зная данную составляющую, можно судить о скорости и эффективности пропитки изделия.

Рассмотрим сдавливаемый слой вязкой несжимаемой жидкости между параллельными подвижными плоскостями (рис. 1). Плоскость 1 движется относительно системы координат Эйлера $Oxuz$ со скоростью V_1 .

Пусть стенка 1 совершает периодические движения

$$y = y_m f(\omega t). \quad (1)$$

Тогда

$$h = \delta + y_m f(\omega t) = \delta \bar{h}; \quad \bar{h} = 1 + \lambda f(\omega t); \quad \lambda = y_m / \delta, \quad V_1 = -\frac{dh}{dt} = -y_m \frac{df(\omega t)}{dt}; \quad (2)$$

где δ – толщина слоя жидкости (средняя), h – текущая толщина слоя жидкости, ω – частота вибрации.

В силу $b \gg 2l$ положим $V_z = 0$. Вводя в уравнения Навье-Стокса и неразрывности (гидродинамики) выражения

$$x = \bar{l}\bar{x}; \quad y = \delta\bar{y}; \quad \tau = \omega t; \quad V_x = W\bar{V}_x; \quad V_y = V\bar{V}_y; \quad V_z = 0; \quad V/W = \delta/l; \quad (3)$$

$$p = \bar{p}l\mu W / \delta^2$$

и отбрасывая члены порядка малости δ/l и более, получаем укороченные безразмерные нелинейные уравнения слоя жидкости:

$$\frac{\omega\delta^2}{\nu} \left[\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \tau} + \lambda \left(\bar{V}_x \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{x}} + \bar{V}_y \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{y}} \right) \right] = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial^2 \bar{V}_x}{\partial \bar{y}^2}; \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} = 0; \quad \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial \bar{y}} = 0. \quad (4)$$

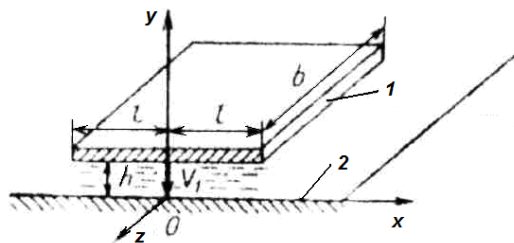


Рис. 1. l – половина длины вибрационного устройства (канала),
 b – ширина вибрационного устройства (канала)

Граничные условия

$$\begin{aligned} \bar{V}_x &= 0; \quad \bar{V}_y = \bar{V}_0 \quad \text{при} \quad \bar{y} = 0; \\ \bar{V}_x &= 0; \quad \bar{V}_y = \frac{y_m \omega}{V} \frac{df}{d\tau} = -V_1 \quad \text{при} \quad \bar{y} = \bar{h} = 1 + \lambda f; \\ \bar{p} &= p_c \delta^2 / (l\mu W) \quad \text{при} \quad x = \pm l. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь скорость V_1 является произвольной функцией времени, V_0 – постоянная, начальная скорость пропитки, ρ – плотность жидкости, ν – коэффициент кинематической вязкости, p_c – давление статическое (начальное).

Размерные укороченные уравнения рассматриваемого слоя жидкости (рис. 1) согласно (4) имеют вид

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} V_x &= 0, \quad V_y = V_0 \quad \text{при} \quad y = 0; \\ V_x &= 0, \quad V_y = -V_1 \quad \text{при} \quad y = h; \\ p &= p_c \quad \text{при} \quad x = \pm l \end{aligned} \quad (7)$$

Интегрируя последнее уравнение из (6) по y в пределах от 0 до h и далее интегрируя по x , получаем единичный секундный расход жидкости в слое

$$Q = xV_1 + Q_2, \quad \frac{\partial Q_2}{\partial x} = 0; \quad Q = Q_2 \quad \text{при} \quad x = 0. \quad (8)$$

Полагая левую часть в первом уравнении из (6) равной нулю и интегрируя оставшееся уравнение Рейнольдса при условиях (7), находим скорости нулевого приближения [1-3]

$$V_{x0} = \frac{6}{h^3} (hy - y^2)x(V_1 - V_0), \quad V_{y0} = -\frac{6}{h^3} \left(\frac{1}{2}hy^2 - \frac{1}{3}y^3 \right) (V_1 - V_0). \quad (9)$$

Усредним скорость нулевого приближения V_{x0} из (9) по сечению слоя h :

$$\langle V_{x0} \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h V_{x0} dy = \frac{x}{h} (V_1 - V_0) \quad (10)$$

Подставляя $\langle V_{x0} \rangle$ в левую часть первого уравнения из (6) и интегрируя по y при граничных условиях (7), получим

$$V_x = \frac{1}{2\mu} (y^2 - hy) \left(\frac{\partial p_+}{\partial x} + \rho A_+ \right). \quad (11)$$

Из условия $\int_0^h V_x dy = Q$ с учетом (7) и (8), находим

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_+}{\partial x} &= -\frac{12\mu}{h^3} x(V_1 - V_0) - \rho \frac{x}{h} \frac{dV_1}{dt} - \rho \frac{2x}{h^2} \left(V_1^2 - \frac{3}{2}V_0V_1 + \frac{1}{2}V_0^2 \right); \\ p_+ &= p_c + \left(\frac{6\mu}{h^3} (V_1 - V_0) + \frac{1}{2} \rho \frac{1}{h} \frac{dV_1}{dt} + \rho \frac{1}{h^2} \left(V_1^2 - \frac{3}{2}V_0V_1 + \frac{1}{2}V_0^2 \right) \right) (l^2 - x^2) \end{aligned} \quad (12)$$

Построим математическую модель силовых динамических характеристик взаимодействия слоя жидкости с подвижными стенками в режиме сдавливания путем введения поправочных частотозависимых коэффициентов ν , w , найденных К.П. Андрейченко [3]:

$$\begin{aligned} \nu &= -\frac{1}{6} \varepsilon^2 \frac{f}{d^2 + f^2}, \quad w = \frac{d}{d^2 + f^2}, \quad d = 1 + \frac{1}{\varepsilon} (c_1 - c_2), \quad f = \frac{1}{\varepsilon} (c_1 + c_2) \\ c_1 &= -\frac{\text{sh} \varepsilon}{\text{ch} \varepsilon + \cos \varepsilon}, \quad c_2 = \frac{\sin \varepsilon}{\text{ch} \varepsilon + \cos \varepsilon} \end{aligned}$$

$\text{sh}\varepsilon$ – синус гиперболический, $\text{ch}\varepsilon$ – косинус гиперболический, $\varepsilon = \delta \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}$. При $\varepsilon \ll 1$: $\nu=1$; $w=1,2$, а при $\varepsilon > 4$: $\nu = \varepsilon/6$; $w=1$. Для воды $\nu=3,25 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\nu \frac{12\mu}{h^3} x(V_1 - V_0) - w\rho \frac{x}{h} \frac{dV_1}{dt} - \left[w\rho \frac{2x}{h^2} \left(V_1^2 - \frac{3}{2} V_0 V_1 + \frac{1}{2} V_0^2 \right) \right]; \quad (13)$$

$$p = p_c + \nu \frac{6\mu}{h^3} (V_1 - V_0)(l^2 - x^2) + w\rho \frac{1}{2h} \frac{dV_1}{dt} (l^2 - x^2) + \left[w\rho \frac{1}{h^2} \left(V_1^2 - \frac{3}{2} V_0 V_1 + \frac{1}{2} V_0^2 \right) (l^2 - x^2) \right]$$

Определим постоянную (не зависящую от времени) составляющую давления в предположении гармонического закона вибрации

$$f = \cos \omega t, \quad \frac{df}{dt} = -\omega \sin \omega t, \quad \frac{d^2 f}{dt^2} = -\omega^2 \cos \omega t \quad . \quad (14)$$

Так как

$$p = p_c + \left\{ \nu \frac{6}{h^3} \rho \nu \left[y_m \left(-\frac{df}{dt} \right) - V_0 \right] + w\rho \frac{1}{2h} y_m \left(-\frac{d^2 f}{dt^2} \right) + w\rho \frac{1}{h^2} \left[y_m^2 \left(-\frac{df}{dt} \right)^2 + \frac{3}{2} V_0 \frac{df}{dt} + \frac{1}{2} V_0^2 \right] \right\} (l^2 - x^2), \quad (15)$$

то имеем

$$p = p_c + \frac{\rho \omega \nu \lambda}{\delta^2} \left\{ \nu \frac{-\frac{6V_0}{y_m \omega} + 6 \sin \omega t}{(1 + \lambda \cos \omega t)^3} + w \frac{\delta^2 \omega}{\nu} \left[\frac{\cos \omega t}{2(1 + \lambda \cos \omega t)} + \frac{\lambda \left(\sin^2 \omega t + \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{y_m^2 \omega^2} - \frac{3}{2} \frac{V_0}{y_m \omega} \sin \omega t \right)}{(1 + \lambda \cos \omega t)^2} \right] \right\} (l^2 - x^2). \quad (16)$$

Рассмотрим, полагая $\omega t = \tau$, среднее по времени давление

$$\langle p \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d\tau. \quad (17)$$

Для этого найдем

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_c d\tau &= p_c; & \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin \tau}{(1 + \lambda \cos \tau)^3} d\tau &= 0; & \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin \tau}{(1 + \lambda \cos \tau)^2} d\tau &= 0; \\ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \tau}{2(1 + \lambda \cos \tau)} d\tau &= \frac{1}{2\lambda} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \lambda^2}} \right); & \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\lambda \sin^2 \tau}{(1 + \lambda \cos \tau)^2} d\tau &= \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \lambda^2}} - 1 \right); \\ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\tau}{(1 + \lambda \cos \tau)^3} &= \frac{1}{2} \frac{\lambda^2 + 2}{(1 - \lambda^2)^{\frac{5}{2}}}; & \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\tau}{(1 + \lambda \cos \tau)^2} &= \frac{1}{(1 - \lambda^2)^{\frac{3}{2}}}; \end{aligned} \quad (18)$$

следовательно

$$\langle p \rangle = p_c + \frac{\rho \omega \nu \lambda}{\delta^2} w \frac{\delta^2 \omega}{\nu} \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \lambda^2}} - 1 \right) (l^2 - x^2) + \frac{\rho \nu V_0^2}{\delta^2} \frac{(l^2 - x^2)}{2(1 - \lambda^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{3\rho \nu V_0}{\delta^3} \frac{\lambda^2 + 2}{(1 - \lambda^2)^{\frac{5}{2}}} (l^2 - x^2) \quad (19)$$

Если $\frac{\delta^2 \omega}{\nu} \ll 1$, то $w=1,2$ при этом $\nu=1$ и имеем

$$\langle p \rangle = p_c + \rho \omega^2 \frac{3}{5} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \lambda^2}} - 1 \right) (l^2 - x^2) + \frac{\rho V_0^2}{\delta^2} \frac{3}{5} \left(\frac{1}{(1 - \lambda^2)^{\frac{3}{2}}} \right) (l^2 - x^2) - \frac{\rho \nu V_0}{\delta^3} 3 \frac{\lambda^2 + 2}{(1 - \lambda^2)^{\frac{5}{2}}} (l^2 - x^2). \quad (20)$$

Для $\lambda \ll 1$ имеем $\frac{1}{\sqrt{1 - \lambda^2}} - 1 \approx \frac{1}{2} \lambda^2$, $\left(\frac{1}{(1 - \lambda^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \approx 1 + \frac{3}{2} \lambda^2$, $\frac{\lambda^2 + 2}{(1 - \lambda^2)^{\frac{5}{2}}} \approx 2 + 6\lambda^2$ и, следовательно

$$\langle p \rangle = p_c + \rho \omega^2 \frac{3}{10} \left(\frac{y_m}{\delta} \right)^2 (l^2 - x^2) + \frac{\rho V_0^2}{\delta^2} \frac{3}{5} \left(1 + \frac{3}{2} \lambda^2 \right) (l^2 - x^2) - \frac{\rho \nu V_0}{\delta^3} 6(1 + 3\lambda^2) (l^2 - x^2). \quad (21)$$

Таким образом, определена постоянная составляющая гидродинамического давления. Под действием указанного постоянного давления пористая жидкость поступает со скоростью V_0 через пористое пространство в массу бетона. При этом давление распределено по параболическому закону

и наибольшее значение имеет при $x=0$, частота ω и относительная амплитуда $\frac{y_m}{\delta}$ должны быть достаточными, чтобы преодолеть противодействие в жидкости внутри массы бетона. После их выравнивания процесс пропитки приостанавливается и увеличение пропитки достигается другими методами (если это необходимо).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-01-00049а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрейченко К.П. К теории жидкостного демпфирования в поплавковых приборах / К.П. Андрейченко // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1977. № 5. С. 13-23.
2. Андрейченко К.П. О динамике взаимодействия сдвигаемого слоя вязкой несжимаемой жидкости с упругими стенками / К.П. Андрейченко, Л.И. Могилевич // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 2. С. 162-172.
3. Андрейченко К. П. К теории демпферов с тонкими слоями жидкости / К.П. Андрейченко // Машиноведение. 1978. № 1. С. 69-75.
4. Динамика взаимодействия подвижных стенок плоского канала со сдвигаемым слоем жидкости, находящимся между ними / Р.В. Агеев, Т.В. Быкова, Л.И. Могилевич, В.С. Попов // Вестник СГТУ. 2009. Т. 1. № 4. С. 7-13.
5. Волов М.И. Математическое моделирование динамики взаимодействия пульсирующего слоя вязкой жидкости с упругими стенками канала, образованного двумя параллельными пластинами / М.И. Волов, В.С. Попов // Вестник СГТУ. 2011. Т. 2. № 1. С. 34-38.
6. Агеев Р.В. Математическое моделирование динамических процессов в гидродинамической опоре с трехслойным статором, установленным на вибрирующем основании / Р.В. Агеев // Вестник СГТУ. 2010. №4(49). С. 7-14.
7. Агеев Р.В. Решение динамической задачи гидроупругости и гидродинамической виброопоры с упругим геометрически нерегулярным статором / Р.В. Агеев, Т.В. Быкова // Вестник СГТУ. 2011. №1(52). С. 7-14.
8. Агеев Р.В. Математическое моделирование взаимодействия слоя вязкой жидкости с упругими стенками канала, установленного на вибрирующем основании / Р.В. Агеев, Т.В. Быкова, Ю.Н. Кондратова // Известия Саратовского университета. Нов. сер. 2011. Т. 11. Сер. Математика. Механика. Информатика. Вып. 2. С. 48-54.
9. Могилевич Л.И. Исследование взаимодействия слоя вязкой несжимаемой жидкости со стенками канала, образованного соосными вибрирующими дисками / Л.И. Могилевич, В.С. Попов // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. №3. С. 55-68.
10. Могилевич Л.И. Динамика взаимодействия упругих элементов вибромашины со сдвигаемым слоем жидкости, находящимся между ними / Л.И. Могилевич, В.С. Попов, А.А. Попова // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №4. С. 23-32.

Краюхин Валентин Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы и технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valentin I. Krayukhin – Ph. D., Associate Professor
Department of the Building Materials and Technology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Могилевич Лев Ильич – доктор технических наук, профессор кафедры «Теплогасоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Lev I. Mogilevich – Dr. Sc., Professor
Department of the Heat, Gas Water Supply, Ventilation, and Applied Hydrogasdynamics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Попов Виктор Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогасоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Victor S. Popov – Dr. Sc., Professor
Head: Department of the Heat, Gas Water Supply, Ventilation, and Applied Hydrogasdynamics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Я.Г. Сапунков, А.В. Молоденков

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО В СМЫСЛЕ МИНИМУМА
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ РАЗВОРОТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА
В КЛАССЕ КОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ**

В кватернионной постановке рассматривается задача оптимального разворота в смысле минимума энергетических затрат космического аппарата как твердого тела со сферическим распределением масс без ограничения на функцию управления. Для этой задачи получено новое аналитическое решение в классе конических движений. Дается численный пример.

Космический аппарат, твердое тело, оптимальное управление, регулярная прецессия

Ya.G. Sapunkov, A.V. Molodenkov

**SOLUTION OF THE MINIMUM ENERGY LOSS PROBLEM FOR THE TURN
OF A SPACECRAFT OF THE CONICAL MOTION CLASS**

The article deals with the problem of optimal turn in the sense of the minimum energy loss in a spacecraft considered as a rigid body with the spherical mass distribution without any constraint for the quaternion statement. A new analytical solution in the class of conical motion is obtained for the problem. A numerical example is provided.

Spacecraft, rigid body, optimal control, regular precession

Введение. Построение управления угловым движением космического аппарата (КА) как твердого тела в традиционной постановке включает задачи программного углового движения (разворота), программного управления и построения управления, стабилизирующего программу углового движения в малом. Задача построения программного углового движения и программного управления во многих случаях решается с помощью методов теории оптимального управления. Точное аналитическое решение этой задачи для наиболее часто используемых функционалов оптимизации при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА не найдено даже в случае сферической симметрии КА, не говоря уже о его произвольной динамической конфигурации. Известны лишь некоторые частные случаи решения задачи (например, [1-8]), при этом для сферически симметричных КА эти решения получены в классе плоских эйлеровых разворотов. Поэтому расширение классов аналитических решений задачи оптимального разворота КА (твердого тела) в замкнутой форме имеет не только теоретический, но и большой практический интерес, так как позволяет использовать на борту КА готовые законы программного управления и изменения оптимальной траектории.

В кватернионной постановке рассматривается задача оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота сферически симметричного КА при произвольных граничных условиях по угловому положению КА и произвольном по направлению векторе начального условия по угловой скорости КА без ограничения на управление. Время переориентации КА произвольно и зафиксировано. С помощью принципа максимума Л.С. Понтрягина получено новое аналитическое решение этой задачи в классе конических движений. Представлено явное выражение для постоянного по модулю оптимального вектора угловой скорости КА. Траектория движения сферически симметричного КА представляет собой регулярную прецессию, вектор оптимального управления КА перпендикулярен вектору угловой скорости и также постоянен по модулю. Сформулированы условия на модуль начального и вид конечного значений вектора угловой скорости КА, при которых допустимо аналитическое решение задачи в классе конических движений. Вектор конечного значения угловой скорости КА должен принадлежать конической поверхности, порождаемой произвольно заданными постоянными условиями задачи. Приводится численный пример.

Статья продолжает исследования, начатые в [9].

1. Постановка задачи. Движение сферически симметричного КА вокруг центра масс описывается уравнениями [1]:

$$2\Lambda^\bullet = \Lambda \circ \omega, \quad (1)$$

$$\omega^\bullet = \mathbf{M}, \quad (2)$$

где $\Lambda(t) = \lambda_0(t) + \lambda_1(t)\mathbf{i}_1 + \lambda_2(t)\mathbf{i}_2 + \lambda_3(t)\mathbf{i}_3$ (кватернион поворота КА), $\omega(t) = \omega_1(t)\mathbf{i}_1 + \omega_2(t)\mathbf{i}_2 + \omega_3(t)\mathbf{i}_3$ (вектор угловой скорости КА) – фазовые координаты, $\mathbf{M}(t) = [M_1(t), M_2(t), M_3(t)]^T$ – управление – подчинены требованиям задачи понтрягинского типа ($\Lambda(t), \omega(t)$ – непрерывные функции, $\mathbf{M}(t)$ – кусочно-непрерывная функция); кватернион $\Lambda(t)$ нормирован, то есть $\|\Lambda\| = \lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1$; $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ – орты гиперкомплексного пространства (мнимые единицы Гамильтона), символ « \circ » означает кватернионное умножение. В динамических уравнениях Эйлера для сферически симметричного твердого тела (2) тензор инерции без ограничения общности положен единичным.

Заданы произвольные граничные условия по угловому положению

$$\Lambda(0) = \Lambda_0, \Lambda(T) = \Lambda_T \quad (3)$$

и угловой скорости КА

$$\omega(0) = \omega_0, \omega(T) = \omega_T. \quad (4)$$

Требуется определить оптимальное управление $\mathbf{M}^{opt}(t)$ системой (1), (2) при ограничении на управление (3) и граничных условиях (4), (5), доставляющее минимум функционалу

$$J = \int_0^T (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2) dt, \quad (5)$$

где время T произвольно и зафиксировано.

2. Переход к безразмерным переменным. Перейдем от размерных переменных задачи к безразмерным по формулам

$$t^{безраз} = t^{раз} / T, \omega^{безраз} = \omega^{раз} T, \mathbf{M}^{безраз} = \mathbf{M}^{раз} T^2, J^{безраз} = J^{раз} T^3,$$

при этом вид формул (1)-(4) не изменится, а функционал (5) запишется так

$$J = \int_0^1 (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2) dt \quad (6)$$

Далее будем иметь в виду постановку задачи (1)-(4) (где $T=1$), (6) в безразмерных переменных и верхние индексы у них будут опущены.

3. Применение принципа максимума. Выполним процедуру принципа максимума Л.С. Понтрягина [1, 10]. Введем вспомогательные функции $\Psi(t)$ (кватернион) и $\varphi(t)$ (вектор) соответствующие фазовым координатам $\Lambda(t)$ и $\omega(t)$. Составим функцию Гамильтона-Понтрягина

$$H = -\psi^*(\mathbf{M}, \mathbf{M}) + (\Psi, \Lambda \circ \omega) / 2 + (\varphi, \mathbf{M}), \quad (7)$$

где постоянная $\psi^* \geq 0$, а « (\cdot, \cdot) » означает скалярное произведение векторов.

Будем рассматривать невырожденные решения краевой задачи принципа максимума, для которых $\psi^* > 0$. В силу однородности функции Гамильтона-Понтрягина H [10] в формуле (7) положим $\psi^* = 1$.

Сопряженная система:

$$\begin{cases} 2\Psi^\bullet = \Psi \circ \omega \\ \varphi^\bullet = -\text{vect}(\tilde{\Lambda} \circ \Psi) / 2. \end{cases} \quad (8)$$

где $\text{vect}(\cdot)$ обозначает векторную часть кватерниона, а \sim – сопряжение кватерниона.

Как видно, уравнения для переменных Ψ и Λ совпадают, а их решения различаются на мультипликативную константу. Используя это и введя обозначение [1]

$$\mathbf{p} = \text{vect}(\tilde{\Lambda} \circ \Psi) = \tilde{\Lambda} \circ \mathbf{c}_v \circ \Lambda, \quad (9)$$

где \mathbf{c}_v – произвольная векторная постоянная, сопряженную систему запишем так:

$$\begin{cases} \mathbf{p} = \tilde{\Lambda} \circ \mathbf{c}_v \circ \Lambda, \\ \dot{\varphi} = -\mathbf{p} / 2. \end{cases} \quad (10)$$

Следует отметить, что применение этого приема [1], основанного на самосопряженности дифференциальной кватернионной системы уравнений (1) (замена кватернионной сопряженной переменной Ψ на векторную переменную \mathbf{p} (9)) позволяет понизить размерность краевой задачи, получаемой после применения принципа максимума, на четыре.

Условие максимума функции Гамильтона-Понтрягина (7) дает следующую структуру оптимального управления

$$\mathbf{M}^{opt} = \varphi / 2. \quad (11)$$

Таким образом, вектор-функция управления КА носит непрерывный характер. Из (1), (2), (10), (11) имеем

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \varphi / 2, \quad \boldsymbol{\omega}'' = -\mathbf{p} / 4, \quad \boldsymbol{\omega}''' = -\dot{\mathbf{p}} / 4 = \boldsymbol{\omega}'' \times \boldsymbol{\omega},$$

где символ \times означает векторное произведение.

Следовательно, на всем интервале времени движения оптимальная угловая скорость КА должна удовлетворять векторному дифференциальному уравнению третьего порядка [9]

$$\boldsymbol{\omega}''' = \boldsymbol{\omega}'' \times \boldsymbol{\omega}. \quad (12)$$

Решение поставленной задачи оптимального управления сводится, тем самым, к решению краевой задачи (1), (12), (3), (4).

4. Аналитическое решение задачи оптимального разворота КА в классе конических движений. Будем искать решение уравнений (1), (12) в классе конических движений. Для этого оптимальную угловую скорость КА представим в виде

$$\boldsymbol{\omega} = \tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_1 \alpha \sin \Omega t + \mathbf{i}_2 \alpha \cos \Omega t + \mathbf{i}_3 \Omega) \circ \mathbf{K}, \quad (13)$$

где \mathbf{K} (кватернион) и α, Ω – неопределенные постоянные; при этом

$$\|\mathbf{K}\| = K_0^2 + K_1^2 + K_2^2 + K_3^2 = 1 \quad (14)$$

Отметим, что кватернион \mathbf{K} позволяет поворачивать вектор в круглой скобке в формуле (13) вокруг некоторой постоянной оси, проходящей через неподвижную точку КА.

Последовательно дифференцируя (13) три раза по переменной t , получим

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \alpha \Omega \tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_1 \cos \Omega t - \mathbf{i}_2 \sin \Omega t) \circ \mathbf{K}, \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\omega}'' = -\alpha \Omega^2 \tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_1 \sin \Omega t + \mathbf{i}_2 \cos \Omega t) \circ \mathbf{K}, \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\omega}''' = \alpha \Omega^3 \tilde{\mathbf{K}} \circ (-\mathbf{i}_1 \cos \Omega t + \mathbf{i}_2 \sin \Omega t) \circ \mathbf{K}. \quad (17)$$

Подставляя (13), (16), (17) в (12), можно убедиться в выполнении равенства. При этом отметим, что

$$\boldsymbol{\omega}''' = \boldsymbol{\omega}'' \times \boldsymbol{\omega} = (\boldsymbol{\omega}'' \circ \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega} \circ \boldsymbol{\omega}'') / 2.$$

Траектория движения КА при угловой скорости (13) из (1), (3) находится явно и имеет вид регулярной прецессии

$$\Lambda(t) = \Lambda_0 \circ \tilde{\mathbf{K}} \circ \exp\{\mathbf{i}_2 \alpha t / 2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 \Omega t / 2\} \circ \mathbf{K}, \quad (18)$$

где $\exp\{\cdot\}$ обозначает кватернионную экспоненту [1].

В выражения (13)-(18) входят пять произвольных постоянных $K_0, K_1, K_2, \alpha, \Omega$. Удовлетворим граничные условия задачи (3), (4). Из-за недостаточного количества произвольных постоянных в решении (13) на величины $|\boldsymbol{\omega}_0|$ и $\boldsymbol{\omega}_T$ будут наложены требования в ходе дальнейшего решения задачи; направление вектора начальной угловой скорости $\boldsymbol{\omega}_0^e = \boldsymbol{\omega}_0 / |\boldsymbol{\omega}_0|$ произвольно и задано. При $t=0$ из (13) имеем

$$\boldsymbol{\omega}_0 = |\boldsymbol{\omega}_0| \boldsymbol{\omega}_0^e = \tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_2 \alpha + \mathbf{i}_3 \Omega) \circ \mathbf{K}, \quad (19)$$

$$\|\boldsymbol{\omega}_0\| = \|\tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_2 \alpha + \mathbf{i}_3 \Omega) \circ \mathbf{K}\| = \|\tilde{\mathbf{K}}\| \|\mathbf{i}_2 \alpha + \mathbf{i}_3 \Omega\| \|\mathbf{K}\| = \alpha^2 + \Omega^2, \quad (20)$$

при $t=1$ (конечный момент времени) из (18) имеем

$$\Lambda_T = \Lambda_0 \circ \tilde{\mathbf{K}} \circ \exp\{\mathbf{i}_2\alpha/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3\Omega/2\} \circ \mathbf{K}, \quad (21)$$

при этом

$$\text{scal}(\tilde{\Lambda}_0 \circ \Lambda_T) = \text{scal}(\exp\{\mathbf{i}_2\alpha/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3\Omega/2\}), \quad (22)$$

где $\text{scal}(\cdot)$ обозначает векторную часть кватерниона. Из (14), (19)-(21) найдем величины $|\boldsymbol{\omega}_0|$, α , Ω , \mathbf{K} .

Представим (14), (21) в виде

$$(\mathbf{i}_2\alpha + \mathbf{i}_3\Omega) \circ \mathbf{K} - \mathbf{K} \circ \boldsymbol{\omega}_0 = 0,$$

$$\exp\{\mathbf{i}_2\alpha/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3\Omega/2\} \circ \mathbf{K} - \mathbf{K} \circ \tilde{\Lambda}_0 \circ \Lambda_T = 0$$

или в векторно-матричной форме с использованием кватернионных матриц m - и n -типов [11]:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -\alpha & -\Omega \\ 0 & 0 & -\Omega & \alpha \\ \alpha & \Omega & 0 & 0 \\ \Omega & -\alpha & 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & -\omega_{01} & -\omega_{02} & -\omega_{03} \\ \omega_{01} & 0 & \omega_{03} & -\omega_{02} \\ \omega_{02} & -\omega_{03} & 0 & \omega_{01} \\ \omega_{03} & \omega_{02} & -\omega_{01} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_0 \\ K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} m_0 & -m_1 & -m_2 & -m_3 \\ m_1 & m_0 & -m_3 & m_2 \\ m_2 & m_3 & m_0 & m_1 \\ m_3 & -m_2 & m_1 & m_0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} n_0 & -n_1 & -n_2 & -n_3 \\ n_1 & n_0 & n_3 & -n_2 \\ n_2 & -n_3 & n_0 & n_1 \\ n_3 & n_2 & -n_1 & n_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_0 \\ K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

где элементы матрицы коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (24) определяются компонентами кватернионов:

$$\begin{aligned} \mathbf{m} &= \exp\{\mathbf{i}_2\alpha/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3\Omega/2\}, \\ m_0 &= \cos(\alpha/2)\cos(\Omega/2), \quad m_1 = \sin(\alpha/2)\sin(\Omega/2), \\ m_2 &= \sin(\alpha/2)\cos(\Omega/2), \quad m_3 = \cos(\alpha/2)\sin(\Omega/2) \end{aligned} \quad (25)$$

и

$$\mathbf{n} = \tilde{\Lambda}_0 \circ \Lambda_T. \quad (26)$$

При этом

$$\|\mathbf{m}\| = 1, \quad (27)$$

$$\|\mathbf{n}\| = 1. \quad (28)$$

Отметим, что ранги матриц коэффициентов систем (23), (24) равны двум.

Выбирая из (23), (24) по два уравнения, получим СЛАУ

$$\begin{pmatrix} 0 & \omega_{01} & \omega_{02} - \alpha & \omega_{03} - \Omega \\ -\omega_{01} & 0 & -(\omega_{03} + \Omega) & \omega_{02} + \alpha \\ m_1 - n_1 & 0 & -(m_3 + n_3) & m_2 + n_2 \\ 0 & n_1 - m_1 & n_2 - m_2 & n_3 - m_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_0 \\ K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Определитель матрицы коэффициентов СЛАУ (29) должен быть равен нулю. Отсюда с учетом (20), (21), (24), (25) получим

$$|\boldsymbol{\omega}_0| = (m_2\alpha + m_3\Omega) / (n_1\omega_{01}^e + n_2\omega_{02}^e + n_3\omega_{03}^e). \quad (30)$$

Из (4.8), (4.10), (4.18) с учетом (4.13) следует два уравнения для определения величин α , Ω

$$\left. \begin{aligned} (\alpha^2 + \Omega^2)(n_1\omega_{01}^e + n_2\omega_{02}^e + n_3\omega_{03}^e)^2 - (m_2\alpha + m_3\Omega)^2 &= 0 \\ \text{scal}(\tilde{\Lambda}_0 \circ \Lambda_T) - \cos(\alpha/2)\cos(\Omega/2) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (31)$$

Величина $|\boldsymbol{\omega}_0|$ определяется по формуле (30) после решения системы (31).

В системе (29) нижнее уравнение заменим уравнением (14). Из первых трех уравнений системы (29) выражаются величины K_0, K_1, K_2 через величину K_3 :

$$K_0 = A_0 K_3 / D, K_1 = A_1 K_3 / D, K_2 = A_2 K_3 / D, \quad (32)$$

где

$$A_0 = \omega_{01} [- (\omega_{03} + \Omega)(m_2 + n_2) + (\omega_{02} + \alpha)(m_3 + n_3)], \quad (33)$$

$$A_1 = \omega_{01} \left[(\Omega - \omega_{03}) \frac{D}{\omega_{01}^2} - (m_2 + n_2)(\omega_{02} - \alpha) - (m_1 + n_1) \frac{\omega_{02}^2 - \alpha^2}{\omega_{01}} \right], \quad (34)$$

$$A_2 = \omega_{01} [(m_1 - n_1)(\omega_{02} + \alpha) + (m_2 + n_2)\omega_{01}], \quad (35)$$

$$D = \omega_{01} [(m_1 - n_1)(\omega_{03} + \Omega) + (m_3 + n_3)\omega_{01}]. \quad (36)$$

Из (14), (33)-(36) имеем

$$K_3 = \left[1 + (A_0 / D)^2 + (A_1 / D)^2 + (A_2 / D)^2 \right]^{1/2}. \quad (37)$$

После определения K_3 из (37) K_0, K_1, K_2 определяются по формуле (32). Граничное условие по угловой скорости КА в конечный момент времени T в безразмерных переменных ($T=1$) должно иметь вид

$$\omega(T) = \omega_T = \tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_1 \alpha \sin \Omega + \mathbf{i}_2 \alpha \cos \Omega + \mathbf{i}_3 \Omega) \circ \mathbf{K}. \quad (38)$$

Таким образом, в случаях, когда на граничные условия по угловой скорости КА наложены ограничения вида (30), (35) (это означает, что вектор ω на всем интервале времени движения принадлежит некоторой конической поверхности, определяемой в пространстве произвольными заданными граничными условиями по угловому положению КА Λ_0, Λ_T и произвольным заданным направлением вектора начального значения угловой скорости КА ω_0^e), траектория углового движения сферически симметричного КА находится в классе конических движений и определяется явными аналитическими выражениями (13), (18).

Оптимальный управляющий момент из (2), (13)

$$\mathbf{M} = \dot{\omega} = \alpha \Omega \tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_1 \cos \Omega t - \mathbf{i}_2 \sin \Omega t) \circ \mathbf{K}, \quad (39)$$

$$|\mathbf{M}|^2 = \alpha^2 \Omega^2 = const. \quad (40)$$

Оптимальное значение функционала качества в безразмерных переменных составляет величину

$$J = \int_0^1 |\mathbf{M}|^2 dt = \alpha^2 \Omega^2. \quad (41)$$

Из выражений (39), (11) и (10) можно найти сопряженные переменные Φ и \mathbf{p} . Тем самым, задача при существующих ограничениях решена полностью.

Приведем алгоритм решения задачи оптимального разворота сферически симметричного КА (твердого тела) в классе конических движений в безразмерных переменных:

1) по заданным кватернионам Λ_0, Λ_T (3), единичному вектору ω_0^e из (4), времени $T=1$ и формулам (31), (30) (с учетом (25), (26)) определяются величины $\alpha, \Omega, |\omega_0|$ (или иначе $|\omega_0|^{вычисл}$);

2) используя $\Lambda_0, \Lambda_T, \alpha, \Omega, |\omega_0|$ по формулам (32)-(37) находим компоненты кватерниона \mathbf{K} ;

3) по формуле

$$\omega_0^{вычисл} = |\omega_0|^{вычисл} \omega_0^e$$

и формуле (38)

$$\omega_T^{вычисл} = \tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_1 \alpha \sin \Omega + \mathbf{i}_2 \alpha \cos \Omega + \mathbf{i}_3 \Omega) \circ \mathbf{K}$$

вычисляются значения векторов $\omega_0^{вычисл}, \omega_T^{вычисл}$;

4) вычисленные значения $\omega_0^{вычисл}, \omega_T^{вычисл}$ сравниваются с заданными в (4) величинами ω_0, ω_T ;

5) если равенство в п. 4 алгоритма выполняется, то оптимальное решение задачи находится в классе конических движений; при этом угловая скорость КА, траектория его углового движения, вектор управляющего момента и значение функционала оптимизации находятся по формулам (13), (18), (39), (41);

6) сопряженные переменные задачи Φ , \mathbf{p} находятся по формулам (10), (11), (39).

5. Численный пример. В данном разделе приводится пример решения задачи оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота сферически симметричного КА в классе конических движений. Ниже на рисунке представлены графики изменения во времени компонент угловой скорости КА $\omega_i(t)$, $i=\overline{1,3}$, векторной части кватерниона ориентации КА $\Lambda_i(t)$, $i=\overline{1,3}$ и компонент вектора управляющего момента $M_i(t)$, $i=\overline{1,3}$.

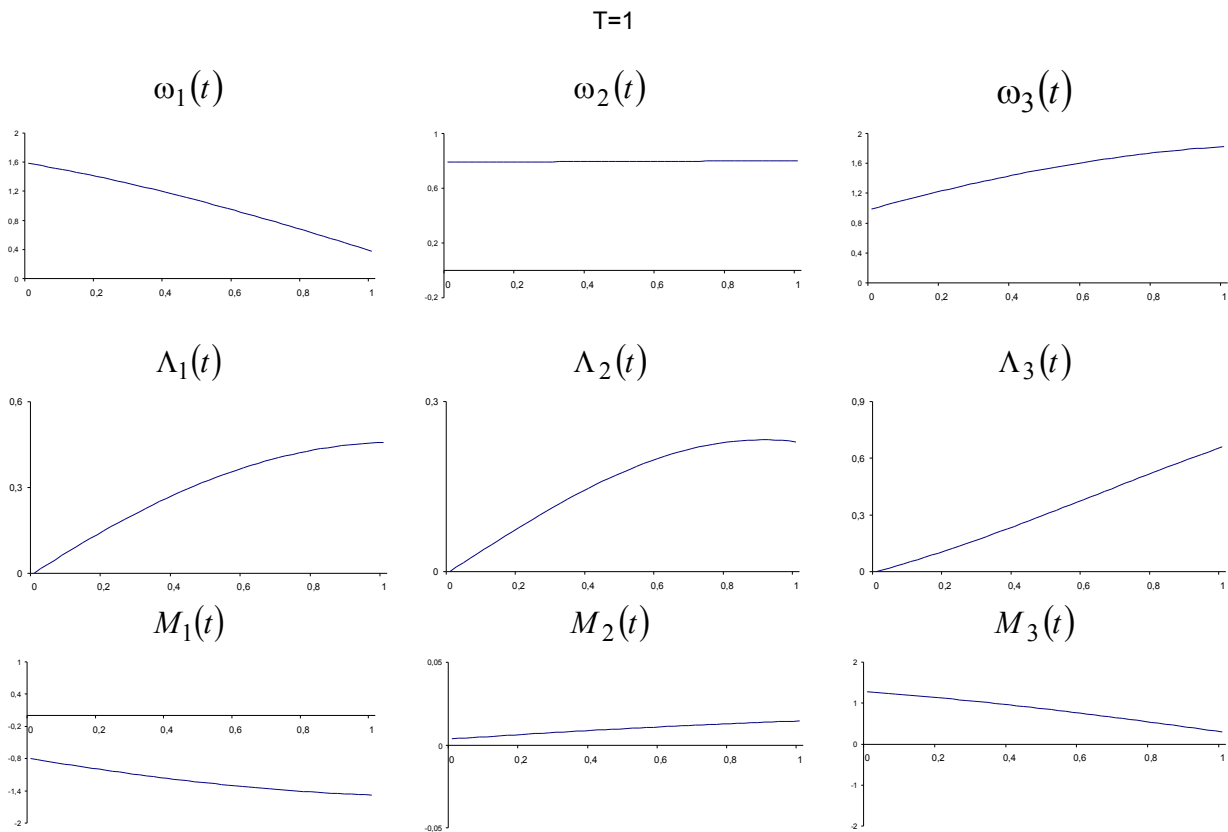
На рисунке приведены результаты решения задачи по формулам п. 4 статьи. Расчеты проводились для значений:

$$\Lambda_0 = (1, 0, 0, 0), \Lambda_T = (0.5498, 0.4582, 0.2291, 0.6598),$$

$$\omega_0 = (1.5834, 0.7917, 0.9896), \omega_T = (0.3760, 0.8014, 1.8247),$$

которые удовлетворяют ограничениям п. 4.

Вначале по формулам (31), (30), (32)-(37) находились величины α , Ω , $|\omega_0|$, K_0, K_1, K_2, K_3 ($\alpha=1.8584$, $\Omega=0.8121$, $|\omega_0|=2.028$, $K_0=0.3398$, $K_1=0.3451$, $K_2=0.6157$, $K_3=0.6216$), затем, по формулам (13), (39), (18), определялись векторы ω , \mathbf{M} и кватернион Λ .



Отметим, что кватернион ориентации КА $\Lambda(t)$ может быть двузначным [1], то есть Λ и $-\Lambda$ соответствуют одному и тому же угловому положению КА в пространстве.

Заключение. Представленные в статье аналитические решения задачи оптимального разворота сферически симметричного КА (твердого тела) могут найти свое применение при построении систем управления КА, как и известное аналитическое решение задачи в классе плоских эйлеровых разворотов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-00165).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бранец В.Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. М.: Наука, 1973. 320 с.
2. Scrivener S.L. Survey of time-optimal attitude maneuvers / S.L. Scrivener, R.C. Thompson // J. guidance, control, and dynamics. 1994. V. 17. № 2. P. 225-233.
3. Петров Б.Н. Аналитическое решение задачи управления пространственным поворотным маневром / Б.Н. Петров, В.А. Боднер, К.Б. Алексеев // Докл. АН СССР. 1970. Т. 192. № 6. С. 1235-1238.
4. Бранец В.Н. Оптимальный разворот твердого тела с одной осью симметрии/ В.Н. Бранец, М.Б. Черток, Ю.В. Казначеев // Космич. исслед. 1984. Т. 22. Вып. 3. С. 352-360.
5. Сиротин А.Н. Оптимальное управление переориентацией симметричного твердого тела из положения покоя в положение покоя / А.Н. Сиротин // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 1. С. 36-47.
6. Сиротин А.Н. Об оптимальной по быстродействию пространственной переориентации в положение покоя вращающегося сферически-симметричного твердого тела / А.Н. Сиротин // Изв. РАН. МТТ. 1997. № 3. С. 18-27.
7. Молоденков А.В. Кватернионное решение задачи оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота твердого тела / А.В. Молоденков // Проблемы механики и управления: сб. науч. тр. Пермь: ПГУ, 1995. С. 122-131.
8. Молоденков А.В. Решение задачи оптимального разворота сферически симметричного космического аппарата для одного частного случая / А.В. Молоденков // Системный анализ и управление космическими комплексами: сб. тр. 6-й Международ. конф., Крым, г. Евпатория. М.: МАИ, 2001. С. 42.
9. Молоденков А.В. Решение задачи оптимального разворота сферически симметричного космического аппарата с ограниченным и импульсным управлением при произвольных граничных условиях / А.В. Молоденков, Я.Г. Сапунков // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2004. № 2. С. 85-196.
10. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. М.: Наука, 1961. 384 с
11. Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения / Ю.Н. Челноков. М.: Физматлит, 2006. 512 с.

Сапунков Яков Григорьевич –
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Вычислительный эксперимент
в механике» Саратовского государственного
университета им. Н.Г. Чернышевского

Yakov G. Sapunkov –
Ph.D., Associate Professor
Department of Computing Experiment in Mechanics,
Chernyshevsky Saratov State University

Молоденков Алексей Владимирович –
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
«Механика, навигация и управление
движением» Института проблем точной
механики и управления РАН, г. Саратов

Alexei V. Molodenkov–
Ph.D., Senior Researcher
Laboratory of Mechanics, Navigation
and Motion Control,
Institute of Precision Mechanics Problems and Control
of the Russian Academy of Sciences, Saratov

Статья поступила в редакцию 12.05.12, принята к опубликованию 20.05.13

ФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 517.958:532.5:536.25

И.А. Ермолаев, А.С. Шаповалов, В.Б. Байбурин

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШАННЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Методом конечных элементов Галёркина решается задача смешанной тепловой конвекции в горизонтальных и вертикальных плоскопараллельных каналах. Особенностью задачи является наличие граничных источников тепла конечных размеров.

Математическое моделирование, метод конечных элементов, смешанная термогравитационная конвекция

I.A. Ermolaev, A.S. Shapovalov, V.B. Baiburin

SIMULATION OF MIXED CONVECTION FLOWS IN THE COOLING SYSTEM CHANNELS BY A FINITE ELEMENTS METHOD

The results of the finite elements Galerkin method the numerical simulation of mixed thermo- convection in the horizontal and vertical channels is provided. The key feature of the problem is the presence of the border heat sources possessing final sizes.

Mathematical simulation, finite elements method, mixed thermogravitational convection

Введение. Обеспечение оптимальных тепловых режимов изделий современной микроэлектроники, оптики, вакуумной и плазменной электроники является важной проблемой конструирования и одним из условий их дальнейшего развития. Значительная часть систем охлаждения таких приборов основана на смешанной, вынужденной и естественной тепловой конвекции. Вследствие этого к настоящему времени выполнено значительное количество экспериментальных и теоретических исследований смешанных конвективных течений, включая случаи полностью развитых потоков, например [1-3], и конвекции на начальном участке, например [4-6], включая случаи как симметричного [3], так и асимметричного [1, 2, 5, 6] нагрева, постоянного вдоль оси канала. Однако в системах охлаждения нагрев часто локализован на участках конечных размеров. Между тем конвекция в присутствии локальных источников тепла изучена менее подробно. Так, смешанная конвекция с локальными источниками тепла изучалась численно и экспериментально отдельно в горизонтальных [7-9] и в вертикальных каналах [10]. При этом практический и теоретический интерес представляет сравнительный анализ конвективного теплообмена в горизонтально и вертикально ориентированных каналах, трубах, щелях и полостях.

В настоящей работе методами, представленными в [11], моделируются смешанные термоконвективные течения на начальных участках двухмерных плоскопараллельных горизонтальных и вертикальных каналов с источниками тепла конечных размеров на границах. Получены зависимости полей температуры и течения от критериальных чисел, проведён сравнительный анализ особенностей конвективного теплообмена.

Постановка задачи, модель, метод решения. Рассматривалось двухмерное стационарное естественное и вынужденное конвективное течение воздуха. До начального момента времени поле температур считалось однородным, температура равна температуре окружающей среды, воздух находился в гидростатическом равновесии в поле силы тяжести, внешнее течение отсутствовало. В на-

чальный момент времени на части стенки плоскопараллельного канала возникал тепловой источник, характеризуемый постоянным равномерным тепловым потоком, одновременно возникало внешнее течение. Размер теплового источника равнялся толщине канала H . При решении задачи использовались нестационарные двумерные уравнения Буссинеска [12], стационарные решения получены методом установления. В качестве масштабов расстояния, времени, скорости и температуры были выбраны $H, H^2/\nu, \nu/H, q_0H/\lambda$. Безразмерные переменные были равны соответственно $X=x/H, Y=y/H, \tau=\nu t/H^2, U=uH/\nu, V=vH/\nu, \theta=\lambda\vartheta/q_0H$. Здесь x, y – координаты, t – время, ν – коэффициент кинематической вязкости, u, v – составляющие скорости в проекции на оси x, y соответственно, $\vartheta = T - T_0, T_0$ – начальная температура; λ – коэффициент теплопроводности, q_0 – плотность теплового потока. Безразмерные уравнения Буссинеска в переменных «вихрь скорости – функция тока – температура» записывались в декартовой системе координат как

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \psi}{\partial Y} \frac{\partial \omega}{\partial X} - \frac{\partial \psi}{\partial X} \frac{\partial \omega}{\partial Y} = \Delta \omega - Gr_y \frac{\partial \theta}{\partial X} + Gr_x \frac{\partial \theta}{\partial Y}, \quad (1)$$

$$\Delta \psi = \omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \psi}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{\partial \psi}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr} \Delta \theta. \quad (3)$$

где ω, ψ – вихрь скорости, функция тока соответственно, $Gr_y = g_y \beta q_0 H^4 / \lambda \nu^2, Gr_x = g_x \beta q_0 H^4 / \lambda \nu^2$ – числа Грасгофа, $Pr = \nu / \chi$ – число Прандтля, g_x, g_y – составляющие ускорения силы тяжести в проекции на оси, β – температурный коэффициент объемного расширения, χ – коэффициент температуропроводности.

Граничные условия для системы (1)-(3) имели вид: на боковых границах канала вне источника тепла $\theta=0, \psi=Re, \partial\psi/\partial n=0$ (условия «прилипания»), температура равна температуре окружающей среды); на источнике тепла $\psi=\partial\psi/\partial n=0, \partial\theta/\partial n=1$ (условия «прилипания», плотность теплового потока); на входных границах $\theta=0, \omega=0, \partial\psi/\partial n=0$ (безвихревой поток на входе, его температура равна температуре окружающей среды); на выходной границе $\partial\psi/\partial n=0, \partial\omega/\partial n=0, \partial\theta/\partial n=0$ (условия «удалённой» границы). Здесь Re – критерий Рейнольдса, значения ω на твердых непроницаемых границах определялись по формуле Вудса, в начальный момент времени $\omega(X, Y, 0) = \psi(X, Y, 0) = \theta(X, Y, 0) = 0$.

Задача решалась методом конечных элементов Галеркина. Температура, вихрь скорости и функция тока аппроксимировались линейной комбинацией не зависящих от времени функций формы на линейных треугольных конечных элементах. Для временной аппроксимации использовалась неявная двухслойная схема.

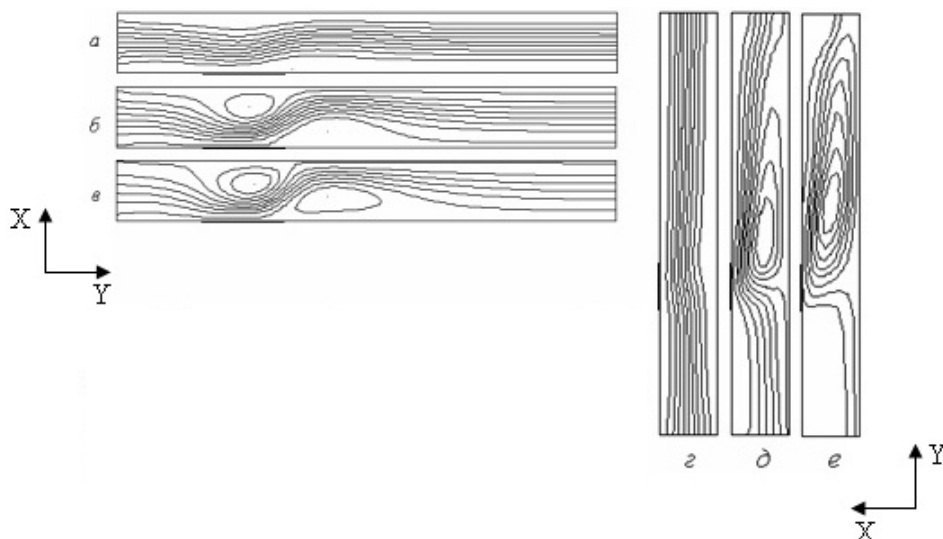


Рис. 1. Поля течений в горизонтальном (а, б, в) и вертикальном (г, д, е) каналах при $Re=10$: а, г – $Gr=10^4$, б, д – 10^5 , в, е – 10^6

Уравнения (1)-(3) решались последовательно, каждый временной шаг начинался с вычисления поля температуры (3), затем определялись граничные условия для вихря скорости, и решалось уравнение (1), далее поле вихря скорости корректировалось и определялось поле функции тока (2). Расчеты проводились по конечно-элементной программе EPEMAI_THERMO (свидетельство №2012611497), реализующей данный алгоритм. Расчеты проводились на неравномерной сетке. Про-

верка на более подробной сетке показала, что относительное изменение максимума температуры не превышает 1%.

Результаты. Влияние выталкивающей силы, обусловленной локальным нагревом, на внешний поток заключается в возникновении вторичного вихревого течения, деформирующего профиль скорости основного потока и перераспределяющего локальные коэффициенты теплоотдачи и трения. Структура вторичного течения в горизонтальных и вертикальных каналах имеет ряд отличий. Так, в горизонтальном канале, показанном на рис. 1 а, б, в, с увеличением числа Грасгофа вторичное течение приобретает вид двух несимметричных поперечных вихрей. Линией на стенке показан нагреваемый участок. Интенсивность вихря, вращающегося против часовой стрелки заметно выше, вихри смещены относительно источника тепла вниз по потоку. В вертикальном канале, показанном на рис. 1 г, д, е, вторичное течение имеет вид одиночного поперечного вихря более высокой интенсивности, вытянутого вдоль оси канала.

Следует отметить, что влияние вторичных вихрей в горизонтальном канале смещает внешнее течение к противоположной стенке, увеличивая его скорость на этом участке (рис. 1 б, в). В вертикальном канале основной поток вследствие взаимодействия с вторичным вихрем, напротив, смещён к стенке с тепловым источником, также увеличивая скорость потока вблизи источника тепла. Всё это позволяет предположить более эффективную теплоотдачу в вертикальном канале, а также наибольшее усиление теплоотдачи и трения вблизи источника тепла и на некотором участке границы за источником тепла.

Зависимости структуры течения от интенсивности внешнего потока для горизонтального и вертикального канала качественно близки. Во всех случаях рост критерия Re приводит к уменьшению интенсивности вихрей и к их смещению по направлению внешнего течения.

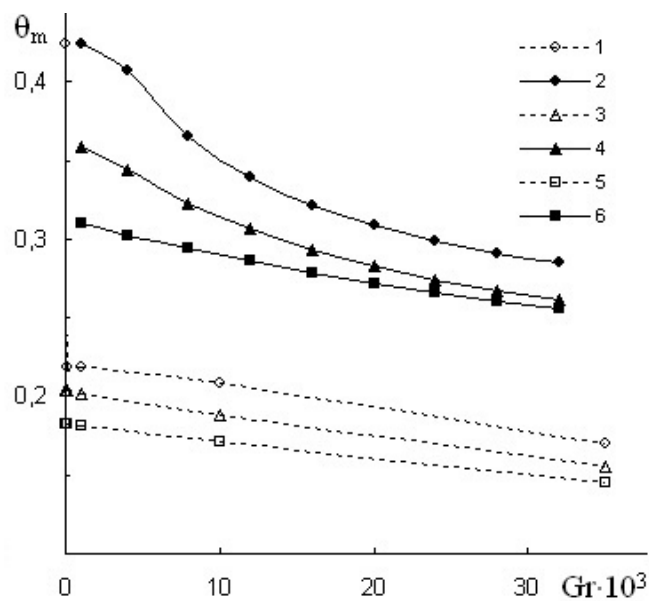


Рис. 2. Зависимость максимума температуры от интенсивности конвективного и внешнего течения для горизонтального (сплошные линии) и вертикального (пунктирные линии) каналов: 1, 2 – $Re=0$; 3, 4 – $Re=5$; 5, 6 – $Re=10$

В условиях слабой конвекции при $Gr < 10^4$ внешнее течение лишь немного деформируется выталкивающей силой, обусловленной нагревом, в условиях же развитого конвективного течения профиль скорости внешнего потока значительно изменяется по длине канала.

Рис. 2 иллюстрирует количественные отличия конвективного теплообмена в каналах различной ориентации. Теплообмен в режиме теплопроводности ($Gr=0$, $Re=0$) не зависит от расположения канала и характеризуется одинаковым максимумом температуры (крайние левые точки кривых 1 и 2). Сравнение теплообмена в горизонтальном (кривые 2, 4, 6) и вертикальном (кривые 1, 3, 5) каналах с источником тепла выявило значительно более низкую температуру при вертикальном расположении. Так, слабая конвекция при $Gr < 10^4$ незначительно влияет на температуру в горизонтальном канале, но существенно – на температуру в вертикальном канале. Здесь максимум безразмерной температуры резко уменьшается от 0,42 до 0,22 даже при чрезвычайно слабой конвекции $Gr < 10^3$. В режиме развитого конвективного течения при $Gr > 10^4$ зависимость максимума температуры $\theta_m(Gr)$ становится

близкой к линейной для каналов любой ориентации. Зависимость температуры от интенсивности внешнего течения $\theta_m(Re)$ является почти линейной для вертикального канала и нелинейной для горизонтального канала. Температура воздуха в горизонтальном канале даже при наличии внешнего течения заметно выше, чем в вертикальном канале при отсутствии такового.

Заключение. Таким образом, полученные результаты моделирования смешанных конвективных течений на начальных участках плоскопараллельных каналов с локальными источниками тепла позволяют сделать вывод о более эффективной теплоотдаче при вертикальном расположении. Количественные оценки говорят об уменьшении температуры почти в два раза. При этом даже слабая естественная конвекция в вертикальном канале может обеспечить более эффективное охлаждение, нежели смешанное конвективное течение в канале, расположенном горизонтально. Результаты позволяют формулировать рекомендации при конструировании систем охлаждения, основанных на тепловой естественной и смешанной конвекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ostrach S. Heat transfer augmentation in laminar fully developed channel flow by means of heating from below / S. Ostrach, Y. Kamotani // *Trans. ASME. Ser. C. J. Heat Transfer*. 1975. V.97. No.2. P. 220-225.
2. Chiu K. C. Mixed convection between horizontal plates. II. Fully developed flow / K. C. Chiu, J. Ouazzani, F. Rosenberger // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 1987. V. 30. No. 8. P. 1655-1662.
3. Negendra H. R. Interaction of free and forced convection in horizontal tubes in transition regime / H. R. Negendra // *J. Fluid Mech*. 1973. V. 57. Pt. 2. P. 269-288.
4. Maughan J.R. Regions of heat transfer enhancement for laminar mixed convection in a parallel plate channel / J.R. Maughan, F.P. Incropera // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1990. V. 33. № 3. P. 555-570.
5. Chiu K. C. Mixed convection between horizontal plates. I. Entrance effects / K. C. Chiu, F. Rosenberger // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 1987. V. 30. No. 8. P. 1645-1654.
6. Nicolas X. Two-dimensional analysis of the Poiseuille – Benard flow in rectangular channel heated from below / X. Nicolas, A. Mojtabi // *Phys. Fluids*. 1997. V. 9. №. 2. P. 337–348.
7. Ермолаев И.А. Смешанная конвекция в горизонтальном канале при локальном нагреве снизу / И.А. Ермолаев, А.И. Жбанов // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2003. № 1. С. 33-40.
8. Flow structure and heat transfer in a horizontal converging channel heated from below / K. S. Wilson, K. C. Chiu, C. J. Richards, Y. Jaluria // *Physics fluids*. 2000. V. 12. No 8. P. 2128-2136.
9. Lai F. C. Oscillatory mixed convection in horizontal porous layers locally heated from below / F. C. Lai, F. A. Kulacki // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1991. V. 34. No 3. P. 887-890.
10. Elpidorou D. Convection in Vertical Channel with a Finite Wall Heat Source / D. Elpidorou, V. Prasad, V. Modi // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1991. V. 34. № 2. P. 573-578.
11. Ермолаев И. А. Моделирование смешанной термогравитационной конвекции в области с нерегулярной геометрией и неоднородными условиями на границах / И. А. Ермолаев, А. С. Шаповалов, В. Б. Байбури // *Вестник СГТУ*. 2011. №4. Вып. 1. С. 88-93.
12. Гершуни Г.З. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. М.: Наука, 1972. 392 с.

Ермолаев Игорь Анатольевич – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер кафедры «Прикладная физика» Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Igor A. Ermolaev – Ph. D., Associate Professor
Department Applied Physics,
Chernyshevsky Saratov State University

Шаповалов Александр Степанович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная физика» Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Aleksandr S. Shapovalov – Dr. Sc., Professor
Head of Department Applied Physics,
Chernyshevsky Saratov State University

Байбури Вил Бариевич – доктор физико-математических наук, профессор,

Vil B. Baiburin – Dr. Sc., Professor

заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Head: Department Software for Computing Machinery and Automated Systems,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.04.13, принята к опубликованию 10.05.13

УДК 629.7

А.А. Копичева

**О ВЫБОРЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОЙ РАЗНОВИДНОСТИ АЛГОРИТМОВ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ОРИЕНТАЦИИ НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ЭЙЛЕРА
С ВВЕДЕННЫМИ ЧЛЕНАМИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ
В УСЛОВИЯХ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА С БОЛЬШИМИ УГЛАМИ ТАНГАЖА**

Сравниваются погрешности БИСО для двух типов алгоритмов функционирования, построенных на основе кинематических уравнений Эйлера с введенными членами горизонтальной коррекции: с использованием сигналов инерциальных датчиков в объектовом базисе и с их предварительным пересчетом к горизонтальному базису. Методом математического моделирования оценены погрешности определения углов ориентации в зависимости как от типа алгоритмов ориентации, так и от уровня ошибок измерителей при задании режимов движения с большими углами тангажа.

Ориентация, гироскоп, акселерометр, погрешность, математическое моделирование

A.A. Kopicheva

**ON THE CHOICE OF THE PREFERABLE ALGORITHMS FOR STRAPDOWN INERTIAL
ORIENTATIONS SYSTEMS ON THE BASIS OF KINEMATIC EULERS EQUALIZATIONS BY
ENTERING MEMBERS OF HORIZONTAL CORRECTION
UNDER MOTION WITH HIGH PITCH ANGLES**

The SISO errors are compared for two types of functioning algorithms. The algorithms are built on the basis of the kinematics Eulers equalizations by entering the members of horizontal correction: using the inertial sensors signals in the objective trihedron and converting them to the axes of horizontal trihedron. The mathematical modelling method has been used to estimate the errors of orientation corners determination depending both on the type of orientation algorithms and the level of measuring devices errors when setting the movement modes with large pitch angles.

Orientation, gyroscope, accelerometer, error, mathematical modeling

В настоящее время бесплатформенные инерциальные системы ориентации (БИСО) находят широкое применение на различных подвижных объектах. В качестве алгоритмов функционирования БИСО, применяемых в навигационно-топографических внутритрубных инспектирующих снарядах (НТ ВИС), успешно используются кинематические дифференциальные уравнения Эйлера с введенными членами горизонтальной и азимутальной коррекции [1-7]. В [6] показано, что для БИСО, состоящей из ГИУС прецизионного класса точности ($\omega_0 < 0.1$ угл.град/ч, $\delta K_m < 10^{-5}$) и ИКУ прецизионного ($W_0 < 10^{-5}$ g, $\delta K_m < 10^{-5}$) или среднего ($W_0 = 10^{-5} \div 10^{-3}$ g, $\delta K_m = 10^{-4} \div 10^{-3}$) классов точности, более целесообразно в качестве алгоритмов функционирования использовать кинематические уравнения Эйлера с настройкой на период Шулера и предварительным приведением сигналов ДПИ к горизонтальному базису. Данный вывод характерен для условий работы БИСО в составе НТ ВИС, при характерном движе-

нии основания в штатных режимах (при малых углах тангажа: <20 угл.град.). Однако в гористой местности, например на Урале или на Кавказе (МГ Дзуарикау – Цхинвал, Ду 300 мм), газопроводы могут прокладываться с большими углами тангажа (>20 угл.град), что при использовании алгоритмов Эйлера в объектовой системе координат может привести к их неустойчивости и, как следствие, к увеличению погрешностей.

Целью данной работы является сравнительное исследование методических погрешностей двух модификаций алгоритмов работы БИСО для режимов движения основания с большими углами тангажа (20...60 угл.град.), а также оценка погрешностей определения параметров ориентации в зависимости от уровня погрешностей датчиков первичной информации (ДПИ) при данных условиях движения.

В состав БИСО входят закрепленные на корпусе объекта трехкомпонентный гироскопический измеритель угловой скорости (ТГИУС), трехкомпонентный измеритель кажущегося ускорения (ТИКУ), а также интерфейс, АЦП и бортовой компьютер (БК), в котором непосредственно реализуются исследуемые алгоритмы.

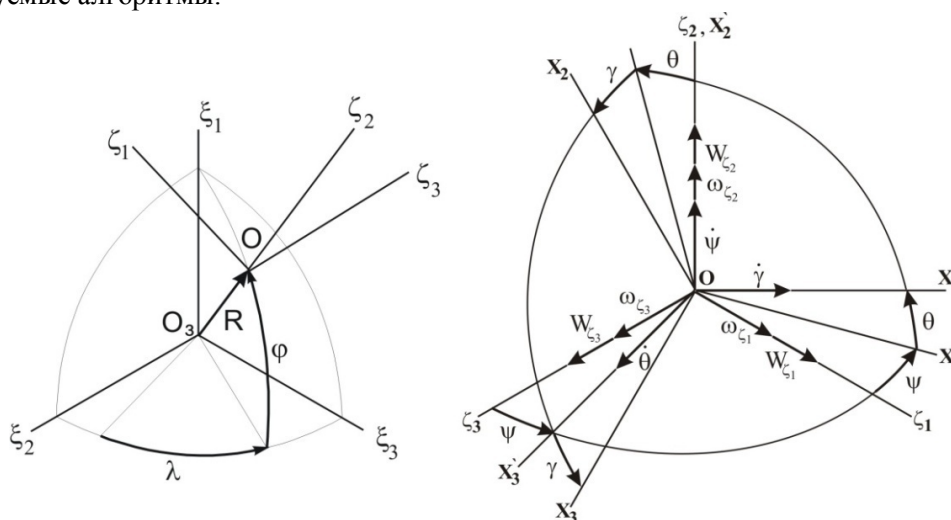


Рис. 1. Опорные системы координат и схема поворотов НТ ВИС

Вводятся в рассмотрение следующие правые ортогональные системы координат (рис. 1): ξ – инерциальная; ζ – азимутально-свободная горизонтная [1], ось ζ_2 которой направлена по вертикали места, а оси ζ_1 и ζ_3 лежат в плоскости горизонта; X – система координат, связанная с подвижным объектом (НТ ВИС), причем OX_1 – продольная, OX_2 – нормальная, OX_3 – поперечная, направленная на правый борт, оси. Точку O совмещаем с центром масс НТ ВИС; ψ, θ, γ – углы рыскания, тангажа и крена соответственно. Здесь за положительный угол ψ принят угол, отсчитываемый против часовой стрелки. На рис. 1 приняты следующие обозначения: λ, ϕ – углы географических долготы и широты места; R – радиус Земли, принятой за сферу; O_3 – центр Земли; $\bar{\omega}_{\zeta_i}, \bar{W}_{\zeta_i}$ ($i = \overline{1,3}$) – компоненты переносной угловой скорости системы координат ζ и кажущегося ускорения точки O по ее осям; $\bar{\omega}_{x_i}, \bar{W}_{x_i}$ ($i = \overline{1,3}$) – компоненты переносной угловой скорости НТ ВИС и кажущегося ускорения точки O по осям OX_i ($i = \overline{1,3}$) соответственно.

В данной работе рассматриваются два типа идентичных по своей структуре алгоритмов ориентации (1) и (4) на основе кинематических уравнений Эйлера [1, 5]. Знаком \circ в уравнениях обозначены оценки соответствующих параметров.

Первая модификация. Алгоритмы с использованием угловых скоростей в связанных осях [1, 4]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\gamma}}_x(t) &= \hat{\omega}_{x1}(t) - (\hat{\omega}_{x2}(t) \cdot \cos \hat{\gamma}_x(t) - \hat{\omega}_{x3}(t) \cdot \sin \hat{\gamma}_x(t)) \cdot \operatorname{tg} \hat{\theta}_x(t) + K_\gamma \Delta \hat{\gamma}_x(t) + \int K_\gamma^I \cdot \Delta \hat{\gamma}_x(t) d\tau; \\ \dot{\hat{\theta}}_x(t) &= \hat{\omega}_{x2}(t) \cdot \sin \hat{\gamma}_x(t) + \hat{\omega}_{x3}(t) \cdot \cos \hat{\gamma}_x(t) + K_\theta \Delta \hat{\theta}_x(t) + \int K_\theta^I \cdot \Delta \hat{\theta}_x(t) d\tau; \\ \dot{\hat{\psi}}_x(t) &= (\hat{\omega}_{x2}(t) \cdot \cos \hat{\gamma}_x(t) - \hat{\omega}_{x3}(t) \cdot \sin \hat{\gamma}_x(t)) / \cos \hat{\theta}_x(t) + K_\psi \Delta \hat{\psi}_x(t) + \int K_\psi^I \cdot \Delta \hat{\psi}_x(t) d\tau. \end{aligned} \quad (1)$$

По сигналам акселерометров \bar{W}_x вычисляются оценки углов тангажа и крена:

$$\hat{\theta}_a(t) = \arctg\left(\frac{\widehat{W}_{x1}(t)}{\sqrt{\widehat{W}_{x2}^2(t) + \widehat{W}_{x3}^2(t)}}\right); \quad \hat{\gamma}_a(t) = \arctg\left(-\frac{\widehat{W}_{x3}(t)}{\widehat{W}_{x2}(t)}\right), \quad (2)$$

На основе (1) и (2) определяют ошибки этих углов, используемые для организации коррекции в кинематических уравнениях:

$$\Delta\theta_x(t) = \hat{\theta}_a(t) - \theta_x(t); \quad \Delta\gamma_x(t) = \hat{\gamma}_a(t) - \gamma_x(t). \quad (3)$$

Вторая модификация. Алгоритмы с приведением угловых скоростей к плоскости горизонта [2]:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_\zeta(t) &= (\hat{\omega}_{\zeta 1}(t) + \omega_{\zeta 1}^k(t))\sin\hat{\psi}_\zeta(t) + (\hat{\omega}_{\zeta 3}(t) + \omega_{\zeta 3}^k(t))\cos\hat{\psi}_\zeta(t); \\ \hat{\gamma}_\zeta(t) &= [(\hat{\omega}_{\zeta 1}(t) + \omega_{\zeta 1}^k(t))\cos\hat{\psi}_\zeta(t) - (\hat{\omega}_{\zeta 3}(t) + \omega_{\zeta 3}^k(t))\sin\hat{\psi}_\zeta(t)]\cos^{-1}\hat{\theta}_\zeta(t); \\ \hat{\psi}_\zeta(t) &= -[(\hat{\omega}_{\zeta 1}(t) + \omega_{\zeta 1}^k(t))\cos\hat{\psi}_\zeta(t) - (\hat{\omega}_{\zeta 3}(t) + \omega_{\zeta 3}^k(t))\sin\hat{\psi}_\zeta(t)]g\hat{\theta}_\zeta(t) + \hat{\omega}_{\zeta 2}(t) + \omega_{\zeta 2}^k(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь горизонтальная коррекция строится по проекциям сигналов акселерометров на оси горизонтного географического сопровождающего трехгранника:

$$\begin{aligned} -\omega_{\zeta 1}^k(t) &= K_\gamma \frac{\widehat{W}_{\zeta 3}}{g}(t) + \int_{t_0}^t K_\gamma^I \cdot \frac{\widehat{W}_{\zeta 3}}{g}(t) d\tau - \omega_{\zeta 1}^k(t_0); \\ \begin{bmatrix} \widehat{W}_{\zeta 1} \\ \widehat{W}_{\zeta 2} \\ \widehat{W}_{\zeta 3} \end{bmatrix} &= \widehat{A} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{W}_{x1} \\ \widehat{W}_{x2} \\ \widehat{W}_{x3} \end{bmatrix}, \\ \omega_{\zeta 3}^k(t) &= K_\theta \frac{\widehat{W}_{\zeta 1}}{g}(t) + \int_{t_0}^t K_\theta^I \cdot \frac{\widehat{W}_{\zeta 1}}{g}(t) d\tau - \omega_{\zeta 3}^k(t_0); \\ \omega_{\zeta 2}^k(t) &= K_\psi \frac{\Delta\psi}{g}(t) + \int_{t_0}^t K_\psi^I \frac{\Delta\psi}{g}(t) d\tau - \omega_{\zeta 2}^k(t_0). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$\widehat{A} = \begin{bmatrix} \cos\hat{\psi}\cos\hat{\theta} & \sin\hat{\theta} & -\sin\hat{\psi}\cos\hat{\theta} \\ -\cos\hat{\psi}\sin\hat{\theta}\cos\hat{\gamma} + \sin\hat{\psi}\sin\hat{\gamma} & \cos\hat{\theta}\cos\hat{\gamma} & \sin\hat{\psi}\sin\hat{\theta}\hat{\gamma}\cos\hat{\gamma} + \cos\hat{\psi}\sin\hat{\gamma} \\ \sin\hat{\psi}\cos\hat{\gamma} + \cos\hat{\psi}\sin\hat{\theta}\sin\hat{\gamma} & -\cos\hat{\theta}\sin\hat{\gamma} & \cos\hat{\psi}\cos\hat{\gamma} - \sin\hat{\psi}\sin\hat{\theta}\sin\hat{\gamma} \end{bmatrix} \quad (6)$$

– матрица направляющих косинусов углов ориентации результирующего поворота НТ ВИС, равная $\widehat{A} = \widehat{A}^\gamma \widehat{A}^\theta \widehat{A}^\psi$, где A^γ , A^θ , A^ψ – матрицы соответствующих углов простейших поворотов.

Азимутальная коррекция строится на основе разницы текущего $\hat{\psi}(t)$ и начального $\psi(t_0)$ значений углов азимута.

$$\Delta\psi = \psi(t_0) - \hat{\psi}(t). \quad (7)$$

Принципиальным отличием алгоритмов (4) от алгоритмов (1) является возможность настройки их параметров на период Шулера, т.е. реализация условий инвариантности к действию линейных ускорений.

Решение задачи проводилось методом математического моделирования, при котором рассматривались следующие режимы работы системы: выставка и рабочий режим, т.е. режим движения основания.

Выставка

Во время выставки подвижный объект находится в состоянии покоя, т.е. все движения отсутствуют. Выставка проводится в два этапа: ускоренная выставка и позиционно-интегральная выставка, с коэффициентами коррекции, представленными в табл. 1.

Таблица 1

| Ускоренная выставка ($t=[0\dots 900]$ с) | Позиционно-интегральная выставка ($t=[900\dots 1500]$ с) |
|--|---|
| $K_j = 0.015 \text{ с}^{-1}$ $K_j^I = 0.25 K_j^2, \quad j = \psi, \theta, \gamma$ | $K_j = 2\sqrt{K_j^I},$ $K_j^I = g/R, \quad j = \psi, \theta, \gamma$ |

Рабочий режим

В рабочем режиме задавались параметры движения основания, характерные для внутритрубных инспектирующих снарядов:

- поступательное движение основания ($t=[2000...9000]$ с)

$$v_{z1} = \left[25 + \sin\left(\frac{2\pi}{55} \cdot t\right) \right] \text{ м/с};$$

- трехосная качка ($t=[2500...8000]$ с) с параметрами

$$t_0 = 0 \quad \psi = \psi_0 + 15 \cdot \sin(\omega_\psi t); \quad \psi_0 = 0 \text{ град}; \quad \omega_\psi = 0,0016 \cdot \pi;$$

$$\theta = \theta_0 + \theta_A \cdot \sin(\omega_\theta t); \quad \theta_0 = 0 \text{ град}; \quad \omega_\theta = 0,005 \cdot \pi;$$

$$\gamma = \gamma_0 + 90 \cdot \sin(\omega_\gamma t); \quad \gamma_0 = 0 \text{ град}; \quad \omega_\gamma = 0,003 \cdot \pi.$$

Моделирование проводилось для следующего множества амплитудных значений угла тангажа $\theta_A = \{1, 7, 20, 30, 40, 60\}$ угл. град.

Коэффициенты коррекции во время рабочего режима принимались равными

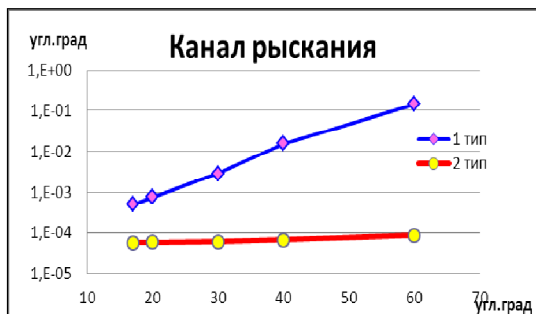
$$K_\psi = 0, \quad K_j = 0,$$

$$K_\psi^I = 0, \quad K_j^I = g/R, \quad j = \theta, \gamma$$

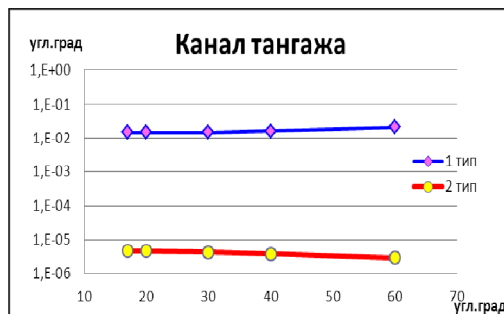
Интегрирование проводилось методом Эйлера с шагом $2 \cdot 10^{-3}$ с. Выходные параметры – заданные углы ориентации и полученные ошибки углов ориентации ($\Delta\psi_x(t)$, $\Delta\theta_x(t)$, $\Delta\gamma_x(t)$ – для алгоритмов в объективном трехграннике, $\Delta\psi_\zeta(t)$, $\Delta\theta_\zeta(t)$, $\Delta\gamma_\zeta(t)$ – с использованием алгоритмов в горизонтном трехграннике).

На рис. 2 представлены методические погрешности решения задачи ориентации по каналам рыскания, тангажа и крена соответственно в зависимости от задаваемого амплитудного значения угла тангажа (θ_A) при использовании алгоритмов ориентации двух модификаций.

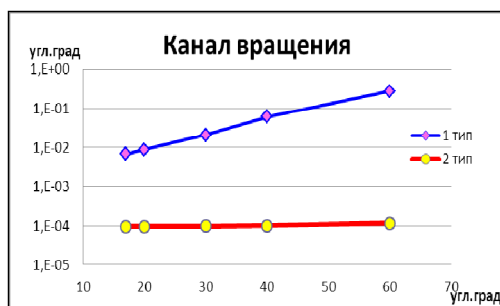
На рисунках приняты следующие обозначения: 1 тип – погрешности определения углов ориентации при использовании алгоритмов первой модификации (1), 2 тип – при использовании алгоритмов второй модификации (4).



а



б



в

Рис. 2. Методические погрешности определения параметров ориентации по каналам рыскания, тангажа и вращения в зависимости от задаваемого амплитудного значения угла тангажа (θ_A)

Показано, что при движении основания с углами тангажа от 20 до 60 угл. град методические погрешности определения параметров ориентации с использованием алгоритмов 2-й модификации на 2..3 порядка меньше, чем при использовании алгоритмов первой модификации, что соответствует значениям от 10^{-5} до 10^{-4} угл. град для алгоритмов 2-й модификации против $10^{-2} \dots 10^{-1}$ угл. град для алгоритмов 1-й модификации.

Определение приемлемого уровня погрешностей датчиков первичной информации для использования алгоритмов с приведением сигналов гироскопов и акселерометров к осям горизонтного трехгранника проводилось методом математического моделирования, путем задания движения с максимальным значением угла тангажа 40 угл. град и введения отдельно различных величин погрешностей датчиков первичной информации. Результаты моделирования показали, что погрешности акселерометров практически не влияют на уровень погрешностей определения параметров ориентации как в алгоритмах 1-й модификации с использованием угловых скоростей и кажущихся ускорений в осях объектового трехгранника, так и с использованием алгоритмов 2-й модификации с предварительным приведением сигналов ДПИ к осям горизонтного трехгранника. Уровень погрешностей определения параметров ориентации с использованием алгоритмов 1-й модификации на 2 порядка (по осям рыскания и крена) и на 3 порядка (по оси тангажа) ниже, чем при использовании алгоритмов 2-й модификации.

Влияние систематической составляющей скорости дрейфа гироскопов на погрешности определения параметров ориентации с использованием исследуемых алгоритмов представлено на рис. 3.

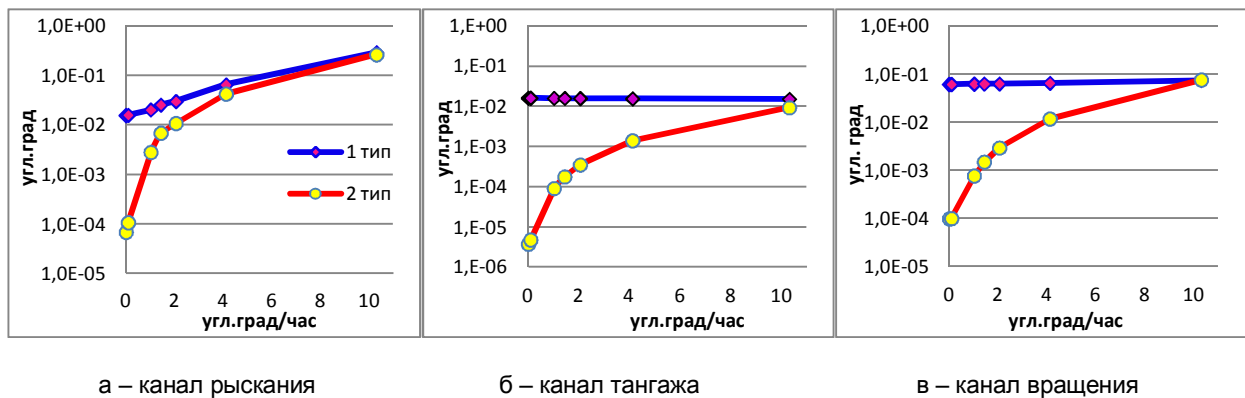


Рис. 3. Погрешности определения параметров ориентации по каналам рыскания, тангажа и вращения при изменении систематической составляющей дрейфа гироскопов в пределах при задании режима движения с углами тангажа до 40 угл. град

На рисунке видно, что при нестабильности систематической и случайной составляющих скорости дрейфа гироскопов более $2^\circ/\text{ч}$ влияние инструментальных погрешностей на ошибки оценок параметров ориентации сопоставимо с методическими погрешностями алгоритмов 1-й модификации, т.е. применение алгоритмов 2-й модификации эффективно при нестабильности скорости дрейфа гироскопов менее $1^\circ/\text{ч}$.

По результатам проведенного моделирования были выбраны следующие величины инструментальных ошибок датчиков первичной информации, соответствующие ошибкам датчиков первичной информации типа волоконно-оптических гироскопов ПНСК 40-016-02 и кварцевых маятниковых акселерометров КХ67-041:

- Погрешность масштабного коэффициента: $\delta K_m = 10^{-4}$
- Систематическая составляющая нестабильности скорости дрейфа гироскопов: $\omega_0 = 0.5$ угл. град./ч
- Случайная составляющая нестабильности скорости дрейфа гироскопов: $\sigma_\omega = 1$ угл. град./ч
- Стабильность нулевого сигнала акселерометров от запуска к запуску: $W_0 = \pm 6 \cdot 10^{-6} g$
- Случайная составляющая нулевого сигнала акселерометров: $\sigma_w = \pm 20 \cdot 10^{-6} g$

На рис. 4 представлены результаты моделирования работы БИСО с принятыми погрешностями ДПИ при движении подвижного объекта с амплитудным значением угла тангажа $\theta_A = 40$ угл. град.

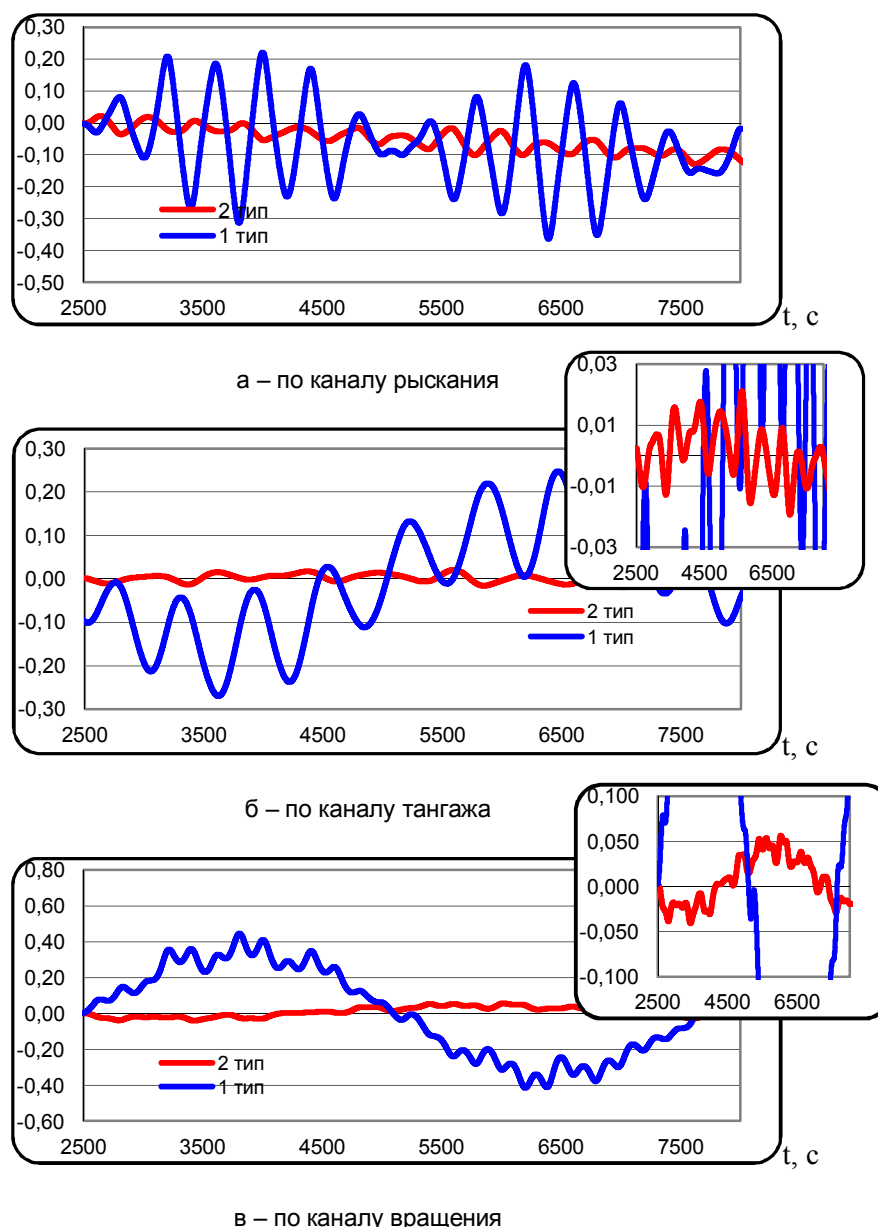


Рис. 4. Погрешности определения параметров ориентации БИСО с использованием алгоритмов 1-й и 2-й модификации с введенными инструментальными ошибками ДПИ по трем каналам ориентации при задании режима движения с амплитудным значением угла тангажа $\theta_A = 40$ угл. град

Показано, что при наличии у датчиков первичной информации выбранных уровней инструментальных погрешностей ошибка определения угла рыскания в алгоритмах 1-й модификации на 1 порядок выше, чем в алгоритмах 2-й модификации ($\Delta\psi_x = 2.1 \cdot 10^{-2}$ угл. град, $\Delta\psi_z = 3.3 \cdot 10^{-3}$ угл. град), ошибка определения угла тангажа на 3 порядка ($\Delta\theta_x = 1.6 \cdot 10^{-2}$ угл. град, $\Delta\theta_z = 8.5 \cdot 10^{-5}$ угл. град), а ошибка определения угла вращения на 2 порядка ($\Delta\gamma_x = 6.2 \cdot 10^{-2}$ угл. град, $\Delta\gamma_z = 7.8 \cdot 10^{-4}$ угл. град).

Выводы. В результате проведенного исследования методом математического моделирования показано, что при использовании БИСО в составе таких подвижных объектов, где имеют место большие углы тангажа (например, летательные аппараты, наземные и подземные подвижные объекты и т.п.), а также в некоторых случаях на борту ВИС при обследовании трасс, проложенных в горных местностях, например на Урале или на Кавказе, целесообразно при обработке сигналов ДПИ использовать алгоритмы с приведением угловых скоростей и кажущихся ускорений к осям горизонтного трехгранника, что обеспечивает снижение методических погрешностей. В данном случае для ДПИ прецизионного и в некоторых случаях среднего класса точности уровни погрешностей определения параметров ориентации на 2-4 порядка ниже, чем при использовании алгоритмов, работающих с сигналами ДПИ в объективном базисе при задании движения подвижного объекта с амплитудным значе-

нием угла тангажа $\theta_A = 40$ угл. град, что подтверждает целесообразность использования алгоритмов 2-й модификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плотников П. К. Элементы теории работы одной разновидности бесплатформенных инерциальных систем ориентации / П. К. Плотников // Гирроскопия и навигация. 1999. № 3. С. 23 – 35.
2. Пат. РФ №2197714. Система определения координат трассы подземного трубопровода / П.К.Плотников, А.И. Синева, В.Б.Никишин, А.П. Рамзаев. 2003.
3. Пат. РФ №2207512. Навигационно-топографический внутритрубный инспектирующий снаряд / А.И. Синева, П.К. Плотников, А.П. Рамзаев, В.Б. Никишин. 2003.
4. Плотников П.К. Применение внутритрубных диагностических снарядов и навигационно-топографических комплексов для повышения безопасности магистральных трубопроводов / П.К. Плотников, А.И. Синева, В.Б.Никишин и др. // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 4. С. 28-33.
5. Копичева А.А. Сравнительный анализ алгоритмов ориентации на основе кинематических уравнений Эйлера / А.А. Копичева, В.Б. Никишин, А.В. Ульянов // Навигация и управление движением: материалы докладов VIII конференции молодых ученых. СПб., 2006. С. 53-60.
6. Копичева А.А. О границах применимости настройки на частоту Шулера в алгоритмах бесплатформенной системы ориентации на основе кинематических уравнений Эйлера с введенными членами горизонтальной коррекции // Вестник СГТУ. 2009. № 42. С. 129-135.
7. Пат. РФ №2437127. Система определения координат трассы подземного трубопровода / В.Б. Никишин, А.И. Синева, П.Г. Чигирев, А.А. Копичева. 2010.

Копичева Алла Алексеевна –
аспирант кафедры «Приборостроение»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Alla A. Kopicheva –
Postgraduate
Department of Instrument Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.01.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 621.391.278

Н.С. Навоев

О ПОКАЗАТЕЛЯХ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РАЗЛИЧИМОСТИ СИГНАЛОВ, ПРИНИМАЕМЫХ НА ФОНЕ ПОМЕХ

Рассматривается задача оценки потенциальной различимости сигналов на выходе приемника при распознавании радиолокационных целей по отраженным от них сигналам на фоне случайных помех. Для такой оценки предлагаются рабочие характеристики различения (РХР) и соответствующие им функции различимости. Показывается, что существует взаимно однозначное соответствие между РХР и функцией различимости. Предлагается способ построения РХР по функциям различимости.

Различение, сигналы, помехи, вероятности ошибок, рабочие характеристики различения, функцией различимости, способ построения

N.S. Navoev

POTENTIAL DISCERNABILITY INDICATORS OF SIGNALS, RECEIVED WITH THE BACKGROUND OF NOISE

The article considers the issue of estimating potential discernability of signals on the receiver output when recognizing the radar-tracking targets by the reflected signals

in the background of random noises. The working distinction characteristics (WCD) and the appropriate discernability functions are offered to provide the estimations. It is shown that there is a one-to-one correspondence between the WCD and discernability function. Thus the discernability function is easily calculated. A method for constructing the WCD by the discernability functions is offered.

Discernment, signals, interference, error probability performance of discernment, discernment function, method of construction

При рассмотрении задачи распознавания радиолокационных объектов по отраженным сигналам на фоне случайных помех со статистической точки зрения часто возникает проблема оценки потенциальной различимости сигналов на выходе приемника.

Обычный подход к этой проблеме заключается в анализе оптимального устройства распознавания с целью расчета вероятностей ошибок распознавания первого рода F_1 и второго рода F_2 , либо построения кривых зависимостей $F_2 = f(F_1)$ рабочих характеристик различения (РХР) [1]. При этом наиболее полной характеристикой различения сигналов является рабочая характеристика различения. Однако отыскание этой характеристики для практически важных случаев сопряжено с большими трудностями. В случае многих сигналов задача еще более усложняется: чтобы охарактеризовать их различимость, требуется вычислить набор вероятностей ошибок, который будет зависеть от принятого правила решения. В связи с этим часто используют числовые и функциональные характеристики различения, связанные с РХР. При этом особенно удобной оказывается функция различимости (логарифм производящей функции моментов). Ниже будет рассмотрена функция различимости, которая позволяет охарактеризовать различимость любой пары из множества сигналов на основании известных законов распределения параметров выходного сигнала приемника. В качестве признаков различения могут использоваться параметры сигналов. Признак x , являющийся некоторой функцией измерения, естественно рассматривать как непрерывную случайную величину. Использование большого числа признаков приводит к замене скалярной величины x случайным вектором признаков $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $X \in R$. Здесь n – число признаков; R – пространство признаков. Через $p(X/S_i)$ и $p(X/S_j)$ обозначим условные плотности распределения вероятностей случайного вектора X при наличии полезного сигнала соответственно S_i и S_j . Функцию различимости двух распределений $p(X/S_i)$ и $p(X/S_j)$ определим как логарифм производящей функции моментов, взятый со знаком минус

$$y_{ij}(x) = -\ln \int_R P^\alpha(X/S_i) P^{1-\alpha}(X/S_j) dX, \alpha \in [0,1]. \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что функция $y_{ij}(\alpha)$ на концах интервала изменения параметра $\alpha \in [0,1]$ принимает значения $y_{ij}(0) = y_{ij}(1) = 0$. Для случая неразличимости сигналов S_i и S_j , т.е. когда плотности $p(X/S_i)$ и $p(X/S_j)$ полностью тождественны, функция $y_{ij}(\alpha) = 0$ для всех значений параметра $\alpha \in [0,1]$. Более детальный анализ свойств функции $y_{ij}(\alpha)$ свидетельствует о возможности ее использования в качестве показателя потенциальной различимости сигналов S_i и S_j .

1. Взаимно однозначное соответствие функции различимости рабочей характеристике различения.

Для отыскания взаимно однозначного соответствия функции $y_{ij}(\alpha)$ рабочей характеристике $F_2 = f(F_1)$ найдем изменения (вариацию) $\delta y_{ij}(\alpha)$ функции $y_{ij}(\alpha)$ при изменении функции $F_2(D)$ на «малую» функцию $\delta(D)$. Для этого в качестве независимой переменной используем величину

$$D = \int_0^{h_0} p_i(h) dh,$$

где $h = \frac{dF_2}{dD}$.

Поскольку $F_2(0) = 0$ и $F_2(l) = 1$, то функция $\delta(D)$ должна удовлетворять на концах интервала $[0, 1]$ условиям

$$\delta(0) = \delta(1) = 0.$$

Дифференциал dD можно записать как $dD = p_i(h) dh$, и выражения для вероятностей ошибок записываются в виде

$$D = \int_0^D dD \quad (2)$$

$$F_2(D) = \int_0^D h(D)d(D)$$

Функция $F_2(D)$ – одна из форм рабочей характеристики различения. Из соотношений (2) следует, что

$$p_i(D) = \begin{cases} 1, & \text{если } D \in [0, 1], \\ 0, & \text{если } D \in [0, 1]. \end{cases} \quad (3)$$

В то же время

$$p_i(D) = \begin{cases} h(D), & \text{если } D \in [0, 1], \\ 0, & \text{если } D \notin [0, 1]. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, функция $h(D) = \frac{dF_2}{dD}$ является плотностью распределения вероятностей $p_i(D)$.

Теперь функцию различимости $\gamma_{ij}(\alpha)$ можно определить как

$$\gamma_{ij}(\alpha) = -\ln \int_0^1 h^\alpha(D)dD \quad (5)$$

На основании соотношений (2) и (5) функция $\delta\gamma_{ij}(\alpha)$ равна

$$-\ln \left\{ \int_0^1 \left[\frac{dF_2}{dD} + \frac{d\delta(D)}{dD} \right]^{1-\alpha} dD \right\} + \ln \left\{ \int_0^1 \left(\frac{dF_2}{dD} \right)^{1-\alpha} dD \right\}. \quad (6)$$

Раскрывая в первом интеграле (6) скобки с учетом малости функции $\delta(D)$ и ограничиваясь линейным относительно $\delta(D)$ числом, находим

$$\delta\gamma_{ij}(\alpha) = -\ln \left\{ \int_0^1 \left(\frac{dF_2}{dD} \right)^{1-\alpha} dD + (1-\alpha) \int_0^1 \left(\frac{dF_2}{dD} \right)^{-\alpha} \frac{d\delta(D)}{dD} dD \right\} + \ln \left\{ \int_0^1 \left(\frac{dF_2}{dD} \right)^{1-\alpha} dD \right\}$$

Преобразуя это выражение, получим

$$\delta\gamma_{ij}(\alpha) = -\ln \left\{ 1 + \frac{(1-\alpha) \left(\int_0^1 \left(\frac{dF_2}{dD} \right)^{-\alpha} \frac{d\delta(D)}{dD} dD \right)}{\int_0^1 \left(\frac{dF_2}{dD} \right)^{1-\alpha} dD} \right\}$$

Это выражение приводится интегрированием по частям интеграла в числителе к виду

$$\delta\gamma_{ij}(\alpha) = -\ln \left\{ 1 + \frac{\alpha(1-\alpha) \int_0^1 h(D)^{-(1+\alpha)} \delta(D) dh}{\int_0^1 \left(\frac{dF_2}{dD} \right)^{1-\alpha} dD} \right\} \quad (7)$$

При этом учтено, что слагаемое

$$(1-\alpha) \left(\frac{dF_2}{dD} \right)^{-\alpha} \delta(D) \Big|_0^1$$

оказывается равным нулю в силу того, что на концах интервала $[0, 1]$ функция $\delta(D) = 0$, а также то, что при $\delta(D) \leq 0$ производная функция $\delta(D)$ в нуле не может быть больше $\frac{dF_2}{dD} \Big|_{D=0}$

Из выражения (7) видно, что изменение $\delta\gamma_{ij}(\alpha)$ положительно, если функция $\delta(D)$ отрицательна, и, наоборот, изменение $\delta\gamma_{ij}(\alpha)$ отрицательно, если функция $\delta(D)$ положительна. Малой вариации $\delta(D)$ соответствует малая вариация $\delta\gamma_{ij}(\alpha)$. Это указывает на монотонную связь рабочих характеристик различения с функциями различимости.

Монотонная связь рабочих характеристик различения с функциями различимости по существу указывает на возможные разбиения совокупности рабочих характеристик различения. При этом можно ввести классы функций этого разбиения (фактор-множества), которые отображаются на множество функций различимости. Другими словами, свойство монотонности утверждает, что одной функции различимости может соответствовать одна или несколько рабочих характеристик различения.

Однако задача различения сигналов S_i и S_j через вероятность D и F_2 (2), сводится к задаче проблемы моментов на интервале $[0, 1]$. В соответствии с теоремой Хаусдорфа решение этой проблемы единственно [2]. Для такого интервала существуют все моменты. Значит, существуют все производные моментной функции (нашей функции различимости). Функция различимости, таким образом, определяет все моменты, а моменты в соответствии с результатом решения проблемы Хаусдорфа определяют рабочую характеристику различения, т.е. функция различимости однозначно определяет рабочую характеристику различения.

С другой стороны, пользуясь свойством монотонности, зная характер поведения функции различимости, необязательно знать рабочую характеристику различения.

2. Рабочие характеристики различения и соответствующие им функции различимости.

На основе свойства взаимно однозначного соответствия функции различимости рабочей характеристике различения находятся пары семейств кривых функций различимости и рабочих характеристик различения. Используя найденные пары семейств кривых рабочих характеристик различения и функции различимости, по какой-то часто получающейся на практике функции различимости, которая является суммой различных по виду функций различимости, можно найти рабочую характеристику различения, которую отыскать прямым расчетом оказалось бы чрезвычайно сложно.

Рассматриваются одномерные условные плотности распределения вероятностей $p(x/S_i)$ и $p(x/S_j)$ случайной величины x , т.е. скалярного признака.

Пример. Случай нормальных распределений случайной величины x .

Пусть условные плотности распределений случайной величины x описываются выражением

$$p\left(\frac{x}{S_{ij}}\right) = \frac{1}{\sigma_{ij}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}}, \quad (8)$$

где μ_{ij} и σ_{ij}^2 – математические ожидания и дисперсии случайной величины x соответственно.

Вероятность ошибок первого рода

$$F_1 = \int_{-\infty}^{x_0} \frac{1}{\sigma_{ij}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}} dx. \quad (9)$$

Выражая вероятность F_1 через функцию нормального распределения, получим

$$F_1 = 1 - \Phi\left(\frac{x_0 - \mu_i}{\sigma_i}\right) \quad (10)$$

Вероятность ошибок второго рода F_2 , выражая также функцию нормального распределения, получим

$$F_2 = 1 - \Phi\left(\frac{x_0 - \mu_j}{\sigma_j}\right) \quad (11)$$

Объединяя выражения (10) и (11), рабочую характеристику различения для нормальных распределений с разными дисперсиями ($\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$) и разными математическими ожиданиями ($\mu_i \neq \mu_j$) можно записать в виде

$$F_2 = 1 - \Phi\left\{\frac{\sigma_i}{\sigma_j} \left[\Phi^{-1}(F_1) + \frac{\mu_i - \mu_j}{\sigma_i}\right]\right\}, \quad (12)$$

где Φ – функция, обратная к функции нормального распределения.

Для случая одинаковых дисперсий ($\sigma_i^2 = \sigma_j^2 = \sigma^2$) и разных математических ожиданий ($[\mu]_i \neq \mu_j$) рабочая характеристика принимает вид

$$F_2 = 1 - \Phi\left[\Phi^{-1}(F_1) + \frac{\mu_i - \mu_j}{\sigma}\right], \quad (13)$$

Соответствующие функции различимости двух нормальных распределений с плотностями (8) находятся по формуле (1). В результате имеем

$$\gamma_{ij}(\alpha) = \frac{1}{2} \ln \left[\left(\alpha \frac{\sigma_j^2}{\sigma_i^2} + 1 - \alpha \right) \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_j} \right)^{2\alpha} \right] + \frac{\alpha(1-\alpha)(\mu_i - \mu_j)^2}{2\sigma_i^2 \left(\alpha \frac{\sigma_j^2}{\sigma_i^2} + 1 - \alpha \right)} \quad (14)$$

Для случая нормальных распределений с одинаковыми дисперсиями ($\sigma_i^2 = \sigma_j^2 = \sigma^2$) и разными математическими ожиданиями ($[\mu]_i \neq \mu_j$) функция различимости примет вид

$$\gamma_{ij}(\alpha) = \alpha(1-\alpha) \frac{(\mu_i - \mu_j)^2}{2\sigma^2} \quad (15)$$

Из построения семейства кривых рабочих характеристик различения и соответствующих им семейств кривых функций различимости для различных видов распределений следует, что существует обратное соответствие функций различимости соответствующим рабочим характеристикам различения. При этом если одна функция различимости больше другой функции различимости, то соответствующая ей рабочая характеристика различения лучше рабочей характеристики, соответствующей второй функции различимости. Анализ значений вероятностей ошибок F (для значений порогов, когда $F = F_1 = F_2$) от начений функции $\gamma_{ij}(\alpha)$ при $\alpha = \frac{1}{2} \gamma\left(\frac{1}{2}\right)$ для различных видов распределений при разных параметрах этих распределений, что общее значение вероятностей ошибок F определяется формулой

$$F = \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{\gamma(\frac{1}{2})}{a} \right] \quad (16)$$

в пределах от 0,4 до 0,004. Величина a может быть вычислена по формуле

$$a = 0,122 \ln \left(\frac{1}{2} \right) + 0,55.$$

3. Построение рабочих характеристик различения по функциям различимости

Рабочие характеристики различения, как следует из полученных результатов, можно построить путем обратного перехода с помощью «ближайших» семейств функций различимости, для которых известны семейства рабочих характеристик различения. Для этого по заданным семействам РХР рассчитываются семейства функций различимости. Рассчитанные пары семейств РХР и функций различимости можно назвать шаблонами (трафаретами), которые могут быть заданы в виде таблиц или графиков.

Способ построения РХР по функциям различимости (с использованием шаблонов) можно свести к следующему. Производится расчет «исходной» функции различимости $\gamma_{ij}(\alpha)$ для независимых признаков различения, учитывая при этом её свойства аддитивности. «Исходная» функция $\gamma_{ij}(\alpha)$ сравнивается с предварительно рассчитанными функциями различимости (шаблоном) и находится «ближайшая» $\gamma_{ij}^{\delta}(\alpha)$ из всего семейства функций различимости. По этой «ближайшей» функции $\gamma_{ij}^{\delta}(\alpha)$ из всего семейства РХР находится соответствующая рабочая характеристика $F_2^{\delta}(F_1)$.

Таким образом, искомую рабочую характеристику различения можно представить в виде

$$F_2(F_1) = F_2^{\delta}(F_1) + \delta(F_1), \quad F_i \in [0,1]. \quad (17)$$

Из выражения (17) видно, что точность такого способа построения РХР будет определяться величиной дополнительного уточнения $\delta(F_1)$, «малой» функции $\delta\gamma_{ij}(\alpha)$. «Малую» функцию $\delta\gamma_{ij}(\alpha)$ можно найти как

$$\delta\gamma_{ij}(\alpha) = \gamma_{ij}(\alpha) - \gamma_{ij}^{\delta}(\alpha), \quad \alpha \in [0,1] \quad (18)$$

Из этого следует, что для более точного построения РХР необходимо найти величину $\delta(F_1)$. Расчет величины $\delta(F_1)$ можно свести к задаче нахождения вариации $\delta(F_1)$, функции $F_2(F_1)$ при изменении функции $\gamma_{ij}(\alpha)$ на «малую» функцию $\delta\gamma_{ij}(\alpha)$.

Выводы

1. Рассмотрение рабочей характеристики различения и ее свойств показало, что оно является наиболее полной характеристикой различения сигналов. Однако ее определение обычно является достаточно трудоемким процессом, хотя само понятие вероятности ошибки простое. Из рассмотрения функции различимости и ее свойств следует, что функция различимости удовлетворяет всем условиям критерия распознавания двух классов (типов) объектов. Показано, что существует взаимно однозначное соответствие между рабочими характеристиками различения и функциями различимости. Функцию различимости наряду с РХР можно использовать для оценки эффективности различения сигналов.

2. Сопоставительный анализ семейств кривых рабочих характеристик различения и соответствующих им семейств кривых функций различимости для различных видов распределений показал обратное соответствие функций различимости соответствующим рабочим характеристикам различения. Причем если одна функция различимости больше другой функции различимости, то соответствующая первой РХР лучше РХР соответствующей этой другой функции различимости. Несимметрия кривых функций различимости соответствует несимметрии кривых РХР. Найдена зависимость общего значения вероятностей ошибок $F=F_1=F_2$, которое соответствует точкам пересечения кривых РХР с биссектрисой координатного угла, от значений $\gamma\left(\frac{1}{2}\right)$ функции различимости для параметра $\alpha\left(\frac{1}{2}\right)$

При этом общее значение вероятностей ошибок F может быть вычислено с помощью полученного выражения, которое описывает эту зависимость.

3. Предложен способ построения РХР по функциям различимости. Этот способ сводится к тому, что предварительно рассчитывают по заданным различным семействам РХР семейства функции различимости (шаблоны), а обратный переход осуществляют с помощью «ближайших» семейств функции различимости, для которых известны семейства РХР. При необходимости отыскания РХР аналитически с учетом дополнительного уточнения требуется решать интегральное уравнение Фред-

гольма первого рода. Методика решения такого уравнения с использованием априорных сведений о ядре интегрального уравнения искомой функции приведена в [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Леман Э. Проверка статистических гипотез / Э. Леман. М.: Наука, 1979. 408 с.
2. Ахиезер Н. И. Классическая проблема моментов и некоторые вопросы анализа, связанные с нею / Н. Ахиезер. М.: Физматлит, 1961. 314 с.
3. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. М.: Наука, 1979. 285 с.
4. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. I. Обработка сигналов в радио- и гидролокации и прием случайных гауссовых сигналов на фоне помех: пер. с англ. / Г. Ван Трис; под ред. проф. В.Г. Горяинова. М.: Сов. радио, 1972. 719 с.

Навоев Николай Сергеевич –
кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Поволжского кооперативного института (филиала) Российского университета кооперации

Nikolay S. Navoev –
Ph. D., Professor
Head: Department of Information Systems and Technology
Povolzhsky Cooperative Institute (branch) of Russian University of Cooperation

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 621.314.58

А.А. Щербаков, Ю.М. Голембиовский

АНАЛИЗ АППАРАТНЫХ И СТОИМОСТНЫХ ЗАТРАТ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Представлены результаты исследования зависимости температуры перехода транзистора в автономном инверторе напряжения с амплитудной модуляцией от параметров модуляции и нагрузки. Проведен сравнительный анализ температуры перехода для двух модулей одной серии, рассчитанных на различную мощность. На основе полученных данных сформулированы рекомендации по выбору IGBT модуля для инвертора напряжения.

Автономный инвертор напряжения, амплитудная модуляция, мощность потерь, температура перехода, IGBT модуль

A.A. Scherbakov, Yu.M. Golembiovsky

ANALYSIS OF HARDWARE OUTLAYS AND COST OF AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER WITH AMPLITUDE MODULATION

The paper presents the analysis results relating the junction temperature dependence in the autonomous voltage inverter transistor with the modulation amplitude depending on modulation and load parameters. The comparative analysis referring the transition temperature for two modules in the series designed for different powers is provided. Based on these results recommendations on the choice of IGBT module for voltage inverter are formulated.

Autonomous voltage inverter, amplitude modulation, power losses, junction temperature, IGBT module

Как известно, для управления величиной выходного напряжения и улучшения его гармонического состава в преобразовательной технике используется модуляция, формируемая алгоритмами переключения силовых ключей. Наибольшее распространение в настоящее время получили схемы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), отличающиеся простотой как схемной реализации, так и алгоритма управления. Как правило, инверторы с ШИМ представляют собой мостовую схему, накрест лежащие силовые ключи которой поочередно открываются, обеспечивая приложение импульсного напряжения с чередующейся полярностью к нагрузке, подключенной в выходы мостовой схемы. При очевидной простоте ШИМ инверторы обладают и существенными недостатками, основными из которых являются наличие бесконечного спектра гармонических составляющих в выходном напряжении, что требует обязательной установки выходного фильтра низких частот, и высокая частота коммутации, превышающая частоту несущего сигнала на 1,5-2 порядка, что приводит к большим динамическим потерям при эксплуатации. Попытка решения первой проблемы привела к появлению большого количества модификаций ШИМ: синусоидальная, ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, векторная ШИМ с коммутацией по фронту/спаду/двусторонняя ШИМ. Однако предложенные варианты бессильны перед второй проблемой.

В то же время существует альтернативный вариант модуляции – амплитудно-импульсная модуляция (АИМ), обеспечивающая получение ступенчатого напряжения, приближенного к синусоидальному, при относительно низкой частоте коммутации (частота модуляции превышает частоту несущего сигнала в 2-10 раз). Большинство базовых схем и алгоритмов для инверторов с АИМ были разработаны в 70-80-е гг. XX века параллельно со схемами ШИМ, однако высокая стоимость и массогабаритные показатели силовых ключей того времени предопределили популярность ШИМ, требующей меньших аппаратных затрат. В последние 10 лет наблюдается устойчивый рост интереса к инверторам с АИМ, причиной которого является повышение требований со стороны потребителей к качеству питающего напряжения (особенно к его гармоническому составу), которое неспособна обеспечить ШИМ. Способствует данному процессу значительное удешевление IGBT и MOSFET модулей [1].

В настоящее время в специальной литературе отсутствует объективное сравнение схем с ШИМ и АИМ. Кроме того, недостаточно изучен вопрос использования самой АИМ, т.к. внимание исследователей занимает изучение многоуровневой ШИМ, которая является гибридным вариантом ШИМ и АИМ и обладает как достоинствами обоих методов, так и недостатками. Данная статья посвящена исследованию АИМ в разных режимах работы, отличающихся коэффициентом мощности нагрузки, питаемой автономным инвертором напряжения.

Исследование проведено на примере силовой схемы с коммутатором и мостом, обеспечивающей генерацию 8-уровневого ступенчатого напряжения. В качестве силовых ключей выбраны полумостовые IGBT модули серии M2TKI-xxx-12K производства ОАО «Электровыпрямитель». Модули данной серии построены на основе IGBT IV поколения с вертикальным каналом (trench gate) и встроенных быстродействующих диодов обратного тока (EmCon Fast diodes), что обеспечивает сверхнизкие потери в открытом состоянии.

Несмотря на значительное удешевление IGBT модулей, их стоимость превышает 2-3 тыс. руб., что делает задачу сравнительного анализа достаточно затратной. Учитывая тот факт, что испытания желательно проводить, в том числе, в предельных режимах, единственным приемлемым методом является использование математического моделирования.

Для этой цели был выбран пакет MATLAB\Simulink, обеспечивающий возможность определения и визуализации широкого спектра показателей электрических схем при относительной простоте моделирования. На рис. 1 показана схема инвертора с коммутатором, обеспечивающего генерацию 8-уровневого напряжения на полупериоде, считая нулевой уровень. Подобранные углы коммутации ключей обеспечивают суммарный коэффициент гармонических искажений выходного напряжения, равный 7%, при учете всего спектра. Исследования проводились для активной и активно-индуктивной нагрузки с активной мощностью 100 кВт. Амплитудное значение питающего напряжения 742 В. Такая величина напряжения выбрана с целью обеспечения на выходе инвертора действующего напряжения, равного 514 В, что соответствует значению напряжения, получаемому на выходе трехфазного выпрямителя.

На первом этапе моделирования проведено измерение средних значений тока и напряжения на каждом из модулей при коэффициентах мощности, равных 1 и 0.8, и постоянной активной мощности в нагрузке. На основе полученных данных выбраны силовые модули для второго этапа моделиро-

вания, а именно определения мощности потерь модулей и их температуры с учетом различной интенсивности охлаждения.

Для определения мощности статических и динамических потерь использована Simulink модель, основанная на схеме, предложенной в [2], учитывающая реальные потери на основе аппроксимации зависимостей величин падения напряжения, энергии включения и выключения модуля, представленных в паспортных данных на IGBT модуль. Для расчета температуры в схеме используется тепловая модель транзистора и диода, состоящая из RC элементов, сопротивление и емкость которых представлены в паспортных данных на модули. Данная тепловая модель обеспечивает точное моделирование температуры перехода на основании данных о мощности потерь и температуры корпуса. Схема расчета температуры корпуса и охладителя учитывает, что используемые в моделировании модуля являются полумостами, соответственно, на температуру корпуса и охладителя оказывает влияние суммарная мощность модулей полумоста.

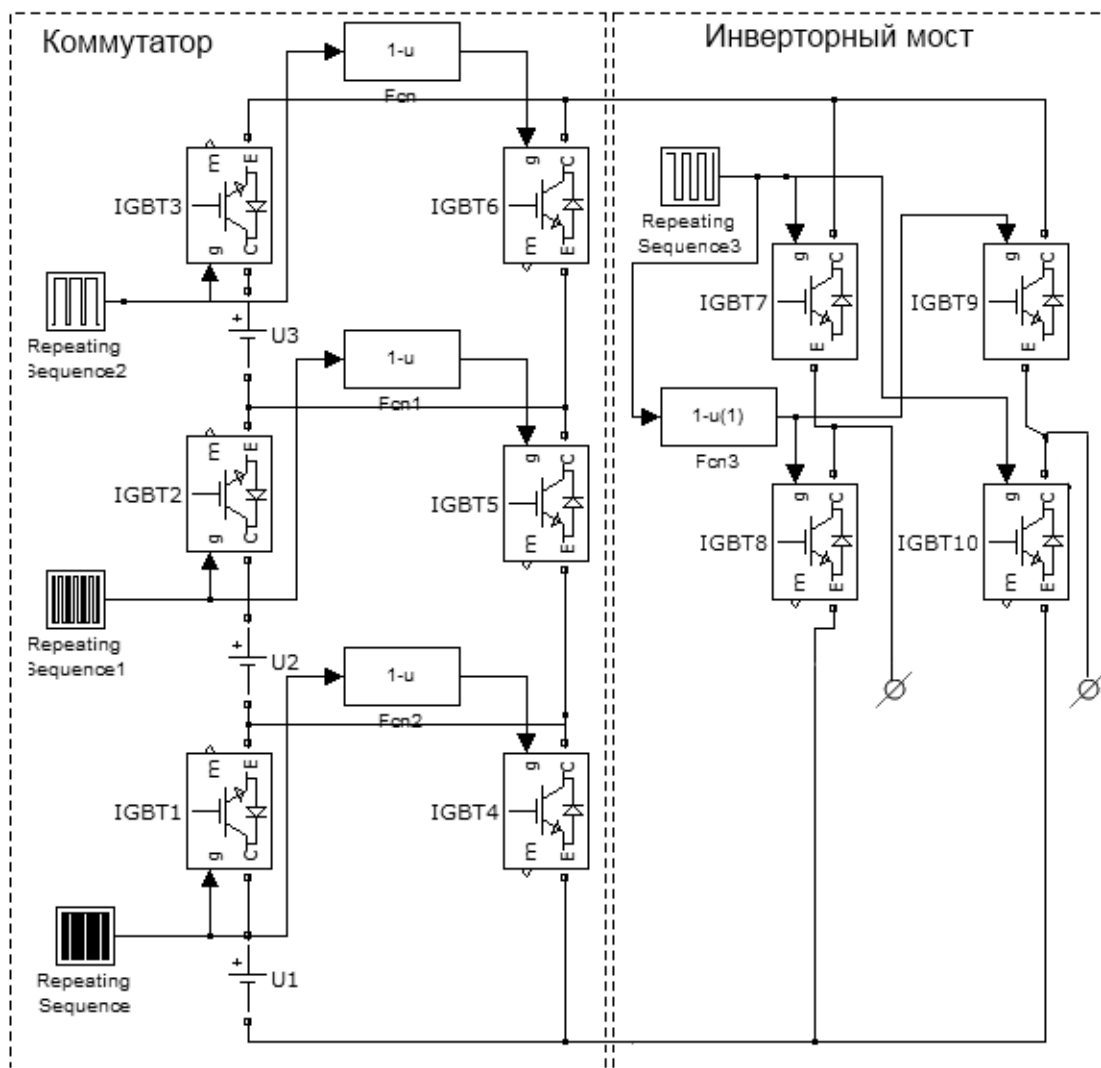


Рис. 1. Схема инвертора с коммутатором, генерирующего ступенчатое выходное напряжение

В качестве вариантов модулей были проанализированы полумостовые схемы M2TKI-200-12K и M2TKI-300-12K. Полумостами представляются попарно блоки коммутатора IGBT1 и IGBT4, IGBT2 и IGBT5, IGBT3 и IGBT6, а также две пары силовых ключей моста.

Углы коммутации модулей и коэффициент частоты коммутация модуля (отношение частоты коммутации $F_{\text{комм}}$ к частоте модуляции $F_{\text{мод}}$) представлены в табл. 1. В табл. 2 представлены усредненные по времени графики мощности статических и динамических потерь соответственно для модулей IGBT1, IGBT2 и IGBT3. Частоты коммутации этих модулей относятся друг к другу как 14:6:2, а напряжения на модулях как 1:2:4. С ростом амплитуды питающего напряжения растет мощность

статических потерь и со снижением частоты коммутации снижается мощность динамических потерь, что и подтверждается графиками.

Таким образом, для анализа влияния частоты коммутации на суммарную мощность потерь в инверторе данной топологии достаточно данных о модуле IGBT1, который имеет наибольшую частоту коммутации и, соответственно, наибольшую динамическую составляющую в общей мощности потерь. Полученные в результате моделирования интегральные характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 1

Углы коммутации силовых ключей в схеме инвертора напряжения с коммутатором

| Модуль | Углы коммутации на полупериоде, ° | $F_{\text{комм}}/F_{\text{мод}}$ |
|----------|---|----------------------------------|
| IGBT1 | 2-11, 21-32, 44-57, 71-109, 123-136, 148-159, 169-178 | 14 |
| IGBT2 | 11-32, 57-123, 149-169 | 6 |
| IGBT3 | 32-148 | 2 |
| IGBT4 | Противофазно IGBT1 | 14 |
| IGBT5 | Противофазно IGBT2 | 6 |
| IGBT6 | Противофазно IGBT3 | 2 |
| IGBT7,10 | 2-178 | 1 |
| IGBT8,9 | 182-358 | 1 |

Таблица 2

Статическая и динамическая составляющая мощности потерь для ключей коммутатора

| Модуль | Мощность статических потерь, Вт | Мощность динамических потерь, Вт |
|--------|---------------------------------|----------------------------------|
| IGBT1 | 185 | 80 |
| IGBT2 | 220 | 35 |
| IGBT3 | 265 | 12 |

Рассмотрим подробно зависимость массогабаритных, стоимостных показателей и установленной мощности инверторов, построенных на различных IGBT полумостах одной серии. Целью исследования будет выявление скрытых закономерностей, влияющих на выбор того или иного модуля, и отсеечение малозначащих критериев.

Исследования проводим при частоте генерируемого сигнала 400 Гц, активная мощность нагрузки – 100 кВт, амплитудное значение питающего напряжения – 742 В, которое делится в соотношении 1:2:4 для питания трех полумостов коммутатора. Соответственно напряжения, прикладываемые к каждому из модулей, равны 106, 212 и 424 В. При построении преобразователя частоты существует два способа добиться такого соотношения напряжений: использование конденсаторного делителя напряжения либо многообмоточного трансформатора.

В табл. 3 представлены значения средних токов и напряжений на каждом из полумостов схемы при работе на чисто активную нагрузку, и полученной исходя из этих значений величин установленной мощности.

Представленные в табл. 3 значения определяют необходимый модуль. В данном случае необходимо использовать модули, рассчитанные на прямой ток коллектора от 137 А до 187 А (меньшие значения не учитываются, т.к. модули попарно входят в полумост и тип модуля определяется максимальным током в одном из ключей полумоста).

По данным критериям был выбран модуль M2TKI-200-12K и для сравнения с ним более мощный модуль M2TKI-300-12K.

Результаты расчета температуры перехода данных модулей при различной интенсивности охлаждения представлены на рис. 2, 3 соответственно.

Значения средних токов I_T , напряжений U_T и мощности P_T для каждого из силовых ключей инвертора при работе на активную нагрузку 100 кВт

| | P_T , кВт | I_T , А | U_T , В |
|-------------------|---------------|-----------|-----------|
| IGBT1 | 10,78 | 156 | 69 |
| IGBT2 | 22,27 | 169 | 132 |
| IGBT3 | 47,31 | 187 | 253 |
| IGBT4 | 9,25 | 116 | 80 |
| IGBT5 | 15,92 | 96 | 165 |
| IGBT6 | 17,75 | 52 | 339 |
| Коммутатор | 123,28 | | |
| IGBT7,10 | 49,59 | 137 | 361 |
| IGBT8,9 | 49,59 | 137 | 361 |
| Мост | 198,36 | | |
| Общая | 321,64 | | |

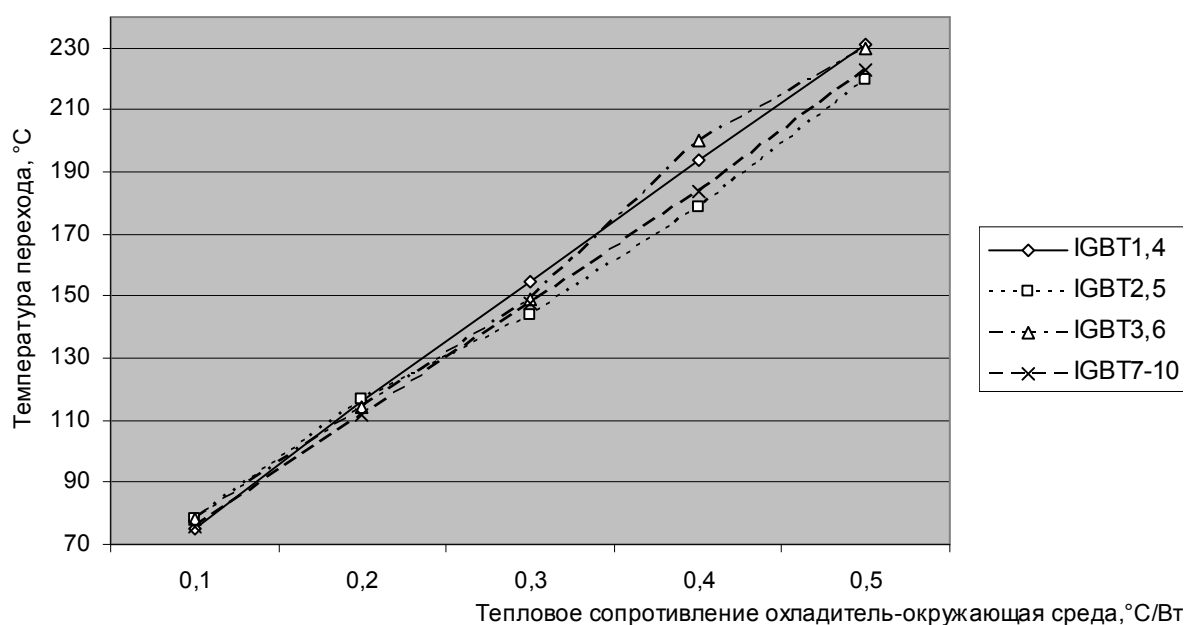


Рис. 2. Зависимость температур перехода транзисторов в силовых ключах М2ТКИ-200-12К коммутатора и моста от интенсивности охлаждения при работе инвертора на активную нагрузку 100 кВт

Из сравнения графиков на рис. 2, 3 следует, что более мощный модуль требует менее интенсивного охлаждения при работе на тех же режимах за счет более низкого сопротивления, более низких потерь включения и выключения, а также более низкого теплового сопротивления. Максимально допустимая температура перехода, указанная в паспортных данных исследуемых модулей, составляет 150 °C. Таким образом, модуль М2ТКИ-200-12К требует теплового сопротивления охладитель-окружающая среда R_{thsa} менее 0,3 °C/Вт для безопасной работы, тогда как М2ТКИ-300-12К позволяет практически для всех позиций, кроме IGBT1,4, работать при тепловом сопротивлении 0,4.

Поставим задачу определить наиболее оптимальный вариант решения проблемы охлаждения: повышение интенсивности охлаждения или установка более мощных модулей. Модули М2ТКИ-200-12К и М2ТКИ-300-12К в соответствии с паспортными данными обладают одинаковыми массогабаритными показателями: размеры 106,5×61,5 мм, масса 0,35 кг. Из полученных при моделировании результатов очевидно, что если система охлаждения не способна обеспечивать тепловое сопротивление менее 0,4 °C/Вт, то установки М2ТКИ-300-12К недостаточно. Следующие модули в серии М2ТКИ-600-12К и М2ТКИ-800-12К, во-первых, обладают размерами 130×140 мм, что потребует полного изменения блока инвертора, включая расположение модулей, а, во-вторых, их масса 1,5 кг, что приведет к увеличению массы схемы инвертора более чем в 4 раза с $5 \times 0,35 = 1,75$ кг до $5 \times 1,5 = 7,5$

кг. При этом значительно возрастает и стоимость схемы. Установка менее мощного модуля М2ТКИ-100-12К при обеспечении высокой интенсивности охлаждения также невозможна, т.к. для данного модуля значение среднего тока коллектора не должно превышать 100 А, тогда как при питании нашей нагрузки ток, проходящий через модули, больше 100 А (табл. 3).

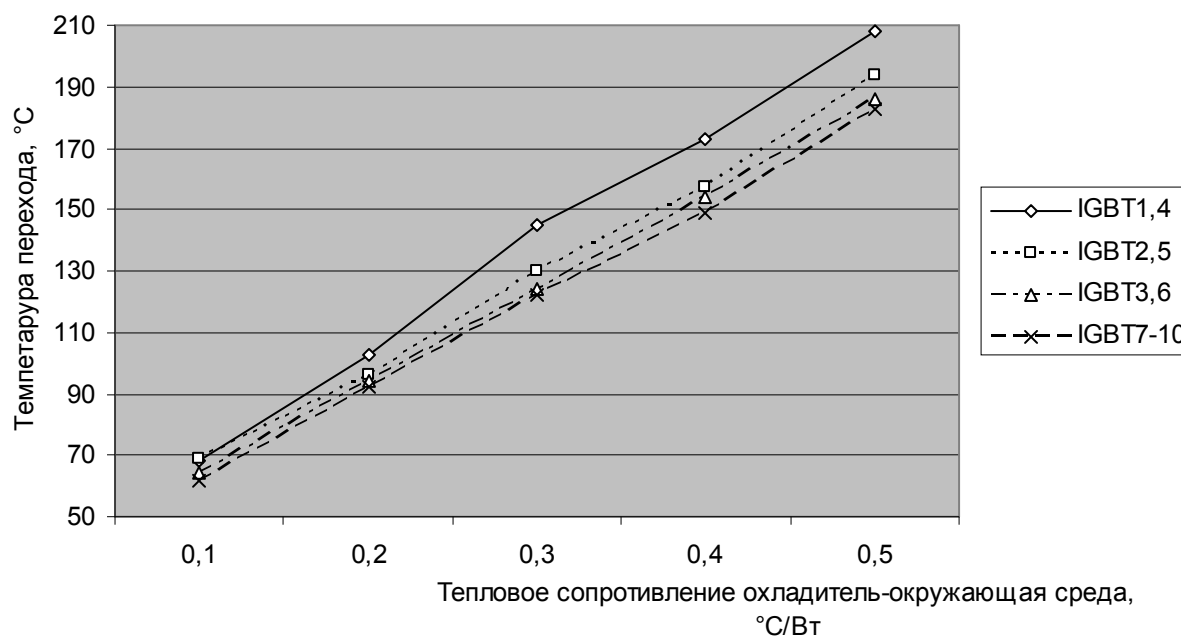


Рис. 3. Зависимость температур перехода транзисторов в силовых ключах М2ТКИ-300-12К коммутатора и моста от интенсивности охлаждения при работе инвертора на активную нагрузку 100 кВт

Для оценки стоимости схемы воспользуемся данными интернет-магазина «Номинал» [3]. Стоимость М2ТКИ-200-12К – 5030 руб., стоимость М2ТКИ-300-12К – 6211 руб. Таким образом, увеличение стоимости инвертора при замене модулей М2ТКИ-200-12К модулями М2ТКИ-300-12К составляет $(6211-5030)*5=5905$ руб.

Оценим вариант с установкой более интенсивной системы охлаждения. В каталоге охладителей ОАО «Электровыпрямитель» [4] представлены охладители О55, О56, О57 и О58, предназначенные для использования в мощных инверторах напряжения. Из анализа таблицы охладителей следует, что обеспечиваемое тепловое сопротивление корпус – окружающая среда, а также цена зависят от массогабаритных показателей охладителя и скорости воздушного потока и в меньшей степени от его формы (табл. 4).

Таблица 4

Соотношение цены и веса охладителей силовых модулей

| Модель охладителя | О25 | О35 | О46 | О47 | О55 |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Масса, кг | 2,17 | 1,26 | 2,58 | 3,25 | 5,2 |
| Цена, руб. [5] | 640 | 480 | 900 | 1000 | 1650 |
| Цена/Масса | 294,9309 | 380,9524 | 348,8372 | 307,6923 | 317,3077 |

Для упрощения задачи будем рассматривать случай, когда на один модуль останавливается отдельный охладитель. При установке одного охладителя на 2 или 4 модуля соотношение интенсивности охлаждения к массогабаритным показателям останется прежним. Изменится лишь требование к скорости воздушного потока для поддержания прежней температуры модулей.

Зависимости массогабаритных и стоимостных показателей схемы представлены в табл. 5. Таким образом, для получения такого же результата, как и замена модуля М2ТКИ-200-12К на более мощный М2ТКИ-300-12К, необходимо установить более мощные охладители, например О57 вместо О56. Стоимостные затраты при установке более мощного модуля для снижения теплового сопротивления на 0.1 °C/Вт составляют $\sim 600*5 \sim 3000$ руб. При этом, если используется один охладитель на 2

или 4 модуля, то затраты на снижение теплового сопротивления будут меньше соответственно в 2 или 4 раза (очевидно, что первоначальные требования к охладителям будут больше, т.к. охладитель должен быть способен рассеивать мощность 2 или 4 силовых модулей соответственно).

Таблица 5

Соотношение массогабаритных и стоимостных показателей схемы инвертора при использовании различных охладителей

| Rthsa, °C/Вт | Температура перехода, °C | | | | Модель охладителя | Масса охладителя, кг | Цена охладителя, руб. |
|-----------------|--------------------------|---------|---------|----------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | IGBT1,4 | IGBT2,5 | IGBT3,6 | IGBT7,10 | | | |
| 0,1 | 75 | 78 | 78 | 76 | O55, принудит. охл | 3,5*5+сист. охл | 1650*5 |
| 0,2 | 116 | 117 | 114 | 112 | O57, ест. охл | 9,2*5 | 2950*5 |
| 0,3 | 155 | 144 | 149 | 148 | O56, ест. охл | 7,5*5 | 2400*5 |
| 0,4 | 194 | 179 | 200 | 184 | O55, ест. охл | 3,5*5 | 1650*5 |

На основе полученных данных можно сделать вывод, что для решения задачи питания более мощного потребителя выгоднее повысить интенсивность системы охлаждения, чем устанавливать более мощные силовые модули. Эта зависимость остается верной для случаев естественного охлаждения модулей. Если возможностей естественного охлаждения оказывается недостаточно, то требуется установка принудительного охлаждения, что требует дополнительных затрат на эту систему. Кроме того, такой подход снижает надежность инвертора, т.к. выход системы охлаждения из строя может привести к выходу из строя всего инвертора из-за превышения максимально допустимой температуры перехода. Таким образом, установка более мощного модуля является предпочтительной в только в тех случаях, когда это позволяет предотвратить установку системы принудительного охлаждения, либо при жестких требованиях к массогабаритным показателям схемы, т.к. массогабаритные показатели охладителей являются определяющими при общей оценке массогабаритных показателей инвертора напряжения.

Сформулированные выше выводы справедливы для инверторов, работающих на нагрузку с разным коэффициентом мощности. Для подтверждения этого факта проведем моделирование работы инвертора на активно-индуктивную нагрузку с коэффициентом мощности 0.8 и прежней активной мощностью 100 кВт (табл. 6).

Таблица 6

Значения средних токов I_T , напряжений U_T и мощности P_T для каждого из силовых ключей инвертора при работе на активно-индуктивную нагрузку с коэффициентом мощности 0.8 и активной мощностью 100 кВт

| Модуль | P_T , кВт | I_T , А | U_T , В |
|-------------------|---------------|-----------|-----------|
| IGBT1 | 13,15 | 190 | 69 |
| IGBT2 | 26,44 | 200 | 132 |
| IGBT3 | 54,41 | 215 | 253 |
| IGBT4 | 12,46 | 156 | 80 |
| IGBT5 | 23,56 | 143 | 165 |
| IGBT6 | 42,02 | 124 | 339 |
| Коммутатор | 172,04 | | |
| IGBT7,10 | 64,31 | 178 | 361 |
| IGBT8,9 | 61,56 | 170 | 361 |
| Мост | 251,74 | | |
| Общая | 423,78 | | |

Очевидно, что значения токов, протекающих через силовые модули, возрастают за счет роста полной мощности до 125 кВА. Как следствие растут и значения мощности статических и динамических потерь, а также температуры перехода. На рис. 4, 5 показаны графики зависимости температуры перехода от интенсивности охлаждения при использовании силовых ключей M2TKI-200-12K и M2TKI-300-12K соответственно.

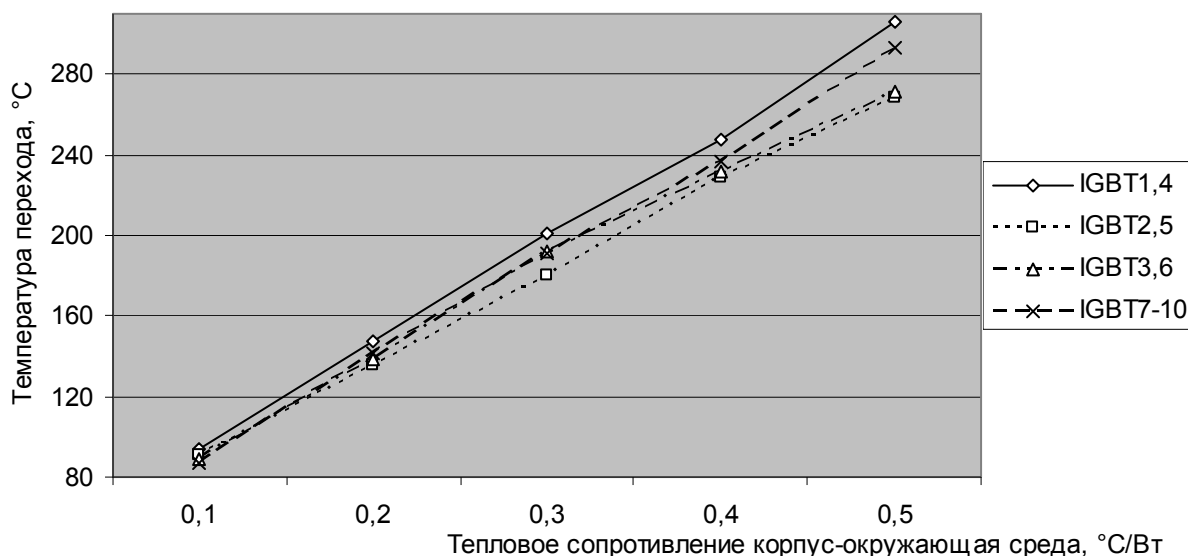


Рис. 4. Зависимость температур перехода транзисторов в силовых ключах M2TKI-200-12K коммутатора и моста от интенсивности охлаждения при работе инвертора на активно-индуктивную нагрузку с коэффициентом мощности 0.8 и активной мощностью 100 кВт

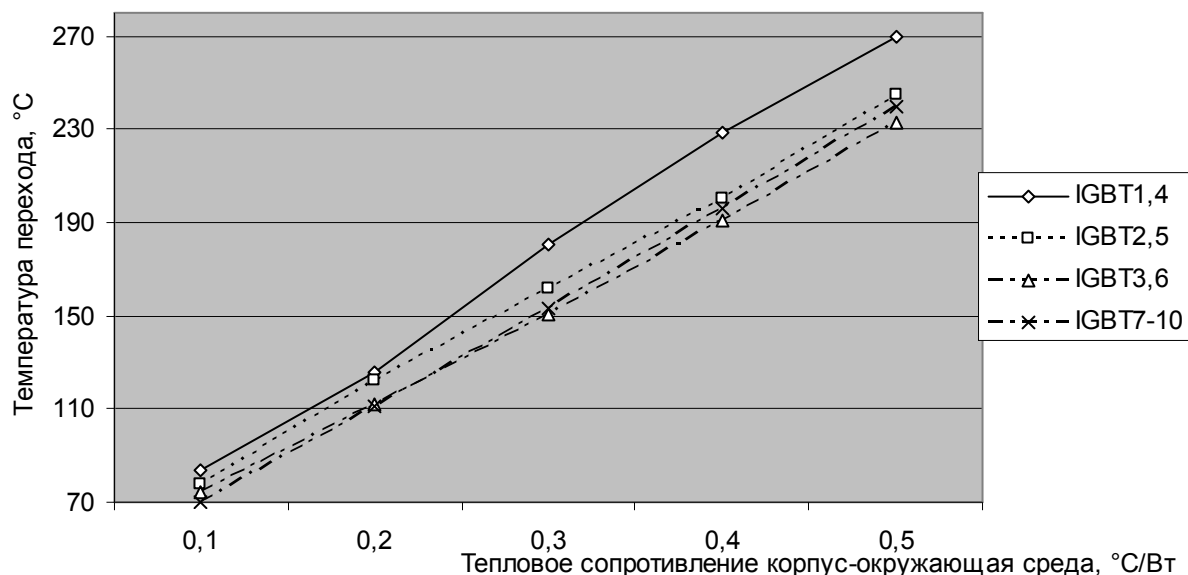


Рис. 5. Зависимость температур перехода транзисторов в силовых ключах M2TKI-300-12K коммутатора и моста от интенсивности охлаждения при работе инвертора на активно-индуктивную нагрузку с коэффициентом мощности 0.8 и активной мощностью 100 кВт

Сравнивая графики на рис. 2 и 4, а также рис. 3 и 5, можно сделать вывод, что температура перехода выросла в соответствии с ростом общей мощности нагрузки, но остальные зависимости остались неизменными.

На основании представленных в работе данных можно сделать следующие выводы относительно использования амплитудной модуляции в автономных инверторах напряжения:

- Частота коммутации не оказывает решающего влияния на выбор модуля. Она превышает частоту выходного сигнала в 2-14 раз, что критично только при эксплуатации модулей в предельном режиме, т.е. когда частота выходного напряжения становится соизмерима с максимально допустимой частотой коммутации силовых ключей. Однако при таких условиях амплитудная модуляция является единственной альтернативой, т.к. частота ШИМ гораздо выше.

- Температура перехода для всех модулей коммутатора практически одинакова. Объясняется это тем, что в предложенной схеме к модулям коммутатора прикладывалось напряжение разной амплитуды, и частота переключения более мощных модулей была меньше. Таким образом, рост мощности динамических потерь компенсируется уменьшением статических потерь, и общая мощность потерь меняется слабо. При другой топологии, например, при использовании каскадной мосто-

вой схемы, частота коммутации всех модулей будет одинаковой и питающие напряжения всех модулей также будут одинаковыми, поэтому мощность потерь, а, следовательно, и температура перехода, разных модулей инвертора будут равны.

– Установленная мощность модуля влияет на температуру перехода в меньшей степени, чем интенсивность охлаждения. Таким образом, установка более эффективного охладителя позволяет использовать менее мощные модули даже при большой нагрузке.

– Коэффициент мощности не оказывает влияния на выбор модуля. Решающее значение имеет лишь общая мощность нагрузки и, как следствие, токи, протекающие в силовых ключах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Muhammad H. R. Power Electronics Handbook / Rashid H. Muhammad. Butterworth Heinemann, 2010. 1362 с.

2. Жемеров Г.Г. Расчет мощности потерь и температуры структуры транзисторно-диодных модулей при компьютерном моделировании преобразователей / Г.Г. Жемеров, В.В. Ивахно, О.И. Ковальчук // Электротехника и электромеханика. 2011. № 4. С. 21-28.

3. Прайс-лист силовых модулей [Электронный ресурс] / «Номинал». Режим доступа: http://номинал.su/price/price_sklad_nominal_1.xls, свободный.

4. Охладители [Электронный ресурс] / ОАО «Электровыпрямитель» Режим доступа: http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/ohlaiteli/silovmodul_vozd.php, свободный. – Загл. с экрана.

5. Прайс-лист на радиаторы [Электронный ресурс] / Литые игольчатые радиаторы. Режим доступа: <http://www.ligra-spb.ru/Price.htm>, свободный. – Загл. с экрана.

Щербаков Андрей Александрович – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey A. Scherbakov – Postgraduate Department of System Engineering Yury Gagarin State Technical University of Saratov

Голембиовский Юрий Мичиславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yury M. Golembiovsky – Dr. Sc., Professor Department of System Engineering Yury Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.179.18

В.Г. Конюшков, В.В. Вязовский

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМАХ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ОБРАБОТКИ ПО РЕЖИМУ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ

Проведено исследование газопроницаемости электровакуумных материалов с «наведенными» дефектами в режиме кратковременной прочности и ползучести в режимах механической нагрузки и обработки по режиму диффузионной сварки.

Диффузионная сварка, ползучесть, водород, газопроницаемость, вакуум, микродефекты структуры, вакуумная плотность, водородопроницаемость, удельная плотность

V.G. Konyuschkov, V.V. Vyazovsky

ANALYSIS OF GAS PERMEABILITY IN THE VACUUM MATERIALS UNDER MECHANICAL LOADING AND TREATMENT BY DIFFUSION WELDING

Investigation of gas permeability in the vacuum materials with "induced" defects under short-term strength and creep modes through mechanical load and processing, and diffusion welding mode.

Diffusion welding, creep, hydrogen, gas permeability, vacuum, micro defects structure, the vacuum density of the hydrogen, the specific density

Использование электровакуумных приборов (ЭВП) в объектах оборонной и космической техники предъявляет особые требования к их надежности и работоспособности. Одним из важных условий надежности и долговечности ЭВП является способность их вакуумных оболочек сохранять высокую герметичность в процессе изготовления и эксплуатации. Наблюдаемые на практике натекания через сквозные неплотности в оболочках могут отличаться по скорости на несколько порядков – от 10^{-10} до 10^{-20} м³/с. Допустимая величина натеканий современных ЭВП СВЧ исходя из условий работоспособности в течение 10-12 лет не должна превышать $133,3 \cdot (10^{-20} \div 10^{-21})$ Па·м³/с.

В настоящее время газопроницаемость различных электровакуумных материалов при температурах, которым подвергается прибор в процессе изготовления и эксплуатации, изучена достаточно хорошо. Недостатком всех выполненных исследований является отсутствие данных по влиянию на их газопроницаемость механических напряжений. В реальных же условиях элементы вакуумной оболочки прибора всегда находятся в напряженном состоянии, вызванном действием статических (в том числе от собственного веса) или динамических нагрузок. Поэтому большой теоретический и практический интерес представляет изучение процесса зарождения и развития сквозных и скрытых дефектов в материале под воздействием термомеханических нагрузок. Технологические особенности режима диффузионной сварки (ДС) материалов таковы, что в процессе обработки детали подвергаются при температурах $(0,5 - 0,9)T_{пл}$ в вакууме порядка $133,3 (10^{-3} - 10^{-8})$ Па воздействию сжимающих усилий. При этом возможно протекание физических процессов, улучшающих свойства исходных материалов. Нами исследовалась газопроницаемость металлов по водороду при испытании их на кратковременную прочность с заданной скоростью нагружений и при испытании на длительную прочность при статической нагрузке.

Авторы [1] впервые исследовали работоспособность сварных соединений из нержавеющей стали применительно к оболочкам ЭВП в термоциклических условиях. В [2] предложена схема испытания сварных соединений на вакуумную плотность при действии напряжений среза. Однако чувствительность регистрации сквозных натеканий в предложенной методике была невелика – $133,3 \cdot 10^{-12}$ Па·м³/с. Эта методика получила развитие в [3], где использовался метод течеискания с чувствительностью до $133,3 \cdot 10^{-19}$ Па·м³/с по гелию.

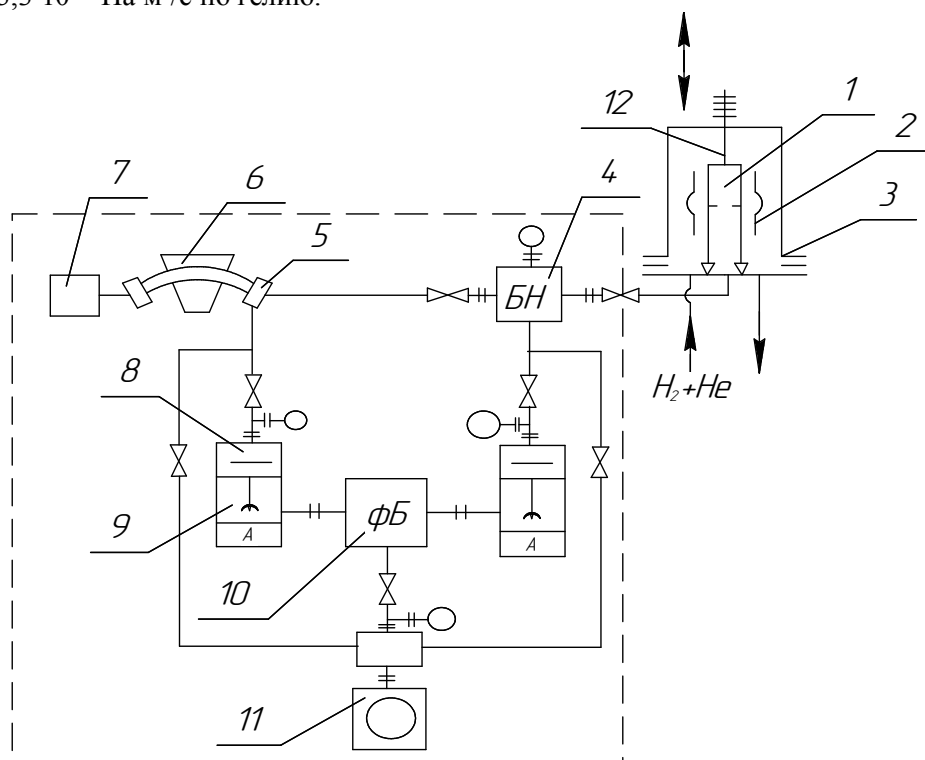


Рис. 1. Схема установки для исследования вакуумной плотности и газонепроницаемости соединений и материалов: 1 – исследуемый образец; 2 – нагреватель; 3 – экспериментальная камера; 4 – накопительный баллон масс-спектрометра MX-1302; 5 – источник ионов; 6 – камера анализатора; 7 – самопишущий потенциометр; 8 – азотная ловушка; 9 – ртутный насос; 10 – уравнильный баллон; 11 – форвакуумный насос; 12 – механизм сварки – растяжения

Исследования газопроницаемости металлов и их соединений проводились нами на установке, схема которой показана на рис.1. Образцы для исследования изготавливались из меди МВ, сплава 29НЖ и нержавеющей стали 12Х18Н9Т (рис. 2). После установки образцов в приставку к масс-спектрометру MX – 1302 внутренняя полость их откачивалась до высокого вакуума, затем они обезгаживались в атмосфере азота при температурах 700-800 °С до установления стабильного фонового сигнала по водороду. Далее мы измеряли водородопроницаемость образца в диапазоне температур 300-700 °С при действии на него сжимающих или растягивающих напряжений величиной в пределах упругости. Затем проводили пластическое деформирование образца растягивающими усилиями с одновременным контролем герметичности по гелию и по водороду в изотермических условиях в диапазоне температур 400-1000 °С. При появлении сквозной течи, момент образования которой фиксировался по появлению пика гелия на выходном приборе анализатора, контролировали её величину в зависимости от величины нагрузки. Таким образом, принятая схема испытания материалов и их соединений является как бы синтезом механических испытаний и испытаний на вакуумную плотность. Основным измеряемым параметром была величина относительной водородопроницаемости – отношение проницаемости в напряженном состоянии P_c к проницаемости ненагруженного образца – P_0 .

При нагружении образцов исследуемых материалов по способу испытания на кратковременную прочность, как видно на рис. 3, наблюдается близкая к линейной зависимость водородопроницаемости от величины нагрузки. Однако можно видеть, что при действии растягивающих нагрузок имеет место увеличение водородопроницаемости, причем тем больше, чем выше температура.

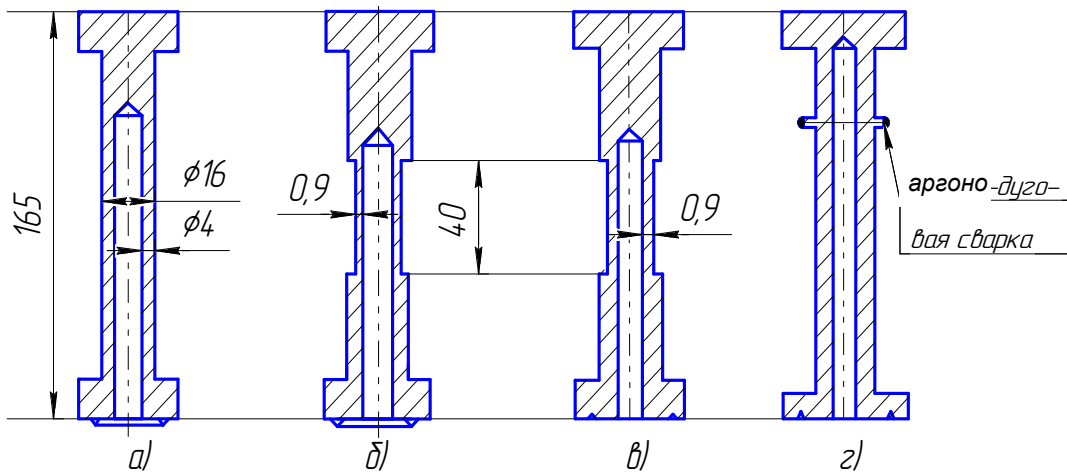


Рис. 2. Образцы исследования термомеханической вакуумной плотности: а – образец для холостых опытов или изучения «залечивания» из стали, б – образцы из ковара и стали, в – образцы из меди, г – образцы аргоно-дуговых соединений стали 12Х18Н9Т, сваренных вольфрамовым электродом при помощи коррозионностойкого хромоникелевого прутка

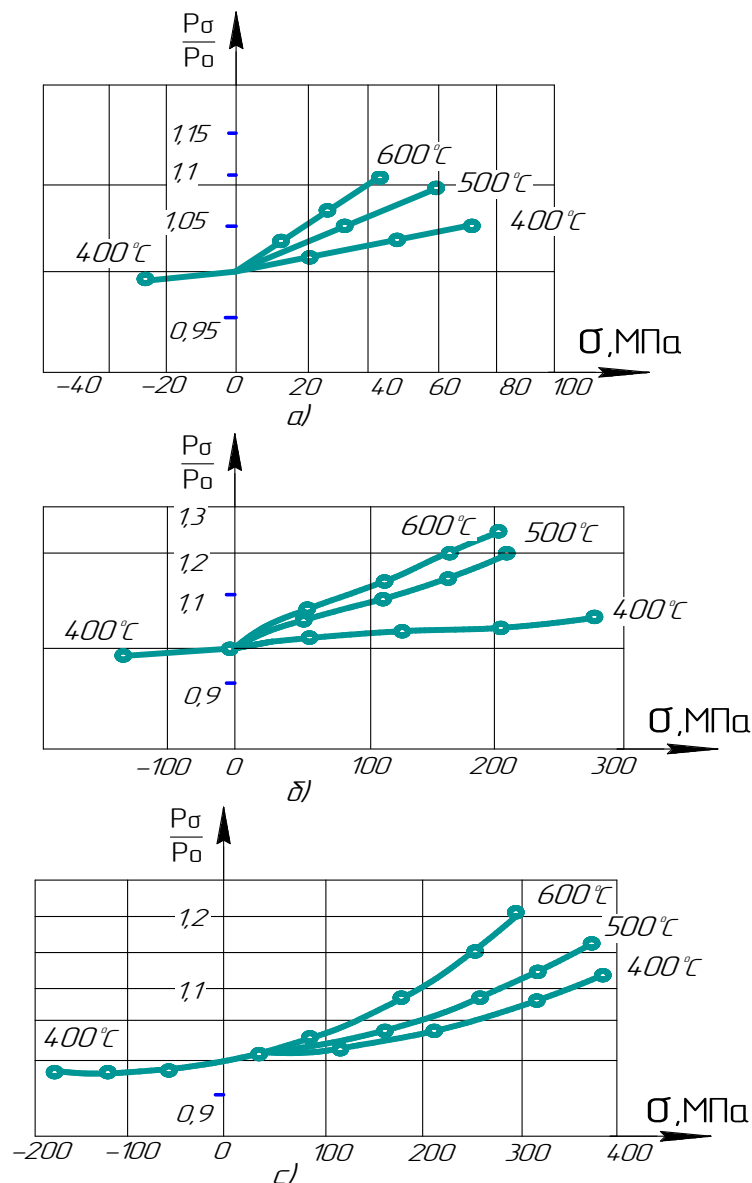


Рис. 3. Изменение относительной водородопроницаемости меди МВ (а), сплава 29НК (б) и нержавеющей стали 12Х18Н9Т (в) при воздействии растягивающих и сжимающих напряжений: P_{σ}/P_0 – относительная водородопроницаемость, σ – механическая нагрузка, действующая на образцы (положительная полуось – действие растягивающих напряжений, отрицательная – сжимающих напряжений), при этом нагрузка на сжатие производилась только при температуре 400 °С

Сжимающая нагрузка (в пределах упругой деформации образца) заметного влияния на проницаемость не оказывает. В [4, 5] авторы объясняют повышение водородопроницаемости металлов при действии растягивающих напряжений суммарным влиянием на процесс трех факторов:

– повышением растворимости R , связанной с проницаемостью

$$P=R \cdot D,$$

где D – коэффициент диффузии;

– тормозящим действием образующихся при деформации микродефектов структуры;

– увеличением активной площади поверхности образца в результате возникающих при пластической деформации металла микронеровностей на поверхности и образование дополнительного числа активных центров вследствие выхода на поверхность дислокаций и вакансий, что облегчает процесс диссоциации адсорбируемого металлом водорода.

Причем тормозящее проницаемость действие второго фактора уменьшается с повышением температуры. Поэтому наблюдается увеличение относительной проницаемости с температурой. При значительной пластической деформации (особенно в области предразрушения) в образце развиваются макродефекты, которые уменьшают эффективную толщину стенки образца.

Изучение микрошлифов показывает, что при испытании на кратковременную прочность из рассмотрения выпадает наиболее существенный с точки зрения нарушения вакуумной плотности фактор – образование и развитие макродефектов. Более того, при таком способе испытания ни на одном образце исследуемых материалов не удалось зафиксировать момент образования сквозной течи (по гелию) или измерить ее величину, так как разрыв стенки происходит очень быстро, а величина нагрузки практически совпадает с пределом прочности данного материала.

Анализ результатов экспериментов позволяет заключить:

– растягивающие или сжимающие (в области упругих деформаций) напряжения не оказывают существенного влияния на водородопроницаемость при пластическом разрушении испытываемых материалов;

– при макропластической деформации образца по способу испытания на кратковременную прочность момент образования сквозного дефекта практически совпадает с полным разрушением образца.

Механические нагрузки на оболочки ЭВП, близкие или равные пределу прочности конструкционного материала встречается практически редко. Однако микронапряжения (как от внешних, так и от внутренних сил), возникающие, в сварных соединениях и монолитных образцах могут в некоторых случаях превышать пределы текучести и прочности или приближаться к их значениям [6].

Известно, что любой материал при повышенных температурах под действием постоянного напряжения может деформироваться с течением времени. Эксперименты по влиянию длительных растягивающих нагрузок на вакуумную плотность проводились при температурах $(0,4 \div 0,6) \cdot T_{пл}$, когда разрушение материала происходит по механизму высокотемпературной ползучести.

В процессе ползучести всех исследуемых материалов (рис. 4) можно отметить существенное (до 50%) возрастание относительной водородопроницаемости P_{σ}/P_0 при напряжениях, близких к значениям пределов текучести. Обращают на себя внимание перегибы на кривых, более заметные при меньших значениях температуры опытов.

Появление этих перегибов можно объяснить следующим образом. В процессе ползучести металла происходит интенсивное зарождение и развитие микродефектов в кристаллической решетке и, прежде всего, возрастает плотность дислокаций. В первый момент времени они инициируют скорость диффузии по ним атомов водорода. В дальнейшем в связи с развитием макродефектов атомарный водород начинает ассоциировать на их стенках в молекулы и скапливаться в порах. Это уменьшает в конечном итоге водородопроницаемость. С ростом температуры роль этих эффектов в общем балансе факторов, влияющих на водородопроницаемость, снижается.

На микрошлифах образцов отчетливо видны поры и трещины, характерные для разрушения исследуемых материалов при ползучести. При этом сквозные течи появляются раньше полного разрушения образцов.

Микropopы появляются, как правило, на границах зерен. Причем количество и размеры их при повышении температуры с течением времени возрастают. Общепринятой в настоящее время схемой зарождения микропор на границах зерен является взаимодействие внутривозеренного скольжения, вызывающего образование ступенек на границах зерен, и проскальзывание по границам, раскрывающего полости около этих ступенек. Зародыши микропор могут образовываться также при проскальзывании около частиц, имеющих в сплаве и расположенных на границах зерен. Экспериментальное изучение кинетики образования пор при ползучести проводили авторы [6].

Ими установлено, что при одном и том же времени испытаний количество пор тем больше, чем выше температура и больше приложенные напряжения. Соответственно больше будет и величина P_{σ}/P_0 . В реальных конструкциях оболочек приборов детали не подвергаются заметной макропластической деформации. Нарушение герметичности чаще всего происходит от действия внутренних напряжений, возникающих из-за различия коэффициентов температурного линейного расширения, остаточных или временных напряжений в соединениях деталей и т.д.

Поэтому особый интерес представляют испытания образцов в условиях ползучести с предварительно «наведенными» макро- или микродефектами. С этой целью были проведены эксперименты на медных образцах, предварительно обработанных в двух режимах: проплавление образца в рабочей зоне по периметру на глубину $0,7 \div 0,9$ от толщины стенки и локальное (в точке) проплавление образца в рабочей зоне. Проплавление осуществляли электронным лучом на установке А.306.05 в один проход луча по периметру. Результаты экспериментов по растяжению образцов из меди МВ с наведенными дефектами представлены в табл. 1.

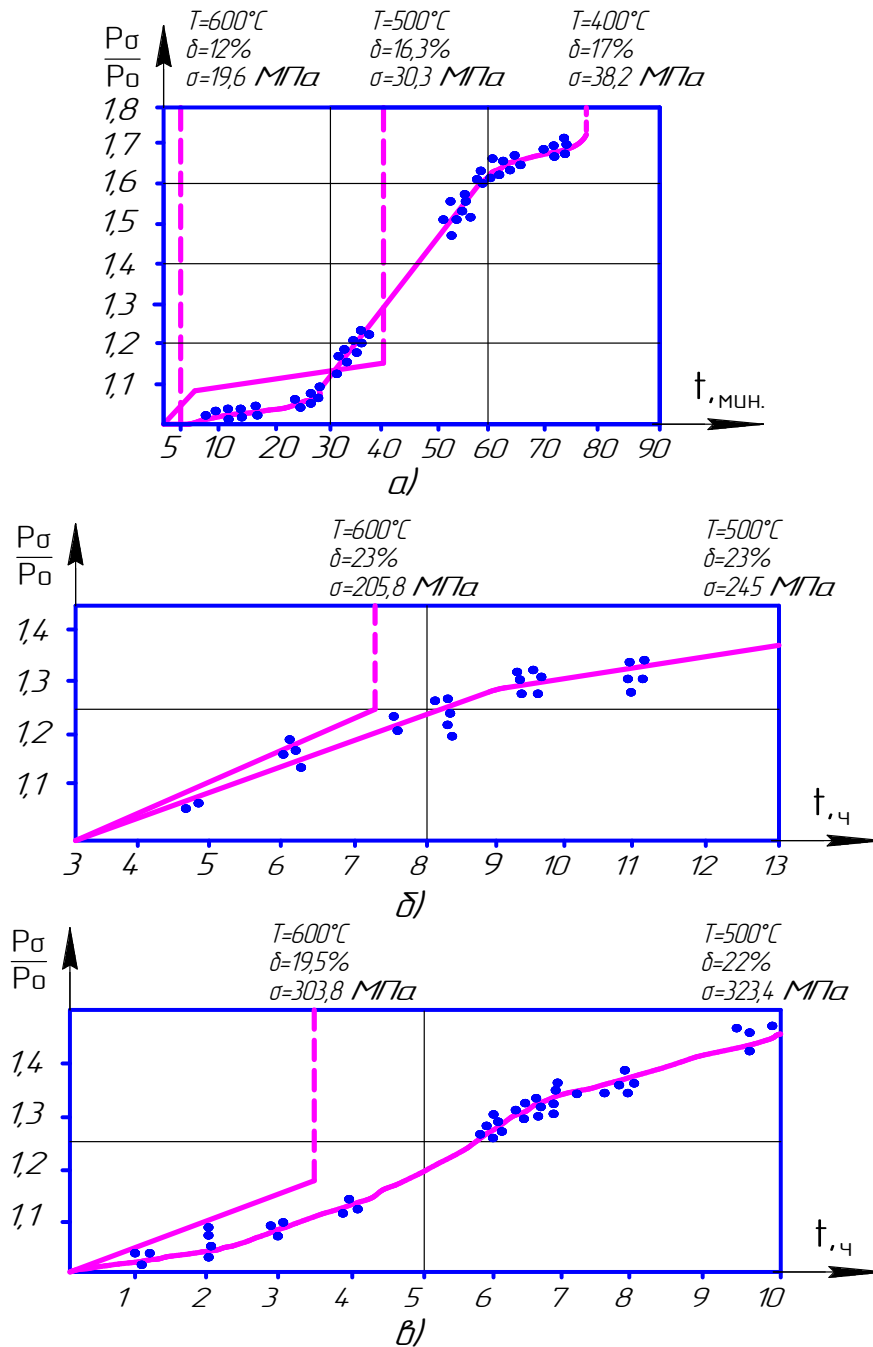


Рис. 4. Изменение относительной водородопроницаемости меди МВ (а), сплава 29HK (б) и нержавеющей стали 12 X18H9T (в) в режиме ползучести с течением времени: штриховыми линиями отмечены моменты времени появления сквозной течи в образцах и соответствующие этим моментам значения температуры (Т), деформации (δ) и нагрузки на растяжение (σ)

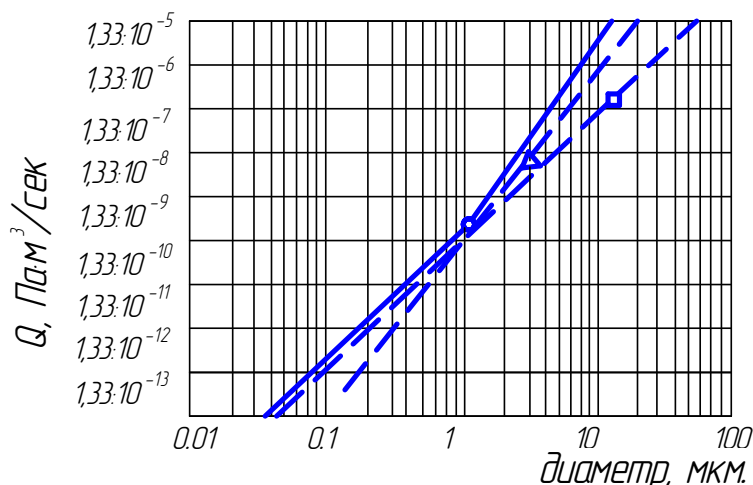


Рис. 5. Зависимость пропускной способности капилляра от его диаметра (для воздуха): Δ – вязкостный режим; ■ – молекулярный режим; ○ – суммарная кривая

Таблица 1

Результаты экспериментов по растяжению образцов

| Вид наведённого дефекта | T, °C | Нагрузка растяжения σ, МПа | Время до появления течи t, мин | Деформация к моменту появления течи δ, % | Поток гелия, Па·м³/с |
|----------------------------------|-------|----------------------------|--------------------------------|--|-----------------------|
| Проплавление лучом по периметру | 500 | 40 | 30 | 3 | 4·10 ⁻¹⁰ |
| Проплавление в точке | 500 | 40 | 10 | 1,2 | 2,6·10 ⁻⁹ |
| Контрольный бездефектный образец | 500 | 40 | 4,3·10 ³ | 10 | 1,3·10 ⁻¹⁰ |

Величина течи (по гелию) у образцов с наведенным дефектом довольно велика – порядка 133,3 (10⁻¹⁰ – 10⁻¹²) Па·м³/с. Место натекания, как правило, локализовано в зоне проплавления.

Обращает на себя внимание большая величина сквозных микродефектов, образующихся у всех испытанных образцов при любых режимах испытания и предварительной обработки.

Некоторые отечественные и зарубежные авторы, длительное время работающие в электровакуумной промышленности, склонны считать так называемые «тонкие» течи, часто встречающиеся в вакуумных оболочках, по существу, крупными, но частично прикрытыми локальными загрязнениями [7-9]. С помощью различного рода термической или химико-термической обработок удастся «раскрывать» эти «тонкие» течи до величин, поддающихся обнаружению с помощью обычных теческаателей.

В металлах величина сквозных дефектов не может быть сколь угодно малой. Величина дефектов в металлах имеет величину по потоку гелия порядка 133,3·10⁻¹⁴ Па·м³/с, что соответствует согласно рис. 5 сквозному каналу порядка 1 мкм. Наблюдаемые на практике более тонкие натекания действительно являются следствием закупорки каналов сквозной проводимости инородными частицами. В этом аспекте не случайными представляются часто наблюдаемые на практике натекания, имеющие характер внезапного прорыва газов в прибор, как если бы в их оболочках неожиданно возник сквозной дефект большой величины.

Как известно [10], проницаемость водорода через металлы осуществляется в пять последовательных этапов: адсорбция молекул на поверхности, диссоциация их на атомы, диффузия атомов через кристаллическую решетку, ассоциация молекул на внутренней поверхности образца и их десорбция. Поэтому любое воздействие, повышающее энергию активации каждого из этих пяти процессов или «тормозящее» их течение, будет уменьшать водородопроницаемость металлов.

Пластическая деформация металлов в подавляющем большинстве случаев протекает по дислокационному механизму за счет движения дислокаций. Когда кристалл деформируется, плотность дислокаций в нем быстро возрастает с увеличением степени деформации. Новые дислокации вносят вклад в упрочнение кристалла и должны оказывать влияние на газопроницаемость металла. Атомы газа, диффундирующее через металл, будут интенсивно «оседать» на дислокациях, уменьшая в итоге общий поток газа через образец, подвергнутый термовакуумной обработке.

Установлено [10], что проницаемость водорода через металлы существенно уменьшается, если их поверхность покрыта пленкой углерода. Это явление объяснено отсутствием дислокации молекул водорода на такой поверхности. На поверхности металлов за время их обработки в технологической камере, откачиваемой «масляными» средствами, может образовываться пленка углерода. В установках УДС-2 вакуумный агрегат как раз и включает паромасляный и механический насосы.

Отметим, что при циклическом деформировании металлов в вакууме их долговечность выше, чем на воздухе. Исследованиями Конюшкова Г.В. установлено, что при воздействии на металлы параметров диффузионной сварки (ДС) происходит увеличение прочности при статическом нагружении. В нашей работе исследовалось влияние воздействия параметров процесса ДС на удельную плотность и газопроницаемость меди МВ, ковара и стали 12Х18Н9Т. Удельная плотность после термовакуумного воздействия проверялась на дисковых образцах диаметром 16 мм и высотой 2 мм и измерялась с помощью гидростатического взвешивания. Обработка металлов проводилась по режимам, обеспечивающим получение равнопрочных соединений в вакууме порядка $6,6 \cdot 10^{-3}$ Па. Результаты исследований, приведенные в табл. 2, показывают, что удельная плотность возрастает для ковара на 5%, нержавеющей стали на 3%. Увеличение плотности медных образцов практически не обнаружено.

Анализ приведенных данных показывает, что водородопроницаемость медных образцов практически не изменяется, а для образцов из ковара и нержавеющей стали уменьшается во всем интервале температур на 1-1,5 порядка. Полученные данные свидетельствуют, видимо, о том, что исходные образцы ковара и стали имеют более высокую пористость, чем медь МВ, и более интенсивно подвергаются залечиванию.

Таблица 2

Изменение удельной плотности металлов в результате термовакуумной обработки

| Материал | Режим обработки | | | | Деформация, δ % |
|----------------|----------------------|-------|--------|---------------------|-----------------|
| | химическая обработка | | | | |
| | P, МПа | T, °C | t, мин | V, Па | |
| Медь МВ | – | 850 | 20 | $6,6 \cdot 10^{-3}$ | — |
| | 6,86 | 850 | 20 | $6,6 \cdot 10^{-3}$ | |
| Сплав 29НК | – | 1050 | 30 | $6,6 \cdot 10^{-3}$ | – |
| | 24,5 | 1050 | 20 | $6,6 \cdot 10^{-3}$ | |
| Сталь 12Х18Н9Т | – | 1050 | 30 | $6,6 \cdot 10^{-3}$ | – |
| | 24,5 | 1050 | 20 | $6,6 \cdot 10^{-3}$ | |

Таким образом, и в основном материале при действии сжимающей нагрузки в условиях вакуума и повышенных температур происходит залечивание пор, приводящее к уменьшению водородопроницаемости металлов. В результате проведенной работы можно сделать выводы:

1. Исследование водородопроницаемости металлов с «наведенными» дефектами в режиме кратковременной прочности и ползучести показало, что при действии растягивающих нагрузок имеет место увеличение водородопроницаемости, причем тем больше, чем выше температура и нагрузка (вплоть до появления сквозных течей). Действие сжимающих нагрузок в упругой области незначительно уменьшает проницаемость.

2. При обработке металлов по режимам ДС наблюдается уменьшение их водородопроницаемости на 1-2 порядка в диапазоне 200-700 °C, вызываемое адсорбцией водорода на возникающих при пластическом деформировании микродефектах структуры и уменьшением степени дислокации его молекул на поверхностях деталей после обработки в установках с «масляными» средствами откачки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. В. Исследование свойств сварных соединений стали Х18Н10Т применительно к оболочкам электровакуумных приборов / В. В. Андреев, В. И. Большаков, И. П. Борисов // Электронная техника. 1966. Сер. I. Вып. 6.

2. Борисов Н.П. Способ определения повреждаемости материалов при испытании на длительную прочность в вакууме / Н.П. Борисов // Заводская лаборатория. 1970. № 12.
3. Крипякевич Р.И. Влияние механических напряжений на водородопроницаемость хромоникелевой стали X18H10T при повышенных температурах / Р. И. Крипякевич, Б. Ф. Качмар, В. М. Сидоренко // Физико-химическая механика материалов. 1970. № 5.
4. Крипякевич Р.И. Влияние напряжений на водородопроницаемость меди, кобальта и их сплавов с керамикой / Р.И. Крипякевич // Физико-химическая механика материалов. 1970. № 3.
5. Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах / Г. Л. Саксаганский. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
6. Нестеров С.Б. Методы расчета вакуумных систем / С.Б. Нестеров, Ю.К. Васильев, А.В. Андросов. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 220 с.
7. Системы неразрушающего контроля. Виды и технология неразрушающего контроля: справ. пособие. М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора в России», 2003. 292 с.
8. Розанов Л.Н. Вакуумная техника / Л.Н. Розанов. М.: Высш. шк., 1990. 320 с.
9. Проницаемость водорода через металлы: учебное пособие / А.А. Писарев, И.В. Цветков, Е.Д. Маренков, С.С. Ярко. М.: МИФИ, 2008. 114 с.
10. Вакуумная техника: справочник. Разд. ГРНТИ / под ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1992. 546 с.

Вязовский Валерий Владимирович – аспирант кафедры «Электронное машиностроение и сварка» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valery V. Vyazovsky – Postgraduate, Department of Electronic Engineering and Welding Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Конюшков Владимир Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронное машиностроение и сварка» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir G. Konyushkov – Ph.D., Associate Professor Department of Electronic Engineering and Welding Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 616.314.17/. 18-008.1 : 579.61 : 616-078 (045)

Л.Ю. Островская, А.П. Могила, А.И. Ханина, Г.Д. Бейбулатов, Л.С. Катханова, А.В. Резанов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ МАРКЕРОВ В ОБСЛЕДОВАНИИ ПАЦИЕНТОВ С ПАТОЛОГИЕЙ ПАРОДОНТА

Проведено изучение местного цитокинового профиля (интерлейкина-6, интерлейкина-10, интерлейкина-12, интерлейкина-18) больных с воспалительными заболеваниями пародонта. Установлено, что у больных пародонтитом развивается местный иммунный ответ, преимущественно по Th2-хелперному пути. Показано, что определение уровня цитокинов в десневой жидкости является информативным неинвазивным методом, позволяющим мониторировать активность воспалительного процесса в тканях пародонта.

Гингивит, пародонтит, цитокины

L.Yu. Ostrovskaya, A.P. Mogila, A.I. Chanina, G.D. Beybulatov, L.S.Kathanova, A.V. Rezanov

USING MOLECULAR MARKERS FOR PATIENTS DEVELOPING PERIODONTAL PATHOLOGY

Analysis of the local cytokine profile (interleukin-6, interleukin-10, interleukin-12, interleukin-18) of the patients developing periodontal disease. It has been found that the patients

with periodontitis develop local immune response mainly through the Th2helper. It has been shown that determination of cytokines in gingival fluid is an informative non-invasive method to monitor intensiveness of the inflammatory process in periodontal tissues.

Gingivitis, periodontitis, cytokines

Хронический генерализованный пародонтит (ХГП) по распространенности, утрате основных функций зубочелюстной системы вследствие потери зубов представляет важную медико-социальную проблему современного общества [3, 8]. Современные представления о патогенезе хронического генерализованного пародонтита определяют его как результирующую взаимодействия микробного фактора и организма больного. При этом нарушение баланса между бактериальной инвазией и резистентностью ротовой полости рассматривается в качестве основного фактора, определяющего клинические проявления поражений тканей пародонта [7, 10].

Анализируя универсальные механизмы повреждения пародонта у пациентов, авторы рассматривают нейроэндокринный дисбаланс, нарушения микроциркуляции, изменения метаболизма соединительной ткани, важная роль придается нарушениям в системе защитных механизмов и, прежде всего, в иммунной системе [6]. Вместе с тем патогенез поражения тканей пародонта до конца не раскрыт.

Ранняя диагностика воспалительных заболеваний пародонта, несмотря на ставшие классическими алгоритмы обследования, остается трудно решаемой проблемой. Клиническая картина и хронического катарального гингивита, и хронического генерализованного пародонтита на ранних стадиях заболевания нередко имеет латентное течение, что затрудняет своевременную диагностику и, следовательно, отодвигает начало адекватных лечебных и реабилитационных мероприятий.

Цель исследования: определение диагностического и прогностического значения изменений цитокинового профиля десневой жидкости у пациентов с воспалительными заболеваниями пародонта на фоне традиционной терапии.

Материалы и методы исследования

В работе использованы материалы, полученные при обследовании 40 больных хроническим генерализованным пародонтитом (ХГП). Группу сравнения составили 30 больных с хроническим генерализованным катаральным гингивитом (ХГКГ), контрольную группу – 25 практически здоровых лиц. Средний возраст пациентов составил – $38,55 \pm 0,63$ лет.

Для обеспечения репрезентативности в число обследуемых пациентов не были включены пациенты, страдающие сахарным диабетом, заболеваниями щитовидной железы, злоупотребляющие алкоголем и курением. Также при отборе пациентов исключались лица с хронической патологией гепатобилиарной и мочевыделительной систем.

Оценка стоматологического статуса осуществлялась в соответствии с рекомендациями В.С. Иванова [4]. Формулировка диагноза ХГП проводилась на основании систематики заболеваний пародонта, принятой на XVI Пленуме Всесоюзного общества стоматологов (1983). Материалом для исследования уровня цитокинов служила десневая жидкость. Подлежащую исследованию область осторожно очищали от зубного налета, изолировали от слюны ватными валиками. Для забора десневой жидкости использовали полоски поролонa (10×4 мм), которые вводили в десневой карман (десневую борозду) и оставляли там до полного пропитывания. Предварительные исследования, выполненные с помощью аналитического взвешивания 30 образцов поролонa указанного объема, показали, что после ее полного пропитывания количество получаемой десневой жидкости составляет $5 \pm 0,05$ мг.

Сразу после получения полоски поролонa, пропитанной десневой жидкостью, ее переносили в пробирку «Эппендорф», содержащую 1000 мкл 0,155М раствора хлорида натрия; пробирку встряхивали с помощью микроцентрифуги Elmi (SkyLine, Латвия) в течение 10 мин и получали разведение десневой жидкости 1:200; полученную десневую жидкость замораживали при -20°C и хранили до проведения анализа. Размораживание производили в день анализа.

Определение содержания цитокинов (интерлейкина-6 (ИЛ-6), интерлейкина-10 (ИЛ-10), интерлейкина-12 (ИЛ-12), интерлейкина-18 (ИЛ-18)) в десневой жидкости проводили методом твердофазного иммуноферментного анализа с использованием автоматического вошера StatWash 2600 (StatFax, USA) орбитального типа с частотой оборотов 400-700 RPM. Результаты анализа учитывались спектрофотометрически с помощью микропланшетного фотометра StatFax 2100 (StatFax, USA) при длине волны 450 нм. Измерения проводили не позднее 10-15 мин после остановки реакции. Для определения уровня цитокинов использовали реактивы фирмы «Вектор Бест» (г. Новосибирск).

Всем больным проводили комплексное лечение заболеваний пародонта, включающее на первом этапе профессиональную гигиену полости рта. Назначали антибактериальную и противовоспалительную терапию.

тельную терапию. Пациентам с хроническим катаральным гингивитом и хроническим пародонтитом рекомендовали полоскание полости рта 0,05%-м раствором хлоргексидина биглюконата 2 раза в день после чистки зубов. Больным хроническим гингивитом проводили аппликации метронидазола («Метрогил-дента гель») по 30 минут, пациентам с хроническим пародонтитом метронидазол вводили в пародонтальный карман. Кратность антибактериальной обработки предполагала 3 посещения с интервалом 2 дня [2]. По показаниям производилось хирургическое устранение пародонтального кармана.

Статистическую обработку результатов исследования проводили с помощью пакета программ STATISTICA, определяли среднее значение и ошибку среднего, с использованием критериев достоверности Стьюдента и Манна-Уитни.

Результаты исследования

У обследованных лиц контрольной группы среднее значение индекса гигиены полости рта по УИГР составило $1,47 \pm 0,06$.

Показатели уровня цитокинов в десневой жидкости были следующими: ИЛ-6 – $12,60 \pm 1,51$ пг/мл, ИЛ-10 – $7,20 \pm 1,02$ пг/мл, ИЛ-12 – $18,52 \pm 1,43$ пг/мл и ИЛ-18 – $11,32 \pm 1,26$ пг/мл.

Больные с воспалительными заболеваниями пародонта предъявляли жалобы на кровоточивость во время чистки зубов, неприятный запах изо рта, зуд в области десен. При объективном осмотре больных обнаружены отечность, цианотичность десны. У всех больных выявлены зубные отложения. Показатели индексной оценки состояния пародонта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные клинические показатели состояния пародонта у больных воспалительными заболеваниями пародонта

| Показатель | Группа пациентов | | |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--|
| | Пациенты с ХГКГ, n=30 | Пациенты с ХГП легкой степени, n=20 | Пациенты с ХГП, сред. и тяж. степени, n=20 |
| Индекс гигиены (УИГР) | $2,18 \pm 0,04$ | $2,37 \pm 0,03^*$ | $2,55 \pm 0,03^{*#}$ |
| Степень кровоточивости десны | $1,69 \pm 0,05$ | $2,18 \pm 0,08^*$ | $2,47 \pm 0,11^{*#}$ |
| РМА | $28,19 \pm 1,45$ | $47,38 \pm 2,20^*$ | $58,47 \pm 2,15^{*#}$ |
| ПИ | $1,38 \pm 0,07$ | $2,89 \pm 0,08^*$ | $5,16 \pm 0,12^{*#}$ |
| Глубина пародонтальных карманов | - | $2,85 \pm 0,15$ | $5,28 \pm 0,26^{*#}$ |

Примечание: * – показатели имеют достоверные различия со значениями в группе пациентов с гингивитом ($p < 0,05$); # – показатели имеют достоверные различия со значениями в группе пациентов с пародонтитом легкой степени ($p < 0,05$).

На ортопантограмме отмечалась деструкция костной ткани межзубных перегородок различной величины в зависимости от степени тяжести пародонтита: исчезновение компактной пластинки, резорбция межальвеолярных перегородок от 1/3 до 2/3 их высоты, явление остеопороза (рис. 1).

При гингивите наблюдали в одинаковой мере повышение уровня в десневой жидкости как про- (ИЛ-6, ИЛ-12, ИЛ-18), так и противовоспалительных (ИЛ-10) цитокинов (рис. 2). Таким образом, формируется местный интегрированный ответ со стороны иммунной системы, который характеризуется повышением содержания как про-, так и противовоспалительных цитокинов и направлен на быстрое купирование воспалительного процесса в пародонте.

В ходе наших исследований установлено, что при пародонтите наиболее значительно была увеличена концентрация ИЛ-6 (в 6-7,2 раз), ИЛ-18 (в 5,2-7 раз) и противовоспалительного медиатора ИЛ-10 (в 9,7-13,7 раз), тогда как содержание ИЛ-12 было не изменено при пародонтите легкой степени и понижено при пародонтите средней степени. Это можно объяснить преимущественно Т₂-хелперным ответом при ХГП, отмеченным и другими исследователями [1].

В результате происходит активация В-лимфоцитарного пула, сопровождающаяся избыточным синтезом иммуноглобулинов. Этот путь малоэффективен в реализации иммунной защиты, но позволяет ослабить деструктивные процессы в пародонте и перевести острое воспаление в хроническое [5].

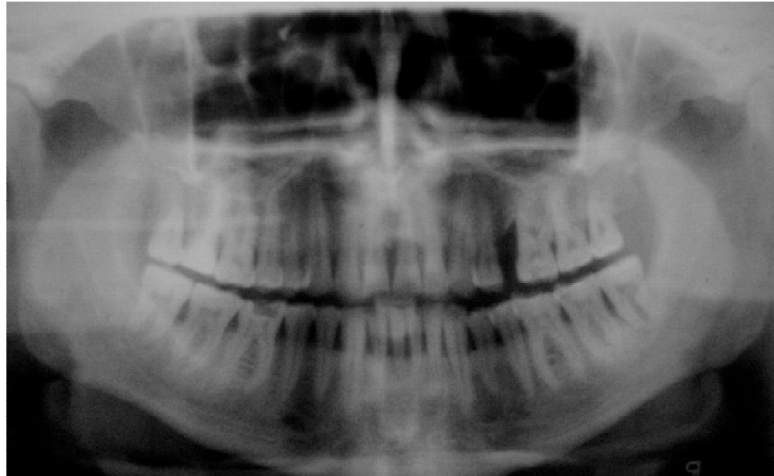


Рис. 1. Ортопантомограмма б-го О., 45 лет. Диагноз: хронический генерализованный пародонтит средней степени тяжести. Определяются резорбция костной ткани межзубных перегородок до 1/2 высоты корня, остеопороз альвеолярной части челюсти

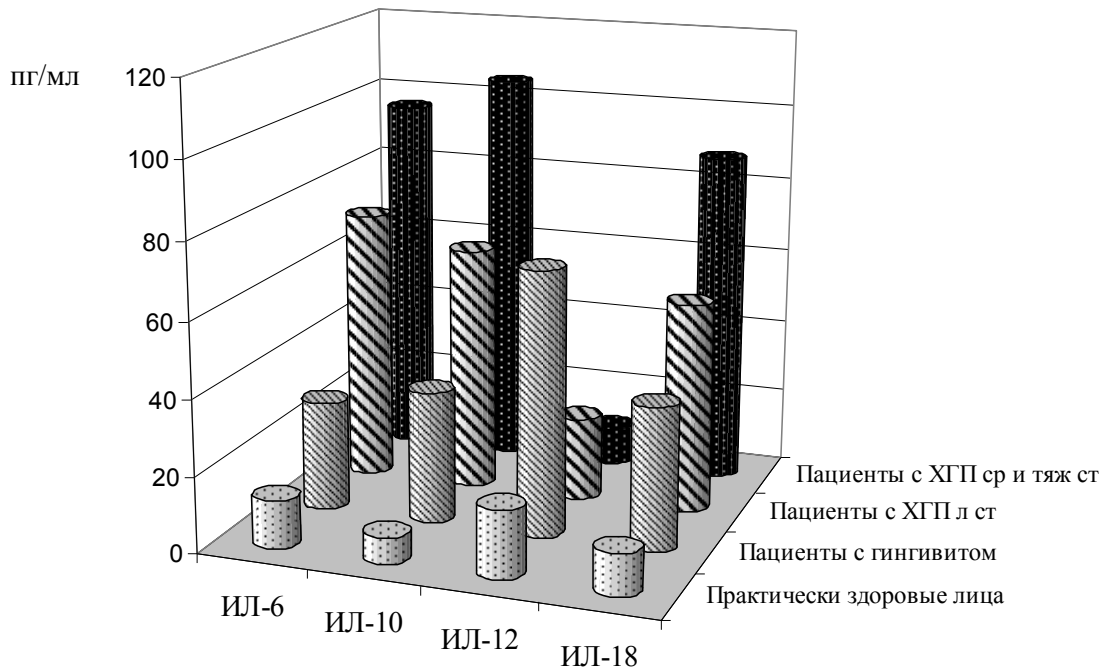


Рис. 2. Содержание интерлейкина-6,10,12,18 в десневой жидкости у пациентов с воспалительными заболеваниями пародонта

Для оценки клинической значимости уровня цитокинов в десневой жидкости в оценке тяжести поражения пародонта были проанализированы взаимосвязи между основными клиническими и индексными характеристиками пародонта, с одной стороны, и концентрацией цитокинов в десневой жидкости – с другой. При проведении корреляционного анализа выявлено, что увеличение содержания в десневой жидкости изучаемых цитокинов коррелировало с тяжестью пародонтита ($r_{\text{ИЛ-6}} = 0,645$; $r_{\text{ИЛ-10}} = 0,622$; $r_{\text{ИЛ-18}} = 0,574$). Выявлена прямая корреляция между повышением уровня провоспалительного ИЛ-6 и глубиной пародонтальных карманов ($r = 0,623$), индексом РМА ($r=0,677$) и индексом ПИ ($r=0,618$). Следовательно, содержание ИЛ-6, ИЛ-10 и ИЛ-18 в десневой жидкости можно рассматривать как параметры, объективизирующие оценку тяжести пародонтита.

Проведение стоматологических мероприятий привело к снижению микробной нагрузки на зубодесневое соединение и восстановлению структуры пародонта у обследованных пациентов. У пациентов с ХГП клиническая ремиссия достигалась в течение 8-14 дней, в среднем – через $10,59 \pm 0,33$. Нами выявлено значительное снижение концентрации всех анализируемых цитокинов, показатели соответствовали аналогичным значениям в группе контроля (табл. 2).

Увеличение содержания каждого из интерлейкинов в десневой жидкости связано не только с изменениями активности воспалительных процессов на уровне зубодесневого соединения, но и с подъемом образования ИЛ-18 в процессах остеокластогенеза, то есть с участием каждого в регуляции локальных процессов разрушения и синтеза костной ткани альвеолярного отростка в процессе лечения воспалительных заболеваний пародонта.

Таблица 2

Содержание цитокинов в десневой жидкости у больных с воспалительными заболеваниями пародонта

| Группа пациентов | | ИЛ-6, пг/мл | ИЛ-10, пг/мл | ИЛ-12, пг/мл | ИЛ-18, пг/мл |
|--|------------------|----------------|-----------------|--------------|-----------------|
| Практически здоровые лица, n=25 | | 12,60±1,51 | 7,20±1,02 | 18,52±1,43 | 11,32±1,26 |
| Пациенты с гингивитом, n=30 | до лечения | 31,25±2,39* | 38,57±2,27* | 63,57±2,63* | 32,50±2,31* |
| | после лечения | 17,65±2,11 | 10,63±2,13 | 22,66±2,70 | 16,56±2,58 |
| Пациенты с пародонтитом легкой ст., n=20 | до лечения | 73,33±3,43* | 68,61±3,32* | 25,28±2,79 | 59,40±3,38* |
| | после лечения | 16,82±1,57 | 6,37±0,94 | 23,47±2,59 | 12,40±1,43 |
| Пациенты с пародонтитом сред.и тяж. ст., n=20 | до лечения | 87,28±5,10* | 96,43±4,90* | 10,78±2,24* | 80,36±5,20* |
| | после лечения | 10,36±2,20 | 10,73±1,52 | 22,29±2,18 | 15,64±2,46 |

Примечание: * – показатели имеют достоверные различия по сравнению со значениями в группе практически здоровых лиц ($p < 0,05$).

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о клинически значимом изменении цитокинового баланса у больных ХГП, что проявляется увеличением уровня как провоспалительных цитокинов (ИЛ-6, ИЛ-18), так и противовоспалительных медиаторов (ИЛ-10). Оценка соотношения содержания цитокинов в десневой жидкости больных четко показывает преобладание факторов с иммуносупрессорными свойствами на фоне недостаточности содержания ИЛ-12, что предопределяет глубокий дефект клеточно-опосредованного иммунитета.

Установлено, что приоритетным для пародонтита является Т2-хелперный ответ иммунитета. У пациентов с хроническим пародонтитом в десневой жидкости отмечен цитокиновый дисбаланс, характеризующийся преимущественным повышением содержания ИЛ-10, ИЛ-6 и уменьшением концентрации ИЛ-12 соответственно тяжести пародонтита. Следовательно, характер изменения цитокинового баланса десневой полости отражает степень местных нарушений.

Очевидно, что длительное сохранение повышенного содержания ИЛ-18 в десневой жидкости у пациентов с пародонтитом средней и тяжелой степеней способствует пролонгации воспалительно-деструктивных изменений в пародонте, резорбции костной ткани и прогрессированию процесса [9].

Таким образом, комплексный анализ содержания цитокинов в десневой жидкости пациентов с ХГП позволяет прогнозировать характер течения заболевания, оценить эффективность лечения и при необходимости наметить пути коррекции. Является актуальной диагностика донозологических состояний, непосредственно предшествующих манифестации заболеваний пародонта, при которых еще возможны обратимые изменения.

Выводы

1. Хронический генерализованный пародонтит у обследованных пациентов сопровождается повышением уровня провоспалительных цитокинов (интерлейкина-6, интерлейкина-18) и противовоспалительных медиаторов (интерлейкина-10) в сочетании с уменьшением содержания интерлейкина-12 в десневой жидкости.

2. Применение пародонтологического лечения у пациентов с воспалительными заболеваниями пародонта способствует купированию клинических проявлений и восстановлению цитокинового баланса в десневой жидкости.

3. Определение уровня цитокинов в десневой жидкости является информативным неинвазивным методом, позволяющим мониторировать активность воспалительного процесса в тканях пародонта, деструкцию костной ткани, и, следовательно, прогнозировать развитие и течение хронического пародонтита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляева О.В. Влияние комплексной терапии на показатели местного иммунитета больных пародонтитом / О.В. Беляева, Н.Н. Кеворков // Цитокины и воспаление. 2002. Т. 1, № 4. С. 34-37.
2. Булкина Н.В. Новые возможности местной антибактериальной терапии воспалительных заболеваний пародонта на фоне патологии органов пищеварения / Н.В. Булкина, Л.Ю. Островская // Рус. мед. журнал. 2007. Т. 15. № 4. С. 230-233.
3. Вейсгейм Л.Д. Организация стоматологической помощи как социальная проблема / Л.Д. Вейсгейм, Е.В. Люмкис // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. 2006. № 1. С. 8-11.
4. Иванов В.С. Заболевания пародонта / В.С. Иванов. М.: Медицинское информационное агентство, 2001. 300 с.
5. Ройт А. Иммунология / А. Ройт, Дж. Бростофф, Д. Мейл. М.: Мир, 2000. С. 169-175.
6. Цепов Л.М. Межсистемные связи при болезнях пародонта / Л.М. Цепов, А.И. Николаев // Пародонтология. 2003. № 2(27). С. 19-24.
7. Цепов Л.М. Диагностика и лечение заболеваний пародонта / Л.М. Цепов, А.И. Николаев. М.: «МЕДпресс-информ», 2004. 200 с.
8. Цепов Л.М. Факторы агрессии и факторы защиты в патологии пародонта воспалительного характера / Л.М. Цепов, А.И. Николаев, Е.А. Михеева // Пародонтология. 2004. №1 (30). С. 3-7.
9. Borrell L.N. Analytical epidemiology of periodontitis / L.N. Borrell, P.N. Papapanou // J. Clin. Periodontol. 2005. Vol. 32, Suppl. 6. P. 132-158.
10. Kinane D.F. Clinical relevance of the host responses of periodontitis / D.F. Kinane, P. Mark Bartold // Periodontol. 2000. 2007. Vol. 43. P. 278-293.

Островская Лариса Юрьевна –
доктор медицинских наук, доцент кафедры
«Стоматология терапевтическая» Саратовского
государственного медицинского университета
имени В.И. Разумовского Минздрава России

Larisa Yu. Ostrovskaya –
Dr.Sc., Associate Professor
Department of Dental Therapy
Saratov State Medical University

Могила Анастасия Петровна –
аспирант кафедры «Стоматология
терапевтическая» Саратовского
государственного медицинского университета
имени В.И. Разумовского Минздрава России

Anastasia P. Mogila –
Postgraduate
Department of Dental Therapy
Saratov State Medical University

Ханина Анастасия Игоревна –
соискатель кафедры «Стоматология
терапевтическая» Саратовского
государственного медицинского университета
имени В.И. Разумовского Минздрава России

Anastasia I. Khanina –
Postgraduate
Department of Dental Therapy
Saratov State Medical University

Бейбулатов Георгий Джамалутдинович –
аспирант кафедры «Стоматология
терапевтическая» Саратовского
государственного медицинского университета
имени В.И. Разумовского Минздрава России

Georgy D. Beibulatov –
Postgraduate
Department of Dental Therapy
Saratov State Medical University

Катханова Лилия Султановна –
соискатель кафедры «Стоматология
терапевтическая» Саратовского
государственного медицинского университета
имени В.И. Разумовского Минздрава России

Lilia S. Katkhanova –
Postgraduate
Department of Dental Therapy
Saratov State Medical University

Резанов Александр Джамалутдинович –
студент стоматологического факультета
Саратовского государственного медицинского
университета имени В.И. Разумовского
Минздрава России

Alexander D. Rezanov –
Undergraduate
Department of Dental Therapy
Saratov State Medical University

Статья поступила в редакцию 20.01.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 678.742:678.5.046; 678.03:546.26

Е.С. Петухова, М.Е. Саввинова

СПОСОБЫ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИЭТИЛЕНОВ ПЭ80Б И ПЭ2НТ11

Исследованы нанокompозиты на основе ПЭ80Б, ПЭ2НТ11, шпинели магния и цеолитов. Выбран и обоснован метод введения нанодобавки в полимерную матрицу, обеспечивающий получение композитов со стабильными свойствами. Установлено, что технологические свойства композитов (температура плавления, показатель текучести расплава) не зависят от количества наполнителя при условии введения в полимерную матрицу термостабилизирующей добавки.

Полиэтилен низкого давления, шпинель магния, цеолиты, термостабилизатор, показатель текучести расплава

E.S. Petukhova, M.E. Savvinova

METHODS OF PE2NT11 PE80B AND POLYETHYLENE MODIFICATION

The paper deals with the research of nanocomposites on the basis of PE80B, PE2NT11, spinel magnesium, and zeolites. The method of introducing nano-size fillers in the polymer matrix that provides obtaining composites with stable properties has been used. It has been found that technological properties of composites (melting temperature, and melt flow rate) do not depend on the amount of filler if the thermo-stabilizing supplement is introduced into the polymer matrix.

Low-pressure polyethylene, spinel magnesium, zeolites, thermo-stabilizer, melt flow rate

В настоящей работе разработке технологии модификации трубных марок полиэтиленов уделено особое внимание, поскольку именно технологическими факторами определяются механические характеристики получаемых материалов.

Транспортировка различных суспензий и взвесей в горнодобывающей и других отраслях, в особенности в условиях Севера России (экстремально низкие температуры, большая амплитуда суточных перепадов температур, возможность замерзания воды в трубах и возникновения морозобойных трещин, воздействие мерзлых грунтов), весьма затруднительна. В зависимости от условий эксплуатации полимерных материалов в промышленных системах требования к их свойствам могут значительно изменяться. Возникает необходимость в материалах, обладающих не только высокими служебными характеристиками, но и адаптивными к условиям применения свойствами.

Применение в качестве модификаторов высокодисперсных наполнителей, в том числе ультрадисперсных, обладающих высокой энергонасыщенностью, повышенной структурной и химической

активностью, является наиболее перспективным направлением получения композитов, отличающихся качественно новыми свойствами.

Целью работы является исследование технологических особенностей модификации трубных марок полиэтиленов.

Материалы и методика эксперимента. В качестве основных полимерных материалов применялись трубные полиэтилены марок ПЭ80Б и ПЭ2НТ11.

Основное назначение полиэтилена средней плотности марки ПЭ80Б – изготовление трубопроводов и соединительных деталей газораспределительных сетей. Трубы из композиции ПЭ80Б используются при строительстве подземных газопроводов, транспортирующих природные горючие газы, применяемые для промышленного и коммунально-бытового использования. Цвет труб, как правило, черный или черный с желтыми маркировочными полосами. Также ПЭ80Б используется при строительстве трубопроводов хозяйственно-бытового холодного водоснабжения и для транспортирования жидких и газообразных веществ, к которым этот вид полиэтилена проявляет химическую устойчивость [1].

Композиции полиэтилена низкого давления бимодального типа ПЭ2НТ11 предназначены для производства труб и соединительных деталей, в том числе хозяйственно-питьевого водоснабжения, композиций для маркировочных полос, изделий, получаемых методом выдувного формования, а также для изготовления высокопрочных толстых пленок толщиной 20 мкм и более.

В качестве нанодобавки была использована шпинель магния, синтезированная в Институте твердого тела СО РАН.

Шпинель магния является искусственно синтезированным аналогом минерала шпинель. С химической точки зрения представляет собой сложный оксид магния и алюминия с фазовым составом $MgO \cdot Al_2O_3$. Частицы шпинели магния характеризуются высокой дисперсностью (размер частиц 50-70 нм) и развитой удельной поверхностью (40-170 м²/г) [2-5].

Результаты эксперимента и их обсуждение. Для исследования влияния нанонаполнителей на технологические свойства ПКМ использовались композиты на основе ПЭ80Б и ПЭ2НТ11, модифицированные нанодисперсной шпинелью магния.

Образцы для исследования были изготовлены по следующим технологиям:

1) в центральной лаборатории ОАО «Казаньоргсинтез». Композиции изготовлены на лабораторных вальцах путем последовательного введения в расплав базового ПЭ термостабилизатора – Ирганокс В225FF (0,27%) (смесь Irgafos 168 и Irganox 1010 в соотношении 1:1), светостабилизатора - технический углерод марки П-245 (2,3%) и добавки шпинели магния в количестве 0,05-2,0 %.

Условия вальцевания ПЭ80Б были следующими:

температура переднего вала – 170 °С

температура заднего вала – 164 °С

время перемешивания – 10 мин

Условия вальцевания ПЭ2НТ11:

температура переднего вала – 176 °С

температура заднего вала – 166 °С

время перемешивания – 10 мин

В результате вальцевания получали пленки полиэтиленовых композитов, из которых в последующем методом горячего прессования получали образцы для испытаний (пластины, столбики).

Условия прессования:

температура прессования – 143-147 °С

давление прессования – 180 кН

2) в лаборатории материаловедения Института проблем нефти и газа СО РАН. Переработка композиций осуществлялось с использованием пластикордера «Брабендер» при скорости вращения валков 30 об/мин и температуре 180 °С. Формованные изделия также получали методом горячего прессования в пресс-формах необходимого типоразмера.

Для выявления возможности использования вводимых наполнителей в качестве термостабилизатора изготавливались образцы без добавки Ирганокс В225FF. Для сравнения в аналогичных условиях были приготовлены стандартные композиции марки ПЭ80Б и ПЭ2НТ11.

В первую очередь было исследовано влияние нанонаполнителей различной химической природы на температуру плавления полиэтиленов. В табл. 1 приведены температуры плавления композитов на основе ПЭ80Б и ПЭ2НТ11, содержащих 0,5 масс.% шпинели магния. Установлено, что введение указанных веществ практически не влияет на температуру плавления базовых марок

полиэтилена. Результаты исследования (ПТР) при нагрузках 5 и 21,6 кг, а также соотношение $\text{ПТР}_{21,6}/\text{ПТР}_5$ приведены в табл. 2.

Анализ результатов показал, что концентрация добавок не оказывает существенного влияния на ПТР полиэтилена марки ПЭ80Б, содержащего термостабилизатор. Переработка модифицированного ПЭ80Б в отсутствие термостабилизатора приводит к снижению значений ПТР при нагрузке 5 кг на 35% по сравнению с образцами, содержащими стабилизатор.

Таблица 1

Температуры плавления композиций на основе ПЭ80Б и ПЭ2НТ11

| Материал | $T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$ |
|--|---------------------------------|
| ПЭ80Б | 126,7 |
| ПЭ80Б+0,5 масс.% MgAl_2O_4 | 127,1 |
| ПЭ2НТ11 | 130,6 |
| ПЭ2НТ11 + 0,5 масс.% MgAl_2O_4 | 130,0 |

Таблица 2

ПТР композитов на основе ПЭ80Б и ПЭ2НТ11

| Состав композиции | ПТР, г/10мин/ Δ ПТР, % при нагрузке | | $\text{ПТР}_{21,6}/\text{ПТР}_5$ |
|--|--|--------------------------|----------------------------------|
| | 5 кг/ Δ ПТР, % | 21,6 кг/ Δ ПТР, % | |
| ПЭ80Б | 0,75 | 10,9 | 14,5 |
| ПЭ80Б+0,25 масс.% B225FF | 0,45/40 | 7,9/27 | 17,5 |
| ПЭ80Б+0,5 масс.% MgAl_2O_4 | 0,29/61 | 6,2/43 | 21,4 |
| ПЭ80Б+0,25 масс.% B225FF + 0,05 масс.% MgAl_2O_4 | 0,45/40 | 8,1/26 | 18,0 |
| ПЭ80Б+0,25 масс.% B225FF + 0,1 масс.% MgAl_2O_4 | 0,47/37 | 8,4/23 | 17,9 |
| ПЭ80Б+0,25 масс.% B225FF + 0,5 масс.% MgAl_2O_4 | 0,45/40 | 8,1/26 | 18,0 |
| ПЭ80Б+0,25 масс.% B225FF + 1,0 масс.% MgAl_2O_4 | 0,48/36 | 8,5/22 | 17,7 |
| ПЭ2НТ11 | 0,20 | 7,2 | 36,0 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% B225FF | 0,18/10 | 6,7/7 | 37,2 |
| ПЭ2НТ11+0,5 масс.% MgAl_2O_4 | 0,19/5 | 8,5/18 | 44,7 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% B225FF + 0,05 масс.% MgAl_2O_4 | 0,17/15 | 6,4/11 | 37,6 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% B225FF + 0,1 масс.% MgAl_2O_4 | 0,18/10 | 6,4/11 | 35,3 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% B225FF + 0,5 масс.% MgAl_2O_4 | 0,17/15 | 6,5/10 | 38,2 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% B225FF + 1,0 масс.% MgAl_2O_4 | 0,17/15 | 6,4/11 | 37,6 |

Анализ ПТР композиций, полученных на базе ПЭ2НТ11, показал, что изменение ПТР при переработке с добавками и термостабилизатором также в основном находится на уровне стандартного образца. Переработка ПЭ2НТ11 с выбранными наполнителями в отсутствие термостабилизатора, сопровождается процессом деструкции в области высоких молекулярных масс, о чем свидетельствует увеличение $\text{ПТР}_{21,6}$ на 18%.

Таким образом, установлено, что введение нанощпинели магния при переработке базового ПЭ80Б и ПЭ2НТ11 в присутствии термостабилизатора не оказывает существенного влияния на реологические характеристики полимера, а изменение показателя текучести расплава при этом находится на уровне стандартных композиций. В отсутствие термостабилизатора при переработке композитов как на основе ПЭ80Б, так и ПЭ2НТ11, наблюдается интенсивный процесс сшивки полимера, что свидетельствует о низких термостабилизирующих возможностях шпинели в составе ПЭ80Б и ПЭ2НТ11.

Основное внимание при разработке технологии переработки нанокомпозитов на полиэтиленовой основе уделялось равномерности распределения наполнителя в полимерной матрице. В качестве критерия равномерности принималась стабильность прочностных характеристик композитов при растяжении.

Для введения нанонаполнителя в полимерную матрицу использовали следующие технологические приемы:

Способ 1: смешение в мельнице ОПА-1 (смеситель типа «пьяная бочка») гранул полиэтилена (ПЭ) и наполнителя, затем экструдирование смеси.

Способ 2: смешение в мельнице ОПА-1 предварительно измельченных гранул ПЭ, далее экструдирование смеси.

Способ 3: смешение гранул ПЭ и наполнителя в роторном смесителе при температуре ($T=170^{\circ}\text{C}$) с последующим измельчением (перегрануляция), затем экструзия смеси.

Основным объектом исследования влияния способа введения добавки на стабильность физико-механических свойств полученных материалов выбран композит на основе ПЭ80Б, содержащий 1 масс.% шпинели магния. Образцы немодифицированного полиэтилена получали экструдированием гранул ПЭ80Б. Результаты исследования прочностных характеристик композитов, полученных с использованием различных способов введения нанонаполнителя, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические характеристики композитов на основе ПЭ80Б, полученных различными способами

| Материал | σ_{\max} , МПа | E, МПа | ϵ , % |
|---|-----------------------|------------------|----------------|
| ПЭ80Б | 24,7 | 1077 | 578 |
| | 24,9 | 997 | 621 |
| | 26,1 | 902 | 660 |
| | 25,4 | 1155 | 606 |
| | 25,4 | 981 | 634 |
| Среднее | 25,3 (24,7-26,1) | 1022 (902-1155) | 620 (578-660) |
| ПЭ80Б + 1,0 масс. % MgAl_2O_4 , способ 1 | 21,4 | 1019 | 528 |
| | 21,6 | 1072 | 509 |
| | 23,4 | 1073 | 555 |
| | 24,8 | 1089 | 582 |
| | 23,8 | 1102 | 560 |
| Среднее | 23,0 (21,4-24,8) | 1071 (1019-1102) | 547 (509-582) |
| ПЭ80Б + 1,0 масс. % MgAl_2O_4 , способ 2 | 23,4 | 997 | 590 |
| | 21,4 | 893 | 537 |
| | 23,7 | 1023 | 565 |
| | 24,3 | 939 | 597 |
| Среднее | 23,2 (21,4-24,3) | 963 (893-1023) | 572 (537-597) |
| ПЭ80Б + 1,0 масс. % MgAl_2O_4 , способ 3 | 25,3 | 1063 | 610 |
| | 23,6 | 998 | 580 |
| | 26,6 | 971 | 635 |
| | 25,2 | 1037 | 562 |
| | 25,8 | 1169 | 656 |
| Среднее | 25,3 (23,6-26,6) | 1048 (971-1169) | 609 (562-656) |

Видно, что прочностные характеристики ПЭ80Б стабильны и высоки. Значения максимальной прочности композитов (σ_{\max}), полученных с использованием способа № 1, имеют большой разброс, однако модуль упругости и относительное удлинение при разрыве имеют стабильные значения. Технологический способ № 2 позволяет получить композиты со стабильными значениями максимальной прочности и относительно стабильными значениями модуля упругости и относительного удлинения. Прочностные характеристики композитов, полученных при использовании способов 1 и 2 ниже характеристик исходного ПЭ80Б.

Использование способа № 3 позволяет получить композиты с уровнем характеристик не ниже ПЭ80Б. Данные композиты характеризуются стабильными значениями максимальной прочности и недостаточно стабильными показателями модуля упругости и относительного удлинения, однако данные характеристики во всех случаях выше, чем у композитов, полученных с использованием способов 1 и 2.

Таким образом, показана эффективность использования способа предварительного смешения гранул ПЭ и наполнителя в роторном смесителе с последующим измельчением смеси и их переработка для модификации трубных марок полиэтиленов. Использование способа перегрануляции смеси приводит к равномерному распределению в объеме полимера нанонаполнителя и, следовательно, к изменению свойств композитов. Управлять процессами структурообразования в полимере и его свойствами можно, используя различные технологические приемы переработки полимеров, варьируя концентрацию и химическую природу наполнителя.

Косвенной характеристикой сил межмолекулярного и адгезионного взаимодействия в системе «полимер – наполнитель» является плотность. В табл. 4 приведены значения плотности полученных композитов.

Видно, что даже при небольших степенях наполнения полимерной матрицы шпинелью магния значения плотности возрастают. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в полученных композитах формируется более плотная структура, т.е. нанонаполнитель, по-видимому, изменяет морфологию полиэтиленов.

Таким образом, показана возможность управления эксплуатационными характеристиками материалов путем изменения технологического способа введения нанодобавки при переработке композитов и варьированием концентрации наполнителя. Выбор оптимальной концентрации нанонаполнителя позволит создать материал с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств.

Таблица 4

Плотность композитов на основе ПЭ80Б, ПЭ2НТ11 и шпинели магния

| Состав композиции | Плотность, г/см ³ |
|---|------------------------------|
| ПЭ80Б+0,25 масс.% В225FF | 0,9375 |
| ПЭ80Б+0,5 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9373 |
| ПЭ80Б+0,25 масс.% В225FF + 0,05 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9374 |
| ПЭ80Б+0,25 масс.% В225FF + 0,1 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9380 |
| ПЭ80Б+0,25 масс.% В225FF + 0,5 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9388 |
| ПЭ80Б+0,25 масс.% В225FF + 1,0 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9383 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% В225FF | 0,9474 |
| ПЭ2НТ11+0,5 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9514 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% В225FF + 0,05 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9475 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% В225FF + 0,1 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9489 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% В225FF + 0,5 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9506 |
| ПЭ2НТ11+0,25 масс.% В225FF + 1,0 масс.% MgAl ₂ O ₄ | 0,9527 |

Исследования были проведены при малых концентрациях нанонаполнителя, дальнейшее изучение свойств материалов планируется проводить при средних и высоких концентрациях нанонаполнителя.

Выводы

Исследованы технологические особенности переработки композиционных материалов на основе ПЭ80Б, ПЭ2НТ11, шпинели магния и цеолитов. Установлено, что нанодисперсные наполнители не оказывают влияние на температуру плавления и показатель текучести расплава полиэтиленов при условии использования термостабилизатора.

Показано, что наиболее приемлемым способом введения нанодобавки в полимерное связующее является использования приема перегрануляции. Данный прием обеспечивает получение композитов со стабильными свойствами за счет равномерного распределения наполнителя.

Выявлено, что плотность композитов при введении модификатора в количестве от 0,05 до 2,0 масс.% увеличивается, что свидетельствует об изменении структуры композитов в ходе технологического процесса переработки.

Обозначения

ПЭ80Б – полиэтилен трубной марки 80; ПЭ2НТ11 – полиэтилен трубной марки 100; Irganox В22FF – термостабилизатор; ПТР – показатель текучести расплава; ρ – плотность; σ_{\max} – максимальное напряжение при растяжении; E – модуль упругости при растяжении; ϵ – относительное удлинение при разрыве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полиэтилен: производство, рынок и перспективные направления переработки / Р.С. Ярулин, Р.К. Сабиров, С.И. Вольфсон, В.И. Кимельблат. Казань: Экс-пресс, 2003. 192 с.
2. Охлопкова А.А. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями / А.А. Охлопкова, О.А. Адрианова, С.Н. Попов. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. 224 с.
3. Охлопкова А.А. ПКМ триботехнического назначения на основе СВМПЭ и ультрадисперсных соединений / А.А. Охлопкова, О.В. Гоголева, Е.Ю. Шиц // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 2. С. 202-206.

4. Охлопкова А.А. Разработка полимерных триботехнических материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и нанодисперсных соединений / А.А. Охлопкова, П.Н. Петрова, О.В. Гоголева // Наука и образование. 2006. № 1. С. 78-82.

5. Полимерные композиты с адаптивными к условиям эксплуатации свойствами / А.А. Охлопкова, П.Н. Петрова, С.А. Слепцова, Т.С. Ючюгяева, О.В. Гоголева // Композиционные материалы в промышленности – «Славполиком»: сб. тр. XXIV Междунар. конф. Ялта, 2004. С. 194-196.

Петухова Евгения Спартаковна –
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Института
проблем нефти и газа Сибирского отделения
Российской академии наук

Evgenia S. Petukhova –
Ph. D., Senior Researcher
Institute of Oil and Gas Problems
Siberian Office of the Russian Academy of Sciences

Саввинова Мария Евгеньевна –
кандидат технических наук, научный сотрудник
Института проблем нефти и газа Сибирского
отделения Российской академии наук

Maria E. Savvinova –
Ph. D., Research Fellow
Institute of Oil and Gas Problems
Siberian Office of the Russian Academy of Sciences

Статья поступила в редакцию 10.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 677.494.745.32.661.838

К.Р. Рамазанов

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО АЛКИЛАТОРА ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕКУРСОРА ДЛЯ СИНТЕЗА РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Рассмотрена модель каталитического алкилятора получения кумола алкилированием бензола пропиленом. Установлено, что для обеспечения приемлемого максимального выхода кумола в реальных условиях оптимальным температурным диапазоном алкилирования бензола пропиленом является 140-180°C и геометрические размеры алкилятора $1 \leq h/2R_0 \leq 10$ (h – высота и R_0 – радиус слоя катализатора). Результаты моделирования использованы при создании установки каталитической дистилляции кумола.

Кумол, алкилятор, гетерогенный катализатор, модель

K.R. Ramazanov

MODELING OF A CATALYTIC ALKYLATOR FOR A PRECURSOR FOR SYNTHESIS OF VARIOUS POLYMERS

The paper considers a model of a catalytic alkylator for cumene production by benzene alkylation with propylene. The optimum temperature range of benzene alkylation with propylene has been found to be 140-180°C and the geometrical sizes of the alkylator should satisfy $1 \leq h/2R_0 \leq 10$ (where h and R_0 are the height and radius of the catalyst layer) to provide an acceptable maximum yield of cumene in actual practice. The results of our modeling were used to design a catalytic cumene distillation unit.

Cumene, alkylator, heterogeneous catalyst, model

В мире до 7 млн. тонн в год или более 96% фенола, являющегося сырьем для производства широкого спектра полимеров, производится совместно с ацетоном по кумольной технологии [1-8], которая состоит из трёх основных стадий: получение кумола алкилированием бензола пропиленом, окисление кумола до гидропероксида (ГПК) с последующим сернокислотным разложением ГПК на фенол и ацетон.

На всех фенольных заводах России [1, 6-8] при получении кумола в качестве катализатора используют низко селективный и коррозионно-активный гомогенный катализаторный комплекс на основе хлорида алюминия, применение которого приводит к образованию множества побочных продуктов, трудно утилизируемых отходов и сточных вод, нестабильному качеству кумола, извлекаемого из многокомпонентной реакционной смеси, к необходимости организации рециклов, их нагрева, охлаждения и транспортировки, усложнению аппаратного оформления и энергоёмкости промышленной установки, высоким значениям расходных коэффициентов сырья на 1 тонну кумола, усиленной коррозии и большим капитальным затратам на ремонт оборудования.

Альтернативой гомогенному катализатору на основе хлорида алюминия получения кумола с точки зрения активности и селективности, экологической безопасности, легкости разделения продуктов реакции и простоты регенерации являются гетерогенные катализаторы – модифицированные и синтетические цеолиты [9]. Принципиальная возможность использования гетерогенных катализаторов – различные алюмосиликаты и широкий спектр модифицированных и синтетических цеолитов типа Y, β, MCM-22 и др., имеющие промышленное значение, доказана на основе экспериментальных данных на пилотных и опытных установках в России [9-13] и промышленных за рубежом [14-26]. Процесс проводится как в газовой фазе, так и в жидких фазах в интервале температур 140-350°C и давлений 0,4÷0,8 МПа. Мольное соотношение бензол:пропилен выбирается от 1:1 до 10:1 [9-26].

Работа посвящена моделированию каталитического алкилятора получения кумола для оптимизации режима проведения реакции алкилирования бензола пропиленом в зависимости от его геометрического размера.

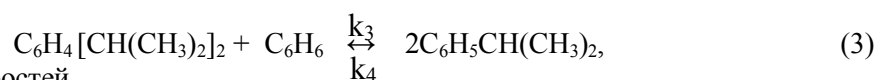
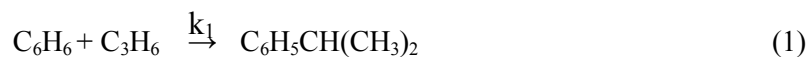
Таблица 1

Физико-химические параметры катализатора

| № | Параметр и обозначение | Ед. измерения | Значение |
|---|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 1 | Удельная масса, δ | кг/м ³ | 820 |
| 2 | Удельная поверхность пор, S | м ² /кг | $5,2 \cdot 10^5$ |
| 3 | Удельный объём пор, V | м ³ /кг | $3,2 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | Средний радиус пор, r | А° | 24 |
| 5 | Плотность, ρ | кг/м ³ | 3400 |
| 6 | Свободный объём, ϵ | | 0,76 |
| 7 | Удельная поверхность, f | м ² /м ³ | 533 |
| 8 | Зернистость, d | мм | 3 |

Химический состав использованного гетерогенного катализатора – оксид кремния (SiO₂) 87,6%; оксид циркония (ZrO₂) 6,5%; оксид алюминия (Al₂O₃) 5,5%; оксид натрия (Na₂O) 0,4%, физико-химические показатели которого приведены в табл. 1.

Кинетическая модель процесса получения кумола. Согласно [27], кинетика реакции твердофазного каталитического алкилирования бензола пропиленом описывается последовательностью трех стадий:



где k_1, k_2, k_3, k_4 – константы скоростей.

Пусть C_1, C_2, C_3, C_4 – концентрации бензола C_6H_6 , пропилена C_3H_6 , кумола $C_6H_5CH(CH_3)_2$, диизопропилбензола $C_6H_4[CH(CH_3)_2]_2$ или полиалкилбензолов (ПАБ), соответственно в молях на 100 г смеси. Тогда получаем систему из четырех дифференциальных уравнений, описывающих скорости протекания реакции (1)-(3) [28]:

$$k_1 C_1 C_2 = dC_3/d\tau, \quad (4)$$

$$k_2 C_2 C_3 = dC_4/d\tau, \quad (5)$$

$$k_3 C_1 C_4 = 2dC_3/d\tau, \quad (6)$$

$$k_4 C_3^2 = -2dC_3/d\tau, \quad (7)$$

где τ – время алкилирования. Интегрируя (4) и (5) при постоянных концентрациях бензола и пропилена, имеем

$$C_3 = k_1 C_1 C_2 \tau \quad (8)$$

$$C_4 = 0,5 k_1 k_2 C_1 C_2 \tau^2 \quad (9)$$

линейный и квадратичный законы нарастания концентраций продуктов во времени до достижения стационарного состояния. Складывая (6) и (7) в квазистационарном приближении получаем:

$$k_3 C_1 C_4 = k_4 C_3^2 \quad (10)$$

или, после подстановки C_3 и C_4 из (8) и (9):

$$k_2/k_1 = 2k_4/k_3. \quad (11)$$

Если $k_1^\circ, k_2^\circ, k_3^\circ, k_4^\circ$ – аррениусовские предэкспоненты и A_1, A_2, A_3, A_4 – энергии активации реакций (1) – (3), то условие стационарности процесса алкилирования приобретает вид

$$k_2^\circ/k_1^\circ = 2(k_4^\circ/k_3^\circ) \exp(A_2 + A_3 - A_1 - A_4). \quad (12)$$

При характерных $k_1^\circ = 5,45 \cdot 10^9$, $k_2^\circ = 2,63 \cdot 10^{10}$, $k_3^\circ = 3,80 \cdot 10^{10}$, $k_4^\circ = 5,83 \cdot 10^{12}$, $A_1 = 51$ кдж/моль, $A_2 = 61,7$ кдж/моль, $A_3 = 66$ кдж/моль, $A_4 = 93$ кдж/моль, $T = 473$ К [28] левая и правая части уравнения (12) совпадают, что свидетельствует о его выполнимости в реальных условиях.

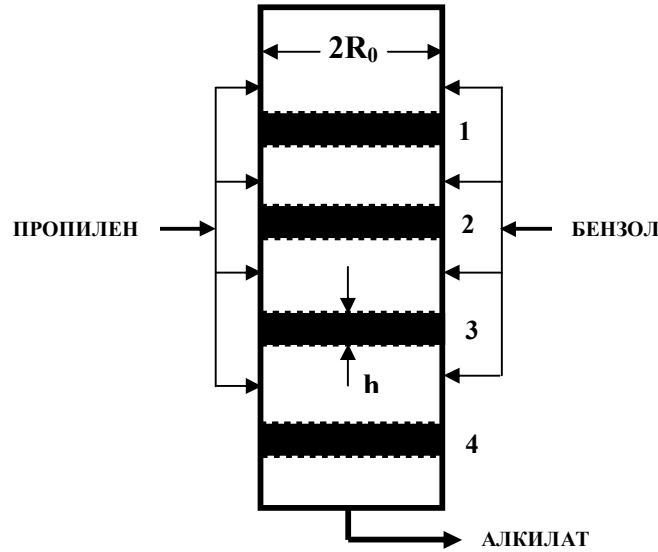


Рис. 1. Схема алкилятора для получения кумола: 1-4 – слои катализатора

Схема четырехслойного каталитического алкилятора получения кумола приведена на рис. 1. Пусть $C_{1j}, C_{12}, C_{13}, C_{14}$ – концентрации бензола на $j = 1, 2, 3, 4$ слоях цилиндрического алкилятора (рис. 1) и C_2 – концентрация пропилена в реакционной массе, которую можно принять как постоянную. Тогда на основании вышеизложенного можно записать следующие выражения для концентраций кумола и ПАБ для j – катализаторного слоя:

$$C_{3j} = k_1^\circ C_{1j} C_2 \exp[-A_1/RT_j] \tau + C_{3j-1}, \quad (13)$$

$$C_{4j} = 0,5 k_1^\circ k_2^\circ C_{1j} C_2^2 \exp[(-A_1 + A_2)/RT_j] \tau^2 + C_{4j-1}, \quad (14)$$

где при $j=1$, $C_{30} = 0$, $C_{40} = 0$ или до первого катализаторного слоя кумол и ПАБ не образуются.

Выход кумола $\alpha < 1$ можно рассчитать по соотношению:

$$\alpha = C_{34} / (C_{14} + C_{34} + C_{44})^{-1}, \quad (15)$$

где пренебрегаем концентрации бензольных примесей. После подстановки C_{3j} и C_{4j} из (13) и (14) в (15) получаем для $j=1, 2, 3, 4$:

$$\alpha = k_1^\circ C_2 \tau \sum C_{1j} \exp[-A_1/RT_j] (C_{14} + k_1^\circ C_2 \tau \sum C_{1j} \exp[-A_1/RT_j] + 0,5 k_1^\circ k_2^\circ C_2^2 \tau^2 \sum C_{1j} \exp[(-A_1 + A_2)/RT_j])^{-1}. \quad (16)$$

Пусть h – толщина или высота слоя катализатора (рис. 1), а $D_{эф}$ – эффективный коэффициент диффузии алкилата по его порам, тогда время просачивания алкилата через слой катализатора может быть оценено как:

$$\tau_0 = h^2 / \pi D_{эф}. \quad (17)$$

Полагая, что время контакта алкилата со слоем катализатора $\tau = 4\tau_0$ при $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = \bar{T}$ из (16) получаем:

$$\alpha = [1 + \pi D_{эф} \exp[-A_1/R\bar{T}] / 4h^2 k_1^\circ C_2 (C_{11}/C_{14} + C_{12}/C_{14} + C_{13}/C_{14} + 1) + (2 k_2^\circ C_2 h^2 / \pi D_{эф}) \exp[-A_2/R\bar{T}]]^{-1}. \quad (18)$$

В качестве характерных концентрационных отношений можно выбрать $C_{11}/C_{14}=1,64$; $C_{12}/C_{14}=1,42$; $C_{13}/C_{14}=1,20$ [28], тогда из (18) имеем:

$$\alpha=[1+\pi D_{эф}\exp[-A_1/R\bar{T}]/21h^2k_1^{\circ}C_2+(2k_2^{\circ}h^2C_2/\pi D_{эф})\exp[-A_2/R\bar{T}]]^{-1}. \quad (19)$$

Концентрация пропилена C_2 в алкилате связана с его давлением в газовой фазе P соотношением Генри [29]:

$$C_2=k_r^{\circ}P\exp[-Q_k/R\bar{T}], \quad (20)$$

где k_r° – константа Генри, равная C_2/P при бесконечно большой температуре и $Q_k=18,41$ кДж/моль – теплота конденсации пропилена [27]. Подставляя C_2 из (20) в (19) получаем:

$$\alpha=[1+\pi D_{эф}\exp[(-A_1+Q_k)/R\bar{T}]/21k_1^{\circ}k_r^{\circ}h^2P+(2k_2^{\circ}k_r^{\circ}h^2P/\pi D_{эф})\exp[(-A_2+Q_k)/R\bar{T}]]^{-1}. \quad (21)$$

Вычислив производную $\partial\alpha^{-1}/\partial h^2$ и приравняв к нулю полученное выражение, находим толщину слоя катализатора h_{max} , отвечающую максимальному выходу кумола α_{max}^0 по соотношению

$$h_{max}^2=P^{-1}\pi D_{эф}(42k_1^{\circ}2k_2^{\circ}k_r^{\circ})^{0,5}\exp[(A_1+A_2+2Q_k)/R\bar{T}]. \quad (22)$$

Подставляя (22) в (21) имеем выражение, согласно которому α_{max}^0 зависит только от соотношения констант и температуры:

$$\alpha_{max}^0=[1+(42k_2^{\circ}/441k_1^{\circ}k_r^{\circ})^{0,5}\exp[(-A_2+Q_k)/R\bar{T}]+(2k_2^{\circ}k_r^{\circ}/21k_1^{\circ})^{0,5}\exp[(A_1+Q_k)/R\bar{T}]]^{-1}. \quad (23)$$

Целесообразно прямой теоретический расчет средней температуры алкилата. Для этого предположим, что толщина h каждого из четырех слоев катализатора (рис. 1) много меньше его диаметра $2R_0$, слой катализатора можно считать термически тонким и пренебречь распределением температуры t , отсчитанной от температуры алкилата за пределами слоя T_0 . Пусть также λ , α и ε соответственно коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и объемной пористости слоя катализатора. При этом на границах идет теплообмен с алкилатом по закону Ньютона – Рихмана [30] при коэффициенте теплообмена γ . Выберем цилиндрическую систему координат O , r , z , φ и поместим её начало координат в центре слоя катализатора и будем считать, что в порах слоя работают энтальпийные химические источники с равномерной тепловой интенсивностью q . После введения безразмерных переменных: $\Phi = \lambda t / (q h)$ – безразмерной температуры, $\beta^2 = 2\gamma h / \lambda$ – безразмерного коэффициента теплообмена, $\eta = r/h$ – безразмерного радиуса, $\omega = \alpha t / h^2$ – безразмерного времени и $\xi = q/q_0$ – безразмерной интенсивности источника (q_0 – характерный масштаб интенсивности химического тепловыделения). Нагрев слоя катализатора может быть описан дифференциальным уравнением [30, 31]:

$$\partial\Phi/\partial\omega = \partial^2\Phi/\partial\eta^2 + \eta^{-1}\partial\Phi/\partial\eta - \beta^2\Phi + f(\omega)\xi \quad (24)$$

с начальным условием $\Phi(\eta, 0) = 0$ и граничным условием $\Phi(\eta, \omega) = 0$. Здесь $f(\omega)$ – функция Хэвисайда, описывающая работу источника, которая $f(\omega) = 0$ при $\omega=0$ и $f(\omega) = 1$ при $\omega>0$.

Приближенным решением (28) является функция [30,31]

$$\Phi \approx -0,5\xi(\eta_0/\eta)^{0,5} \int_0^{\omega} \operatorname{erfc}[0,5(\eta_0-\eta)\omega^{-0,5}]\exp(-\beta^2\omega)d\omega + \xi(1-\exp(-\beta^2\omega))/\beta^2, \quad (25)$$

где $\operatorname{erfc}=1-\operatorname{erf}(x)$, $\operatorname{erf}(x)=2\pi^{-0,5} \int_0^x \exp(-y^2)dy$ – функция ошибок [32].

Интеграл в (25) не берется в аналитическом виде, поэтому решение мы можем найти его только в стационарном режиме нагрева при $\omega \rightarrow \infty$:

$$\Phi \approx \xi[1-0,5(\eta_0/\eta)^{0,5}\exp[-\beta(\eta-\eta_0)]]/\beta^2. \quad (26)$$

Возвращаясь, к размерным переменным имеем:

$$t = q[1-0,5(R_0/r)^{0,5}\exp[-(2\gamma/\lambda h)^{0,5}(R_0-r)]]/2\gamma \quad (27)$$

и при $r \approx R$ – среднерадialная температура нагрева слоя катализатора составит:

$$t_{cp} = q[1-(\lambda h/2\gamma)^{0,5}/2R_0]/2\gamma. \quad (28)$$

Интенсивность теплового источника можно найти по уравнению:

$$q = (\varepsilon D_{эф}/h)[Q_1(\rho_k/M_k) - Q_{исп}(\rho_b/M_b) + Q_2(\rho_{паб}/M_{паб}) + Q_3(\rho_k/M_k)], \quad (29)$$

где M_b , M_k , $M_{паб}$ и ρ_b , ρ_k , $\rho_{паб}$ – молекулярные массы и плотности бензола, кумола и диизопропилбензола или ПАБ, соответственно $Q_{исп}$ – теплота испарения бензола, а Q_1 , Q_2 , Q_3 – теплоты или тепловые эффекты реакции (1)-(3).

При ламинарном движении алкилата коэффициент теплообмена определяется из известного критериального уравнения [30]:

$$Nu = 0,66 Re^{0,5} P_{г\text{ алк}}, \quad (30)$$

где $Nu = \gamma R_0 / \lambda_{алк}$ – критерий Нуссельта, $Re = \pi D_{эф} R_0 / (h v_{алк})$ – критерий Рейнольдса, $P_{г\text{ алк}} = v_{алк} / \alpha_{алк}$ – критерий Прандтля, $\lambda_{алк}$, $\alpha_{алк}$, $v_{алк}$ – коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, ки-

нематической вязкости алкилата за пределами слоя катализатора. Это приводит к следующему выражению для неизвестного коэффициента теплообмена:

$$\gamma = 0,66 * (\lambda_{\text{алк}}/R_0) * (\pi D_{\text{эф}} R_0 / h v_{\text{алк}})^{0,5} * (P_{\text{г алк}})^{0,33} \quad (31)$$

Подставляя величины γ из (31) и q из (29) в (28) получаем уравнение для расчета средней абсолютной температуры:

$$\bar{T} = T_0 + 0,76 \varepsilon D_{\text{эф}} R_0 * [Q_1(\rho_{\text{к}}/M_{\text{к}}) - Q_{\text{исп}}(\rho_{\text{б}}/M_{\text{б}}) + Q_2(\rho_{\text{паб}}/M_{\text{паб}}) + Q_3(\rho_{\text{к}}/M_{\text{к}})] * \quad (32)$$

$$* \lambda_{\text{алк}} (\pi D_{\text{эф}} R_0 / h v_{\text{алк}})^{0,5} * (P_{\text{г алк}})^{0,33} - 1 * [1 - 0,5 [0,76 \lambda h / \lambda_{\text{алк}} * (\pi D_{\text{эф}} R_0 / h v_{\text{алк}})^{0,5} * (P_{\text{г алк}})^{0,33}]^{0,5}].$$

Из соотношения (32) видно, что \bar{T} зависит сложным образом от таких конструктивных параметров алкилятора как его радиус R_0 и высота слоя катализатора h . На основании (23) находим α_{max}^0 для различных h и R_0 , чтобы предсказать поведение алкилятора на начальных стадиях рабочего цикла.

Более детальные исследования требуют учета «старения» и дезактивации слоя катализатора во время его эксплуатации. С этой целью можно предполагать, что дезактивация определяется транспортом диизопропилбензола или ПАБ в поры слоя катализатора с эффективным коэффициентом диффузии $D_{\text{паб}}^{\text{эф}}$, а также константой скорости дезактивации $k_{\text{дез}}$ с температурными аррениусовскими зависимостями:

$$D_{\text{паб}}^{\text{эф}} = D_{\text{паб}}^0 \exp(-A_{\text{д}}/R\bar{T}) \quad (33)$$

$$k_{\text{дез}} = k_{\text{дез}}^0 \exp(-A_{\text{дез}}/R\bar{T}), \quad (34)$$

где $D_{\text{паб}}^0$, $k_{\text{дез}}^0$ и $A_{\text{д}}$, $A_{\text{дез}}$ – аррениусовские предэкспоненты и энергии активации процессов транспорта и химического взаимодействия ПАБ с катализатором. В этом случае средний за время рабочего цикла выход кумола может быть оценен по соотношению:

$$\alpha_{\text{ср}} = \alpha_{\text{max}}^0 [1 - h^{-1} (\pi D_{\text{паб}}^0 / k_{\text{дез}}^0)^{0,5} * \exp(-\Delta A / R\bar{T})], \quad (35)$$

где $\Delta A = A_{\text{дез}} - A_{\text{д}}$.

Очевидно, что численное моделирование алкилятора следует начинать с многоступенчатого расчета рабочих температур. Тепловые эффекты реакции (1)-(3) рассчитывали по закону Гесса [29]. При энтальпиях образования соответственно бензола, пропилена, кумола и диизопропилбензола или ПАБ, равных $\Delta H_{\text{б}}^0 = -82,98$ кДж/моль, $\Delta H_{\text{п}}^0 = -20,42$ кДж/моль, $\Delta H_{\text{к}}^0 = -41,3$ кДж/моль и $\Delta H_{\text{паб}}^0 = -29,6$ кДж/моль [33], тепловые эффекты реакции (1)-(2) составляют: $Q_1 = \Delta H_{\text{к}}^0 - \Delta H_{\text{б}}^0 - \Delta H_{\text{п}}^0 = 62,1$ кДж/моль; $Q_2 = \Delta H_{\text{паб}}^0 - \Delta H_{\text{к}}^0 - \Delta H_{\text{п}}^0 = 32,12$ кДж/моль; $Q_3 = 2 \Delta H_{\text{к}}^0 - \Delta H_{\text{б}}^0 - \Delta H_{\text{паб}}^0 = 29,98$ кДж/моль. С учетом плотности жидких фаз при $\rho_{\text{б}} = 0,88 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{к}} = 0,86 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{паб}} = 0,87 \cdot 10^3$ кг/м³, молекулярных масс $M_{\text{б}} = 78 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $M_{\text{к}} = 120 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $M_{\text{паб}} = 162 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и теплоты испарения бензола $Q_{\text{исп}} = 30,77$ кДж/моль получается следующая удельная энергия выделения тепла в объеме слоя катализатора:

$$Q_1(\rho_{\text{к}}/M_{\text{к}}) - Q_{\text{исп}}(\rho_{\text{б}}/M_{\text{б}}) + Q_2(\rho_{\text{паб}}/M_{\text{паб}}) + Q_3(\rho_{\text{к}}/M_{\text{к}}) = 4,85 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3. \quad (36)$$

Для $\varepsilon = 0,76$, $D_{\text{эф}} = 5 \cdot 10^{-8}$ м²/с [28] и (36) имеем рабочую формулу вычисления интенсивности тепловыделения в слое катализатора, получаемую на основании соотношения (29):

$$q = 18,43/h, \text{ Вт/м}^2. \quad (37)$$

Если принять, что при средней температуре реактора 160°C теплофизические параметры алкилата примерно соответствуют таковым для воды на линии насыщения, т.е. $\lambda_{\text{алк}} = 0,681$ Вт/(м·К), $v_{\text{алк}} = 0,191 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $P_{\text{г алк}} = 1,1$ [29], то для вышеупомянутого $D_{\text{эф}} = 5 \cdot 10^{-8}$ м²/с на основании соотношения (31) получаем следующую рабочую формулу для расчета коэффициента теплообмена:

$$\gamma = 0,42 (h R_0)^{-0,5}, \text{ Вт/(м}^2/\text{К)}. \quad (38)$$

Подставляя величины q и γ из соотношений (37) и (38) в соотношение (28) при $\lambda = 0,582$ Вт/(м·К) [33] находим рабочую формулу для расчета средней температуры перегрева слоя катализатора относительно температуры алкилата за его пределами:

$$t_{\text{ср}} = 21,92 (R_0/h)^{0,5} [1 - 0,83 (h^3/R_0)^{0,25}], \text{ град}. \quad (39)$$

Из нее нетрудно видеть, что величина $t_{\text{ср}}$ увеличивается с радиусом алкилятора R_0 и уменьшается с толщиной слоя катализатора h и действительно расчеты показывают, что наибольшая температура перегрева слоя катализатора относительно алкилата $t_{\text{ср}} = 81$ град относится к самому тонкому слою катализатора с $h = 0,1$ м и максимальному из рассмотренных в нашей работе радиусу алкилятора $R_0 = 1,5$ м. При вышеупомянутых значениях k_1^0 , k_2^0 , A_1 , A_2 , $Q_{\text{к}}$ полученная на основании соотношения (23) рабочая формула для вычисления выходов кумола в начальный период работы алкилятора без существенной дезактивации слоя катализатора имеет вид

$$\alpha_{\text{max}}^0 = [1 + 0,675 (k_{\text{р}}^0)^{-0,5} * \exp(-9674/\bar{T}) + 0,675 (k_{\text{р}}^0)^{0,5} * \exp(8347/\bar{T})]^{-1}, \quad (40)$$

где величина подгоночного параметра $k_r^0 = 6 \cdot 10^{-16}$, отвечающий безразмерным относительным концентрациям и давлениям пропилена в законе Генри (20) рассчитывался из имеющихся в нашем распоряжении экспериментальных результатов по зависимости выхода кумола от $h, R_0, \bar{T} = T_0 + t_{cp}$ при $T_0 = 433K (160^\circ C)$.

При $D_{наб}^0 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, $k_{дез}^0 = 1,61 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ и $\Delta A = 10 \text{ кДж/моль}$ [28] на основании соотношения (35) была получена рабочая формула для вычисления среднего выхода кумола с учетом старения и дезактивации катализатора за время рабочего цикла (2 года) в виде:

$$\alpha_{cp} = \alpha_{max}^0 [1 - (1,40/h) \exp(-962/\bar{T})]. \quad (41)$$

Расчеты по формуле (40) показывают, что при абсолютной температуре алкилата $T_0 = 303K (30^\circ C)$ и $\bar{T} \leq 384K (111^\circ C)$ алкилатор практически неработоспособен даже в самом тонком $h = 0,1 \text{ м}$ и широком $R_0 = 1,5 \text{ м}$ слое катализатора, где величина $\alpha_{max}^0 \leq 0,02$.

На рис. 2А приведены результаты расчета α_{max}^0 и α_{cp} в зависимости от геометрического размера алкилатора от соотношения высоты слоя катализатора h к его диаметру $2R_0$ при температуре алкилата $140^\circ C$ (кривые 1, 2) и $180^\circ C$ (кривые 3, 4) и зависимости их (кривая 5) и (кривая 6) от температуры алкилата, а на рис. 2В зависимости α_{max}^0 (кривые 1, 2) и α_{cp} (кривые 3, 4) от температуры алкилата при тонком слое $h = 0,1 \text{ м}$ (кривые 1,4) и толстом слое $h = 1 \text{ м}$ (кривые 2, 3) катализатора.

В тонком и широком слое катализатора в зависимости от $h/2R_0$ до величины $h/2R_0 = 1$ (рис.2А) выходы кумола α_{max}^0 и α_{cp} уменьшаются, которые совпадают и не зависят в от $h/2R_0$ в рассчитанном диапазоне величин $1 \leq h/2R_0 \leq 10$, причем с увеличением температуры от $140^\circ C$ до $180^\circ C$ выходы кумола возрастают (сравни кривые 1, 2 и кривые 3, 4). Вместе с тем наблюдается увеличение выхода кумола в начальный период α_{max}^0 (кривая 4, рис.2А) в наиболее приемлемом практическом диапазоне изменения температуры $140-180^\circ C$ (кривая 5, рис. 2А), поскольку в процессе эксплуатации катализатора за счет его старения и дезактивации величина выхода α_{cp} достигает максимума при температуре $250^\circ C$ со снижением активности или быстрой дезактивации уже при $300^\circ C$ (кривая 6, рис. 2А).

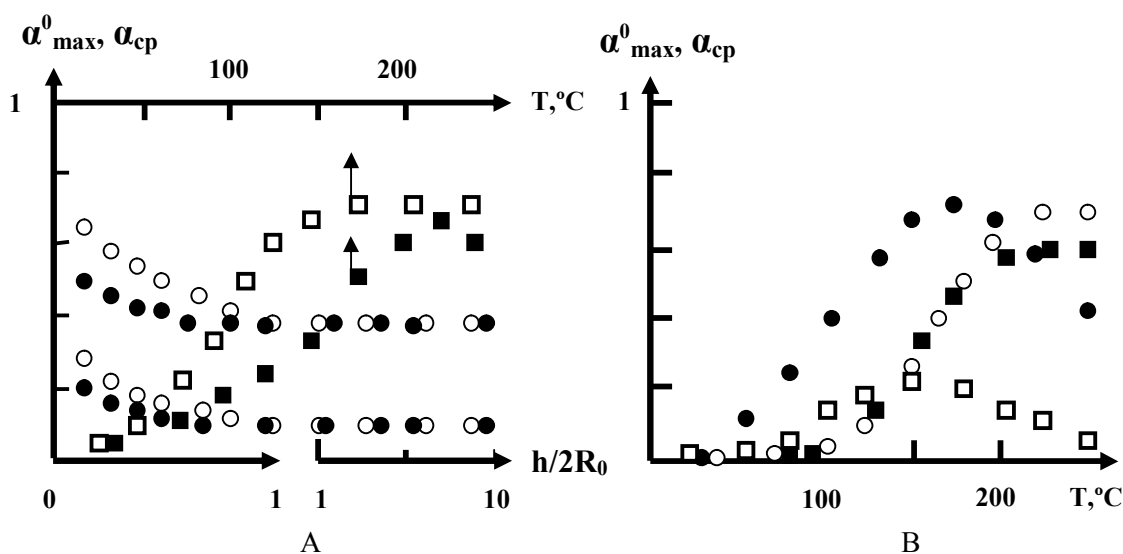


Рис. 2. Зависимости наибольших начальных α_{max}^0 (1,3) и среднего выхода α_{cp} (2,4) кумола: А – от соотношения высоты слоя катализатора h к диаметру алкилатора $2R_0$ при температуре алкилата $140^\circ C$ (1,2) и $180^\circ C$ (3,4); α_{max}^0 (5) и α_{cp} (6) от температуры алкилата; В – α_{max}^0 (1,2) и α_{cp} (3,4) от температуры алкилата при тонком слое $h = 0,1 \text{ м}$ (1,4) и толстом слое $h = 1 \text{ м}$ (2,3) катализатора

Результаты расчетов на рис. 2 В показывают, что с увеличением высоты слоя катализатора и температуры возрастает выход кумола α_{max}^0 и α_{cp} (тонкий $h = 0,1 \text{ м}$, кривые 1,4 и толстый слой катализатора $h = 1 \text{ м}$, кривые 2, 3), достигая максимума при $175^\circ C$ (кривая 1) и $150^\circ C$ (кривая 4) выходы кумола соответственно α_{max}^0 и α_{cp} в тонком слое с последующим снижением за счет «старения» и дезактивации тонкого слоя катализатора с повышением температуры (кривые 1, 4). Для толстого слоя катализатора (рис.2В, кривые 2,3) для важного при эксплуатации катализатора технологического параметра α_{cp} наиболее приемлемым температурным диапазоном является $140-180^\circ C$, поскольку с увеличением температуры также проявляется тенденция усиления и дезактивации катализатора, к примеру, при температуре $200^\circ C$ (рис. 2В, кривая 3) уже достигается максимальный выход кумола (кривая 3).

Таким образом, хотя модель каталитического алкилятора получения кумола предсказывает максимальные выходы кумола для толстого слоя катализатора с увеличением температуры, однако увеличение температуры выше 200°C приводит и к быстрому «старению» и дезактивации катализатора. Поэтому для реальных практических условий получения кумола алкилированием бензола пропиленом на гетерогенных цеолитсодержащих катализаторах наиболее приемлемым температурным диапазоном эксплуатации является 140-180°C для алкилятора с геометрическими параметрами $1 \leq h/2R_0 \leq 10$, которые использованы при создании установки каталитической дистилляции кумола [11-13].

Выводы

1. Моделирование каталитического алкилятора получения кумола предсказывает, что для обеспечения приемлемого максимального выхода кумола в реальных условиях оптимальным температурным диапазоном алкилирования бензола пропиленом является 140-180°C и геометрические параметры алкилятора $1 \leq h/2R_0 \leq 10$ (h – высота и R_0 – радиус слоя катализатора).

2. Результаты моделирования использованы при создании установки каталитической дистилляции кумола.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кружалов Б.Д. Совместное получение фенола и ацетона / Б.Д. Кружалов, Б.И. Голованенко. М.: Наука, 1963. 200 с.
2. Hock H. Autoxidation of Hydrocarbons Peroxides of benzene derivatives / H. Hock, S. Lang. Ber. V.77. 1944. № 3. P. 257-264.
3. Kirk-Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology / Kirk-Othmer. 3rd Edition. See article «Phenol». V. 17. P. 373.
4. Закошанский В.М. Кумольный процесс получения фенола-ацетона / В.М. Закошанский // Нефтехимия. Т. 47. 2007. № 4. С. 301-313.
5. Закошанский В.М. Альтернативные технологии получения фенола / В.М. Закошанский // Российский Химический Журнал (ЖРХО им. Д.И. Менделеева). Т. LI. 2008. № 4. С. 53-71.
6. Постоянный технологический регламент №37-03 цеха получения изопропилбензола производства органического синтеза ООО «Саратоворгсинтез». Саратов: 2003. 252 с.
7. Постоянный технологический регламент №40-03 цеха получения гидропероксида изопропилбензола производства органического синтеза ООО «Саратоворгсинтез». Саратов; 2003. 179 с.
8. Постоянный технологический регламент №53-06 цеха получения фенола и ацетона производства органического синтеза ООО «Саратоворгсинтез». Саратов; 2006. 158 с.
9. Применение цеолитов в катализе / под ред. акад. Г.К. Борескова, Х.М. Миначева // Новосибирск. Наука. 1977. 192 с.
10. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты органических и неорганических веществ. СПб.: АНО НПО «Мир и Семья», АНО НПО «Профессионал», 2002. Ч. 1. 998 с.
11. Рамазанов К.Р. Разработка технологии получения кумола в режиме каталитической дистилляции на твердофазном катализаторе / К.Р. Рамазанов // Материалы отраслевого совещания по нефтехимии «Производство мономеров и продуктов на их основе». М., 2002. С. 152-153.
12. Пат. 15779 (Полезная модель) РФ: МПК C07C 2/66, 15/085; B01J 8/04 (2006.01). Установка каталитической дистилляции кумола; заявитель и патентообладатель Рамазанов К.Р. (RU); №2011151580; заявл. 16.12.2011; опубл. 10.05.2012.
13. Ramazanov K.R. Increase of efficiency of cumol process of recelving phenol and acetone / K.R. Ramazanov // European Science and Technology: 4th International scientific conference. Munich. V. II. 2013. P. 775-786. ISBN 978-3941352-89-6.
14. Q-MAXTM PROCESS FOR CUMENE PRODUCTION // Сайт компании UOP [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.accessengineeringlibrary.com.|...|0071....
15. Pat. US 4857666, IPC C 07C 100, 268, 522. Alkylolation / transalkylation process; assign.UOP Company; filed Sep.21,1988; publ. Aug.15, 1989.
16. Pat. US 4587370, IPC C 07C 15/02, 15/00, 02/66, 02/00, 07/00, 07/04, 02/64. Aromatic hydrocarbon alkylolation process product recovery method; assign.UOP Company; filed Jun 5,1985; publ. May 6, 1986.
17. CUMENE // Сайт компании Lummus Global [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.Lummus.cbi.com.

18. Pat. US 5086193, IPC C 07C 264. Aromatic alkylation process; assign. Chemical Research and Licensing Company, ABB Lummus Crest Inc.; filed Nov.9, 1990; publ. Feb. 4, 1992.
19. Pat. US 5894076, IPC C07C 266, 502 ,7163; C10G 4500. Process for alkylation of benzene; ; assign. Catalytic Distillation Technologies Company; filed May 12, 1997; publ. Apr. 13, 1999.
20. Pat. US 7524467, IPC B01J 8/04; C07C 2/00, 2/64. Process for the production of alkylbenzene; assign. Lummus Technology Inc. and Bloomfield NJ (US) Company; filed Jun 8, 2006; publ. Apr. 28, 2009.
21. Pat. US 4307254, IPC C 07C 41/05. Catalytic Distillation process; assign. Chemical Research and Licensing Company; filed Feb. 21, 1979; publ. Dec. 22, 1981.
22. Pat. US 5055627, IPC C 07C 2/68. Process for the preparation of cumene; assign. Chemical Research and Licensing Company; filed Sep. 11, 1979; publ. Oct. 8, 1991.
23. Pat. US 5866736, IPC C07C 266. Process for the production of alkyl benzene; assign. Catalytic Distillation Technologies Company; filed Oct. 14, 1997; publ. Feb. 2, 1999.
24. Pat. US 6002058, IPC B01D 3/00; C10G 29/20, 29/00, 65/04 ,65/00, 69/00, 49/00, 045/00, 001/00; C07C 002/64, 001/00, 005/03. Process for the alkylation of benzene; assign. Catalytic Distillation Technologies Company; filed May 12, 1997; publ. Dec. 14, 1999.
25. Pat. US 7074978, IPC C07C 2/66. Process for the production of alkylbenzene; assign. ABB Lummus Crest Inc. Company; filed Feb. 25, 2003; publ. Jul 11, 2006.
26. Pat. US 7524467, IPC B01J 8/04; C07C 2/00, 2/64. Process for the production of alkylbenzene; assign. Lummus Technology Inc. and Bloomfield NJ (US) Company; filed Jun 8, 2006; publ. Apr. 28, 2009.
27. Алкилирование. Исследования и промышленное оформление процесса / под ред. Л.Ф. Олбрайта и А.Р. Голдсби: пер. с англ., под ред. В.Г. Липовича. М.: Химия, 1982. 336 с.
28. Жоров Ю.М. Кинетика промышленных органических реакций: справ. изд. / Ю.М. Жоров. М.: Химия, 1989. 384 с.
29. Жуховицкий А.А. Физическая химия: учеб. для вузов / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман 3-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1976. 543 с.
30. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. М.: Энергия, 1977. 343 с.
31. Электрохимическая обработка металлов: учеб. пособие для студентов машиностроительной и химической специальностей / Ю.В. Чеботаревский, Ю.В. Серянов, Л.А. Фоменко, Т.Н. Соколова. Саратов: СГТУ, 1998. 124 с.
32. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн // под общ. ред. И.Г. Арамановича. М.: Наука, 1974. 831 с.
33. Химическая энциклопедия. Т. 1-5. Под ред. И.Л. Кнунянца и Н.С. Зефирова. М.: Большая российская энциклопедия, 1988-1998.

Рамазанов Кенже Рамазанович –
кандидат физико-математических наук, кафедры
«Химическая технология» Технологического
института Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Kenzhe R. Ramazanov –
Ph. D.,
Department Chemical Technology
Technological Institute
Yury Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.02.13, принята к опубликованию 20.04.13

УДК 66.081.6

В.М. Седелкин, Л.Н. Потехина, О.А. Чиркова, Д.А. Машкова, Е.В. Олейникова

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЦЕТАТЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН

Целью работы являлось изучение влияния состава формовочных смесей, приготовленных на основе диацетата целлюлозы, на их реологические свойства и оптические характеристики. В статье приведены зависимости эффективной вязкости ацетатцеллюлозных растворов от напряжения сдвига и дан анализ влияния на вязкость концентрации полимера и включения в состав растворов протофильных добавок. Установлены зависимости оптических свойств формовочных растворов от изменяемых факторов.

Диацетат целлюлозы, формовочные растворы, эффективная вязкость диацетатцеллюлозных растворов, микрогелевые частицы, наноструктурированные фильтрационные мембраны

V.M. Sedelkin, L.N. Potekhina, O.A. Chirkova, D.A. Mashkova, E.V. Oleynikova

STRUCTURE AND PROPERTIES OF CELLULOSE ACETATE SOLUTIONS FOR MOULDING NANOSTRUCTURED FILTRATION MEMBRANES

The purpose of the paper is to study the impact of molding materials prepared on the basis of cellulose diacetate, their rheological properties and optical characteristics. The article provides the data relating effective cellulose acetate solution viscosity relation and the shear stress, including the analysis the impact of the polymer concentration and protophilic solutions on the viscosity ratio. Relations between the optical properties of molding solutions and variable factors have been found.

Cellulose diacetate, solutions forming, effective viscosity of cellulose diacetate solutions, microgel particles, nanostructured filtration membranes

Ацетаты целлюлозы широко используются для изготовления фильтрационных мембран, особенно для пищевых, фармацевтических и медицинских технологий. Это связано с такими их свойствами, как умеренная гидрофильность, обеспечивающая взаимодействие полимера с водой без растворения в ней, инертность полимера к компонентам разделяемой системы, способность растворяться в большом числе сравнительно дешевых растворителей с образованием хорошо формуемых растворов.

В качестве полимера для мембран наиболее широко используется вторичный ацетат целлюлозы – диацетат целлюлозы (ДАЦ). Его макромолекулы являются достаточно жесткими и образуют устойчивые надмолекулярные структуры. Это, во-первых, облегчает получение рыхлой базовой матрицы при формовании ассиметричных мембран, а, во-вторых, затрудняет растекловывание полимера при эксплуатации мембран, препятствуя их деформации под влиянием давления. Повышению жесткости полимера способствует наличие в цепи большого числа циклических звеньев.

Эксплуатационные характеристики фильтрационных мембран (проницаемость, селективность) существенно зависят от состава исходного формовочного раствора: вида полимера и его концентрации, типа растворителя, наличия и концентрации нерастворителей, играющих роль пластификаторов, агентов набухания или порообразователей.

Для приготовления формовочных растворов был использован диацетат целлюлозы, полученный из хлопкового сырья, свойства которого даны в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические характеристики исходного полимерного сырья

| Физико-химические характеристики | | | | | | |
|----------------------------------|--|--|---|---|--------------------------------------|-------------------------------|
| Степень ацетилирования, % | Средне-вязкостная молекулярная масса \bar{M}_η , г/моль | Предельное число вязкости $[\eta]^{25}$, см ³ /г | Насыпная плотность ρ_n , г/см ³ | Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /г | Объем пор V_n , см ³ /г | Средний радиус пор r_n , нм |
| 55,4 | $7,8 \times 10^4$ | 1,65 | 1,32 | 11,5 | 0,05 | 1,65 |

Степень этерификации использованного сырья составляла $\gamma=240-260$, а степень замещения $m=2,4-2,6$.

Степень ацетилирования образцов определяли согласно [1]. Средневязкостную молекулярную массу определяли вискозиметрически (в качестве растворителя использовали ацетон квалификации ч.д.а.) при 25 °С и рассчитывали по уравнению Марка-Куна-Хаувинка [1]:

$$[\eta] = K \times \bar{M}_\eta^\alpha,$$

где $[\eta]$ – предельное число вязкости, см³/г; K и α – константы, которые определялись в соответствии с методикой [2] и были равны $K=1,6 \times 10^{-4}$, $\alpha=0,82$; \bar{M}_η – средневязкостная молекулярная масса полимера.

Насыпная плотность была определена весовым методом.

Использованный в опытах хлопковый диацетат целлюлозы имел низкую полидисперсность и отличался узким молекулярно-массовым распределением.

Известно [3], что на структуру и функциональные свойства полупроницаемых фильтрационных мембран определяющее влияние оказывает выбор системы полимер-растворитель при получении формовочных растворов.

Из литературных данных известно [4], что наиболее эффективным растворителем вторичных ацетатов целлюлозы является метилацетат. Однако повсеместно при изготовлении пленок и мембран используется более дешевый технически чистый ацетон, который приемлем и по растворяющей способности, и по стоимости. Поэтому в качестве растворителя при приготовлении исследованных нами полимерных формовочных смесей на основе ДАЦ и был использован ацетон.

Для изменения структуры формовочных растворов в них добавлялись нерастворители (вода и этиловый спирт), которые могут выполнять роль агентов набухания и порообразователей.

Характеристика исследованных растворов дана в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика растворов ДАЦ

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Концентрация ДАЦ, масс. % | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 | 20 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Концентрация ацетона, масс. % | 97 | 95 | 93 | 90 | 85 | 80 | 92 | 90 | 88 | 83 | 88 | 83 | 78 | 68 |
| Концентрация воды, масс. % | - | - | - | - | - | - | 1 | 3 | 5 | 10 | - | - | - | - |
| Концентрация этилового спирта, масс. % | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 5 | 10 | 15 | 25 |

Критерием истинности (изотропности) полимерного раствора, как это принято повсеместно, считали получение однородной, визуально прозрачной жидкости. В случае растворения низкомолекулярных компонентов получение визуально прозрачной однородной жидкости с большой долей вероятности говорит о молекулярной степени дисперсности раствора, так как морфология низкомолекулярного растворимого вещества в конденсированном состоянии (например, кристаллическом) достаточно однородна по всему объему образца. Поэтому в данном случае нет оснований считать, что после растворения основной массы вещества в системе могут остаться какие-либо нерастворенные ассоциаты. Многолетняя лабораторная и технологическая практика подтверждает эти предположения.

Совершенно по-другому обстоит дело в случае растворения полимеров. Даже в благоприятных случаях, с точки зрения термодинамики их растворения, всегда остаются проблемы кинетического свойства, обусловленные цепным строением макромолекул и большой молекулярной массой полимера. В конденсированном состоянии полимера молекулярные цепи перепутаны друг с другом, возникают всякого рода зацепления макромолекул, что чисто стерически затрудняет проникновение молекул растворителя в матрицу полимера.

В ацетатах целлюлозы, относящихся к аморфно-кристаллическим полимерам, возникают дополнительные трудности в связи с тем, что одна и та же макромолекула может входить и в кристаллит (и даже не в один), и в аморфную область. В таких полимерах кристаллиты играют роль сцепок (физических сшивок), которые в еще большей степени затрудняют проникновение молекул растворителя в матрицу полимера и, таким образом, сдерживают полное растворение полимерного остова даже в термодинамически хороших растворителях. Полностью не разрушенные кристаллиты (или их фрагменты) переходят в раствор основной массы полимера и образуют частицы, имеющие большие размеры, чем макромолекулы. В литературе такие частицы называют по-разному (ассоциаты, агрегаты, кластеры, надмолекулярные частицы, микрогелевые частицы) [4].

Параметры микрогелевых частиц (МГЧ) таковы, что они не нарушают визуальной прозрачности и однородности структурно-сложного раствора полимера. Несмотря на то, что количество таких МГЧ от общей массы полимера обычно не превышает 0,01-0,2 %, их присутствие в растворе позволило нам использовать для исследования его свойств такой структурно-чувствительный оптический метод, как метод спектра мутности [4].

Плодотворное использование этого метода связано с тем, что фрагменты кристаллитов, составляющих основу МГЧ, являются достаточно плотными частицами, интенсивность рассеяния света от которых на 2-3 порядка превосходит интенсивность молекулярного рассеяния света. Поэтому для изучения морфологии растворов полимеров нами использован метод спектра мутности, основанный на измерении зависимости мутности системы τ от длины волны падающего света λ в определенном интервале $\Delta\lambda$.

Структурные изменения в полимерных растворах проявляются также через конформационные состояния макромолекул полимера – их форму, построение, расположение. Наиболее информативным методом изучения конформационных изменений макромолекул полимера в растворах является измерение их реологических характеристик.

Основной реологической характеристикой при течении жидкостей является их вязкость. Если для низкомолекулярных жидкостей (растворителей) под физической (динамической) вязкостью подразумевается их микровязкость, то для растворов полимеров понятия микро- и макровязкости разделяются в силу цепного строения полимеров из макромолекул и независимости сегментальных движе-

ний цепи. Поэтому для характеристики вязких течений концентрированных полимерных растворов целесообразно использовать понятие эффективной вязкости $\eta_{эф}$, которая учитывает все виды деформаций объема раствора при его течении и зависит от характера образующейся так называемой флуктуационной сетки межмакромолекулярных зацеплений.

Для определения реологических параметров растворов ДАЦ использовался ротационный вискозиметр марки Rheotest RN 4.1. Относительная погрешность определения $\eta_{эф}$ не превышала 4 %.

На рис. 1 приведены зависимости эффективной вязкости растворов с различной концентрацией ДАЦ от напряжения сдвига σ .

Как видно из рис. 1, вязкость полимерных растворов очень сильно зависит от концентрации. Вязкость растет с увеличением содержания полимера в растворе, причем эта зависимость нелинейная. Наличие макромолекул и процессы их релаксации, сильно зависящие от молекулярной массы и концентрации полимера, приводят к основным различиям в структуре, в том числе и в вязкости полимерных растворов.

Концентрация полимера в растворах, используемых для формирования наноструктурированных баромембран, изменяется в диапазоне 3-10 % (при сухом способе формования) и 10-20 % (при мокром способе формования) [5]. Как видно из рис. 1а, в этом диапазоне концентраций полимера в растворе вязкость последнего, при прочих равных условиях, изменяется приблизительно в 200 раз.

В случае исследованных нами растворов общая деформация объема раствора при его течении, которая складывается из трех видов деформации: обратимой упругой, обратимой эластичной и необратимой деформации течения, будет существенно зависеть от характера образующейся так называемой флуктуационной сетки межмолекулярных зацеплений. Закономерности образования этой сетки и влияние на нее различных факторов в настоящее время можно сформулировать скорее на качественном, нежели на количественном уровне.

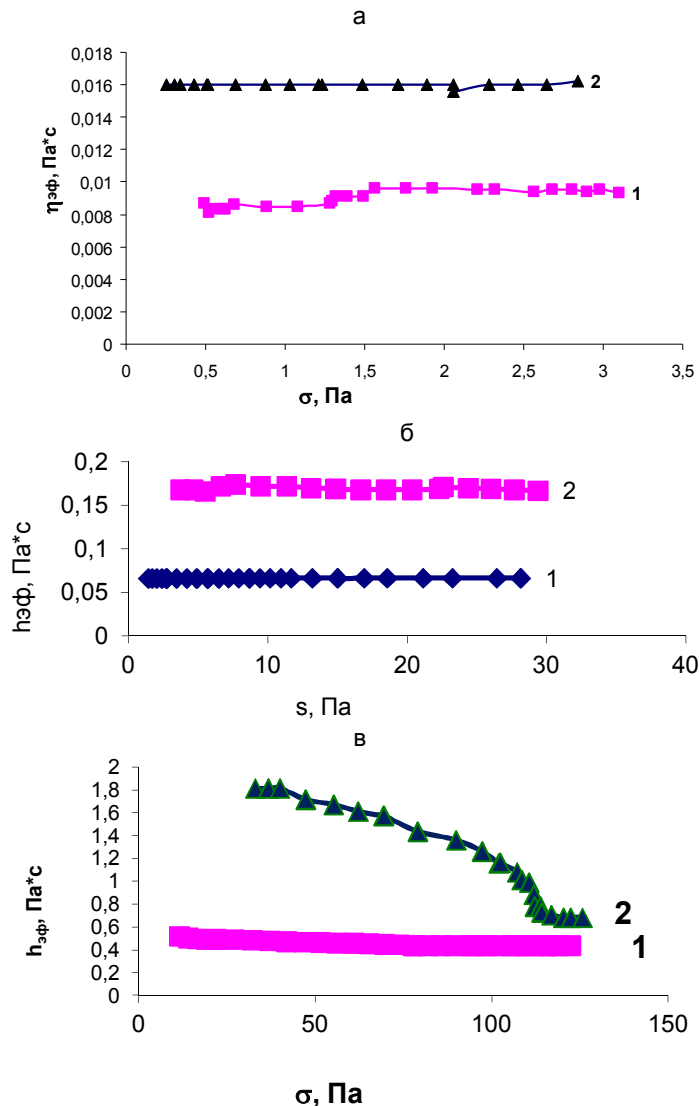


Рис. 1. Зависимости эффективной вязкости от напряжения сдвига для полимерных растворов ДАЦ в ацетоне различной концентрации: а – 1 – 3% ДАЦ; 2 – 5% ДАЦ; б – 1 – 7% ДАЦ; 2 – 10% ДАЦ; в – 1 – 15% ДАЦ; 2 – 20% ДАЦ

Как уже отмечалось выше, определяющее влияние на структуру и свойства полимерных растворов оказывает выбор растворителя. В настоящее время для каждого полимера выявлены «плохие» и «хорошие» растворители. Однако в каждом конкретном полимерном растворе всегда существует множество конкурирующих флуктуационных взаимодействий полимер-растворитель и полимер-полимер, ход которых влияет на надмолекулярную структуру и на конформацию макромолекул. Эти факторы влияют также на формирование и развитие различных составляющих общей деформации текущего полимерного раствора, что и проявляется в изменении его вязкости.

Структурные изменения в полимерных растворах, вносимые растворителями и затрагивающие надмолекулярные и межмолекулярные пространственные связи, обычно сохраняются после удаления растворителя в ходе фазоинверсионного процесса получения фильтрационных мембран.

Для управления структурообразованием при переходе золя в гель к полимеру и растворителю могут добавляться другие компоненты: соразтворители, агенты набухания, нерастворители-порообразователи, твердые дисперсные наполнители. Спектр взаимодействий отдельных веществ в таких многокомпонентных полимерных смесях еще более сложный, чем спектр взаимодействий полимер – один растворитель. Состояние и поведение отдельных компонент в многокомпонентных смесях будет зависеть от природы полимера и его концентрации, природы и концентрации других веществ, добавляемых в раствор.

На рис. 2 приведены кривые течения для растворов ДАЦ, включающих кроме основного растворителя различные нерастворители-порообразователи (протофильные добавки). В качестве добавок были выбраны вода и этиловый спирт, которые относятся к веществам, обладающим определенным сродством к полимеру (ДАЦ) и растворителю (ацетону) и обеспечивающие необходимый спектр их взаимодействий.

Сравнение реологических свойств полученных растворов (см. рис. 2) показывает, что введение протофильных добавок снижает вязкость формовочных растворов.

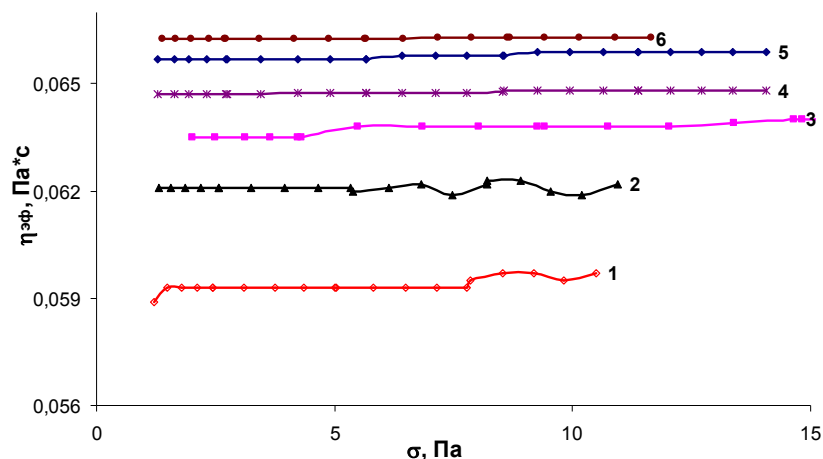


Рис. 2. Зависимости эффективной вязкости от напряжения сдвига для ацетоновых растворов ДАЦ, включающих нерастворители-порообразователи (протофильные добавки): 1 – 7% ДАЦ + 5% воды; 2 – 7% ДАЦ + 3% воды; 3 – 7% ДАЦ + 1% воды; 4 – 7% ДАЦ + 15% этилового спирта; 5 – 7% ДАЦ + 5% этилового спирта; 6 – 7% ДАЦ

Более детальное изучение структуры растворов с привлечением метода спектра мутности (рис. 3 и 4) указывает на повышение изотропности растворяющих систем в присутствии нерастворителей-порообразователей. Их введение в раствор сопровождается уменьшением размеров микрогелевых частиц (дисперсной фазы раствора в виде агрегатированных макромолекул) и увеличением их числа в единице объема.

Степень дезагрегирующего действия различных протофильных веществ на МГЧ различна и зависит от концентрации этих веществ и степени их несовместимости с сольватируемым полимерным компонентом отливочного раствора. Под действием протофильных добавок МГЧ распадаются на более мелкие фрагменты, вплоть до агрегатов с размерами $\approx 0,02-0,05$ мкм. При этом раствор становится более однородным и менее вязким.

Например, при введении в 7%-й исходный раствор ДАЦ в ацетоне этилового спирта размеры МГЧ уменьшаются от 0,62 мкм (раствор без спирта) до 0,22 мкм (содержание спирта 25%) (рис. 3а).

Снижение концентрации полимера в растворяющей системе приводит к уменьшению размеров МГЧ. Так, в 5%-х растворах ДАЦ размеры МГЧ составляют, соответственно, 0,5 мкм (без спирта) и 0,12 мкм (с содержанием спирта 25%).

Добавление воды в полимерный раствор может играть двоякую роль. Как видно из рис. 2, при низких концентрациях (до ~5%) вода действует как соразстворитель, способствуя ускорению набухания полимера и его сольватации через межмолекулярные и внутримолекулярные водородные связи. Являясь амфипротонным веществом, вода дополняет основной растворитель – ацетон, имеющий сильнополярные связи с карбонильной ($>C=O$) группой полимера, своими сильнополярными связями с гидроксильной ($H-O$) группой полимера, ускоряя и улучшая его растворение. Об этом свидетельствует более низкая вязкость растворов ДАЦ в ацетоне с водой в количестве 1, 3 и 5% (см. рис. 2), а также более высокая их изотропность (см. рис. 4). При концентрациях воды $>5\%$ ее добавление будет снижать растворяющую способность системы за счет уменьшения относительной концентрации ацетон-полимер, что приведет к росту агрегатирования МГЧ с увеличением их размеров (см. рис. 4).

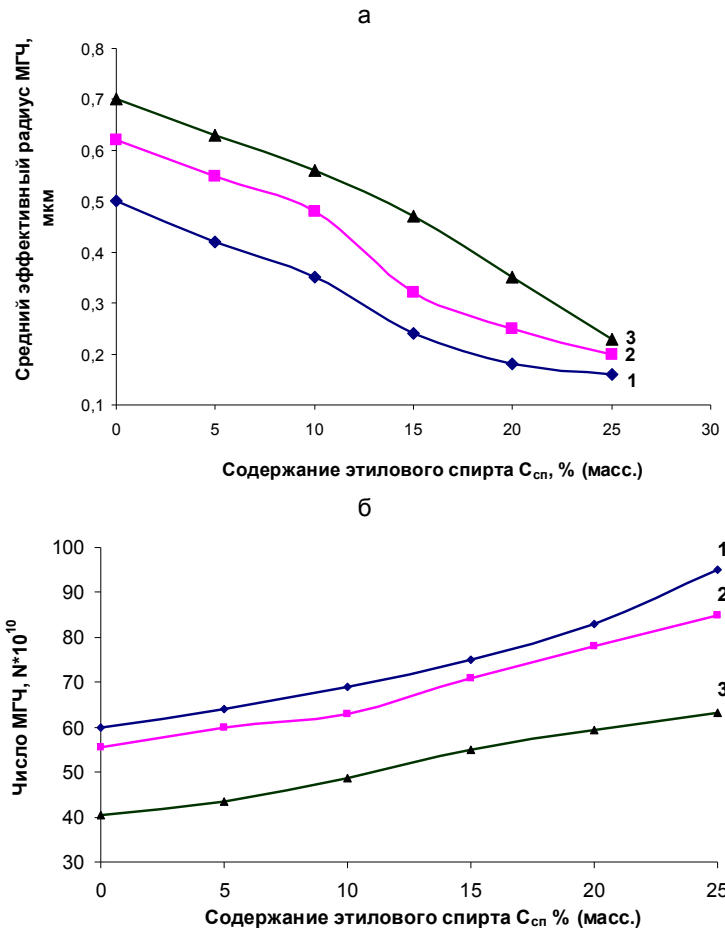


Рис. 3. Зависимости среднего эффективного радиуса МГЧ (а) и числа МГЧ (б) от содержания этилового спирта в ацетоновом растворе: 1 – 5% ДАЦ, 2 – 7% ДАЦ, 3 – 10% ДАЦ

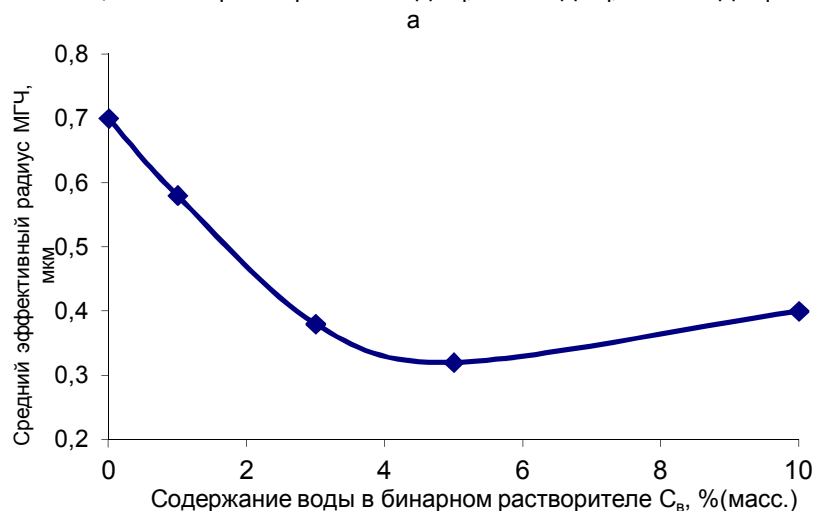


Рис. 4а. Зависимость среднего эффективного радиуса МГЧ от содержания воды в бинарном растворителе на примере раствора 7 % ДАЦ+ацетон

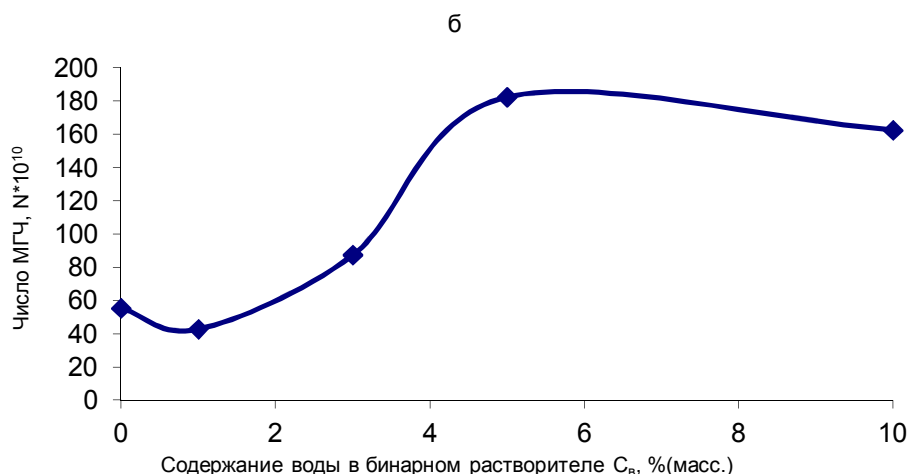


Рис. 4б (окончание). Зависимость числа МГЧ от содержания воды в бинарном растворителе на примере раствора 7 % ДАЦ+ацетон

Содержание воды в формовочном растворе играет существенную роль и в процессах порообразования при переводе золя в гель, а геля – в готовое изделие (ксерогель).

Из приведенных выше результатов следует, что структура и свойства ацетатцеллюлозных формовочных растворов в значительной степени определяются соотношением полимер : растворитель : порообразователь. Включение в состав растворов различных протофильных добавок позволяет изменять их структуру, а следовательно, регулировать функциональные свойства и характеристики получаемых фильтрационных мембран.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геллер Б.Э. Практическое руководство по физикохимии волокнообразующих полимеров: учеб. пособие для вузов: 2-е изд. / Б.Э. Геллер. М.: Химия, 1996. 432 с.
2. Рафиков С.Р. Методы определения молекулярных весов и полидисперсности высокомолекулярных соединений / С.Р. Рафиков, С.А. Павлова, И.И. Твердохлебова. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 334 с.
3. Потехина Л.Н. Технология и свойства ультрафильтрационных мембран на основе модифицированных ацетатов целлюлозы / Л.Н. Потехина, В.М. Седелкин // Вестник СГТУ. 2010. №3 (46). Вып. 1. С. 109-114.
4. Кленин В.И. Высокомолекулярные соединения: учебник для студентов хим. фак. / В.И. Кленин, И.В. Федусенко. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2008. 440 с.
5. Седелкин В.М. Влияние структуры растворов диацетатцеллюлозы – ацетон на свойства ультрафильтрационных мембран / В.М. Седелкин [и др.] // Химические волокна. 2003. № 3. С. 32-34.

Седелкин Валентин Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты пищевых производств и теплотехника» Энгельского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valentin M. Sedelkin – Dr. Sc., Professor
Department of Machines and Mechanisms of Food Industry and Heat Engineering, Engels Technological Institute (Part) Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Потехина Лариса Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение» Энгельского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Larisa N. Potekhina – Ph. D., Associate Professor
of the Department Materials Technology Engels Technological Institute (branch) of Gagarin Saratov State Technical University

Чиркова Ольга Александровна – аспирант кафедры «Машины и аппараты

Olga A. Chirkova – Ph. D., Associate Professor

пищевых производств и теплотехника»
Энгельсского технологического института
(филиала) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Машкова Дарья Александровна –
аспирант кафедры «Машины и аппараты
пищевых производств и теплотехника»
Энгельсского технологического института
(филиала) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Олейникова Елена Владимировна –
аспирант кафедры «Машины и аппараты
пищевых производств и теплотехника»
Энгельсского технологического института
(филиала) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Department Materials Science
Engels Technological Institute
(Part) Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Darya A. Mashkova –
Postgraduate
Department of Machines and Mechanisms
Food Industry and Heat Engineering
Engels Technological Institute
(Part) Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Elena V. Oleynikova –
Postgraduate
Department of Machines and Mechanisms
of Food Industry and Heat Engineering
Engels Technological Institute (branch)
(Part) Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.02.13, принята к опубликованию 20.05.13

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.9:531.1

Б.М. Бржозовский, И.Н. Янкин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Рассмотрено использование способа фазовых диаграмм, получаемых по сигналу колебательного процесса из зоны резания, для оценки динамики резания и поиска оптимальных режимов обработки на металлорежущих станках по критерию минимизации детерминированной вибрации

Процесс резания, спектр колебаний, фазовая диаграмма, оптимальный режим обработки

B.M. Brzhozovskiy, I.N. Yankin

THE PHASE DIAGRAM METHOD FOR MONITORING DYNAMICS OF MACHINING

The article considers the method of phase diagram designed by means of the swaying process signal in the cutting area. The method is used to estimate the cutting dynamics and find the optimum modes of treatment utilizing metal-cutting machine-tools by means of minimization of determined vibration criterion.

Cutting process, spectrum of vibrations, phase diagram, optimum mode of treatment

Процесс резания на металлорежущих станках протекает в условиях интенсивного упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала, что оказывает значительное возмущающее воздействие на упругую систему станка. Следствием такого возмущения является образование колебаний формообразующих подсистем станка. Колебания протекают непосредственно в зоне формообразования поверхности, поэтому их влияние на формирование как точности формы, так и микрогеометрических параметров обрабатываемой поверхности оказывается значимым.

В зависимости от соотношения между параметрами возмущения и динамическими характеристиками станка в колебательном процессе могут преобладать стохастические или детерминированные составляющие. Проявление детерминированных составляющих является сигналом к тому, что динамическая система переходит в неустойчивую область. В таких условиях процесс резания теряет стабильность, что является причиной снижения точности и ухудшения качества обработанных поверхностей. Поэтому соотношение случайных и детерминированных составляющих в колебательном процессе, сопровождающем резание, может являться критерием выявления нежелательных тенденций в процессе обработки и использоваться для корректировки условий резания.

Детерминированная вибрация может проявляться в виде развития уровня колебаний. Поэтому для ее выявления могут быть использованы два простых способа:

- отслеживание действующего значения или общего уровня колебаний;
- фиксирование уровня колебаний на собственных частотах станка.

Оба способа имеют существенные недостатки.

Недостатком первого способа является то, что общий уровень колебаний может меняться при переходе от одного режима обработки к другому. Однако это изменение не всегда связано с ростом уровня детерминированной вибрации и может являться следствием роста случайной составляющей колебаний, что зачастую благоприятно сказывается на процессе резания, поскольку оказывает положительное влияние на снижение уровня сил трения на режущих элементах инструмента.

Второй способ оказывается более корректным. Измерение и отслеживание уровня сигнала с использованием узкополосных фильтрующих элементов, настроенных на собственные частоты станка, может давать весьма положительный результат. Однако основной недостаток этого способа связан с тем, что собственные частоты и собственные формы колебаний динамической системы станка имеют существенную связь с упругодиссипативными характеристиками процесса резания, которые, в свою очередь, зависят от множества факторов обработки. В частности, на упругодиссипативные характеристики процесса резания оказывают влияние такие факторы, как геометрия инструмента, состояние его режущих свойств, режим обработки, состав смазочно-охлаждающей жидкости и многие другие факторы. Зависимость собственных частот станка от условий обработки существенно снижает достоверность указанного способа.

В этой связи выделение детерминированной вибрации целесообразно осуществлять по способу фазовых диаграмм [1]. В основе данного способа лежат следующие этапы:

- регистрация порции сигнала;
- преобразование порции сигнала в спектр смещения и скорости;
- расчет коэффициента корреляции кривых, описывающих спектры смещения и скорости при изменении уровня фильтрации;
- расчет коэффициента детерминированной составляющей.

В качестве примера рассмотрим реализацию способа фазовых диаграмм для условий точения и растачивания отверстия на одном и том же токарном станке.

На рис. 1 показаны фрагменты алгоритма выделения неслучайной составляющей в порции сигнала колебания на операции точения. В левой части помещены макет сигнала акселерометра, спектры сигналов скорости V и смещения S , рассчитанные в диапазоне частот 0,1-5 кГц. В правой части рисунка расположена фазовая диаграмма в системе «смещение S – скорость V ». Коэффициент детерминированной составляющей на операции точения определен на уровне $K_d=0,64$.

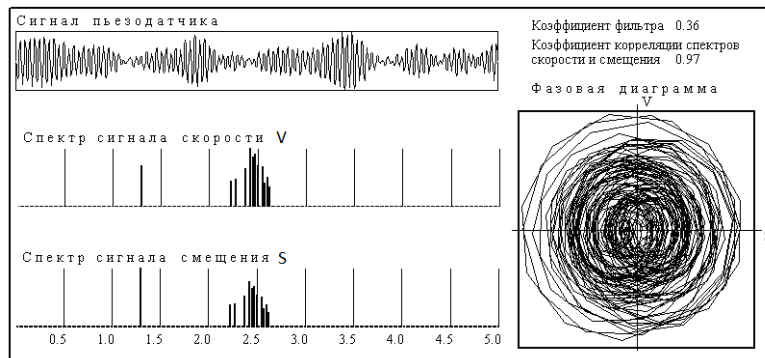


Рис. 1. Фазовая диаграмма порции сигнала при точении

Аналогичный алгоритм применен для порции сигнала на операции растачивания, информация о котором представлена на рис. 2.

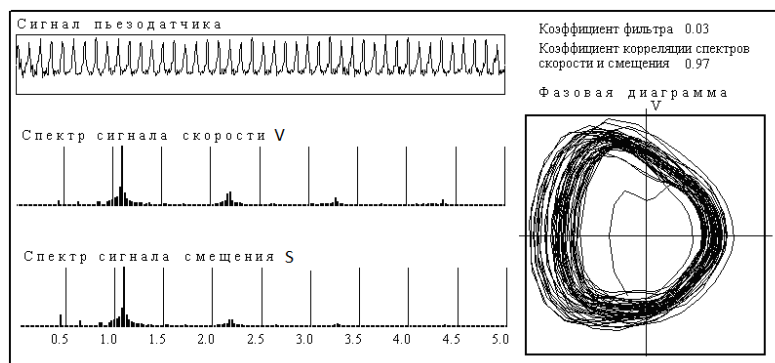


Рис. 2. Фазовая диаграмма порции сигнала при растачивании

При растачивании коэффициент детерминированной составляющей достигает уровня $K_d=0,97$. Как видно, при обработке на одном и том же станке разными инструментами наблюдается существенное изме-

нение структуры колебательного процесса. Такое различие при точении и растачивании объясняется существенным изменением характеристик динамической системы резания. При точении неслучайные формы колебаний проявляются в диапазоне частот 2,25-2,6 кГц, а при растачивании система резания имеет высокую склонность к образованию детерминированной вибрации на частоте 1,1 кГц, о чем свидетельствуют высокая плотность и степень повторяемости траекторий фазовой диаграммы.

Рассмотрим еще один пример использования способа фазовых диаграмм на операции точения для поиска оптимального режима обработки. С этой целью выполнен эксперимент путем обтачивания детали при варьировании частоты вращения шпинделя от 125 до 800 мин⁻¹, варьировании продольной подачи от 0,07 до 0,14 мм/об при глубинах резания 1 и 2 мм. Число вариантов обработки $n=6 \cdot 4 \cdot 2=48$. При резании осуществлялась регистрация сигнала колебаний с пьезоэлектрических датчиков, установленных на суппорте станка, с последующей оцифровкой и обработкой сигнала по специальным алгоритмам.

На рис. 3 приведены результаты обработки сигналов колебаний. Доля детерминированной составляющей представлена коэффициентом K_d , который рассчитывался по двадцати реализациям колебаний с периодическим движением начала отсчета по файлу колебаний и последующей статистической обработкой. Как видно, соотношение стохастических и детерминированных составляющих в колебательном процессе находится под влиянием частоты вращения шпинделя. Причем, если при глубине резания $t=1$ мм (рис. 3а) наблюдается значительный разброс форм кривых 1-4, отражающих влияние частоты вращения шпинделя на K_d при изменении продольной подачи от 0,07 до 0,14 мм/об, то при глубине резания $t=2$ мм между подобными кривыми отмечается высокая корреляция (рис. 3б). Экстремальное значение частоты вращения шпинделя составляет 400 мин⁻¹, при которой в колебательном процессе возрастает доля детерминированных составляющих и на которой нерационально вести обработку. С другой стороны, если необходимо минимизировать детерминированную вибрацию, то частоты вращения 630 и 200 мин⁻¹ являются наиболее предпочтительными.

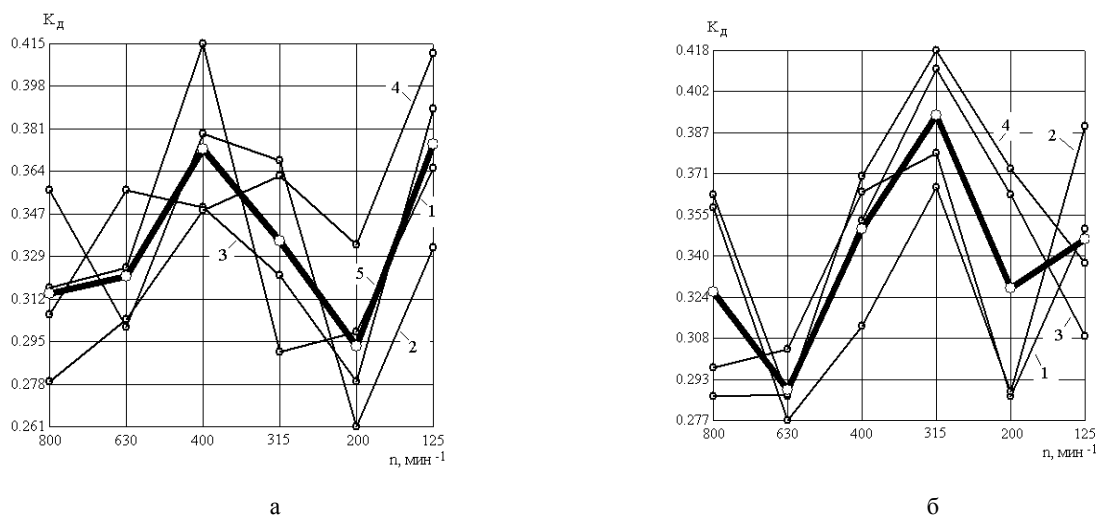


Рис. 3. Влияние режима обработки на структуру колебательного процесса при глубине резания $t=1$ мм (а) и $t=2$ мм (б):
1 – $S_{пр}=0,07$ мм/об; 2 – $S_{пр}=0,084$ мм/об; 3 – $S_{пр}=0,11$ мм/об; 4 – $S_{пр}=0,14$ мм/об;
5 – усредненная кривая по четырем подачам

Таким образом, качество процесса резания можно оценивать по характеристикам возбуждаемых им колебаний. Одной из наиболее информативных характеристик является соотношение случайных и неслучайных составляющих. Метод фазовых диаграмм можно использовать для поиска оптимальных режимов обработки по критерию минимизации детерминированной вибрации, в системах диагностирования технологического оборудования в качестве источника информации о состоянии рабочих процессов и в других технических системах, где требуется высокая информативность о протекающих в них динамических процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бржозовский Б.М. Извлечение полезной информации из сигнала колебательного процесса при механической обработке / Б.М. Бржозовский, И.Н. Янкин, Д.А. Хайров // Ученые записки КНАГТУ. Науки о природе и технике. 2012. № I-1(9). С. 65-70.

Бржозовский Борис Максович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris M. Brzhozovskiy– Dr.Sc., Professor
Department of Construction and Computer Design of Fabrication Systems for Machine and Instrument Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Янкин Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor N. Yankin– Dr. Sc., Professor
Department of Construction and Computer Design of Fabrication Systems for Machine and Instrument Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 621.924.3

П.Н. Мальцев, И.П. Никифоров

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРИВОШИПНО-КОРОМЫСЛОВОГО МЕХАНИЗМА ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

Предложен способ уменьшения засаливания шлифовальных кругов. Проведен кинематический анализ кривошипно-коромыслового механизма, предназначенного для реализации планетарного шлифования торцом круга с переменной скоростью резания. Определены оптимальные диапазоны варьирования скоростей.

Шлифование, засаливание, переменная скорость резания

P.N. Maltsev, I.P. Nikiforov

KINEMATIC ANALYSIS OF CRANK-AND-ROCKER CUTTING MECHANISM FOR SPEED CHANGE

The method to reduce salting of grinding wheels is proposed. Kinematic analysis has been applied of the crank-and-rocker mechanism designed to implement planetary grinding by means of the end face of a wheel with the variable cutting speed. Optimal ranges of speed variation have been determined.

Grinding, salting, variable cutting speed

Шлифование как способ обработки резанием широко используется для обеспечения точности и качества поверхностей различных изделий. При этом материалами заготовок служат черные и цветные металлы (а также сплавы на их основе), керамика, стекло, композиты, твердые сплавы и пр. Серьезным препятствием, стоящим на пути расширения областей рационального применения абразивных технологий, является засаливание шлифовальных кругов – перенос на рабочую поверхность абразивного инструмента частиц шлама. Особенно это актуально при обработке высокопластичных материалов: сплавов на основе алюминия, меди и других цветных металлов, сталей с низким содержанием углерода, а также полимерных материалов (резины, эбонита, пластмассы и пр.).

Исходя из установленного наличия экстремума (максимума) на графике зависимости объема снятого металла от радиуса округления абразивного зерна при различных значениях коэффициента трения [5], было высказано предположение о том, что зерно более округлой формы при малом коэффициенте внешнего трения способно снять больший объем обрабатываемого металла, чем более острое зерно. Соответственно для того, чтобы задействовать большее количество зёрен, расположенных на поверхности шлифовального круга, необходимо изменять скорость резания. Варьируемая скорость

резания вызывает изменение сил фрикционного взаимодействия, т.е. величина внешнего трения между соприкасающимися объектами (в данном случае – передней поверхностью абразивного зерна и стружкой) не будет постоянной [3] и будет уменьшаться с увеличением скорости (что характерно для скоростей, соответствующих шлифованию), что означает следующее: при меньшей скорости резания количество режущих зёрен будет максимальным, но основная работа резания будет осуществляться более округлыми (крупными) зёрнами, в то время как при большей скорости резания такие зёрна будут участвовать лишь в пластической деформации поверхностного слоя детали, создавая благоприятные условия для резания менее округлыми (мелкими) зёрнами. Такая схема позволит более равномерно распределить нагрузку на зёрна и увеличит время стойкости каждого зерна.

Кроме того, изменение положения линии режущей кромки, разделяющей переднюю и заднюю поверхности единичных зёрен, зависящей от величины внешнего трения, повлечёт за собой следующий эффект: зоны минимальных касательных напряжений будут непрерывно изменять своё положение (колебаться в пределах некоторой зоны). Частота и амплитуда изменения скорости резания повлияет на эффективность ликвидации застойных зон, характеризующихся сильными адгезионными связями, с которых, по нашему мнению, и начинается процесс засаливания инструмента.

На рис. 1 схематично изображено устройство для торцевого планетарного шлифования, обеспечивающее обработку с непрерывно изменяющейся скоростью резания, вид сбоку; на рис. 2 – то же, вид снизу (расположение зубчатых колес); на рис. 3 – то же, вид сверху (кривошипно-коромысловый механизм изменения скорости). Разработанная конструкция имеет ряд преимуществ перед существующими аналогами [1,4 и др.] и позволяет реализовать непрерывно изменяющуюся скорость резания в процессе шлифования (заявка на изобретение № 2011141620/20 от 13.10.2011).

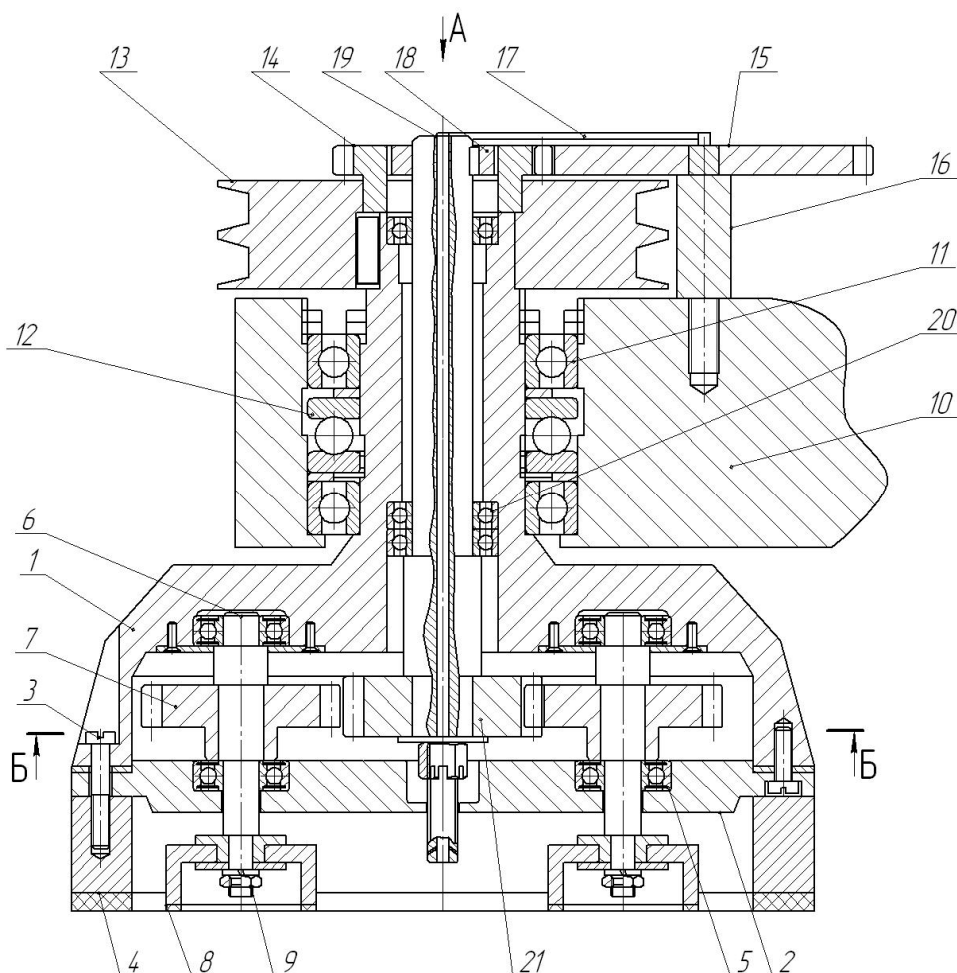


Рис. 1. Шлифовальная головка с непрерывно изменяющейся скоростью резания

1 – корпус; 2 – водило; 3 – винт; 4 – внешний шлифовальный круг; 5, 11, 12, 20 – подшипник; 6 – ось; 7 – шестерня; 8 – внутренний шлифовальный круг; 9 – гайка; 10 – консоль станка; 13 – шкив ременной передачи; 14 – ведущая шестерня механизма изменения скорости резания; 15 – ведомая шестерня механизма изменения скорости резания; 16 – опора; 17 – водило; 18 – шкив; 19 – ось; 21 – опорное зубчатое колесо

Корпус 1, вращаясь от ременного привода через шкив 13, приводит во вращение внешний шлифовальный круг 4 и водило 2, которое, в свою очередь, заставляет три внутренних шестерни 7 обкатываться вокруг опорного зубчатого колеса 21. Три внешние шестерни 7, находясь в зацеплении с внутренними, будут совершать вращение в противоположную сторону с большей скоростью. Зубчатое колесо 14, вращаясь вместе со шкивом 13, приводит во вращение колесо 15. За счёт меньшего числа зубьев на ведущем колесе, чем на ведомом, правая часть водила 17 будет совершать вращательное движение, а левая часть – колебательное, и передавать колебания на ось 19 через шкив 18. Опорное колесо 21 будет совершать крутильные колебания, передавая их на шестерни 7, и тем самым влиять на мгновенную скорость резания кругами-сателлитами 8. Необходимыми условиями изменения мгновенной скорости резания являются: 1) большее число зубьев шестерни 15, чем 14; 2) большее расстояние от центра зубчатого колёса 14 до посадочных мест водила 17, чем аналогичное расстояние на колесе 15. Изменяя передаточное отношение зубчатых колёс 14 и 15, можно получить различные по периоду крутильные колебания, что повлияет на период колебаний изменения мгновенной скорости резания кругов-сателлитов 8, а изменяя расстояние от центра зубчатых колёс 14 и 15 до посадочных мест водила 17, а также саму длину водила (при необходимости), можно получить различные по амплитуде крутильные колебания. Ось 19 может быть выполнена полой, а на конце иметь не менее 2 наклонных концентрических отверстий для подвода СОЖ в зону резания.

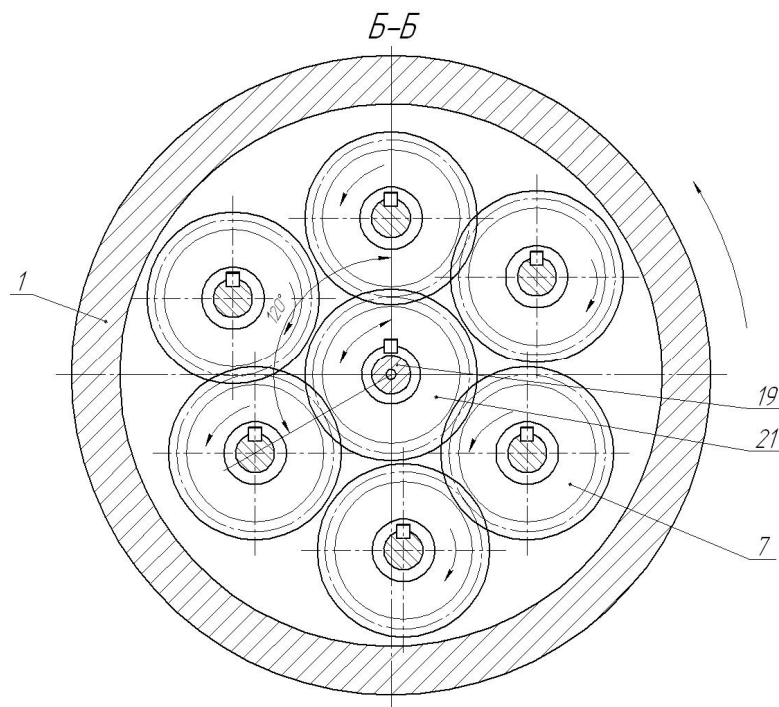


Рис. 2. Расположение зубчатых колес

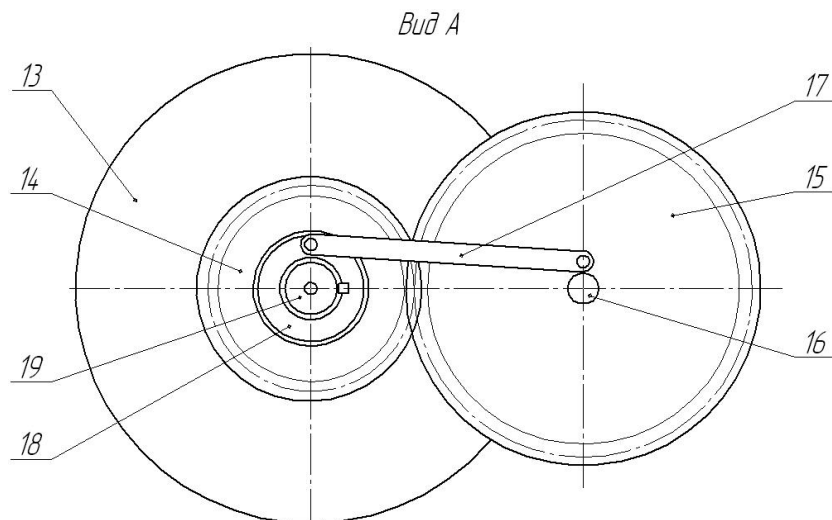


Рис. 3. Кривошипно-коромысловый механизм изменения скорости

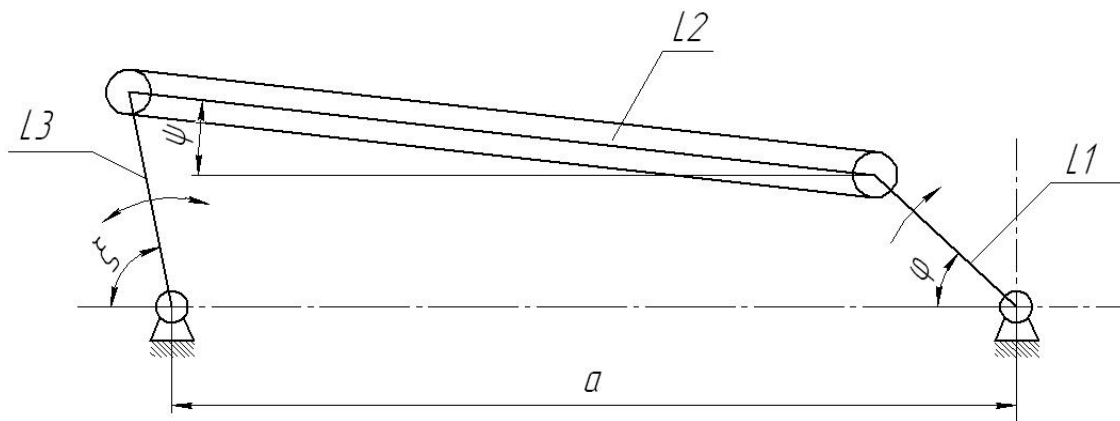


Рис. 4. Схема кривошипно-коромыслового механизма

Механизм привода опорного колеса 21 (рис. 1), по сути, является кривошипно-коромысловым механизмом, схематичное изображение которого представлено на рис. 4. Проведем его кинематический анализ с целью определения значений угловых скоростей и ускорений. Полученные результаты позволят: во-первых, определить диапазон варьирования скоростей резания при торцовом шлифовании; во-вторых, выполнить расчеты на прочность механизмов привода.

Для нахождения зависимостей изменения угла ξ , угловой скорости ξ_t и углового ускорения ξ_{tt} от угла φ был проведен следующий структурный анализ [2] (см. рис. 4):

$$L_1 \cos \varphi + L_2 \cos \psi - L_3 \cos \xi = a, \quad (1)$$

$$L_1 \sin \varphi + L_2 \sin \psi - L_3 \sin \xi = b, \quad (2)$$

$$a - L_1 \cos \varphi = L_2 \cos \psi - L_3 \cos \xi, \quad (3)$$

$$b - L_1 \sin \varphi = L_2 \sin \psi - L_3 \sin \xi, \quad (4)$$

$$a - L_1 \cos \varphi = P, \quad (5) \qquad b - L_1 \sin \varphi = Q, \quad (6)$$

$$P - L_2 \cos \psi = -L_3 \cos \xi, \quad (7) \qquad Q - L_2 \sin \psi = -L_3 \sin \xi, \quad (8)$$

$$(P - L_2 \cos \psi)^2 + (Q - L_2 \sin \psi)^2 = L_3^2, \quad (9)$$

$$P \cos \psi + Q \sin \psi = \frac{(P^2 + Q^2 + L_2^2 - L_3^2)}{2L_2} = F, \quad (10)$$

$$\sin \psi = \frac{2 \operatorname{tg}(\psi / 2)}{1 + \operatorname{tg}^2(\psi / 2)}, \quad (11) \qquad \cos \psi = \frac{1 - \operatorname{tg}^2(\psi / 2)}{1 + \operatorname{tg}^2(\psi / 2)}, \quad (12)$$

$$P[1 - \operatorname{tg}^2(\psi / 2)] + 2Q \operatorname{tg}(\psi / 2) = F[1 + \operatorname{tg}^2(\psi / 2)], \quad (13)$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\psi}{2}\right) = \frac{Q \pm \sqrt{Q^2 + P^2 - F^2}}{P + F}, \quad (14) \qquad \psi_{1,2} = 2 \operatorname{arctg} \frac{Q \pm \sqrt{Q^2 + P^2 - F^2}}{P + F}, \quad (15)$$

$$\cos \xi = (L_1 \cos \varphi + L_2 \cos \psi - a) / L_3, \quad (16)$$

Угол поворота ξ кривошипа можно определить следующим образом:

$$\xi = \arccos \frac{L_2 \cos \psi - P}{L_3}, \quad (17)$$

Исходя из полученных выражений, были взяты соответствующие производные для нахождения угловых скоростей ξ_t и ускорений ξ_{tt} :

$$\xi_t = \varphi_t \frac{L_1 \sin(\psi - \varphi)}{L_3 \sin(\psi - \xi)}, \quad (18)$$

$$f_1 = \varphi_{tt} L_1 \sin \varphi + \varphi_t^2 L_1 \cos \varphi + \psi_t^2 L_2 \cos \psi - \xi_t^2 L_3 \cos \xi, \quad (19)$$

$$f_2 = -\varphi_{tt} L_1 \cos \varphi + \varphi_t^2 L_1 \sin \varphi + \psi_t^2 L_2 \sin \psi - \xi_t^2 L_3 \sin \xi, \quad (20)$$

$$\xi_{tt} = \frac{f_1 \cos \psi + f_2 \sin \psi}{L_3 \sin(\xi - \psi)}. \quad (21)$$

На основании этого построены графические зависимости (рис. 5), при следующих начальных параметрах: частота вращения шкива $n=5732$ об/мин, передаточное отношение зубчатого зацепления от шкива к кривошипу 22/36, расстояние между осями кривошипов $a=87$ мм, длина кривошипа $L_1=5$ мм, длина коромысла $L_2=87,2$ мм, момент инерции вращающихся с переменной скоростью элементов кинематической цепи – $0,0016$ кг·м². Значение угла φ изменяется от 0 до 2π . На графиках показано влияние длины кривошипа L_3 на угловое положение, скорость и ускорение опорного зубчатого колеса 4. Результаты расчетов представлены в таблице.

Результаты расчетов

| Вариант | Длина кривошипа L_3 , мм | Макс. угловая скорость ξ_t , рад/с | Макс. угловое ускорение ξ_{tt} , рад/с ² | Изменение крутящего момента T , Н·м | Скорость резания на внутренних кругах $V_{кр}$, м/с | | Изменение скорости, % |
|---------|----------------------------|--|---|---------------------------------------|--|------|-----------------------|
| | | | | | min | max | |
| 1 | 6 | 304,1 | 209290 | 325,1 | 10,2 | 31,5 | ±51,1 |
| 2 | 15 | 121,9 | 46039 | 71,5 | 16,6 | 25,2 | ±20,6 |
| 3 | 25 | 73,6 | 26674 | 41,4 | 18,3 | 23,5 | ±12,4 |

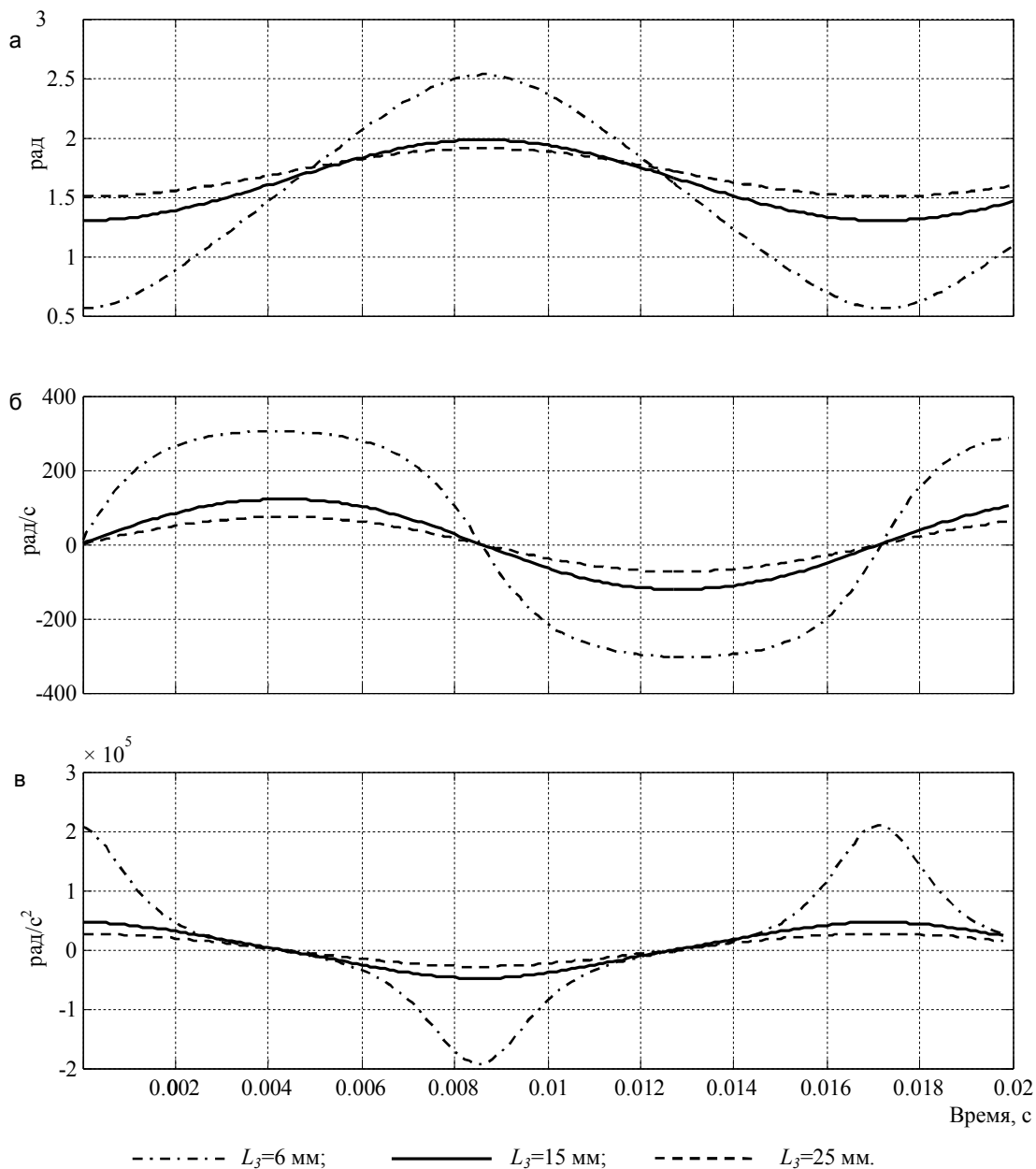


Рис. 5. Графики зависимостей угловых положений (а), скоростей (б) и ускорений (в) от времени

Исходя из рекомендуемых режимов резания для плоского торцового шлифования (20...25 м/с) [1], наиболее оптимальными являются варианты 2 и 3 (таблица). Выполненные расчеты на прочность показывают, что механизм привода выдержит превышение крутящего момента на величину 90 Н·м, этому также соответствуют варианты 2 и 3. Однако вариант 2 более предпочтителен, поскольку обеспечивает наибольший диапазон варьирования скорости резания – $20,9 \pm 4,3$ м/с ($\pm 20,6\%$). При этом фактическая глубина резания будет изменяться до 10 мкм и выше.

Теоретические исследования показывают, что при таких условиях коэффициент трения будет изменяться на величину 0,02...0,03, а фактическая глубина резания – до 10 мкм и более. Этого вполне достаточно, чтобы говорить не только о количественных преобразованиях процесса резания – объём стружки, снимаемый единичным зерном [5], может изменяться в несколько раз, но и качественных – явления резания и пластической деформации будут сменять друг друга, что не позволит развиваться процессам засаливания на рабочих поверхностях шлифовальных кругов.

Выводы:

1. Технология обработки с непрерывно изменяющейся скоростью резания может быть реализована в шлифовальных головках планетарного типа, работающих торцом круга.

2. Варьирование скоростью резания в пределах $\pm 20\%$ является вполне достаточным для изменения силы трения между передней поверхностью абразивного зерна и стружкой, при котором будут происходить не только количественные, но и качественные изменения в зоне фрикционного контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абразивная и алмазная обработка: справочник / под ред. А.Н. Козникова. М: Машиностроение, 1977. 391 с.
2. Алюшин Ю.А. Кинематический анализ шарнирно-рычажных механизмов / Ю.А. Алюшин // [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://allmechanics.narod.ru/1poso-bii/kinem_analiz.htm, свободный.
3. Крагельский И.В. Трение, изнашивание и смазка / И.В. Крагельский, В.В. Алисин. Кн. 1. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.
4. Люпа Д.С. Совершенствование планетарного устройства при шлифовании / Д.С. Люпа, Т.Н. Иванова // Вестник ИжГТУ. 2006. № 3. С. 102-105.
5. Никифоров И.П. Определение объёма металла, снимаемого единичным абразивным зерном при плоском шлифовании / И.П. Никифоров, В.К. Кошмак, Н.Ф. Кудрявцева // Тр. ППИ. Сер. Машиностроение. Электропривод. 2008. № 11.3. С. 218-222.

Мальцев Павел Николаевич – аспирант, инженер кафедры «Технология машиностроения» Псковского государственного университета

Pavel N. Maltsev – Postgraduate, Engineer
Department of Mechanical Engineering Technologies
Pskov State University

Никифоров Игорь Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Псковского государственного университета

Igor P. Nikiforov – Dr. Sc., Professor
Postgraduate, Engineer
Department of Mechanical Engineering Technologies
Pskov State University

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 668.395:006.354

Д.Н. Муромцев, С.Я. Пичхидзе

ОЦЕНКА ВИБРОДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МАСТИКИ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНПРОПИЛЕНОВОГО КАУЧУКА

Проведена сравнительная оценка свойств мастичных материалов с разным содержанием этиленпропиленового каучука и бутилкаучука. Изучено влияние этиленпропиленового каучука и вермикулита на основные свойства мастичного мате-

риала. Разработан способ прогнозирования демпфирующих свойств материала при помощи тангенса угла механических потерь, полученным на RPA2000.

Вибродемпфирование, тангенс угла механических потерь, мастика, этиленпропиленовый каучук, вермикулит

D.N. Muromtsev, S.Ya. Pichhidze

EVALUATION OF VIBRATION DAMPING PROPERTIES BASED ON MASTIC EPDM

The article covers the comparative evaluation of the properties of mastic materials with different content of ethylene-propylene rubber and butyl rubber. It shows the study of the effect of ethylene-propylene rubber and vermiculite on the basic properties of mastic material. The method for predicting the damping properties of the material with the mechanical loss tangent obtained on RPA2000 was developed.

Vibration damping, the tangent of the angle of mechanical losses, mastic, EPDM, vermiculite

Развитие техники, связанное с увеличением скоростей и мощностей машин и механизмов, привело к значительному возрастанию вредных шумов и вибраций, понижающих надежность работы механизмов, ухудшающих условия труда. Одним из основных способов эффективного снижения вредных шумов и вибраций является применение в конструкциях, подверженных воздействию динамических нагрузок, материалов с высокими вибропоглощающими свойствами. Широкое применение находят два основных средства вибропоглощения: вибропоглощающие покрытия и вибропоглощающие конструкционные материалы. Вибропоглощающие покрытия наносят на готовые конструкции для увеличения в них потерь энергии при периодических деформациях. Из вибропоглощающих конструкционных материалов можно изготавливать конструкции, обладающие высокими диссипативными свойствами и при отсутствии специальных покрытий. Эффективность вибропоглощающих средств зависит от демпфирующих свойств применяемых в них материалов. Многолетний опыт борьбы с шумами и вибрациями показал, что наиболее эффективными вибропоглощающими материалами являются полимерные композиционные материалы с дисперсными наполнителями [1].

Цель работы заключалась в прогнозировании демпфирующих свойств композиционных материалов на основе этиленпропиленового каучука при помощи анализатора перерабатываемости резин RPA2000 и создание вибродемпфирующего материала, обладающего улучшенными эксплуатационными характеристиками.

В качестве объекта исследования были взяты полимерные самоклеящиеся материалы (мастики) на основе СКЭПТ-50 (ТУ 2294-022-05766801-2002), БК-1675Н (ТУ 2294-021-48158319-2001) и их комбинации, в том числе с добавлением минерала из группы природных гидрослюд - вермикулита (ГОСТ 12865-67) с размером частиц менее 0,16 мм, имеющих слоистую структуру.

Экспериментальная часть

Изготовление модельных смесей осуществлялось в специальной камере с использованием приводной станции фирмы «Brabender» при скорости вращения роторов 40 об/мин, температуре смешения 130 °С в течение 1,5 часа. Изготовление мастики с добавлением вермикулита осуществлялось при режиме смешения: 70 об/мин, 100 °С, 1 час.

Исследования вибродемпфирующих свойств (определение коэффициента потерь) проводились на образцах толщиной 2 мм с использованием стендовой измерительной установки «Оберст» [2] при частоте 200 Гц и температуре 20 °С.

Для оценки упруго-деформационных свойств исследуемых мастик применялся анализатор перерабатываемости резин RPA2000 [3]. В качестве оценочных показателей были приняты модуль потерь (G'') и тангенс угла механических потерь ($tg\delta$), определяемые в области деформации сдвига 5 % (0,36 degrees) при частоте 1 Гц и температуре 30 °С.

Далее проводилось исследование по разработке экспресс-метода прогнозирования вибродемпфирующих свойств мастик, основываясь на результатах определения тангенса угла механических потерь и модуля потерь.

Термостойкость образцов осуществляли в сушильном шкафу при температуре 90 ± 3 °С. Для этого испытуемый образец размерами $50\times 70\times 2$ мм укладывали на металлическую загрунтованную пластину размером 200×250 мм из стали марки 08Ю (ГОСТ 9045-93), затем прикатывали валиком массой 2 кг десятикратно. Далее устанавливали стальную пластину с образцом в сушильный шкаф в вертикальном положении на 24 часа. Затем охлаждали в вертикальном положении при температуре 20 ± 3 °С не менее 1 часа. После термостатирования и охлаждения оценивали смещение образца от контрольной черты (исходного положения).

Для оценки стойкости образцов к низкой температуре при минус (-40 ± 3) °С испытуемые образцы с размерами $50\times 70\times 2$ мм укладывали на металлическую загрунтованную пластину размером 200×250 мм из стали марки 08Ю. Затем прикатывали валиком массой 2 кг десятикратно, после чего помещали образец в холодильную камеру КМД-0,25 в горизонтальном положении на 24 часа. По истечении заданного времени образец вынимали из камеры и бросали с высоты 0,5 м металлической поверхностью вниз. После удара образец выдерживали при температуре (23 ± 3) °С в течение 1 часа и визуально оценивали наличие или отсутствие отслаивания от пластины, трещин и изломов по ТУ 2549-143-00149289-2008.

Прочность связи прокладок с металлом при отслаивании осуществляли на разрывной машине Zwick, оснащенной приспособлением для закрепления образца под углом (45 ± 2)° и скоростью движения подвижного зажима 50 мм/мин. Испытуемый образец укладывали на металлическую загрунтованную пластину из стали марки 08Ю. Затем прикатывали валиком массой 2 кг десятикратно, после чего образец выдерживали в горизонтальном положении при температуре (23 ± 3) °С в течение 4 часов.

Обсуждение результатов

Как видно из представленных экспериментальных данных в табл. 1, образец мастики №1 на основе БК-1675Н имеет меньшую термостойкость по сравнению с мастикой на основе СКЭПТ-50, образец №2.

Оба образца обладают неудовлетворительной стойкостью к низкой температуре. Мастика на основе СКЭПТ-50 обладает наименьшей прочностью связи с металлом. Исходя из полученных данных, целесообразна дальнейшая проработка опытных образцов мастики на повышение стойкости к низкой и высокой температурам.

Для решения данной задачи были приготовлены мастики со следующими соотношениями бутилкаучука с этиленпропиленовым каучуком: 1:1 (образец 3); 1:2 (образец 4); 2:1 (образец 5), соответственно.

Как видно из табл. 1, мастики на основе смеси 2 каучуков обладают лучшими свойствами в сравнении с индивидуальными аналогами.

Добавление СКЭПТ-50 к БК-1675Н улучшает стойкость мастики к низкой и высокой температурам. Образец мастики №4 обладает наиболее лучшим комплексом свойств при соотношении каучуков 1:2 (БК-1675Н:СКЭПТ-50), что позволяет применять данную мастику в расширенном температурном интервале.

Основным недостатком полученной мастики на основе БК-1675Н и СКЭПТ-50 (в соотношении 1:2) является неудовлетворительная вибродемпфирующая способность, таблица 1. Для устранения этого недостатка на следующем этапе работ была проведена модификация мастики введением в нее наполнителя вермикулита.

Из результатов, представленных в табл. 2, видно, что введение вермикулита в дозировке до 10 масс.ч. позволяет повысить вибродемпфирующие свойства материала в 2 раза без потери таких свойств, как стойкость к низкой температуре, термостойкость, а также сохранить в соответствии с требованиями ТУ прочность связи с металлом (не менее 300 Н/м).

Введение вермикулита в дозировках свыше 15 масс.ч. негативно влияет на комплекс физико-механических свойств, поэтому применение вермикулита в дозировках свыше 15 масс.ч. нецелесообразно, табл. 2.

Наряду с основными испытаниями мастики, предложен способ оценки вибродемпфирующих свойств через модуль потерь (G'') и тангенс угла механических потерь ($\text{tg}\delta$), определяемых на приборе РРА2000. Из табл. 2 видно, что изменение коэффициента потерь, определяемого на установке «Оберст», удовлетворительно коррелирует с тангенсом угла механических потерь и модулем потерь, определяемых на РРА2000.

Из результатов, представленных на рис. 1 и 2, видно, что наиболее лучшую взаимосвязь результатов показывает пара: коэффициент потерь и тангенс угла механических потерь. Также по тан-

генсу потерь механических потерь ($tg\delta$) удобнее проводить корреляцию состава, т.к. он более чувствителен, диапазон изменений шире более чем в 2 раза по сравнению с модулем потерь (G'').

Таблица 1

Результаты испытаний опытных образцов мастики

| № п/п | Наименование показателей | Образцы мастики | | | | |
|-------|---|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|
| | | №1 | №2 | №3 | №4 | №5 |
| 1 | Термостойкость при $(90\pm 3)^\circ\text{C}$ в течение 24 часа | смещение 3 мм | смещений нет | смещение 1 мм | смещений нет | смещение 2 мм |
| 2 | Прочность связи прокладок с металлом при отслаивании при $(23\pm 3)^\circ\text{C}$ в течение 4 часов, Н/м | 480 | 410 | 460 | 450 | 470 |
| 3 | Стойкость к низкой температуре при минус $(40\pm 3)^\circ\text{C}$ в течение 24 часов | частичное отслоение от панели | отслоение от панели | частичное отслоение от панели | соответствует | частичное отслоение от панели |
| 4 | Коэффициент потерь при температуре 20°C и частоте 200 Гц | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,05 |
| 5 | Модуль потерь (при $t=30^\circ\text{C}$ и частоте 1 Гц), G'' , кПа | 153,74 | 153,79 | 155,56 | 154,07 | 156,74 |
| 6 | Тангенс угла механических потерь (при $t=30^\circ\text{C}$ и частоте 1 Гц), $tg\delta$ | 0,638 | 0,641 | 0,640 | 0,639 | 0,641 |

Таблица 2

Результаты основных свойств опытных образцов мастики с добавлением вермикулита

| № п/п | Наименование показателей | Содержание вермикулита (мас.ч.) | | | | |
|-------|---|---------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 1 | Термостойкость при $(90\pm 3)^\circ\text{C}$ в течение 24 часа | смещений нет | смещений нет | смещений нет | смещение 2 мм | смещение 3 мм |
| 2 | Прочность связи прокладок с металлом при отслаивании при $(23\pm 3)^\circ\text{C}$ в течение 4 часов, Н/м | 450 | 450 | 430 | 410 | 400 |
| 3 | Стойкость к низкой температуре при минус $(40\pm 3)^\circ\text{C}$ в течение 24 часов | соотв-ет | соотв-ет | соотв-ет | частичное отслоение от панели | частичное отслоение от панели |
| 4 | Коэффициент потерь при температуре 20°C и частоте 200 Гц | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,16 | 0,19 |
| 5 | Модуль потерь (при $t=30^\circ\text{C}$ и частоте 1 Гц), G'' , кПа | 190,07 | 192,43 | 194,01 | 195,33 | 205,15 |
| 6 | Тангенс угла механических потерь (при $t=30^\circ\text{C}$ и частоте 1 Гц), $tg\delta$ | 0,643 | 0,789 | 0,987 | 1,301 | 1,617 |

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено влияние этиленпропиленового каучука на свойства получаемого самоклеющегося мастичного материала. Получены образцы мастики с расширенным температурным интервалом применения и улучшенными вибродемпфирующими свойствами.

2. Разработан метод прогнозирования вибродемпфирующих свойств на RPA2000. Показана взаимосвязь тангенса угла механических потерь, полученного на RPA2000, с коэффициентом потерь, определяемым на установке «Оберст».

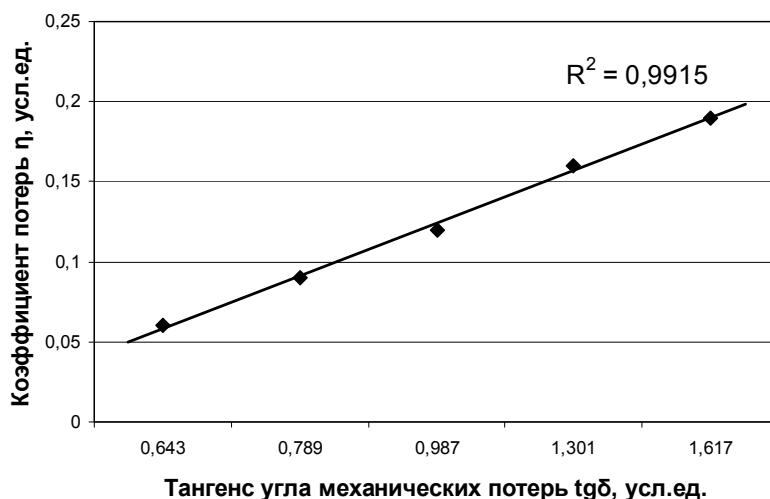


Рис. 1. Взаимосвязь коэффициента потерь и тангенса угла механических потерь ($\text{tg} \delta$)

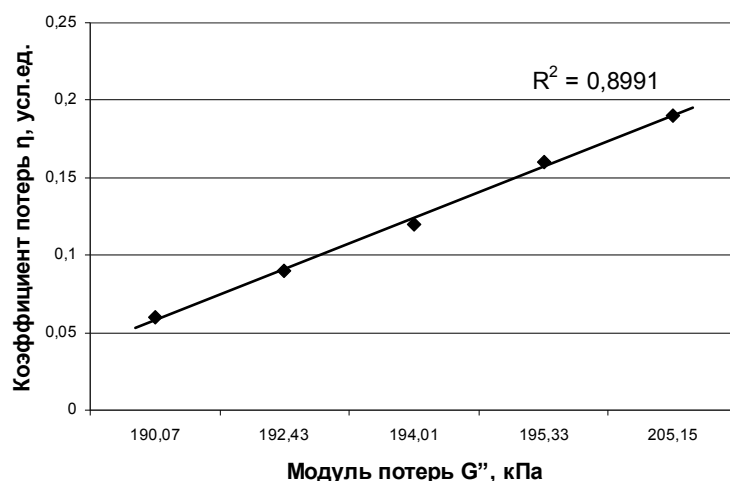


Рис. 2. Взаимосвязь коэффициента потерь и модуля потерь (G'' , кПа)

ЛИТЕРАТУРА

1. Bares R.A. Relationship between geometric and physical structure and properties of granular composites / R.A. Bares // J. Mater. Sci. 1985. Vol. 20. № 2. P. 471-481.
2. ASTM E756-04 «Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials».
3. ASTM D6204-04 «Standard Test Method for Rubber-Measurement of Unvulcanized Rheological Properties Using Rotorless Shear Rheometers».
4. Чернышев В.М. Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов / В.М. Чернышев; под ред. А.А. Гусарова. М.: Наука, 2004. 288 с.

Пичхидзе Сергей Яковлевич –
кандидат химических наук, доцент кафедры
«Биотехнические и медицинские аппараты
и системы» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Муромцев Денис Николаевич –
ведущий инженер-технолог
ОАО «Балаковорезинотехника», г. Балаково

Sergei Ya. Pichhidze –
Ph. D., Associate Professor
Senior Researcher: Department of Biotechnical
and Medical Devices and Systems,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Denis N. Muromtsev –
Leading Engineer
JSC «Balakovorezintehnika», Balakovo

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 532.543

А.М. Калякин, Е.В. Чеснокова

УЧЕТ НЕРАВНОМЕРНОСТИ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ

Рассматривается один из возможных способов учета влияния неравномерности на потери энергии и предлагаются зависимости, которые могут быть применены в инженерных расчетах.

Неравномерное движение, потери на трение, коэффициент сопротивления, критерий Re, открытый поток

A.M. Kalyakin, E.V. Chesnokova

UNEVEN HYDRAULIC CALCULATION OF FRICTION LOSSES

The paper deals with a potential method of accounting the influence of non-uniformity in the energy loss, and proposes the relationship that can be used for engineering calculations.

Uneven movement, friction losses, drag coefficient, the Re criterion, open flow

Примерами неравномерного движения являются потоки в диффузорах, конфузорах, в открытых каналах с неравномерным плавноизменяющимся течением. В дальнейшем рассматриваются только безотрывные потоки, в которых неравномерность выражена слабо; задачи ставятся и решаются в одномерной постановке.

При расчетах потерь на трение при неравномерном движении рассматриваемый участок представляют состоящим из бесконечно малых отрезков, для каждого из которых полагают

$$dh_{\text{ном}} = \lambda \frac{dl}{d(l)} \cdot \frac{V^2(l)}{2g}, \quad (1)$$

где l – расстояние, отсчитываемое вдоль оси потока, $V(l)$ и $d(l)$ – соответственно средняя скорость и характерный линейный параметр, зависящий от l .

Затем определяют потери на трение

$$h_{\text{ном}} = \int_0^l dh_{\text{ном}}, \quad (2)$$

при этом считают [1], что коэффициент λ зависит от тех же параметров, что и при равномерном движении.

Нами предполагается, что коэффициент сопротивления при неравномерном движении зависит (как и при равномерном) в общем случае от числа Re и шероховатости, а также от геометрии потока, т. е. от параметра, характеризующего степень неравномерности.

Очевидно, что все эти факторы независимы друг от друга.

Поэтому возможно представить коэффициент $\lambda_{\text{нер}}$ при неравномерном движении в виде

$$\lambda_{\text{нер}} = \lambda_{\text{равн}} \cdot \varphi(\gamma). \quad (3)$$

Таким образом, учет неравномерности производится функцией $\varphi(\gamma)$, а параметр γ зависит от ускорения, поэтому он может быть единственным образом представлен так:

$$\gamma = \frac{a \cdot l}{V^2}. \quad (4)$$

Имея в виду, что $a = dV / dt$, преобразовать γ к виду

$$\gamma = \frac{dV}{dl} \cdot \frac{l}{V} \quad (5)$$

В последнем выражении производная dV / dl характеризует степень изменения средней скорости по длине, l – некоторый линейный параметр.

В дальнейшем рассматривается малая степень неравномерности, то есть параметр γ принимает по абсолютной величине значения, меньшие единицы. Возможно, вследствие этого разложить функцию $\varphi(\gamma)$ в ряд Маклорена вблизи $\gamma = 0$, то есть

$$\varphi(\gamma) = \varphi(0) + \frac{\varphi'(0)}{1!} \gamma + \frac{\varphi''(0)}{2!} \gamma^2 + \dots \quad (6)$$

Очевидно, что $\varphi(0) = 1$, и задача будет решена, если определить коэффициенты ряда (6) или в первом приближении определить значение $\varphi'(0)$.

Для напорного потока в круглой трубе переменного сечения получим (принимая $l = r$)

$$\gamma = -4 \frac{dr}{dl} \quad (7)$$

и в первом приближении

$$\varphi(\gamma) = 1 - 4\varphi'(0) \frac{dr}{dl} \quad (8)$$

Из последнего соотношения следует, что потери при неравномерном движении отличаются от потерь в равномерном потоке.

Из (3) получается

$$\varphi(\gamma) = \frac{\lambda_{\text{н.р.}}}{\lambda_{\text{р.в.}}} = \frac{h_{\text{н.р.}}}{h_{\text{н.р.р.в.}}}, \quad (9)$$

так как выше предполагалось, что все эффекты потерь при неравномерном течении определяются функцией $\varphi(\gamma)$.

Применяя изложенный выше подход к открытому неравномерному плавноизменяющемуся потоку в призматическом канале, получим

$$\varphi(\gamma) = \frac{dh_{\text{н.р.}}}{dh_{\text{р.в.}}} \quad (10)$$

или, учитывая, что $dh_{\text{р.в.}} = i \cdot dl$,

$$\varphi(\gamma) = \frac{i \cdot dl + dh + \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{dh}{h}}{i \cdot dl} \quad (11)$$

или

$$\varphi(\gamma) = 1 + \frac{\left(1 + \frac{V^2}{2gh}\right)}{i} \cdot \frac{dh}{dl}. \quad (12)$$

Если приравнять потери для замедленного и ускоренного потоков одинаковой геометрии, то получим

$$\varphi(-\gamma) = \varphi(\gamma),$$

а это приводит к тому, что сумма

$$1 + \frac{V^2}{2gh}$$

должна быть равна нулю, что невозможно.

Таким образом, получен вывод о том, что потери для замедленного и ускоренного потоков неодинаковы.

Из выражения (12) для $\varphi(\gamma)$ следует, что эта функция линейно зависит от dh/dl , поэтому и потери в канале при малой степени неравномерности линейно зависят от dh/dl .

Окончательно можно записать

$$\lambda_{\text{неп.}} = \lambda_{\text{рав.}} \left(1 + \frac{1 + \frac{V^2}{2gh}}{i} \cdot \frac{dh}{dl} \right). \quad (13)$$

Безусловно, подход к решению задачи в данной работе в значительной степени формальный и не проясняет физику явления; иного при гидравлическом подходе трудно было ожидать.

Тем не менее можно отметить следующее: физический смысл потерь при неравномерном движении можно объяснить как возникновение дополнительных потерь из-за перестройки эпюры распределения скорости при движении вдоль потока. В конечном счете, потери вызваны внутренним трением в жидкости.

Пример расчета

Для проверки выводов и зависимостей, полученных в основной части статьи, было проведено сравнение результатов для длин кривых свободной поверхности, полученных

- а) общепринятым способом;
- б) с учетом полученной в работе функции $\varphi(\gamma)$.

Для примера была выбрана следующая задача: определить длину кривой свободной поверхности, на которой глубина уменьшается на 0,1 м. Лоток бетонный прямоугольного сечения шириной $b = 1$ м, расход воды $Q = 1$ м³/с, уклон дна лотка $i = 0,02$, коэффициент шероховатости $n = 0,017$. Нормальная глубина в лотке $h_0 = 0,3$ м.

В обоих случаях применялся метод непосредственного интегрирования, то есть выбирался промежуток изменения глубин от h_1 до h_2 (в данном случае кривой спада $h_1 > h_2$), он разбивался на 10 частей, и для каждой точки разбиения находилась величина

$$\frac{dh}{dl} = f(h).$$

В последующем вычислялся интеграл

$$l = \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{f(h)}.$$

Для определения l обычным способом использовалось известное уравнение [2]

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{S^2 RC^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{gS^3} B}. \quad (14)$$

Величина C находилась по формуле [2]

$$C = 1/n + 7,7 \ln R,$$

где n – коэффициент шероховатости, R – гидравлический радиус.

Интегрирование в обоих случаях проводилось по формуле трапеций.

Известная зависимость

$$\lambda = 8g / C^2$$

для случая, когда влияние неравномерности потока учитывается, принимает вид (зависимости (3) и (12)):

$$\lambda_{\text{неп.}} = \frac{8g}{(1/n + 7,7 \ln R)^2} \left(1 - \frac{1 + \frac{V^2}{2gh}}{i} \cdot \frac{dh}{dl} \right)$$

знак «-» в скобках поставлен потому, что в данном случае имеет кривую спада и $dh/dl < 0$. Окончательно выражения для dh/dl получим, если зависимость для λ подставим в (14)

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{S^2 R} \cdot \frac{1 + \frac{V^2}{2gh} \cdot \frac{dh}{dl}}{(1/n + 7,7 \ln R)^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{gS^3} B} \quad (15)$$

При каждом из 11 значений h в точках разбиения в последнее соотношение подставлялись все известные параметры; особенность в данном случае заключалась в том, что для получения dh/dl приходилось в каждой точке разбиения решать трансцендентное уравнение относительно dh/dl .

Только после решения (15) относительно dh/dl полученное значение dh/dl принималось в качестве исходного для последующего подставления в формулу трапеций.

Данные результаты приведены в таблице.

Результаты сравнения величин dh/dl

| Глубина, м | Величина dh/dl по (14) | Величина dh/dl по (15) |
|------------|--------------------------|--------------------------|
| 0,45 | -0,0468 | -0,041 |
| 0,44 | -0,0323 | -0,0285 |
| 0,43 | -0,0234 | -0,022 |
| 0,42 | -0,0174 | -0,0155 |
| 0,41 | -0,013 | -0,0115 |
| 0,40 | -0,0098 | -0,0085 |
| 0,39 | -0,0072 | -0,0065 |
| 0,38 | -0,0052 | -0,0045 |
| 0,37 | -0,0036 | -0,004 |
| 0,36 | -0,0022 | -0,0015 |
| 0,35 | -0,0011 | -0,0005 |

На основании данных, приведенных в таблице, были подсчитаны длины кривых свободной поверхности для обоих случаев. Длина кривой спада, подсчитанная обычным способом составляет $l_1 = 18,3$ м; длина кривой, определенная с учетом функции $\varphi(\gamma)$ получилась равной $l_2 = 26,5$ м. Получено, таким образом, значительное расхождение, и дальнейшие выводы возможно сделать после тщательных экспериментов.

Полученная в работе зависимость, учитывающая ускорение потока, может быть скорректирована введением коэффициента, который находится на основе опытных данных.

Таким образом, появляется возможность уточнить все расчеты, связанные с ускоренным движением жидкости; в особенности, когда это связано с потерями на трение.

Выводы:

1. Предложен способ учета неравномерности открытых потоков.
2. Приведено сравнение обычного способа расчета кривых свободной поверхности со способом, предложенным в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. М., 1975. 323 с.

2. Богомолов А.И. Гидравлика: учебник для вузов / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.

Калякин Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander M. Kalyakin – Ph.D., Assistant Professor
Department Heat, ventilation, water supply and applied fluid dynamics
Gagarin Saratov State Technical University

Чеснокова Елена Вадимовна – ассистент кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena V. Chesnokova – Assistant Department Heat, ventilation, water supply and applied fluid dynamics
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 21.04.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 621.184

В.Н. Лункин, Н.А. Озеров

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ХОЛОДИЛЬНИКА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Приводятся методика и результаты анализа работы холодильников, охлаждающих элементы стекловаренных печей. Представлены расчеты температурных характеристик опорного холодильника подвесной стены, позволяющие рекомендовать требуемые параметры охлаждающего теплоносителя.

Методика, холодильник, печь, теплообмен, температура

V.N. Lunkin, N.A. Ozerov

A TECHNIQUE FOR ASSESSMENT OF OPERATIONAL RELIABILITY OF THE GLASS FURNACE REFRIGERATOR

The article considers a technique and operation analysis of refrigerators utilized for cooling glass furnaces components. Calculations referring temperature characteristics to the basic refrigerator of the suspended wall, allowing to recommend the demanded parameters in the cooling heat carrier are presented.

Technique, refrigerator, furnace, heat exchange, temperature

В стекловаренных печах с температурой около 1600⁰С и агрессивным действием стекломассы многие элементы футеровки выходят из строя, что приводит к авариям. Поэтому устанавливают как постоянные холодильники, так и аварийные. Надежность работы холодильников продлевает срок компании печи при сокращении аварийных ситуаций. Основные аварии холодильников вызваны нарушениями в подаче охлаждающей воды.

Рассмотрим холодильник, используемый в качестве опоры подвесной стены между 2-й и 3-й горелками регенеративной печи листового стекла. Это вызвано разрушением стены, прогаром полки колонны и необходимостью ее усиления.

На стекольных заводах широко используются холодильники из прямоугольных труб различного сечения. В нашем случае холодильник выполнен из трубы 80*60*5 по ГОСТ8645-68 из стали

В 20. При температуре охлаждающей воды на выходе 40...50 °С данная сталь соответствует температурному режиму работы холодильника при непрерывной подаче расчетного количества охлаждающей воды. Температура поверхности холодильника ограничивается началом интенсивного окисления при 480 °С [1]. На рисунке показано подключение реального Г-образного опорного холодильника, который при непродолжительной эксплуатации прогорел.

Водяное охлаждение должно обеспечить надежную работу холодильника при температуре его внутренней поверхности на 20°С ниже температуры кипения воды при минимально допустимом давлении воды в первой секции холодильника 0,25 МПа ($t_{кип}=138^{\circ}\text{C}$).

Далее приводится методика расчета внутреннего и внешнего теплообмена, результаты которого представлены в таблице.

Допустимая рабочая температура внутренней поверхности стенки
 $t_{ст.вн.} = t_{кип} - 20 = 118^{\circ}\text{C}$.

Внешний теплообмен

Принята максимальная температура газового пространства печи в зоне между 2-й и 3-й горелками 1550°С.

Эффективная длина пути луча

$$S_{эф} = \eta_z \frac{4 \cdot h \cdot b \cdot l}{2(h \cdot l + b \cdot l)}; \quad (1)$$

При принятой $t_{ст} = 161^{\circ}\text{C}$ найдены $\varepsilon_{CO_2} = 0,09$; $\varepsilon'_{H_2O} = 0,175$

Степень черноты газов:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}; \quad (2)$$

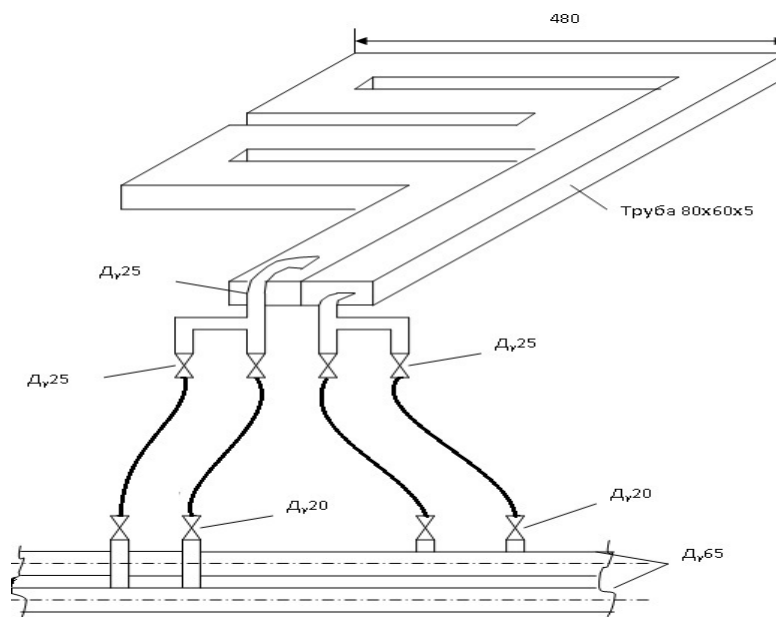


Схема подключения холодильника

Степень развития кладки:

$$\omega = \frac{F_{кл}}{F_{mat}} \quad (3)$$

Коэффициент

$$\beta = [\varepsilon_m + \varepsilon_z (1 - \varepsilon_m)] \quad (4)$$

Коэффициент

$$K = \frac{\omega + 1 - \varepsilon_z}{\beta \frac{1 - \varepsilon_z}{\varepsilon_z} + \omega} \quad (5)$$

Приведенный коэффициент излучения

$$C_{г.к.м.} = C_0 \cdot \epsilon_M \cdot K \quad (6)$$

Тепловой поток удельный

$$q_{л.} = C_{г.к.м.} \left[\left(\frac{T_г}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_м}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

Из предварительных расчетов тепловой поток от соприкасающейся кладки (кондукцией) принят $q_{конд.} = 20$ кВт.

Внутренний теплообмен

Температуру $t_{ст.вн.} = 118^{\circ}\text{C}$ при большом удельном тепловом потоке 380 кВт/м² можно обеспечить только при интенсивном водяном охлаждении.

Относительно большие размеры сечения прямоугольной трубы снижают коэффициент теплоотдачи к воде по сравнению с применяемыми в котлах трубами $D=32; 38$. Поэтому увеличение определяющего размера приходится компенсировать увеличением скорости движения воды.

Определяющий размер прямоугольной трубы:

$$d_u = \frac{4F}{\Pi} \quad (8)$$

Из предварительных расчетов принимаем $\omega_b = 1,2$ м/с; $\bar{t}_g = 36^{\circ}\text{C}$

Температура охлаждающей воды из оборотной системы принята по факту для самого жаркого периода года (июля) $t'_g = 35^{\circ}\text{C}$.

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega_g \cdot d_u}{\nu} \quad (9)$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде, Вт/м²·К,

$$\alpha_g = A \frac{\omega_g^{0,8}}{d^{0,2}} \quad (10)$$

Передаваемый в первом элементе (секции) тепловой поток, кВт:

$$Q_1 = q_{л.} \cdot F_{л.} + q_{конд.} \cdot F_{конд.} \quad (11)$$

Расход воды при скорости $\omega_b = 1,2$ м/с:

$$G_b = \omega_b \cdot f. \quad (12)$$

Температура воды на выходе из первой секции

$$t''_{g1} = \frac{Q_1}{c_g \cdot G_g} + t'_g \quad (13)$$

Максимальная температура внутренней поверхности чистой стенки (без учета растекания теплоты по стенке за счет ее теплопроводности)

$$t_{ст.вн.}^{max} = \bar{t}_g + \frac{1}{\alpha_g} \cdot q_{л.} \quad (14)$$

Температура чистой стенки со стороны газов

$$t_{ст.н.}^{max} = t_{ст.вн.} + \frac{\delta_{ст.}}{\lambda_{ст.}} \cdot q_{л.} \quad (15)$$

При наличии накипи со стороны воды $\delta_{нак} = 1$ мм.

Максимальная температура внутренней поверхности загрязненной стенки

$$t_{ст.вн.}^{max} = \bar{t}_g + \left(\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_{нак}}{\lambda_{нак}} \right) \cdot q_{л.} \quad (16)$$

Температура стенки со стороны газов (при накипи 1 мм)

$$t_{ст.н.}^{нак} = t_{ст.вн.} + \frac{\delta_{ст.}}{\lambda_{ст.}} \cdot q_{л.} \quad (17)$$

Температура стенки со стороны газов (при накипи и окалине) $t_{ст.н.}^{нак} = 360^{\circ}\text{C}$.

Проверка принятого теплового потока $Q_{л.} = 375$ кВт при наличии накипи

$$q_{л.} = C_{г.к.м.} \left[\left(\frac{T_г}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_м}{100} \right)^4 \right]; \quad (18)$$

Общий нагрев воды в холодильнике

$$t_g^{//} = \frac{Q_1}{c_g \cdot G_g} + t_g^I \quad (19)$$

Подача уменьшенного вдвое количества воды со скоростью 0,6 м/с

Аналогичным расчетом получена температура стенки со стороны газов (при накипи и окалине) $t_{ст.н.}^{нак} = 439 \text{ } ^\circ\text{C}$, тогда общий нагрев воды в холодильнике

$$t_g^{//} = \frac{Q_1}{c_g \cdot G_g} + t_g^I \quad (20)$$

Предельная температура воды, при которой начинается выпадение солей карбонатной жесткости [2]

$$t_{np} = 353 + 1,67Ok - 14N_{\kappa} - \frac{112N_{нек}}{48 - Ok} \quad (21)$$

Результаты расчета внешнего и внутреннего теплообмена

| Наименование расчетного параметра | Обозначение | Размерность | Значение |
|--|--------------------|--------------------------------|---------------------|
| Эффективная длина пути луча | $S_{эф}$ | м | 2,8 |
| Степень черноты газов | ε_z | - | 0,277 |
| Степень развития кладки | ω | - | 4 |
| Коэффициент | β | - | 0,855 |
| Коэффициент | K | - | 0,758 |
| Приведенный коэффициент излучения | $C_{г.к.м}$ | Вт/м ² ·К | 3,457 |
| Тепловой поток удельный | $q_{Л}$ | кВт/м ² | 380 |
| Определяющий размер прямоугольной трубы | d_u | м | 0,058 |
| Критерий Рейнольдса | Re | - | 99400 |
| Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде | α_g | Вт/м ² ·К | 4619 |
| Передаваемый в первом элементе (секции) тепловой поток | Q_1 | кВт | 26 |
| Расход воды | G_b | (кг/с)/ (м ³ /ч) | (0,0042)/ (15,1) |
| Температура воды на выходе из первой секции | $t_{г1}^{//}$ | °C | 37 |
| Максимальная температура внутренней поверхности чистой стенки без учета растекания / с учетом растекания | $t_{ст.вн.}^{max}$ | °C | 118,2/ 115,5 |
| Температура чистой стенки со стороны газов | $t_{ст.н.}^{max}$ | °C | 161 |
| Максимальная температура внутренней поверхности загрязненной стенки | $t_{ст.вн.}^{max}$ | °C | 304,7 |
| Температура стенки со стороны газов | $t_{ст.н.}^{нак}$ | °C | 347,3 |
| Уточнение удельного теплового потока | $q_{Л}$ | кВт/м ² | 376 |
| Общий нагрев воды в холодильнике | $t_g^{//}$ | °C | 38 |
| Общий нагрев воды в холодильнике, при накипи и окалине | $t_g^{//}$ | °C | 41 |
| Предельная температура воды | t_{np} | °C | 325 |

Выводы:

1. При чистых поверхностях нагрева и подаче охлаждающей воды 15 м³/ч ($\omega_b=1,2$ м/с) холодильник будет работать надежно, без перегрева.
2. Минимальное давление охлаждающей воды в самом холодильнике должно быть не менее 0,25 МПа.
3. При наличии накипи 1 мм будет наблюдаться местное кипение воды на поверхности фронтальной секции и накипеобразование. При дальнейшем продвижении воды по холодильнику образо-

вавшийся в небольшом количестве пар сконденсируется в воде и на выходе из холодильника он будет отсутствовать.

4. При подаче воды $7,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($\omega_{\text{в}}=0,6 \text{ м/с}$) температурные условия работы металла фронтальной секции холодильника близки к предельным, и при любом нарушении режима подачи воды могут быть негативные последствия.

Кроме того, обратная вода характеризуется высокой карбонатной и общей жесткостью 5-6 мг-экв/кг, высокой окисляемостью 13 мг-экв/кг, что приводит как к отложению солей кальция и магния, так и к высокотемпературной (кислородной) коррозии. В результате – резкое сокращение срока службы холодильника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оребренные поверхности нагрева паровых котлов / Г.И. Левченко, И.Д. Лисейкин, А.М. Копелиович и др. М.: Энергоатомиздат, 1986. 168 с.
2. Андоньев С.М. Испарительное охлаждение металлургических печей / С.М. Андоньев. М.: Металлургия, 1970. 420 с.

Лункин Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir N. Lunkin – Ph. D., Associate Professor
Department of Industrial Heating Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Озеров Никита Алексеевич – ассистент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita A. Ozerov – Assistant Lecturer
Department of Industrial Heating Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.05.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 662.758.3

О.Н. Медведева, В.О. Фролов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ХЛАДОНОСИТЕЛЯ И ПРИРОДНОГО ГАЗА В ЦИКЛЕ ПРОИЗВОДСТВА СПГ

Излагаются научные положения по разработке теоретических основ расчета основных эксплуатационных параметров модернизированной схемы доставки сжиженного природного газа (СПГ) потребителям.

Сжиженный природный газ, хладоноситель, теплообменник, температура, давление, теплоемкость

O.N. Medvedeva, V.O. Frolov

DEFINING THE KEY PARAMETERS OF REFRIGERANTS AND NATURAL GAS IN THE PRODUCTION OF LNG CYCLE

The article presents scientific propositions for the development of theoretical foundations for calculating key operational parameters of modernized schemes for the delivery of liquefied natural gas (LNG) to consumers.

Liquefied natural gas, refrigerants cooling, heat exchanger, temperature, pressure, heat capacity

Оценка экономической эффективности использования сжиженного природного газа показывает, что данный энергоноситель позволяет обеспечить потребителей безопасным, конкурентоспособным топливом в тех регионах страны, где экономически нецелесообразно строительство газопроводных сетей. Одним из основных факторов конкурентоспособности СПГ является удаление потребителей газа от источника газоснабжения, и, чем удаленнее находится потребитель, тем эффективнее вариант газоснабжения сжиженным природным газом.

В состав комплексов СПГ входят: комплексы по сжижению природного газа, хранилища и средства выдачи сжиженного газа, средства для транспортировки СПГ, хранилища газа у потребителей, газификаторы, криогенная арматура, оборудование газораспределения. Для оптимального функционирования всего комплекса СПГ необходимо наладить четкое взаимодействие между его основными составляющими.

В результате анализа существующих схем газоснабжения на базе СПГ с использованием автомобильного транспорта были выявлены элементы системы, усовершенствование которых приведет к положительному экономическому эффекту [1].

Проведем расчет основных эксплуатационных параметров модернизированной схемы доставки сжиженного природного газа потребителям.

1. Определим необходимое конечное давление (давление инверсии), развиваемое компрессором в зависимости от начальной температуры магистрального природного газа. Для определения давления инверсии воспользуемся уравнением состояния реального газа. В настоящее время состояние реального газа с высокой степенью точности описывается уравнением Редлиха-Квонга [2], которое имеет вид

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{\sqrt{T}v(v+b)}, \quad (1)$$

где

$$a = f(T, \omega) = \alpha \cdot 0,42748 \cdot R^2 \frac{T_c}{P_c}; \quad (2)$$

$$b = 0,08664 \frac{RT_c}{P_c}; \quad (3)$$

$$\alpha = \left[1 + \left(0,48508 + 1,55171\omega - 0,15613\omega^3 \right) \left(1 - \sqrt{T_r} \right) \right]^2; \quad (4)$$

ω – фактор ацентричности Питцера, определяется по уравнению Эдмистера:

$$\omega = \frac{3\theta}{7(1-\theta)} \lg p_c - 1; \quad (5)$$

$$\theta = \frac{T_B}{T_C}, \quad (6)$$

где T_C – критическая температура, для метана принимается равной 191 К; T_B – нормальная температура кипения, для метана принимается равной 111,4 К; $T_r = \frac{T}{T_C}$ – приведенная температура; P_C – критическое давление для метана равно 47,2 атм.

В данном уравнении нам не известен удельный объем газа. Для его определения воспользуемся уравнением кривой инверсии, которое имеет вид

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i = 0, \quad (7)$$

где

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i = \frac{1}{c_p} \left(T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right), \quad (8)$$

соответственно:

$$\frac{1}{c_p} \left(T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right) = 0, \quad (9)$$

откуда

$$T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v = 0. \quad (10)$$

Вычисление производной $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$ приводит к решению уравнения 3-й степени, для этого целесообразно воспользоваться тождеством:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = -1 ; \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = -\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = -\frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v}{\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T} . \quad (12)$$

После вычисления необходимых производных уравнение кривой инверсии примет вид

$$T \left[\left(\frac{R}{v-b} + \frac{a \cdot \left[d \cdot \left(\sqrt{\frac{T}{T_C}} - 1 \right) - 1 \right]^2}{2 \cdot \sqrt{T^2} \cdot v(v+b)} - \frac{a \cdot d \cdot \left[d \cdot \left(\sqrt{\frac{T}{T_C}} - 1 \right) - 1 \right]}{T \sqrt{T_C} \cdot v(v+b)} \right) \right. \\ \left. - \left(\frac{a \cdot \left[d \cdot \left(\sqrt{\frac{T}{T_C}} - 1 \right) - 1 \right]^2}{\sqrt{T} \cdot v(v+b)^2} - \frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{a \cdot \left[d \cdot \left(\sqrt{\frac{T}{T_C}} - 1 \right) - 1 \right]^2}{\sqrt{T} \cdot v^2 \cdot (v+b)} \right) \right] = 0 \quad (13)$$

После проведения соответствующих преобразований получим

$$v = \frac{\frac{C^2}{9 \cdot B^2} - \frac{D}{3 \cdot B}}{\sqrt[3]{\sqrt{\frac{D^3}{27 \cdot B^3} + \frac{E^2}{4 \cdot B^2} - \frac{C^2 \cdot D^2}{108 \cdot B^4} + \frac{C^3 \cdot E}{27 \cdot B^4} - \frac{C \cdot D \cdot E}{6 \cdot B^3} - \frac{C^3}{27 \cdot B^3} - \frac{E}{2 \cdot B} + \frac{C \cdot D}{6 \cdot B^2}} - \frac{C}{3 \cdot B} + \sqrt[3]{\sqrt{\frac{D^3}{27 \cdot B^3} + \frac{E^2}{4 \cdot B^2} - \frac{C^2 \cdot D^2}{108 \cdot B^4} + \frac{C^3 \cdot E}{27 \cdot B^4} - \frac{C \cdot D \cdot E}{6 \cdot B^3} - \frac{C^3}{27 \cdot B^3} - \frac{E}{2 \cdot B} + \frac{C \cdot D}{6 \cdot B^2}}}} . \quad (14)$$

Подставляя полученное выражение в уравнение состояния, получим зависимость давления инверсии от температуры.

Определяя значения давления инверсии при температуре наружного воздуха $T1$ и при температуре природного газа, охлажденного хладоносителем $T2$, получим необходимые конечные давления для базовой схемы доставки СПГ и для предлагаемой схемы P2.

2. Определим температуру хладоносителя после теплообменника-регазификатора. Количество теплоты, переданное от хладоносителя к СПГ, будет равняться количеству теплоты, воспринятой СПГ, за вычетом теплопритоков из окружающей среды. Теплопритоки учитываются с помощью коэффициента полезного действия (КПД) теплообменника. КПД теплообменников, используемых в криогенной технике, составляет $\varepsilon=0,94 \div 0,98$ [3]. Таким образом:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{хлад}}}{Q_{\text{СПГ}}} , \quad (15)$$

отсюда количество теплоты, переданной от хладоносителя к СПГ, будет определяться по формуле

$$Q_{\text{хлад}} = \varepsilon \cdot Q_{\text{СПГ}} . \quad (16)$$

Диметилвый эфир и метан не являются ассоциированными жидкостями, следовательно, для вычисления их изобарной теплоемкости можно воспользоваться уравнением Роулинсона-Бонди [2], основанном на использовании принципа соответственных состояний:

$$\frac{c_P - c_P^0}{R} = 2,56 + 0,436(1 - \tau)^{-1} + \omega \left[2,91 + \frac{4,28(1 - \tau)^{\frac{1}{3}}}{\tau} + 0,296(1 - \tau)^{-1} \right] , \quad (17)$$

где c_p – теплоемкость вещества при постоянном давлении (изобарная); c_p^0 – идеальноегазовая теплоемкость, определяется по формуле Лурия и Бенсона (применяется ниже нормальной точки кипения):

$$c_p^0 = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3, \quad (18)$$

A, B, C, D – коэффициенты, принимаются по данным [4]; R – универсальная газовая постоянная; τ – приведенная температура, определяется по уравнению:

$$\tau = \frac{T}{T_{KP}}, \quad (19)$$

T_{KP} – абсолютная и критическая температуры соответственно; ω – фактор ацентричности Питцера (константа чистого вещества), определяется по формуле [2]:

$$\omega = \frac{3\theta}{7(1-\theta)} \lg p_c - 1, \quad (20)$$

θ – нормированная температура кипения вещества, определяется по формуле

$$\theta = \frac{T_B}{T_C}, \quad (21)$$

T_C – критическая температура кипения вещества; T_B – нормальная температура кипения вещества; p_c – критическое давление.

В целях численной реализации приведенного алгоритма были проведены соответствующие расчеты. В расчетах использовались следующие исходные данные и предпосылки:

- средняя теплоемкость СПГ в интервале температур от 107,15 К до 111,55 К принимается равной 3,41 кДж/кг;
- температура транспортировки СПГ $T_1 = 107,15$ К;
- температура кипения СПГ $T_2 = 111,55$ К;
- средняя теплоемкость диметилового эфира в интервале температур от 233,15 К (что соответствует температуре минус 40⁰С) до 111,55 К принимается равной 2,1025 кДж/кг.
- минимальная температура хладоносителя при транспортировке $T_1 = 222,15$ К (выбираем вариант с наихудшим показателем).
- температура максимального охлаждения хладоносителя (при условии отсутствия теплопритоков) $T_2 = 111,55$ К.

Необходимые для проведения расчета величины сведены в таблицу.

Исходные данные для проведения расчета

| Величина | ω , г/моль | T_B , К | T_C , К | P_c , атм | A | B | C | D |
|------------------|-------------------|-----------|-----------|-------------|-------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Метан | 16,04 | 111,55 | 191,0 | 45,64 | 4,598 | $1,245 \cdot 10^{-2}$ | $2,86 \cdot 10^{-6}$ | $-2,703 \cdot 10^{-9}$ |
| Диметиловый эфир | 46,07 | 248,25 | 400,15 | 53 | 4,064 | $4,277 \cdot 10^{-2}$ | $-1,25 \cdot 10^{-5}$ | $-0,458 \cdot 10^{-9}$ |

Количество теплоты, воспринятое 1 кг СПГ, определяется по формуле

$$Q_{СПГ} = Q_{СПГ}^{нагр} + Q_{СПГ}^{рег}, \quad (22)$$

где $Q_{СПГ}^{нагр}$ – количество теплоты, расходуемой на нагрев СПГ; $Q_{СПГ}^{рег}$ – количество теплоты, расходуемой на регазификацию (испарение) СПГ.

$$Q_{СПГ}^{нагр} = c_p^{cp} \cdot \Delta T = c_p^{cp} (T_2 - T_1); \quad (23)$$

$$Q_{СПГ}^{нагр} = 3.41 \cdot (111.55 - 107.15) = 15.004 \text{ кДж/кг.}$$

$$Q_{СПГ}^{рег} = r = 511 \text{ кДж/кг; } Q_{СПГ} = 15 + 511 = 526 \text{ кДж.}$$

Определяем количество теплоты, воспринятое хладоносителем:

$$Q_{хлад} = 0.94 \cdot 526 = 483.92 \text{ кДж/кг.}$$

Вычислим массу хладоносителя, необходимую для регазификации одного кг СПГ. Будем считать, что все тепло, воспринятое СПГ, отведено от хладоносителя, то есть

$$Q_{\text{ХЛАД}}^{\text{max}} = Q_{\text{СПГ}},$$

в этом случае

$$Q_{\text{ХЛАД}}^{\text{max}} = m \cdot c_p^{\text{cp}} (T_1 - T_2), \quad (24)$$

откуда масса хладоносителя:

$$m = \frac{Q_{\text{СПГ}}}{c_p^{\text{cp}} (T_1 - T_2)} = \frac{526}{2.1025 \cdot (233.15 - 2.057)} = 2.057 \text{ кг.}$$

С учетом потерь полезного холода температура хладоносителя на выходе из теплообменника будет равна

$$T_2' = T_1 - \frac{Q_{\text{СПГ}}}{c_p^{\text{cp}} \cdot m} = 233.15 - \frac{488.92}{2.1025 \cdot 2.057} = 118.07 \text{ К.}$$

Температурная недорекупация составит

$$\Delta T_{\text{нед}} = T_2' - T_2 = 118.07 - 11.55 = 6.52 \text{ К}$$

Количество холода, возвращенного на станцию по сжижению, равно 483,92 кДж на 1 кг СПГ.

Определим температуру охлажденного газа. Магистральный газ поступает в теплообменник при температуре окружающей среды (принимается 40°C).

Теплоемкость в интервале температур от 90 до 300К определяется по формуле

$$c_p^{\text{cp}} = 1.49505 + 0.1389 \cdot 10^{-2} \cdot T - 0.10872 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0.02897 \cdot 10^{-6} \cdot T^3. \quad (25)$$

Средняя теплоемкость в интервале от 111,15 до 300 К, определенная по формуле (25), равна $c_p^{111.15-300K} = 1.635$ кДж/кг.

Теплоемкость в интервале температур от 300 до 1000 К определяется по формуле

$$c_p^{300-1000K} = 1.75423 + 0.035566 \cdot 10^{-2} \cdot T + 0.046523 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0.001701 \cdot 10^{-6} \cdot T^3. \quad (26)$$

Средняя теплоемкость в интервале температур от 300 до 315,15 К, определенная по формуле (26), равна $c_p^{300-315.5K} = 2.2545$ кДж/кг.

Определим массу природного газа, необходимую для нагрева хладоносителя, в расчете на 1 кг хладоносителя. Масса природного газа определяется аналогично массе хладоносителя в расчете на 1 кг СПГ.

С учетом принятого ранее допущения о равенстве отведенной и воспринятой теплоты ($Q_{\text{ХЛАД}} = Q_{\text{ПГ}}$), получим

$$Q_{\text{ХЛАД}} = Q_{\text{ПГ}}^{300-315.15} + Q_{\text{ПГ}}^{300-121.26}; \quad (27)$$

$$m_{\text{ПГ}} = \frac{Q_{\text{ХЛАД}}}{c_p^{300-315.15} \cdot (T_1 - T_2) + c_p^{300-121.26} \cdot (T_{11} - T_{22})}, \quad (28)$$

$$m_{\text{ПГ}} = \frac{483.92}{2.255 \cdot (315.15 - 300) + 1.635 \cdot (300 - 121.26)} = 1.482 \text{ кг.}$$

Температура на выходе из теплообменника будет равна

$$T_2' = T_1 - \frac{Q_{\text{ХЛАД}} \cdot \varepsilon}{m \cdot c_p^{300-121.26}} - Q_{\text{ПГ}}^{300-315.15} = 30 - \frac{483.92 - 0.94}{1.482 \cdot 1.635} - 34.16 = 133.16 \text{ К.}$$

Температурная недорекупация составит

$$\Delta T_{\text{нед}} = T_2' - T_2 = 133.16 - 121.26 = 11.9 \text{ К.}$$

Максимальное значение удельной холодопроизводительности q_x и коэффициента ожижения x полностью определяется максимумом дроссельного эффекта Δi_T . $\Delta i_T = f(T, p)$ является функция

температуры и давления [5]. Значение Δi_T существенно возрастает с понижением исходной температуры T_2 . Влияние давления p_2 имеет сложный характер. Вначале повышение величины p_2 приводит к возрастанию дроссельного эффекта Δi_T вплоть до состояния инверсии $p_{\text{инв}} = f(T)$. При понижении T_2 при $\Delta i_T = \text{const}$, то есть без изменения производительности установки, возможно понизить значение p_2 , необходимое для протекания процесса дросселирования, и, тем самым, уменьшить необходимый перепад давлений, развиваемый компрессором, а следовательно понизить мощность самого компрессора. Таким образом, понижение мощности компрессора приведет к уменьшению затрат электроэнергии.

Для определения давления инверсии воспользуемся формулами (1)-(14). Определяя значения давления инверсии при температуре наружного воздуха $T_1 = 313\text{K}$ и при температуре природного газа, охлажденного хладоносителем, $T_2 = 134,31\text{K}$, получим следующие значения давлений: $P_1 = 5,659 \text{ МПа}$; $P_2 = 0,638 \text{ МПа}$.

Разработанная математическая модель обоснования основных параметров новой схемы транспортировки СПГ позволяет произвести расчет температурных режимов перевозимых сжиженного природного газа и хладоносителя на каждом этапе транспортировки и определить необходимое конечное давление (давление инверсии) в зависимости от различной степени предварительного нагрева природного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведева О.Н. Разработка схемы транспортировки природного газа / О.Н. Медведева, В.О. Фролов // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 520-524.
2. Энциклопедия газовой промышленности. 4-е изд., пер. с фр. [ред. пер. К.С. Басниев]. М.: Акционерное общество ТВАНТ, 1994. 884 с.
3. Бармин И.В. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / И.В. Бармин, И.Д. Кунис. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 256 с.
4. Bondi A. Ind. Eng. Chem. Fundam / A. Bondi, 1966. 443 p.
5. Архаров А.М. Криогенные системы / А.М. Архаров. М.: Машиностроение, 1996. 576 с.

Медведева Оксана Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oksana N. Medvedeva – Ph. D., Associate Professor
Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, Water Supply and Applied Fluid and Gas Dynamics, Institute of Civil Engineering and Architecture, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Фролов Владимир Олегович – аспирант кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir O. Frolov – Postgraduate
Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, Water Supply and Applied Fluid and Gas Dynamics, Institute of Civil Engineering and Architecture, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 662.732

В.Ф. Симонов, А.А. Морев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРНИСТОГО СЛАНЦА КАРЬЕРНОЙ ДОБЫЧИ НА ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ РЕАКТОРОВ ПОЛУКОКСОВАНИЯ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Разработано математическое описание процесса полукоксования сернистых горючих сланцев в псевдоожигенном слое с учётом эндотермического эф-

фекта при разложении органического вещества. Приводится блок-схема алгоритма расчета. Показано влияние характеристик сернистого сланца карьерной добычи на габаритные размеры реакторов полукоксования в псевдооживленном слое.

Горючий сланец, кинетика, органическая масса, псевдооживленный слой, разложение, скорость нагрева, температура

V.F. Simonov, A.A. Morev

RESEARCH OF EFFECT CHARACTERISTIC OF SULFUR MINING OIL SHALE TO DIMENSIONS OF REACTOR SEMI COKING IN A FLUIDIZED BED

Creating mathematical description of process semi coking sulfur oil shale in a fluidized bed with the endothermic effect of the decomposition of organic substances in. Shows a block diagram of the process. Shows the effect characteristic of sulfur mining oil shale to dimensions of reactor semi-coking in a fluidized bed

Shale oil, kinetic, organic matter, fluidized bed, decomposition, heating rate, temperature

Горючие сланцы представляют собой комплексное органоминеральное полезное ископаемое. Существуют многочисленные разновидности горючих сланцев, значительно отличающихся по генезису, вещественному составу и физико-химическим свойствам, которые, в свою очередь, обуславливают возможные пути использования горючих сланцев.

Отличительной особенностью волжских сланцев является высокое содержание серы (от 2 до 6-10 %), большая часть которой входит в состав органического вещества. Это обстоятельство препятствует применению сланца в качестве топлива из-за высокого содержания SO_2 в дымовых газах. Вместе с тем термическая обработка сланца в режиме полукоксования позволяет перевести большую часть органического вещества в смолу с содержанием серы до 7-8%. Дальнейшее термokatалитическое преобразование парогazовой смеси, полученной при полукоксовании, предоставляет возможность получить ценные сераорганические соединения – тиофен, 2-метилтиофен, 2-5-диметилтиофен. Указанные продукты в настоящее время в Российской Федерации и странах СНГ не производятся. Вместе с тем эти вещества находят широкое применение при синтезе медицинских и ветеринарных препаратов, гербицидов, пестицидов, фунгицидов.

Процесс полукоксования горючих сланцев может быть реализован в установке с твёрдым теплоносителем (УТТ) и в реакторе псевдооживленного слоя (ПС). По сравнению с УТТ реактор ПС обладает рядом преимуществ, главное из которых – высокая интенсивность процессов тепло- и массообмена материала со средой и вследствие этого увеличение производительности установки и уменьшение капитальных затрат в оборудовании реакторного блока.

При проектировании и оптимизации оборудования реакторного блока полукоксования горючего сланца необходимо учитывать влияние изменяющихся характеристик горючего сланца карьерной добычи и условий эксплуатации на габаритные размеры реактора псевдооживленного слоя. К подобным характеристикам можно отнести изменяющийся фракционный состав горючего сланца карьерной добычи и изменение содержания условной органической массы (УОМ) в сланцах различных месторождений (а иногда и в рамках одного месторождения). Также необходимо определить степень влияния эндотермического эффекта разложения органического вещества горючего сланца, так как приведенные в литературе данные характеризуются большим разбросом значений $Q_{энд}$. Кроме того, при оптимизации совместной работы всех аппаратов реакторного блока необходимо учитывать влияние на габаритные характеристики реактора ПС температуры подаваемого в реактор ПС горючего сланца и газообразного теплоносителя, а также остаточного содержания органики в образующемся полукоксе.

Исследование влияния характеристик сернистого горючего сланца карьерной добычи на размеры реактора ПС целесообразно проводить на основе математического моделирования. Поэтому важной задачей является создание качественного математического описания процесса полукоксования сернистых горючих сланцев Поволжья в псевдооживленном слое, учитывающего характеристики горючего сланца карьерной добычи как твердой фазы псевдооживленного слоя, особенности гидро-

динамики и теплообмена в ПС, а также позволяющего определять качественный и количественный состав образующихся продуктов полукоксования.

При переработке горючего сланца карьерной добычи приходится иметь дело со смесями, составленными из частиц различного размера и формы, отличающейся от идеальной сферы. Если смесь сыпучего материала представляет собой узкую фракцию, то определяющий размер частиц – их эквивалентный диаметр d_s , можно принять равным среднему геометрическому:

$$d_s = \sqrt{d_1 \cdot d_2}, \quad (1)$$

где d_1 ; d_2 – наименьший и наибольший размеры частиц в смеси, м

Ряд параметров слоя (например, площадь поверхности теплообмена) зависит от формы частиц. Величина поверхности сферических частиц однозначно определяется по их диаметру. Поверхность несферической частицы всегда больше поверхности равного по объему шара. Для учета этого различия вводится понятие фактора формы частицы Φ , количественно определяющего отличие реальной формы частицы от идеальной сферы. В результате пересчета систематизированных значений Φ было получено значение фактора формы частиц горючего сланца карьерной добычи ($d_s = 2,5 \div 11,2$ мм) $\Phi = 0,653$.

Твердые топлива характеризуются действительной и кажущейся плотностью. Действительная плотность горючего сланца зависит от плотности его органической массы, от содержания и характера минеральных примесей и может быть рассчитана по уравнению

$$\rho_o = \frac{100 \cdot \rho_o}{100 - A^c \cdot \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_{мин}}\right)}, \quad (2)$$

где ρ_o – плотность органической массы сланца, кг/м³; A^c – выход золы на сухую массу сланца, %; $\rho_{мин}$ – плотность минеральных примесей горючего сланца, кг/м³.

Расчеты движения и теплообмена топливных частиц в газовых потоках следует проводить с использованием значений кажущейся плотности. Если известна пористость топлива Π , определяемая как отношение объема пор частицы к полному её объему, то кажущаяся плотность для сухого сланца определяется как

$$\rho_k = \rho_o \cdot (1 - \Pi). \quad (3)$$

При полукоксовании горючего сланца происходит интенсивное выделение летучих и уменьшение содержания органического вещества в частицах нагреваемого сланца. В результате пористость топлива увеличивается. Данное обстоятельство необходимо обязательно учитывать при моделировании процессов термической деструкции топлива, так как изменение пористости, а следовательно, и кажущейся плотности частиц ведёт к изменению поверхности теплообмена.

К сожалению, в литературе не содержится каких-либо данных об изменении пористости горючего сланца в зависимости от остаточного содержания в нём органического вещества. К тому же сложно представить точные зависимости вида $\Pi = f(\varphi_{ост})$, так как содержание органической массы в горючих сланцах различных месторождений колеблется в достаточно широких пределах, и единую корреляцию изменения пористости от степени выгазовывания получить практически невозможно. Поэтому вполне допустимо и практически целесообразно использовать для расчета кажущейся плотности горючего сланца модифицированную зависимость (4), позволяющую учесть уменьшение плотности частиц горючего сланца в процессе выделения летучих:

$$\rho'_k = \rho_k \cdot \left(1 - \sum \varphi_{уд}^{лет}\right), \quad (4)$$

где $\sum \varphi_{уд}^{лет}$ – суммарный удельный выход летучих (масса выделяющихся летучих веществ в расчете на 1 кг сланца), кг/кг.

Выражение для расчета удельной поверхности частиц f , м²/кг, может быть записано с использованием полученных ранее значений эквивалентного диаметра частиц, кажущейся плотности сланца и фактора формы:

$$f = \frac{6}{\rho'_k \cdot d_s \cdot \Phi^2}. \quad (5)$$

При математическом описании взаимодействия газового потока и сланцевых частиц в ПС важным вопросом является выбор рабочей скорости псевдоожижения. Увеличение рабочей скорости псевдоожижения ведет к интенсификации процесса теплообмена и уменьшению габаритных разме-

ров реактора ПС. Однако необходимо учитывать, что в процессе полукоксования горючего сланца происходит выделение летучих продуктов, увеличивается объём псевдооживленного слоя, что приводит к возрастанию рабочей скорости псевдооживления и может повлечь за собой унос мелких частиц топлива. Поэтому для расчета рациональной рабочей скорости псевдооживления $w_{раб}$, м/с, обеспечивающей псевдооживление самых крупных частиц фракции и предотвращающей унос самых мелких частиц, в первом приближении можно воспользоваться выражением

$$w_{раб} = \frac{w'_{кр} + w''_{кр}}{2}. \quad (6)$$

где $w'_{кр}$, $w''_{кр}$ – соответственно первая и вторая критические скорости псевдооживления, м/с.

Для расчета скорости начала псевдооживления $W'_{кр}$ и скорости уноса $W''_{кр}$ можно воспользоваться подтвержденными многочисленными опытными данными выражения

$$Re'_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}}, \quad (7)$$

где $Re'_{кр}$ – число Рейнольдса, соответствующее первой критической скорости; Ar – число Архимеда.

$$Re''_{кр} = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}}, \quad (8)$$

где $Re''_{кр}$ – число Рейнольдса, соответствующее второй критической скорости.

При этом стоит отметить, что для создания устойчивого режима псевдооживления в слое, образованном смесью частиц различного размера, первая критическая скорость псевдооживления рассчитывается с учетом размера наиболее крупных частиц фракции (d_{max}), а при расчете второй критической скорости необходимо использовать размер наименее крупных частиц фракции (d_{min}).

Большинство авторов отмечают, что для псевдооживленных слоев нет необходимости в расчете динамики теплообмена материала со средой, и можно ограничиться статическим балансовым расчетом, принимая, что температура газов, выходящих из псевдооживленного слоя, будет равна температуре материала в слое. Теплообмен в этом случае считается завершенным, а определяемая величина (температура или расход теплоносителя) может быть просто найдена из уравнения теплового баланса:

$$G_2 \cdot c_2 \cdot (t'_2 - t''_2) \cdot \eta = G_{cl} \cdot c_{cl} \cdot (t''_{cl} - t'_{cl}) + Q_{энд}, \quad (9)$$

где G_2 , G_{cl} – расходы газа псевдооживления и горючего сланца соответственно, кг/с; c_2 , c_{cl} – массовые теплоемкости газа и сланца соответственно, кДж/кг °С; t'_2 , t''_2 – температура газа псевдооживления, соответственно на входе и выходе из слоя, °С; t'_{cl} , t''_{cl} – температура сланца, соответственно на входе и выходе из слоя, °С; η – коэффициент, учитывающий потери теплоты в окружающую среду; $Q_{энд}$ – суммарный эндотермический эффект разложения органического вещества горючего сланца.

При решении задач моделирования процессов термодеструкции горючих сланцев с учетом кинетики разложения органического вещества необходимо знать зависимость изменения температуры нагреваемых частиц во времени. Поэтому недостаточно ограничиться использованием в расчетах лишь уравнения теплового баланса. Для поинтервального (по времени) расчета межфазного теплообмена необходимы данные по всем составляющим уравнения теплопередачи, поэтому выбор критериального уравнения теплообмена является одной из важнейших задач математического моделирования.

Межфазному теплообмену в псевдооживленном слое посвящено огромное число работ и тем не менее полной ясности в этом вопросе нет, а данные разных авторов иногда различаются более чем на порядок [1].

Обобщение большого числа экспериментальных данных позволило авторам [1] рекомендовать для расчета межфазного теплообмена следующие зависимости:

$$\text{при } Re/\varepsilon < 200, Nu = 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{1,3} \cdot Pr^{1/3}, \quad (10)$$

$$\text{при } Re/\varepsilon > 200, Nu = 0,4 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{2/3} \cdot Pr^{1/3}, \quad (11)$$

где Nu , Pr – соответственно числа Нуссельта и Прандтля; ε – порозность слоя.

Дифференцирование и совместное решение уравнения теплового баланса и теплоотдачи позволяет получить зависимости для поинтервального (по времени) изменения температуры горючего сланца и газа псевдооживления:

$$t_{cl}'' = \frac{c_{cl} \cdot t_{cl}' + \alpha \cdot f \cdot t_2'' \cdot \Delta\tau}{c_{cl} + \alpha \cdot f \cdot \Delta\tau}, \quad (12)$$

$$t_2'' = \frac{G_2 \cdot c_2 \cdot t_2' - c_{cl} \cdot (t_{cl}'' - t_{cl}') - \Delta Q_{энд}}{G_2 \cdot c_2}, \quad (13)$$

Необходимо отметить, что в выражении (13) температура газа на выходе из элементарного временного интервала изначально неизвестна, поэтому её значение определяется в процессе итерационного расчета.

Для определения количества выделившихся летучих продуктов полукоксования используются положения химической кинетики. В соответствии с положениями химической кинетики скорость образования суммарных летучих продуктов при полукоксовании сланца может быть записана в виде

$$\frac{dg_i}{d\tau_i} = K_0 e^{-\frac{E}{RT}} (g_0 - \sum_{i=0}^{i-1} g_i)^n, \quad (14)$$

где dg_i – количество образующихся летучих продуктов (кг/100 кг сухого сланца) за время $d\tau_i$, с, на i -м участке расчета от начала разложения; K_0 – предэкспоненциальный множитель, 1/с; E – энергия активации, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль К; T – температура термического разложения, К (средняя по массе подвергающихся полукоксованию частиц сланца); g_0 – начальное содержание условного органического вещества в сухом сланце, кг /100 кг сухого сланца; n – порядок реакции.

Для определения неизвестных в выражении (15) данных об энергии активации, предэкспоненциальном множителе и порядке реакции должны быть использованы экспериментальные данные, полученные исключительно в условиях скоростного нагрева. Из-за крайне ограниченного числа экспериментальных данных по полукоксованию сернистых горючих сланцев в ПС нами были использованы трансформированные данные исследований [2, 3]. Совместное использование полученных кинетических параметров позволило преобразовать выражение (15) к виду, пригодному для количественной оценки образовавшихся в результате полукоксования продуктов с учётом их качественного состава:

– газы дезоксидации:

$$\frac{g}{\Delta\tau} = 7 \cdot e^{-\frac{10525}{T}} (g_0 - g)^{2,6}, \quad (15)$$

– «легкие» газы:

$$\frac{g}{\Delta\tau} = 80 \cdot e^{-\frac{11844}{T}} (g_0 - g)^{1,3}, \quad (16)$$

– смоляные продукты:

$$\frac{g}{\Delta\tau} = 6200 \cdot e^{-\frac{12497}{T}} (g_0 - g)^{0,7}. \quad (17)$$

Одним из важнейших параметров, оказывающих влияние на количественный и качественный состав продуктов полукоксования, является скорость нагрева исходного сланца. Важным обстоятельством является учёт влияния скорости нагрева на динамику выхода отдельных групп летучих продуктов и их качественные характеристики.

В результате анализа исследований [4] установлено, что при увеличении скорости нагрева происходит смещение температур начала разложения к более высоким значениям. Также происходит смещение в сторону увеличения и температуры, соответствующей максимальному выходу летучих. Скорость уменьшения массы также имеет боковое смещение при увеличении скорости нагрева.

На основании выполненного анализа можно предположить следующую последовательность разложения горючего сланца в условиях скоростного нагрева в псевдооживленном слое:

– температурный интервал 100 – 350 °С: летучие представлены газами дезоксидации – CO₂, H₂O, H₂S;

- температурный интервал 350 – 400 °С: летучие представлены «легкими» газами – H_2 , CO , CH_4 , C_2H_4 ;
- температурный интервал 400 – 600 °С: летучие представлены смоляными продуктами.

Стоит отметить, что в условиях скоростного нагрева в ПС выход отдельных групп летучих не лимитируется приведенными выше температурными интервалами, а продолжает осуществляться согласно уравнениям химической кинетики (16), (17), (18) вплоть до полного разложения органического вещества.

Приведённые выше теоретические положения и основные зависимости были реализованы в виде алгоритма, блок-схема которого представлена на рис. 1.

Программа реализована в приложении Microsoft Office и написана на языке Visual Basic.

Необходимо отметить, что в данном математическом описании на начальном этапе рабочая скорость псевдоожигения рассчитывается по уравнению (7). В дальнейшем производится определение фактической скорости псевдоожигения $w_{раб}^{\phi}$ с учетом расширения ПС при выделении летучих и самопроизвольном увеличении рабочей скорости газа. Если фактическая скорость псевдоожигения превышает вторую критическую, происходит уменьшение рабочей скорости псевдоожигения на величину Δw . Уточнение рабочей скорости заканчивается, когда значение рабочей скорости псевдоожигения становится меньше скорости уноса самых мелких частиц фракции.

Для проверки адекватности полученного математического описания процесса полукоксования сернистого горючего сланца Поволжья в ПС и сопоставления с экспериментальными данными был проведен численный эксперимент. Исходными данными являлись результаты экспериментальных исследований полукоксования сланца Коцебинского месторождения в ПС [2]. При заданных характеристиках горючего сланца ($d_{сл}=1,25 - 2,5$ мм, $g_n=27,26$ кг/100 кг с.с.), заданной температуре в реакторе ПС (515 °С), а также остаточного содержания органики в полукоксе ($g_k=7,77$ кг/100 кг с.с.) были определены количество (рис. 3) и динамика выхода (рис. 2) отдельных компонентов парогазовой смеси, а также получено среднее время разложения твердого топлива до заданного остаточного содержания органики в полукоксе. Кроме того, были получены температурные графики динамики нагрева частиц сланца в реакторе ПС (рис. 4).

Как видно из данных диаграммы (рис. 3), данные моделирования относительно близки к экспериментальным данным.

Сравнивая время полукоксования сланца до заданной степени выгазовывания, можно отметить, что результаты моделирования опытов хорошо коррелируются с экспериментальными данными. Так, полученное в ходе моделирования время (15,7 мин) практически полностью совпадает со временем, полученным в ходе эксперимента (14,25 мин).

Как видно из рис. 4, температуры газа и сланца быстро выравниваются, и теплообмен в ПС можно считать завершенным (что согласуется с экспериментальными данными многих ученых). Кроме того, можно наблюдать небольшое снижение температуры сланца на протяжении всего времени полукоксования. Данный факт является следствием эндотермического эффекта при разложении органического вещества горючего сланца. Следовательно, можно сделать вывод, что скорость теплообмена в ПС значительно превышает скорость разложения органической массы.

На полученной математической модели был проведен численный эксперимент по изучению влияния характеристик горючего сланца карьерной добычи на габаритные размеры реактора ПС.

Горючий сланец карьерной добычи представлен смесью широкого гранулометрического состава, которую целесообразно перерабатывать в нескольких отдельных реакторах ПС, разделив при этом на узкие фракции частиц. Поэтому нами было исследовано влияние изменения расхода горючего сланца ($g_n=27,26$ кг/100 кг с.с.) различных фракций на размеры реактора ПС (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что увеличение расхода любой фракции приводит к увеличению диаметра реактора ПС, что объясняется увеличением расхода газа псевдоожигения и увеличением площади газораспределительной решетки. Также из рис. 5 следует, что увеличение расхода сланца не сопровождается изменением высоты псевдоожигенного слоя, которая зависит лишь от размера частиц перерабатываемого сланца. Это объясняется тем, что при увеличении расхода горючего сланца происходит увеличение двух компенсирующих факторов: площади газораспределительной решетки и массы частиц сланца, находящихся постоянно в пределах реактора ПС.

Сланец карьерной добычи характеризуется не только широким полифракционным составом, но и различным содержанием УОМ. При обедненном карьерном сланце УОМ составляет около 25-30% и может достигать 40%. Этот фактор также необходимо учитывать при проектировании и опти-

мизации оборудования реакторного блока. На рис. 6 приведены зависимости влияния содержания УОМ в сланце на габаритные характеристики реактора ПС на примере фракции 4-7 мм.

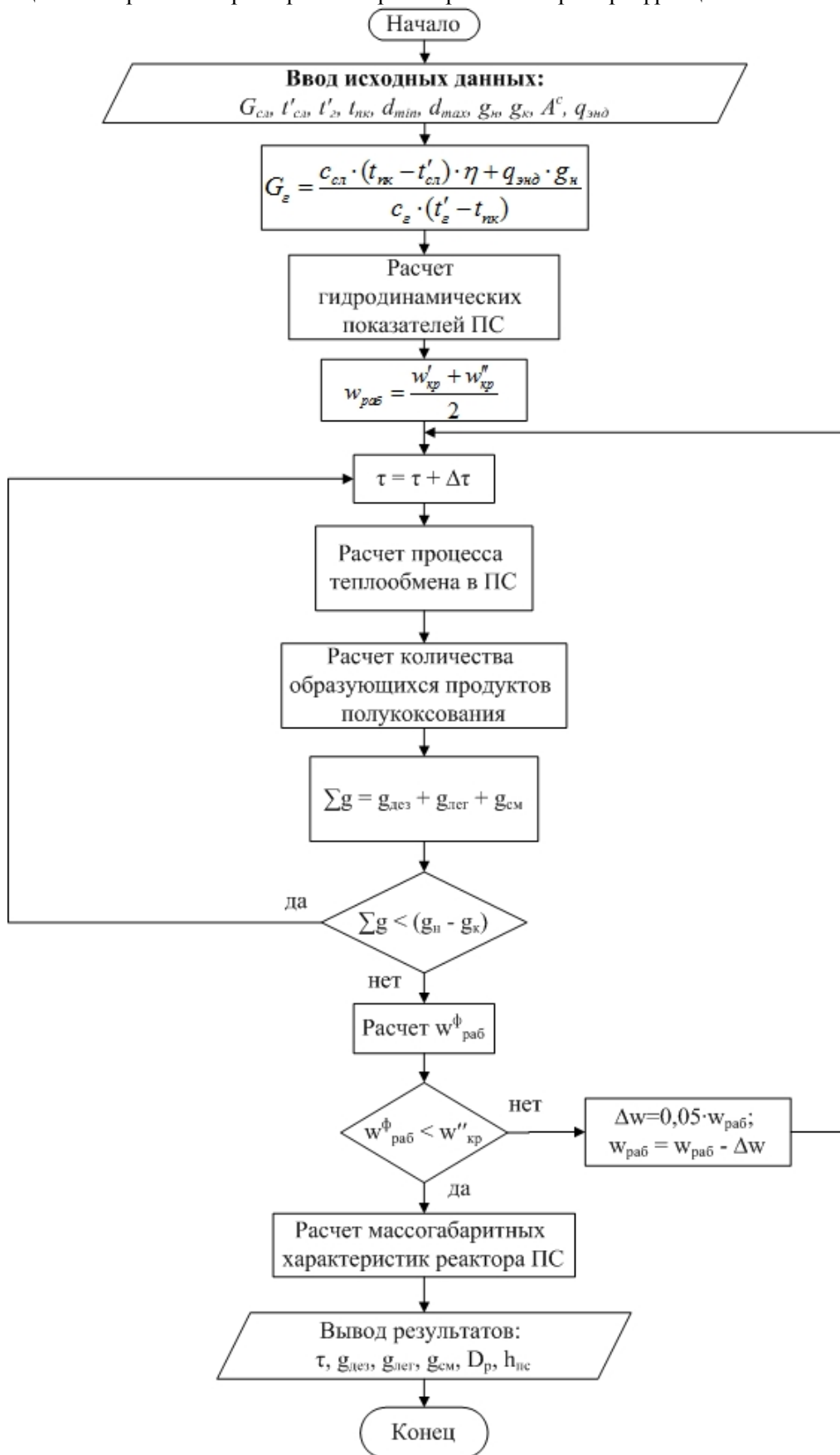


Рис. 1. Обобщенный алгоритм расчета процесса полукоксования горючего сернистого сланца Поволжья в реакторе псевдооживленного слоя

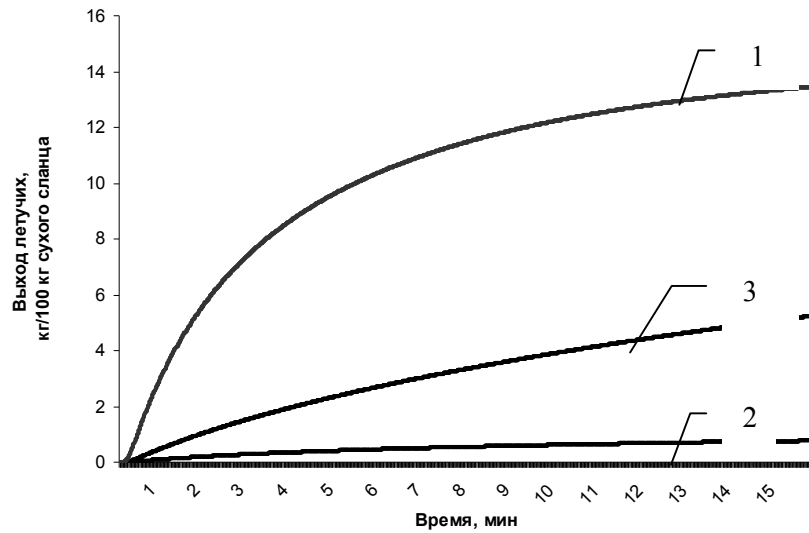


Рис. 2. Выход летучих в зависимости от времени прогрева
 1 – выделение газов дезоксидации; 2 – выделение «легких» газов; 3 – выделение смолы

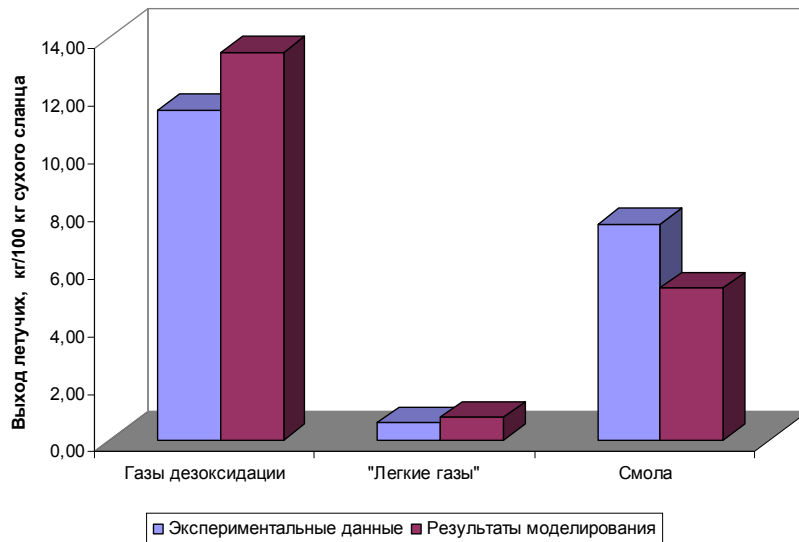


Рис. 3. Количественная оценка выхода компонентов парогазовой смеси

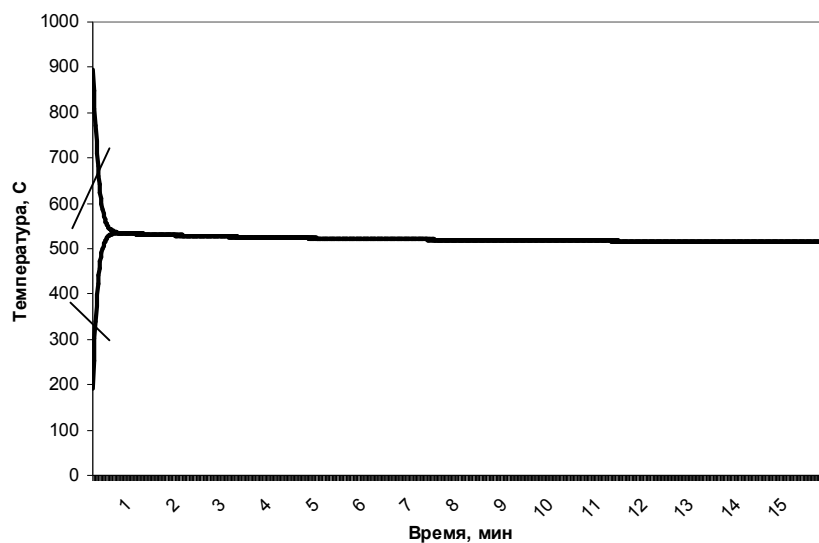


Рис. 4. Зависимость изменения температуры частиц сланца и газа псевдоожигения от времени

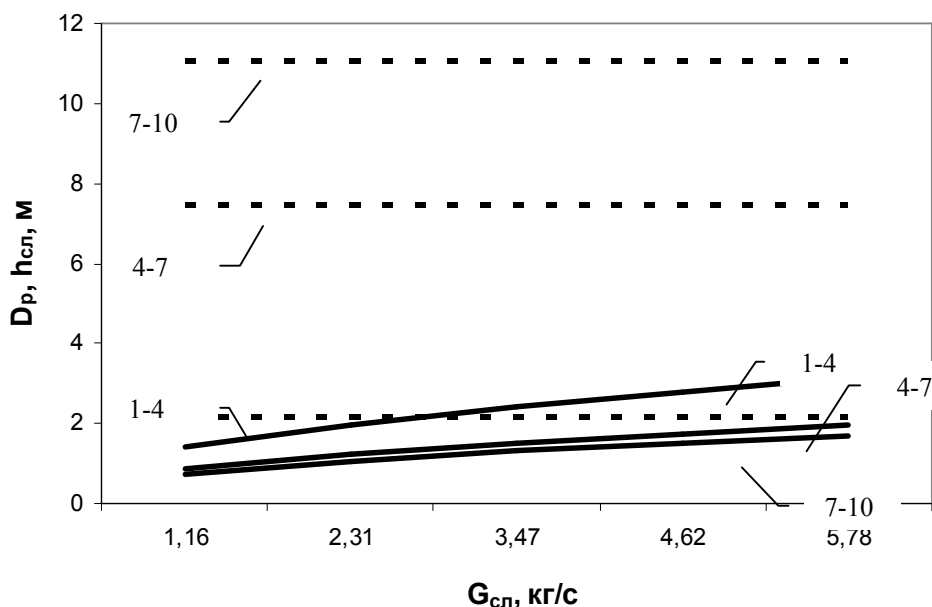


Рис. 5. Зависимость изменения габаритных характеристик реактора ПС от расхода различных фракций ГС (непрерывные линии – диаметр реактора, пунктирные – высота слоя)

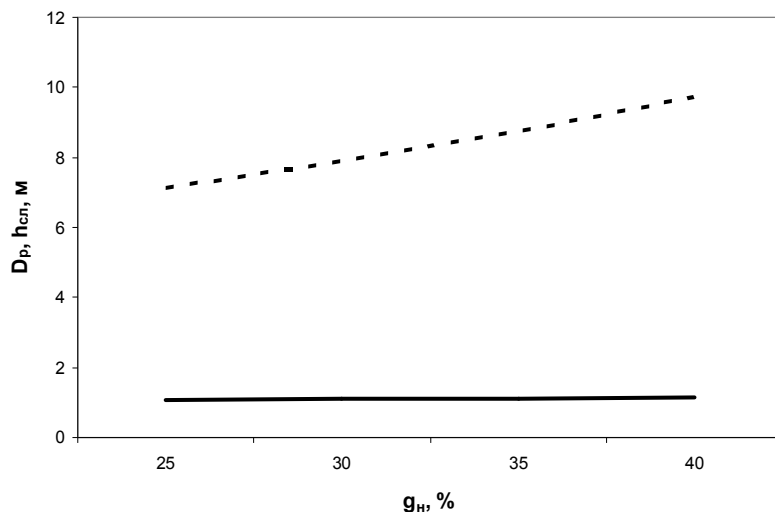


Рис. 6. Зависимость изменения габаритных характеристик реактора ПС от начального содержания УОМ (непрерывные линии – диаметр реактора, пунктирные – высота слоя)

По рис. 6 можно отметить незначительное влияние содержания УОМ в исходном сланце на габаритные характеристики реактора ПС. Тем не менее незначительное увеличение диаметра газораспределительной решетки объясняется увеличением расхода газового теплоносителя, возникающего в результате возрастания абсолютного эндотермического эффекта разложения органического вещества. Высота слоя увеличивается в результате возрастания времени пребывания частиц горючего сланца в слое при увеличении УОМ.

При оптимизации совместной работы всех аппаратов реакторного блока полукоксования горючего сланца важным вопросом является определение необходимого остаточного содержания органики в образующемся полукоксе, которое напрямую влияет на температуру зольного остатка, получаемого при сжигании полукокса в циклонной топке. В свою очередь, температура зольного остатка будет определять значение температуры газообразного теплоносителя, поступающего в реактор ПС. Таким образом, необходимо определить степень влияния температуры газообразного теплоносителя и остаточного содержания органики в полукоксе на размеры реактора ПС. На рис. 7 показана зависимость размеров реактора ПС от значения температуры теплоносителя, подаваемого в реактор ПС, при различных значениях остаточного содержания органики в полукоксе (на примере фракции 4-7 мм).

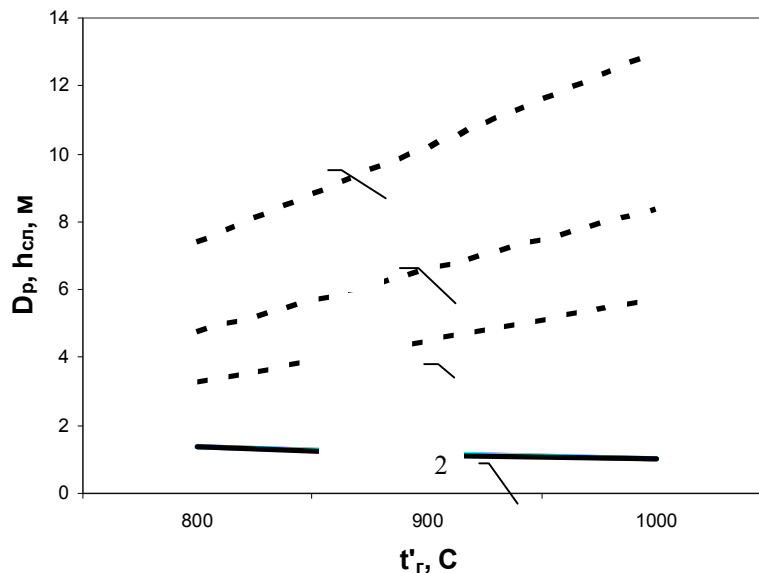


Рис. 7. Зависимость изменения габаритных характеристик реактора ПС от величины температуры теплоносителя при различном остаточном содержании органики в полукоксе (2, 4, 6%) (непрерывные линии – диаметр реактора, пунктирные – высота слоя)

Из графиков рис. 7 видно, что увеличение температуры газа, подаваемого в реактор полукоксования, приводит к уменьшению расхода газообразного теплоносителя и, как следствие, к уменьшению диаметра реактора и увеличению высоты псевдооживленного слоя. Остаточное содержание органики в полукоксе никак не влияет на диаметр газораспределительной решетки, но приводит к изменению высоты слоя, что объясняется изменением времени пребывания частиц в реакторе.

Рассмотренные выше исследования влияния качественных характеристик горючего сланца карьерной добычи и условий полукоксования горючего сланца в реакторе ПС на габаритные характеристики реактора доказывают адекватность приведенного математического описания и его пригодность для решения задач оптимизации реакторного блока полукоксования горючего сланца в ПС.

Выводы:

1. Использование кинетических характеристик K_0 и E позволяет получить расчетные данные, хорошо коррелирующие с экспериментальными данными.
2. Показано существенное влияние эндотермического эффекта разложения органического вещества горючего сланца на температурные условия в реакторе ПС.
3. Сопоставление полученных зависимостей (рис. 5-7) позволяет сделать вывод, что рассчитанные на определенную фракцию сланца реакторы могут использоваться и для полукоксования других фракций путем изменения эксплуатационных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Псевдооживление / В.Г. Айнштейн, А.П. Баскаков, Б.В. Берг и др. М.: Химия, 1991. 400 с.
2. Прелатов В.Г. Термические процессы переработки горючих сланцев для получения энергоносителей и ценных сераорганических соединений: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / В.Г. Прелатов. Саратов, 2002. 189 с.
3. Ромаденкина С.Б. Физико-химические основы получения функциональных материалов из горючих сланцев: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04 / С.Б. Ромаденкина. Саратов, 2005. 170 с.
4. Симонов В.Ф. О влиянии скорости нагрева горючих сланцев на динамику выделения летучих продуктов и их качественный состав / В.Ф. Симонов, А.А. Морев // Вестник СГТУ. 2012. № 4 (59).

Симонов Вениамин Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Veniamin F. Simonov – Dr.Sc., Professor
Department of Heat Process Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Морев Александр Александрович – аспирант кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Morev – Postgraduate
Department of Heat Process Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 531.383

В.В. Алешкин

ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА НА ТОЧНОСТЬ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Рассмотрено влияние инструментальных погрешностей инерциальных измерительных блоков гироскопических измерителей угловой скорости и акселерометров на точность определения параметров движения по упрощенным алгоритмам решения уравнений обратной задачи теории гироскопических измерений. Показано, что и при наличии инструментальных погрешностей методические погрешности датчиков существенно снижаются.

Инерциальный блок; методические погрешности; алгоритмическая компенсация; инструментальные погрешности; результаты моделирования

V.V. Aleshkin

INSTRUMENTAL ERRORS IN THE INERTIAL MEASUREMENT UNIT AS THE ALGORITHM ACCURACY FACTOR OF THE MODELING ERRORS COMPENSATION

The article considers the influence of instrumental errors in inertial measurement units with gyroscopic rate sensors and accelerometers on the accuracy of motion parameters estimation using simplified algorithms of the reverse gyroscopic measurements problems. It is shown that in the case of instrumental errors, systematic errors in the sensors decrease significantly.

Gyroscopes block; the methodic errors; the algorithmic compensation; the instruments errors; the simulation results

Как показано в [1, 2], использование полных алгоритмов асимптотического оценивания параметров движения по информации инерциального измерительного блока позволяет теоретически полностью компенсировать, а с учетом инструментальных погрешностей значительно снизить погрешности, обусловленные движениями основания и чувствительных элементов датчиков. В настоящей работе получены аналитические и численные оценки погрешностей определения компонентов векторов абсолютной угловой скорости и кажущегося ускорения по упрощенным, алгебраическим алгоритмам компенсации с учетом инструментальных погрешностей.

Полные алгоритмы вычисления проекций абсолютной угловой скорости и кажущегося линейного ускорения объекта и оценки их точности получены в предположении, что блок чувствительных элементов не имеет инструментальных погрешностей. Он построен на гироскопических измерителях угловых скоростей (ГИУС) и акселерометров (А), ориентация осей которых $O^i z_j^i$, $O_i u_i$ ($j, i = 1, 2, 3$) относительно объектовых осей $O u_i$ полностью совпадает с расчетной [1, 3], измерение углов относительных движений β^i, α_i ($i = 1, 2, 3$), вычисление их производных $\dot{\beta}^i, \dot{\alpha}^i, \ddot{\beta}^i, \ddot{\alpha}^i$ осуществляется без погрешностей, так же как и измерение токов датчиков моментов. Конструктивные параметры блока ГИУС (кинетические моменты H^i ($i = 1, 2, 3$), моменты инерции A^i, B^i) и А (маятниковость $m_i l_i$ ($i = 1, 2, 3$), моменты инерции I_i ($i, j = 1, 2, 3$), расстояния L_i от центров подвесов до полюса O трехгранника $O u_i$ ($i = 1, 2, 3$)) известны точно. Оценки точности алгоритмов, приведенные в [1, 3], справедливы и в том случае, если инструментальные погрешности датчиков, погрешности их установки на объекте и погрешности съема сигналов определены при калибровке. Тогда их можно учесть

при задании коэффициентов алгоритмов и, хотя динамические свойства решений будут несколько иные, на точности компенсации методических погрешностей это практически не отразится.

На практике определение параметров ГИУС и подвижных частей А, установка датчиков в блоке и измерение выходных сигналов осуществляются с некоторыми погрешностями, которые мы обозначим так: $\Delta H^i, \Delta A^i, \dots, \Delta L^i$ – отклонения соответствующих значений; $\Delta N_i = [\Delta n_{kj}^i](i, j = 1, 2, 3)$ матрицы погрешностей ориентации каждого датчика в блоке; $\Delta \beta_i, \Delta \beta^i, \Delta \beta^i, \Delta \alpha_i, \Delta \alpha_i, \Delta \alpha_i$ ($i = 1, 2, 3$) – погрешности съема сигналов по углам относительных движений чувствительных элементов (ЧЭ) и их производным; $\Delta r^i, \Delta r_i$ – погрешности измерения токов в обмотках датчиков моментов электрических пружин ГИУС и А.

Поскольку сам алгоритм (его коэффициенты), заложенный в бортовой вычислитель, в процессе работы изменяться не будет, очевидно, что все инструментальные погрешности ИИБ по отношению к нему будут проявляться через погрешности выходных сигналов $\Delta \beta^i, \Delta \alpha_i, \Delta r^i, \Delta r_i$. Величина этих погрешностей определяется, с одной стороны, отклонениями параметров датчиков и их ориентации ($\Delta H^i, \dots, \Delta M$), с другой – погрешностями съема сигналов по углам относительных движений и токам датчиков моментов.

Обозначим первую составляющую погрешностей $\Delta \beta^{i1}, \Delta \alpha_i^1, \Delta r^{i1}, \Delta r_i^1$, вторую – $\Delta \beta^{i2}, \Delta \alpha_i^2, \Delta r^{i2}, \Delta r_i^2$.

$$\Delta \beta^i = \Delta \beta^{i1} + \Delta \beta^{i2}; \Delta \alpha_i = \Delta \alpha_i^1 + \Delta \alpha_i^2; \Delta r_i = \Delta r^{i1} + \Delta r^{i2}; \Delta r_i = \Delta r_i^1 + \Delta r_i^2.$$

Поэтому представляется целесообразным:

- 1) привести погрешности параметров и ориентации датчиков к погрешностям их выходных сигналов;
- 2) оценить влияние погрешностей выходных сигналов датчиков (информации, поступающей в вычислитель) на точность вычисления величин V_j, X_j ($j = 1, 2, 3$).

Пункт 1) можно выполнить, используя уравнения ошибок прямых задач ГИУС и А, связывающие отклонения выходных сигналов датчиков $\Delta \beta^i, \Delta \alpha_i, \Delta r^i, \Delta r_i$ с отклонениями их параметров и ориентации. Для выполнения пункта 2) необходимо рассмотреть уравнения ошибок обратных задач, позволяющие оценить влияние погрешностей входной информации на точность определения величин V_j, X_j ($j = 1, 2, 3$). Рассмотрим уравнения ошибок прямой и обратной задач для блока ГИУС.

Подставляя действительные значения параметров ГИУС и их ориентации, равные $H^i + \Delta H^i, A^i + \Delta A^i, B^i + \Delta B^i, d_{kj}^i + \Delta d_{kj}^i$ ($i, j, k = 1, 2, 3$), в уравнения движения ЧЭ и вычитая из полученных уравнений исходные, получим уравнения прямой задачи относительно отклонений, которые после некоторых преобразований примут вид

$$\begin{aligned} & \Delta A^i (\beta^i + \Delta \beta^i) + \Delta n^i (\beta^i + \Delta \beta^i) + A^i \Delta \beta^i + n^i \Delta \beta^i + \Delta Q^i = -\Delta H^i \sum_{j=1}^3 (d_{2j}^i + \\ & + \Delta d_{2j}^i) \omega_i - H^i \sum_{j=1}^3 \Delta d_{2j}^i \omega_i - \Delta A^i \sum_{j=1}^3 (d_{1j}^i + \Delta d_{1j}^i) \omega_i - A^i \sum_{j=1}^3 \Delta d_{1j}^i \omega_i - \\ & - \Delta B^i \left[\sum_{j=1}^3 (d_{2j}^i + \Delta d_{2j}^i) \omega_i \right] \left[\sum_{j=1}^3 (d_{3j}^i + \Delta d_{3j}^i) \omega_i \right] - B^i \left\{ \left(\sum_{j=1}^3 \Delta d_{2j}^i \omega_i \right) \left(\sum_{j=1}^3 \Delta d_{3j}^i \omega_i \right) + \right. \\ & \left. + \left[\sum_{j=1}^3 \left(\frac{d_{2j}^i}{\Delta d_{2j}^i} \right) \omega_i \right] \left(\sum_{j=1}^3 \Delta d_{3j}^i \omega_i \right) \right\} \quad (i = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) $\Delta \beta^i, \Delta r^i, \Delta d_{kj}^i = \Delta d_{kj}^i(\Delta \beta^i), \Delta Q^i = \Delta Q^i(\Delta r^i)$ ($i = 1, 2, 3$) – отклонения выходных сигналов ГИУС (углов β^i и токов датчиков моментов r^i), вызванные отклонениями конструктивных параметров и ориентации ГИУС.

Для того, чтобы получить уравнения ошибок обратной задачи, нужно подставить в ее уравнения действительные значения выходных сигналов ГИУС $Q^i + \Delta Q^i; \beta^i + \Delta \beta^i$, а также вычисленные значения $V_j + \Delta V_j$ и их производные, а затем вычесть исходные из полученных уравнений.

$$\begin{aligned} & A^i \left[\sum_{j=1}^3 \Delta d_{1j}^i (\dot{V}_j + \Delta \dot{V}_j) + \sum_{j=1}^3 d_{1j}^i \Delta \dot{V}_j \right] + H^i \left[\sum_{j=1}^3 \Delta d_{2j}^i (V_j + \Delta V_j) + \right. \\ & \left. + j=13d2ji\Delta V_j + Bij=13d2jiVj=13d3ji\Delta V_j + j=13\Delta d3jiVj + \Delta V_j + \right. \\ & \left. + \left[\sum_{j=1}^3 d_{2j}^i \Delta V_j + \sum_{j=1}^3 \Delta d_{2j}^i (V_j + \Delta V_j) \right] \left[\sum_{j=1}^3 (d_{3j}^i - \Delta d_{3j}^i) (V_j + \Delta V_j) \right] \right\} = \\ & = -A^i \Delta \beta^i - n^i \Delta \beta^i - \Delta Q^i \quad (i = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения ошибок (1), (2) в принципе дают возможность определить погрешности $\Delta \beta^i, \Delta r^i$ информации ГИУС, а затем и погрешности ΔV_j вычисления угловой скорости объекта при заданных значениях отклонений параметров ГИУС и их ориентации. Однако получить какую-либо аналитическую оценку влияния каждой из перечисленных погрешностей на величины ΔV_j ($j = 1, 2, 3$) из этих

уравнений трудно в силу их нелинейности и громоздкости. Поэтому примем следующую методику исследований. Рассмотрим отдельно влияние двух групп погрешностей: а) погрешностей параметров ГИУС; б) погрешностей ориентации ГИУС на отклонения выходных сигналов ГИУС и влияние последних на точность вычисления абсолютной угловой скорости. В статическом режиме получим аналитические выражения зависимостей

$$\Delta V_j = \Delta V_j(\Delta H, \Delta A, V), \Delta V_j = \Delta V_j(\Delta n_{kj}^i, V), \dots$$

В дальнейшем уточним полученные результаты с помощью моделирования работы вычислителя по полному алгоритму, на вход которого поступают сигналы с блока ГИУС, имеющие указанные погрешности.

В качестве исходных уравнений прямой и обратной задачи возьмем уравнения первого приближения систем (1, 2).

Вводя обозначения $A^i = A, H^i = H$ и переходя к матричной записи уравнений ошибок, получим для случаев а) и б):

$$\Delta Q = -\Delta H(D_2 + \Delta D_2')\omega; \tag{3}$$

$$\Delta Q = -H\Delta D_2\omega, \tag{4}$$

где $\Delta Q, \omega$ – матрицы 3×1 элементов $\Delta Q^1, \Delta Q^2, \Delta Q^3, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ соответственно; D_2 – матрица 3×3 , определяющая текущее положение осей чувствительности ГИУС.

Определим вид матриц $\Delta D_2, \Delta D_2'$. Отклонения параметров H, A ГИУС, влияние которых мы рассматривали в случае а), вызывают изменения $\Delta \beta^i$ углов относительных движений главных осей ГИУС. Матрица D_2 составлена из вторых строк матриц D^i , имеющих в данном случае вид

$$D^i + \Delta D^i = (K^i + \Delta K^i) * N^i (i = 1, 2, 3).$$

Матрица ΔK^i при малых β^i и $\Delta \beta^i$ в силу (2.3) запишется в виде

$$\Delta K^i = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta \beta^i \\ 0 & -\Delta \beta^i & 0 \end{vmatrix} \tag{5}$$

Следовательно, $D^{i'} = \Delta K^i * N^i (i = 1, 2, 3)$.

В случае б) считаем, что при установке ГИУС в блоке не удалось добиться полного совпадения или параллельности осей $O^i u_j^i$ с расчетными осями. В результате действительные значения элементов $n_{kj}^i (k, j = 1, 2, 3)$ матрицы N^i равны $n_{kj}^i + \Delta n_{kj}^i$. Поскольку это приводит и к изменению углов относительных движений β^i , получаем

$$D^i + \Delta D^i = (K^i + \Delta K^i) * (N^i + \Delta N^i). \tag{6}$$

Вид матрицы ΔN^i определим следующим образом.

В силу (2.4) имеем

$$n_{11}^i + \Delta n_{11}^i = \cos(\theta_2^i + \Delta \theta_2^i) \cos(\theta_3^i + \Delta \theta_3^i), \text{ откуда } \Delta n_{11}^i \approx -\Delta \theta^i \sin(\theta_2^i + \theta_3^i)^1.$$

Определяя аналогичным образом остальные восемь элементов матрицы ΔN^i , получим

$$\Delta N^i = \begin{vmatrix} -\Delta \theta^i \sin(\theta_2^i + \theta_3^i) & \Delta \theta^i \cos(\theta_2^i + \theta_3^i) & -\Delta \theta^i \cos \theta_2^i \\ -\Delta \theta^i \begin{bmatrix} \cos(\theta_1^i + \theta_3^i) (1 - \sin \theta_1^i) - \\ -\cos \theta_1^i \sin \theta_2^i \cos \theta_3^i \end{bmatrix} & -\Delta \theta^i \begin{bmatrix} \sin(\theta_1^i + \theta_3^i) (1 - \sin \theta_1^i) - \\ -\sin \theta_1^i \cos \theta_2^i \sin \theta_3^i \end{bmatrix} & \Delta \theta^i \cos(\theta_1^i + \theta_2^i) \\ -\Delta \theta^i \begin{bmatrix} \sin(\theta_1^i + \theta_3^i) (\sin \theta_2^i - 1) - \\ -\cos \theta_1^i \cos \theta_2^i \cos \theta_3^i \end{bmatrix} & -\Delta \theta^i \begin{bmatrix} \cos(\theta_1^i + \theta_3^i) (1 - \sin \theta_2^i) - \\ + \cos \theta_1^i \cos \theta_2^i \sin \theta_3^i \end{bmatrix} & -\Delta \theta^i \sin(\theta_1^i + \theta_2^i) \end{vmatrix} \tag{7}$$

Матрицы (5), (7) позволяют определить ΔD_2 и $\Delta D_2'$.

Уравнения ошибок обратной задачи после окончания переходных процессов в решениях ΔV_j имеют для случаев а) и б) одинаковый вид:

$$H\Delta D_2'(V + \Delta V) + HD_2\Delta V = -\Delta Q - n\Delta \beta - A\Delta \ddot{\beta},$$

откуда

$$\Delta V = (D_2 + \Delta D_2')^{-1} \Delta D_2' V + \frac{1}{H} (D_2 + \Delta D_2')^{-1} \Delta Q + \frac{A}{H} (D_2 + \Delta D_2')^{-1} \cdot \Delta \ddot{\beta} + \frac{n}{H} (D_2 + \Delta D_2')^{-1} \Delta \beta. \tag{8}$$

Подставив выражения для ΔQ из формул (3), (4), получим аналитические зависимости погрешностей решений обратной задачи от отклонений параметров и ориентации ГИУС.

¹ Это означает, что погрешности углов ориентации одного ГИУС равны между собой, но не равны погрешностям ориентации других ГИУС.

$$\Delta V = (D_2 + \Delta D'_2)^{-1} \Delta D'_2 V - \frac{\Delta H}{H} E \omega + \frac{A}{H} (D_2 + \Delta D'_2)^{-1} \Delta \ddot{\beta} + \frac{n}{H} (D_2 + \Delta D'_2)^{-1} \Delta \dot{\beta} \quad (9)$$

$$\Delta V = (D_2 + \Delta D'_2)^{-1} \Delta D'_2 V - (D_2 + \Delta D'_2)^{-1} \Delta D'_2 \omega + \frac{A}{H} (D_2 + \Delta D'_2)^{-1} \cdot \Delta \ddot{\beta} + \frac{n}{H} (D_2 + \Delta D'_2)^{-1} \Delta \dot{\beta}. \quad (10)$$

Учитывая погрешности $\Delta \beta^{i''}$ ($i = 1, 2, 3$) измерения углов относительных движений главных осей ГИУС, получим

$$\Delta V = -(D_2 + \Delta D''_2)^{-1} \Delta D''_2 V,$$

где $\Delta D''_2 (\Delta \beta^{i''})$ составлена из вторых строк матриц

$$\Delta D^{i''} = \Delta K^i * N^i \quad (i = 1, 2, 3),$$

а ΔK^i имеет вид (5). Считая, что $\Delta \beta^i = \Delta \beta$ ($i = 1, 2, 3$), получим

$$\Delta D''_2 = \beta'' N_3.$$

Поскольку

$$(D_2 + \Delta D''_2)^{-1} \approx D_2^{-1}, \text{ то } \Delta V = -D_2^{-1} \Delta \beta'' N_3 V. \quad (11)$$

Так как $V \approx \omega$, из (7), (5), (9), (10), (11) следует, что:

1) относительные погрешности определения угловой скорости как по показаниям ГИУС $\Delta Q/Q$, так и по решениям уравнений обратной задачи $\Delta V/V$, пропорциональны относительным погрешностям задания кинетических моментов $\Delta H/H$ и абсолютным погрешностям $\Delta \beta$ измерения углов относительных движений;

2) относительные погрешности $\Delta Q/Q$, а также $\Delta V/V$, сравнимы с абсолютными погрешностями задания углов ориентации ГИУС;

3) погрешность вычисления угловой скорости ΔV в H/A и H/n раз меньше погрешности измерения производных углов относительных движений $\Delta \ddot{\beta}$ и $\Delta \dot{\beta}$ соответственно.

Аналогичным образом получим формулы для оценки влияния инструментальных погрешностей блока А на точность решения прямой и обратной задач.

Как в предыдущем случае, все инструментальные погрешности поделим на две группы: а) погрешности параметров; б) погрешности ориентации А в ИИБ. Считая, что параметры трех А одинаковы, и пренебрегая относительными движениями ЧЭ, получим в первом приближении:

$$\Delta F = -\Delta M * M_3 (W_0 - g) + \Delta \Lambda'(\omega); \quad (12)$$

$$\Delta F = -M * \Delta M_3 (W_0 - g) + \Delta \Lambda''(\omega), \quad (13)$$

где ΔF – матрица 3×1 отклонений величин обобщенных сил F_i ; ΔM – погрешность задания маятниковости; W_0, g – матрицы 3×1 компонентов W_{01}, W_{02} ,

W_{03}, g_1, g_2, g_3 векторов линейного ускорения объекта и ускорения силы тяжести; $\Delta \Lambda'(\omega)$, $\Delta \Lambda''(\omega)$ – составляющие отклонений ΔF , вызванные отклонениями параметров и ориентации А, зависящие от углового движения объекта; $M_3 = \|m_{3j}^i\|$ ($i, j = 1, 2, 3$) – матрица 3×3 , составленная из третьих строк матриц ориентации M^i ($i, j = 1, 2, 3$); ΔM_3 – матрица погрешностей ориентации, имеющая вид

$$\Delta M_3 \approx \begin{vmatrix} -\Delta \chi^1 \begin{bmatrix} \sin(\chi_1^1 + \chi_3^1) (\sin \chi_2^1 - 1) - \\ -\cos \chi_1^1 \cos \chi_2^1 \cos \chi_3^1 \end{bmatrix} & -\Delta \chi^1 \begin{bmatrix} \cos(\chi_1^1 + \chi_3^1) (1 - \sin \chi_2^1) + \\ +\cos \chi_1^1 \cos \chi_2^1 \sin \chi_3^1 \end{bmatrix} & -\Delta \chi^1 \sin(\chi_1^1 + \chi_3^1) \\ -\Delta \chi^2 \begin{bmatrix} \sin(\chi_1^2 + \chi_3^2) (\sin \chi_2^2 - 1) - \\ -\cos \chi_1^2 \cos \chi_2^2 \cos \chi_3^2 \end{bmatrix} & -\Delta \chi^2 \begin{bmatrix} \cos(\chi_1^2 + \chi_3^2) (1 - \sin \chi_2^2) + \\ +\cos \chi_1^2 \cos \chi_2^2 \sin \chi_3^2 \end{bmatrix} & -\Delta \chi^2 \sin(\chi_1^2 + \chi_3^2) \\ -\Delta \chi^3 \begin{bmatrix} \sin(\chi_1^3 + \chi_3^3) (\sin \chi_2^3 - 1) - \\ -\cos \chi_1^3 \cos \chi_2^3 \cos \chi_3^3 \end{bmatrix} & -\Delta \chi^3 \begin{bmatrix} \cos(\chi_1^3 + \chi_3^3) (1 - \sin \chi_2^3) + \\ +\cos \chi_1^3 \cos \chi_2^3 \sin \chi_3^3 \end{bmatrix} & -\Delta \chi^3 \sin(\chi_1^3 + \chi_3^3) \end{vmatrix} \quad (14)$$

Погрешности вычисления ускорений объекта, вызванные погрешностями входной информации определяются в первом приближении равенствами

$$\Delta X = -M^{-1} [\Delta F + \Delta \Lambda(\omega)]; \quad (15)$$

$$\Delta X = E_3^{-1} \Delta \alpha'' M_2 X, \quad (16)$$

где $E_3 = \|e_{3j}^i\|$ ($i, j = 1, 2, 3$) – матрица (3×3), составленная из третьих строк матриц $E^i = K^i * M^i$; $M_2 = \|m_{2j}^i\|$ ($i, j = 1, 2, 3$) – матрица (3×3), составленная из вторых строк матриц M^i ($i = 1, 2, 3$).

Подставляя в (15) формулы (12), (13) получим

$$\Delta X = \frac{1}{M} \Delta M M_3 (W_0 - g) - \frac{1}{M} [\Delta \Lambda'(\omega) - \Delta \Lambda(\omega)]; \quad (17)$$

$$\Delta X = \Delta M_3 (W_0 - g) - \frac{1}{M} [\Delta \Lambda''(\omega) - \Delta \Lambda(\omega)]. \quad (18)$$

Поскольку $X \approx W_0 - g$, из (17), (18) следует, что относительные погрешности определения линейного ускорения объекта по алгоритмам решения обратной задачи пропорциональны относительным погрешностям задания маятниковости, абсолютным погрешностям углов ориентации А в блоке и абсолютным погрешностям измерения углов относительных движений ЧЭ А.

Формулы (8-10), (17), (18) позволяют осуществить предварительную оценку влияния инструментальных погрешностей ИИБ (ГИУС и А) и погрешностей съема их сигналов на точность вычисления угловой скорости и линейного ускорения объекта по алгоритмам решения обратной задачи. Для получения численных оценок проводилось моделирование работы на борту объекта ИИБ ГИУС и А, имеющих инструментальные погрешности, и работы вычислительного устройства, определяющего компоненты векторов абсолютной угловой скорости и кажущегося ускорения объекта по сигналам этих датчиков. При этом полагалось, что параметры датчиков заданы с погрешностью 1%, погрешности ориентации датчиков заданы углами $\Delta\theta_j^i = \Delta\chi_j^i = 5'$, что соответствует выставке осей датчиков относительно осей объекта с точностью $7'$, погрешности съема выходных сигналов составляет 1% от действительных значений снимаемых величин.

Значения относительных погрешностей определения ω_j, W_j по полному алгоритму $\delta\omega_j, \delta W_j$ и по решениям уравнений движения ГИУС и А (то есть по Q^i, F_i) $\Delta\omega_j, \Delta W_j$ приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Погрешности оценок

| Параметры | V_1 | V_2 | V_3 |
|----------------------|-------|-------|-------|
| $\delta\omega_j$ [%] | 1,893 | 1,235 | 1,217 |
| $\Delta\omega_j$ [%] | 11,69 | 9,42 | 9,8 |

Таблица 2

Погрешности оценок

| Параметры | W_1 | W_2 | W_3 |
|------------------|-------|-------|-------|
| δW_j [%] | 1,481 | 1,63 | 1,24 |
| ΔW_j [%] | 3,28 | 3,41 | 2,98 |

Сравнивая значения $\delta\omega_j$ с $\Delta\omega_j$ и δW_j с ΔW_j ($j = 1, 2, 3$), делаем вывод, что погрешности блока датчиков и погрешности измерения их выходных сигналов вызывают примерно равное увеличение погрешностей вычисления ω_j, W_j как по алгоритмам решения уравнений обратных задач ГИУС и А, так и непосредственно по решениям Q^i, F_i уравнений их движения. Так, в последнем случае по окончании переходных процессов в решениях обратной задачи погрешности вычисления компонентов вектора абсолютной угловой скорости не превышают 1,893%. В то же время погрешность определения угловой скорости непосредственно по токам датчиков моментов ГИУС увеличилась на 1,9%. Следовательно, и при наличии инструментальных погрешностей блока ГИУС и А использование алгоритмов компенсации позволяет существенно снизить методические и динамические погрешности ИИБ. В отношении самих инструментальных погрешностей использование этих алгоритмов никаких преимуществ не дает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плотников П.К. О точности определения ускорения объекта по полным и упрощенным алгоритмам решения обратной задачи теории акселерометров / П.К. Плотников, В.В. Алешкин // Известия вузов СССР. Приборостроение. 1976. № 10. С. 73-79.
2. Плотников П.К. К вопросу построения алгоритмов оценивания параметров движения по сигналам датчиков первичной информации / П.К. Плотников // Механика твердого тела. 1990. № 1. С. 12-22.
3. Алешкин В.В. Определение конфигурации блока датчиков при асимптотическом оценивании параметров движения / В.В. Алешкин, П.К. Плотников, Ю.Н. Челноков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 2. С. 60-65.

Алешкин Валерий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valeriy V. Aleshkin – Ph. D., Associate Professor
Department of Instrument Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.314.572

Ю.М. Астапович, Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин

ГИБКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕДИНЕННЫМИ ПО ВЫХОДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ АГРЕГАТАМИ

Описываются принципы построения гибких систем распределения мощности между нагруженными на общую динамическую нагрузку преобразовательными комплексами, обеспечивающих высокие энергетические показатели. Приводятся результаты исследования математической модели системы.

Преобразователи частоты, параллельная работа, распределение мощности, гибкость, стабилизация, инверторы, фильтр, импульсный преобразователь, энергетические показатели

Yu.M. Astapovich, E.E. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin

FLEXIBLE CONTROL SYSTEM OF CONVERSION UNITS UNITED IN OUTPUT

The principles of the flexible power distribution system between the transducer complexes with mutual dynamic load which provide high energy efficiency are described. The results of the study of the mathematical model system are adduced.

Frequency converter, parallel operation, the distribution of power, flexibility, stabilization, inverter, filter, pulse converter, energy data

Постановка задачи. В связи с ростом потребления электроэнергии в преобразованном виде возрастают мощности преобразовательных устройств. Электропитание групповых потребителей, таких как производственные участки и цеха, целесообразно организовывать с использованием групп объединенных по выходу преобразовательных агрегатов [1], на основе которых можно строить эффективные структуры электроснабжения. При этом достигается упрощение резервирования, предотвращение работы оборудования в неэффективных режимах, повышение его гибкости.

Основными задачами при применении подобных систем электроснабжения являются: распределение загрузки работающих агрегатов, согласованной с их номинальными мощностями, и обеспечение наилучших энергетических и качественных показателей при изменении нагрузки в широких пределах. Существенно, что эти задачи необходимо решать в реальном масштабе времени.

Решение первой задачи связано с необходимостью избежать перегрузки преобразователей, прежде всего в режимах максимальной нагрузки. Известные схемные решения с неизменяемой структурой распределяют нагрузку пропорционально номинальным мощностям преобразователей не только в номинальных режимах, но и в режимах, близких к холостому ходу, что приводит к снижению энергетических показателей [2].

Методы решения

Проблема может быть решена за счет перехода к системе с гибкой структурой, изменяемой с изменением нагрузки. Эта система должна обеспечивать слежение за уровнем нагрузки и соответствующие отключения или подключения преобразователей так, чтобы обеспечивались высокие энергетические показатели всего комплекса.

Рассмотрим схему, показанную на рис. 1. Здесь n преобразователей частоты Π_k имеют явно выраженные звенья постоянного тока, выполненные на основе неуправляемых выпрямителей (НВ) и регулируемых импульсных преобразователей постоянного тока (ИППТ), представленных силовыми

ключами K_1, K_2, \dots, K_n . Регулируемые знакопостоянные напряжения через Γ -образные LC-фильтры подаются на входы объединенных по выходу автономных инверторов тока (АИТ) I_1, I_2, \dots, I_n , питающие общую нагрузку.

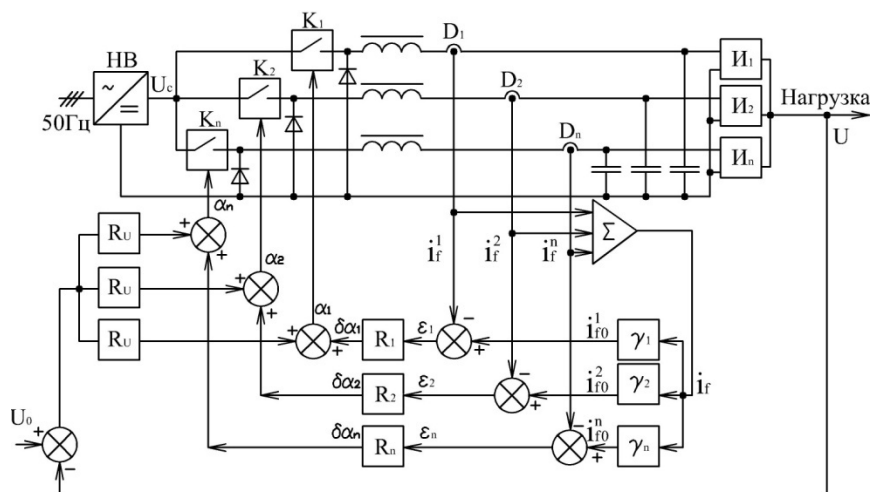


Рис. 1. Структура системы распределения мощности между объединенными по выходу преобразователями

Заданное распределение определим положительными параметрами $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ такими, чтобы выполнялись условия

$$\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n = 1, \quad P_k/P_j = \gamma_k / \gamma_j, \quad (1)$$

где P_k и P_j – номинальные мощности любых двух преобразователей.

Поскольку для объединенных по выходу инверторов их входные напряжения U_d^k близки по величине, то второе из условий (1) можно заменить условием

$$I_f^k/I_f^j = \gamma_k/\gamma_j, \quad (2)$$

где I_f^k и I_f^j – токи индуктивностей фильтров соответствующих преобразователей.

Такое распределение достигается следующим образом.

Ввиду нестабильности входной сети и нагрузки преобразователи снабжены системами стабилизации выходного напряжения, в которых используются силовые регуляторы на основе ИППТ, управляемыми за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Поскольку преобразователи I_k объединены по входу и выходу, формируемые регуляторами R составляющие сигнала управления ИППТ, обеспечивающие стабилизацию выходного напряжения, имеют общее значение α_0 . Для обеспечения выполнения условия (2) сигнал управления ИППТ преобразователя I_k формируется следующим образом:

$$\alpha_k = \alpha_0 + \delta\alpha_k, \quad (3)$$

Здесь $\delta\alpha_k$ – составляющие сигнала управления ИППТ, формируемые регуляторами системы распределения R_1, R_2, \dots, R_n . Они рассчитываются по формулам

$$\delta\alpha_k = \kappa_p \cdot (I_{f0}^k - I_f^k), \quad (4)$$

где κ_p – коэффициент усиления регуляторов системы распределения, I_{f0}^k и I_f^k – уставки системы распределения токи индуктивностей входных фильтров инверторов I_k и их текущие значения соответственно. Уставки определяются по формулам:

$$I_{f0}^k = \gamma_k I_f, \quad (5)$$

где I_f – сумма токов индуктивностей входных фильтров всех инверторов.

Таким образом, для уставок I_{f0}^k выполняются условия вида (2) и, следовательно, если регуляторы системы распределения обеспечат минимальные значения разностей в скобках формулы (4), то требуемое распределение мощности между преобразователями будет достигнуто. При этом из-за

низкого входного сопротивления инверторов значения $\delta\alpha_k$ малы и, следовательно, напряжения U_d^k на входе инверторов отличаются незначительно.

Особенностью рассмотренной системы распределения является то, что уставки I_{j0}^k определяются в процессе работы преобразователя и изменяются автоматически с изменением величины нагрузки. Это делает систему не зависящей от режима работы системы во всем диапазоне от холостого хода до любых неаварийных перегрузок. Но, как сказано выше, такая система не обеспечивает высоких средних значений энергетических показателей. Следовательно, целесообразно изменять набор работающих преобразователей K , выбирая его из общего множества преобразователей N так, чтобы при текущей величине потребляемой мощности P , во-первых, обеспечивался необходимый запас по мощности и, во-вторых, средние значения энергетических показателей системы преобразования были близки к оптимальным.

Обозначим через N/K – набор преобразователей из N , не подключенных к нагрузке в рассматриваемый момент, P_N и P_K – номинальные значения мощности преобразователей из N и K , т.е.

$$P_N = \sum_{i \in N} P_i, P_K = \sum_{i \in K} P_i.$$

Пусть далее ΔP – требуемое значение запаса мощности, на которое мощность P_K должна превышать мгновенное значение мощности P для надежного электроснабжения.

Предлагаемая система, помимо элементов, показанных на рис. 1, содержит блок управления структурой (БУС) комплекса, который осуществляет отключения и подключения преобразователей к нагрузке таким образом, чтобы выполнялось условие

$$P + \Delta P < P_K < P + \Delta P', \quad (6)$$

где $\Delta P'$ – допустимое с точки зрения эффективности преобразования превышение мощности P_K над мгновенной мощностью нагрузки P . Очевидно, что $\Delta P' > \Delta P$. В случае нарушения левого неравенства БУС выбирает из множества N/K такой минимальный по мощности набор преобразователей M_1 , подключение которого восстанавливает его выполнение, но не нарушает правое неравенство. Наоборот, в случае нарушения правого неравенства БУС выбирает из множества K такой максимальный по мощности набор преобразователей M_2 , подключение которого восстанавливает его выполнение, но не нарушает левое неравенство.

При изменении набора инверторов необходимо изменять коэффициенты $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$, которые для преобразователей из нового набора K должны удовлетворять равенствам

$$\gamma_i = P_i / \sum_{j \in K} P_j.$$

Для преобразователей из N/K коэффициенты γ_k равны нулю.

Переходные процессы в системе возникают при каждом изменении структуры системы и соответствующем изменении значений коэффициентов $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$. Особенность системы с этой точки зрения состоит в том, уставки I_{j0}^k формируются самой системой и изменяются в процессе регулирования. Установившийся режим наступает тогда, когда они достигают требуемых значений одновременно с регулируемым током. Контуры стабилизации выходного напряжения преобразователей в качестве регулирующих органов используют те же силовые ключи K_1, K_2, \dots, K_n , что и система распределения, в силу чего обе системы являются друг для друга возмущающими факторами. По этой причине изменения структуры реализуются БУС с установленной задержкой во времени относительно моментов нарушения условий (6) для того, чтобы избежать наложения переходных процессов в обеих системах.

Для исследования и параметрической оптимизации описанной гибкой системы создана компьютерная модель. На рис. 2 приведены графики изменения токов, потребляемых инверторами тока в системе из четырех объединенных по выходу трехфазных преобразователей. По оси абсцисс отложены номера интервалов, прошедших от начала работы преобразователя. Длительность интервала – одна шестая периода выходной частоты. Моделирование проводилось при следующих параметрах ком-

плекса. Фильтр: $L_f = L_d = 10 \text{ мГн}$, $C_f = 3000 \text{ мкФ}$, емкость коммутирующей батареи $C = 900 \text{ мкФ}$, индуктивность компенсатора $L_k = 100 \text{ мкГн}$, частота $f = 200 \text{ Гц}$.

$$I_{d_1}, I_{d_2}, I_{d_3}, I_{d_4}, \text{ А}$$

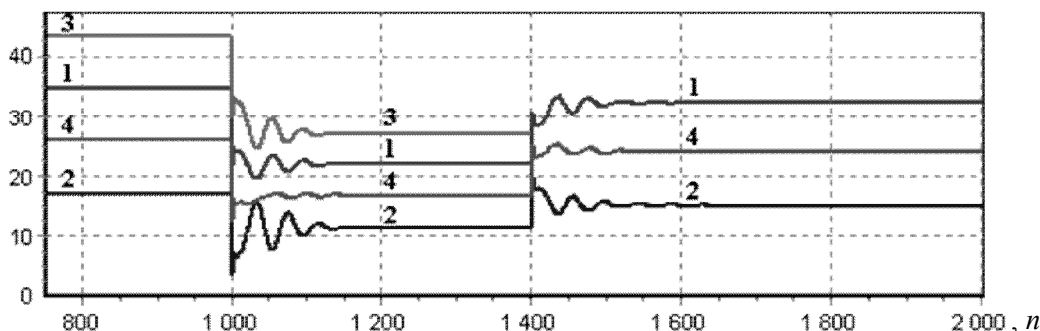


Рис. 2. Переходные процессы в гибкой системе распределения

Результаты моделирования отображают следующие процессы в системе: при $n < 1000$ нагрузка номинальная и система распределяет потребляемые токи и, следовательно, мощность между преобразователями в соответствии с исходными значениями коэффициентов $\gamma_1 = 0.3$, $\gamma_2 = 0.1$, $\gamma_3 = 0.4$, $\gamma_4 = 0.2$. В момент $n_1 = 1000$ происходит резкое уменьшение нагрузки и возникает переходный процесс в системе стабилизации выходного напряжения, затухающий к моменту $n_2 = 1120$. Поскольку при $n_1 = 1000$ произошло нарушение правого неравенства (6), БУС в момент $n_3 = 1400$ отключает третий преобразователь и реализует новые значения коэффициентов $\gamma_1 = 1/2$, $\gamma_2 = 1/6$, $\gamma_3 = 0$, $\gamma_4 = 1/3$. Возникающий переходный процесс в системе распределения нагрузки не накладывается на переходный процесс в системе стабилизации выходного напряжения благодаря задержке переключений преобразователей на установленные 400 интервалов.

Выводы

Проведенные компьютерные исследования предлагаемой гибкой системы подтверждают ее работоспособность. При распределении нагрузки между объединенными по выходу преобразователями обеспечивается номинальная нагрузка преобразователей, что способствует достижению высоких энергетических показателей преобразовательного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митяшин Н.П. Гибкие преобразовательные комплексы / Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. 128 с.
2. Автоматическое распределение нагрузки между параллельно работающими агрегатами / Ю.М. Астапович, Н.П. Митяшин, Р.А. Биликов, Н.А. Калистратов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. URL: <http://www.science-education.ru/107-8571>

Астапович Юрий Михайлович – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Миргородская Екатерина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Митяшин Никита Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yury M. Astepovich – Postgraduate
Department of the System Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ekaterina E. Mirgorodskaya – Ph. D., Associate Professor
Department of the System Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nikita P. Mityashin – Dr. Sc., Professor
Department of the System Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.03.13, принята к опубликованию 10.04.13

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.45: 519. 816

Г.М. Чуркин, А.М. Великанов, Е.А. Тырин

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ АСУ ТП

Формируется информационная модель описания средств автоматизации АСУ ТП. Задача выбора средств автоматизации по техническому заданию рассматривается как задача гипервекторного ранжирования. Решение проводится методом идеальной точки в пространстве критериев.

Средства автоматизации, задачи выбора, ранжирование

G.M. Churkin, A.M. Velikanov, E.A. Tyrin

THE PROBLEM OF SELECTING AUTOMATION FOR THE AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM

The article deals with the emerging information model for the description of automation control systems. The problem of selecting means for the automated process using the technical task is considered as the issue of hyper vector ranking. The solution to the problem provided using the method of an ideal point in the criteria environment.

Automation, the problem of choice, ranking

Введение. Технические средства автоматизации АСУ ТП могут быть следующими:

- техническая система, которая по запросу автоматически выполняет все необходимые функции информационных технологий для каждого рабочего места (АРМ) сотрудника [1];
- индивидуальные средства автоматизации АСУ ТП, они локальны и взаимодействуют между собой только под действием персонала АСУ ТП (средства контроля, управления, передачи информации, регистрации, компьютерная и оргтехника и т.д.) [2, 3].

Далее будем рассматривать индивидуальные средства автоматизации.

Выбор индивидуальных средств автоматизации персонала АСУ ТП реализуется на этапе формирования техники и технологии управления системы управления ТП [3].

Одной из основных операций при оснащении АСУ ТП является разработка технического задания на индивидуальные технические средства автоматизации [4]. Разработка технического задания (ТЗ) – ответственная операция, так как здесь определяются основные характеристики индивидуальных средств персонала для обслуживания ТП. Как правило, при составлении ТЗ заказчик или проектировщик ориентируется на конкретную модель технических средств (ТС). Подобный подход при выборе может привести к значительным потерям.

Требования ТЗ реализуются либо путём выбора ТС из имеющихся образцов, либо специализированной разработкой необходимого образца. Будем рассматривать первый случай.

Выбираемое по требованиям технического задания ТС может быть многофункциональным и обладать определёнными свойствами. Например, ГОСТ 21.404-85 в качестве параметров свойств ТС (прибора) использует перечень параметров измеряемых величин и перечень функциональных признаков технических средств автоматизации (измерение, регистрация, управление, сигнализация) [5].

Рассматриваемая задача определения индивидуальных средств автоматизации относится к задачам выбора [6]. Исследователями накоплен большой опыт решения задач многокритериальной оптимизации и ранжирования, разработаны методы, которые широко применяются в прикладных зада-

чах [10-13]. Часто решение задачи выбора сводится к решению задачи гипервекторного ранжирования (ГВР) [7]. В [8, 9] приведены постановки задач ГВР, особенности задач такого класса, метод решения, основанный на методе «жесткого» ранжирования.

В работе рассматривается применение *метода идеальной точки в пространстве критериев* для решения задачи выбора индивидуальных средств автоматизации АСУ ТП как задачи ГВР.

Постановка задачи. Первоначально приведём формальное описание требований ТЗ на выбор ТС и характеристик образцов ТС для выбора. При описании будем использовать иерархию отношений принадлежности между элементами описания ТС: «параметры – свойства – функциональные признаки».

Оценку какого-либо ТС в техническом задании выбора представим в виде множества оценок функциональных признаков со своими свойствами

$$O^T = \{O_v^T\}; \quad v = \overline{1, \psi}, \quad (1)$$

где O_v^T – оценка v -го признака ТС в техническом задании выбора.

Множество O^T представим в виде последовательности кортежей

$$O^T = \{ \langle \varepsilon_1^T, O_1^T, \theta_1 \rangle, \dots, \langle \varepsilon_v^T, O_v^T, \theta_v \rangle, \dots, \langle \varepsilon_\psi^T, O_\psi^T, \theta_\psi \rangle \}, \quad (2)$$

где $\langle \varepsilon_v^T, O_v^T, \theta_v \rangle$ – кортеж, в котором ε_v^T – логическая переменная, соответствующая наличию v функционального признака у выбираемого технического средства; θ_v – степень важности v -го признака ТС технического задания.

Оценка v -го признака технического средства в техническом задании выбора O_v^T представляется в виде последовательности кортежей

$$O_v^T = \{ \langle c_{v1}^T, O_{v1}^T, \theta_{v1} \rangle, \dots, \langle c_{vs}^T, O_{vs}^T, \theta_{vs} \rangle, \dots, \langle c_{vm}^T, O_{vm}^T, \theta_{vm} \rangle \}, \quad (3)$$

где $\langle c_{vs}^T, O_{vs}^T, \theta_{vs} \rangle$ – кортеж, в котором c_{vs}^T – логическая переменная, соответствующая наличию s свойства v функционального признака у технического средств ТЗ; O_{vs}^T – оценка s -го свойства v функционального признака ТС технического задания, θ_{vs} – степень важности s свойства v функционального признака ТС технического задания.

Каждый параметр свойства O_{vs}^T имеет порядковую шкалу количественных или качественных оценок. Оценки параметров свойств могут быть:

- а) точечными ($L_s^T = x_s, x_s \in R, R$ – множество вещественных чисел);
- б) интервальными ($P_s^T = [y_{s1}^T, \overline{y_{s1}^T}] \in R$ – интервалы);
- в) нечёткими числами ($B_s^T = \{(t_s, \mu_s(t_s)) \mid \mu_s(t_s) \in R_+\}$ на положительной полуоси R_+).

Здесь $\underline{y}_i^T, \overline{y}_i^T$ – вещественные значения нижней и верхней границ параметра y_i^T соответственно; t – нечёткие оценки, $\mu_s(t)$ – значения функции принадлежности нечеткой оценки t_s к заданным элементам нечёткого множества.

Оценку какого-либо свойства технического средства ТЗ представим в виде

$$O_s^T = L_s^T \cup P_s^T \cup B_s^T, \quad (4)$$

где L_s^T, P_s^T, B_s^T – множества параметров s свойства, принимающих точечные, интервальные и нечеткие значения соответственно.

Множество L^T представляется в виде последовательности кортежей

$$L_s^T = \{ \langle l_{sl1}^T, x_{sl1}^T, \gamma_{sl1}, \theta_{sl1} \rangle, \dots, \langle l_{sli}^T, x_{sli}^T, \gamma_{sli}, \theta_{sli} \rangle, \dots, \langle l_{slk}^T, x_{slk}^T, \gamma_{slk}, \theta_{slk} \rangle \}, \quad \kappa \leq m_s, \quad (5)$$

где $\langle l_{sli}^T, x_{sli}^T, \gamma_{sli}, \theta_{sli} \rangle$ – кортеж, в котором l_{sli}^T – логическая переменная, соответствующая наличию li -го параметра s свойства у выбираемого технического средств;

$$l_{sli}^T = \begin{cases} 1 - \text{наличие } i\text{-го параметра } l\text{-го свойства,} \\ 0 - \text{отсутствие } i\text{-го параметра } l\text{-го свойства;} \end{cases}$$

x_{sli}^T – численное значение li -го параметра s -го свойства, больше или меньше которого не должен быть параметр выбираемого ТС; γ_i конкретизирует понятия «больше», «меньше», т.е.

$$\gamma_{sli} = \begin{cases} -1 & \text{при } x_{sli} \leq x \\ 0 & \text{при } x_{sli} = x \\ 1 & \text{при } x_{sli} \geq x \end{cases}$$

x_{sli} – оценка параметра l_{si} выбираемого ТС, θ_{sli} – степень важности li -го параметра s -го свойства ТС технического задания.

Множество P_s^T представляется в виде последовательности кортежей

$$P_s^T = \left\{ \left\langle p_{spi}^T, \left[\underline{y_{spi}^T}, \overline{y_{spi}^T} \right], \theta_{spi} \right\rangle, \dots, \left\langle p_{spj}^T, \left[\underline{y_{spj}^T}, \overline{y_{spj}^T} \right], \theta_{spj} \right\rangle \right\}, f \leq m_s, \quad (6)$$

где $\left\langle p_{spi}^T, \left[\underline{y_{spi}^T}, \overline{y_{spi}^T} \right], \theta_{spi} \right\rangle$ – кортеж, в котором p_{spi}^T – логическая переменная, соответствующая наличию pi -го параметра s -го свойства у выбираемого технического средств, и принимающая значения аналогично переменной l_{sli}^T ; $\underline{y_{spi}^T}, \overline{y_{spi}^T}$ – вещественные значения нижней и верхней границ параметра y_{spi}^T соответственно; θ_{spi} – степень важности параметра y_{spi}^T ТС технического задания.

Множество B_s^T представляется в виде последовательности кортежей

$$B_s^T = \left\{ \left\langle b_{sbl}^T, t_{sbl}^T, \mu_{sbl}(t_{sbl}^T), \gamma_{sbl} \theta_{sbl} \right\rangle, \dots, \left\langle b_{sbz}^T, t_{sbz}^T, \mu_{sbz}(t_{sbz}^T), \gamma_{sbz} \theta_{sbz} \right\rangle \right\}; \quad (7)$$

$$z \leq m_s, z+f+k = m_s,$$

где $\left\langle b_{sbi}^T, t_{sbi}^T, \mu_{sbi}(t_{sbi}^T), \gamma_{sbi} \theta_{sbi} \right\rangle$ – кортеж, в котором b_{sbi}^T – логическая переменная, соответствующая наличию bi -го параметра s -свойства у выбираемого технического средства, и принимающая значения аналогично переменной l_{sli}^T ; t_{sbi}^T – нечёткая оценка bi -го параметра; $\mu_{sbi}(t_{sbi}^T)$ – значение функции принадлежности нечёткой оценки t_{sbi}^T к заданным элементам нечёткого множества, θ_{sbi} – степень важности bi -го параметра s -го свойства ТС технического задания с нечёткой оценкой, sm – количество параметров s свойства, m_s – общее количество параметров s -свойства.

$$\gamma_{sbi} = \begin{cases} -1 & \text{при } \mu_{sbi} \leq \mu_{sbi}^T, \\ 0 & \text{при } \mu_{sbi}^T = 0, \\ 1 & \text{при } \mu_{sbi} \geq \mu_{sbi}^T; \end{cases}$$

μ_{sbi} – значения функции принадлежности нечёткой оценки t_{sbi} к заданным элементам нечёткого множества выбираемого образца ТС.

Следующим этапом является выбор необходимого технического средства по требованиям ТЗ должен проводится из множества $A = \{A_1, \dots, A_j, \dots, A_n\}$ допустимых образцов (моделей) технического средства. Количество функциональных признаков у каждой модели A_j различно, т.е.

$$O^{A_j} = \{O_v^{A_j}\}; \quad v = 1, \overline{\psi_{A_j}}; \quad j = \overline{1, n}, \quad (8)$$

где ψ_{A_j} – количество функциональных признаков.

Множество O^{A_j} представим в виде последовательности кортежей

$$O^{A_j} = \left\{ \left\langle \varepsilon_1^{A_j}, O_1^{A_j} \right\rangle, \dots, \left\langle \varepsilon_v^{A_j}, O_v^{A_j} \right\rangle, \dots, \left\langle \varepsilon_{\psi}^{A_j}, O_{\psi}^{A_j} \right\rangle \right\}, \quad (9)$$

где $\left\langle \varepsilon_v^{A_j}, O_v^{A_j} \right\rangle$ – кортеж, в котором ε_v^T – логическая переменная, соответствующая наличию v -го функционального признака у выбираемого технического средства.

Оценка v признака технического средства в техническом задании выбора $O_v^{A_j}$ представляется в виде последовательности кортежей

$$O^{Aj} = \left\{ \langle c_1^{Aj}, O_1^{Aj} \rangle, \dots, \langle c_s^{Aj}, O_s^{Aj} \rangle, \dots, \langle c_h^{Aj}, O_h^{Aj} \rangle \right\}, \quad (10)$$

где $\langle c_s^{Aj}, O_s^{Aj} \rangle$ – кортеж, в котором c_s^{Aj} – логическая переменная, соответствующая наличию s-го свойства у A_j образца выбираемого технического средства; O_s^{Aj} – векторная оценка s-го свойства A_j образца.

Оценку какого-либо свойства образца технического средства ТЗ представим в виде

$$O_s^{Aj} = L_s^{Aj} \cup P_s^{Aj} \cup B_s^{Aj}, \quad (11)$$

где L_s^{Aj} , P_s^{Aj} , B_s^{Aj} – множества оценок s-го свойств A_j , принимающих вещественные, интервальные и нечеткие значения соответственно.

Формальное описание множеств оценок s-го свойства A_j образца технического средства L_s^{Aj} , P_s^{Aj} , B_s^{Aj} аналогично описанию множества оценок L_s^T , P_s^T , B_s^T технического задания соответственно и имеет вид

$$L_s^{Aj} = \left\{ \langle l_{sl1}^{Aj}, x_{sl1}^{Aj} \rangle, \dots, \langle l_{sli}^{Aj}, x_{sli}^{Aj} \rangle, \dots, \langle l_{slk}^{Aj}, x_{slk}^{Aj} \rangle \right\}, \quad k \leq h_s, \quad (12)$$

$$P_s^{Aj} = \left\{ \langle p_{sp1}^{Aj}, [y_{sp1}^{Aj}, \overline{y_{sp1}^{Aj}}] \rangle, \dots, \langle p_i^T, [y_{spi}^{Aj}, \overline{y_{spi}^{Aj}}] \rangle, \dots, \langle p_{spf}^{Aj}, [y_{spf}^{Aj}, \overline{y_{spf}^{Aj}}] \rangle \right\}, \quad f \leq h_s, \quad (13)$$

$$B_s^{Aj} = \left\{ \langle b_{sbl}^{Aj}, t_{sbl}^{Aj} \rangle, \dots, \langle b_{sbi}^{Aj}, t_{sbi}^{Aj} \rangle, \dots, \langle b_{sbz}^{Aj}, t_{sbz}^{Aj} \rangle \right\}, \quad z \leq h, \quad z+f+k=h_s, \quad (14)$$

$h_s \leq n_s$ либо $h_s \geq m_s$.

Описание элементов кортежей выражений (12)-(14) совпадает с описанием элементов кортежей выражений (5)-(7) и относится к параметрам свойств A_j образца ТС.

Для требований ТЗ, определяемого (1)-(7), необходимо построить упорядоченное множество эффективных образцов ТС (кортеж Парето), описание которых задано (8)-(14), и выбрать наилучший образец для практического использования. Элементы кортежа $P = \{A_1^0, \dots, A_j^0, \dots, A_n^0\}$ должны быть ранжированы в соответствии с решающими правилами так, чтобы выполнялось условие $A_1^0 \succ \dots \succ A_j^0 \succ \dots \succ A_n^0$, где \succ – знак отношения доминирования.

Критерий выбора ТС в общем случае может быть гипервекторным [8, 9]. В данном случае параметры свойства будут скалярными критериями, свойства – векторными компонентами, а функциональные свойства (признаки) (измерение, управление, регистрация, хранение, передача и т.д.) – многовекторными компонентами [7].

Решение. Поставленную задачу, как задачу гипервекторного ранжирования, решим методом *идеальной точки в пространстве критериев* [8]. Идеальным образцом будем считать образец с требованиями ТЗ, а критерий выбора должен оценивать удовлетворение выбираемым образцом требований ТЗ по параметрам свойств, свойствам функциональных признаков и по самим функциональным признакам.

Удовлетворение требований по параметрам s-го свойства (5-7) каждого образца оценим по критерию

$$I_s^{Aj} = I_{sL}^{Aj} + I_{sP}^{Aj} + I_{sB}^{Aj}, \quad (13)$$

$$I_{sL}^{Aj} = \sum_{i=1}^k a_{sli}^{Aj} \delta_{sli}^{Aj}, \quad (14)$$

$$\delta_{sli}^{Aj} = \begin{cases} 1, \text{ если } D_{sli} = (l_{sli}^T \wedge l_{sli}^{Aj}) \wedge [(x_{sli}^{Aj} \leq x_{sli}^T) \wedge (\gamma_{sli} = -1)] \vee [(x_{sli}^{Aj} \geq x_{sli}^T) \wedge (\gamma_{sli} = 1)], \\ 0, \text{ если } \overline{D_{sli}} = (\overline{l_{sli}^T} \wedge \overline{l_{sli}^{Aj}}) \wedge [(x_{sli}^{Aj} \leq x_{sli}^T) \wedge (\gamma_{sli} = -1)] \vee [(x_{sli}^{Aj} \geq x_{sli}^T) \wedge (\gamma_{sli} = 1)] \end{cases}$$

$$I_{sP}^{Aj} = \sum_{i=1}^f a_{spi}^{Aj} \delta_{spi}^{Aj}, \quad (15)$$

$$\delta_{spi}^{Aj} = \begin{cases} 1, \text{ если } D_{spi} = (p_{spi}^T \wedge p_{spi}^{Aj}) \wedge [y_{spi}^{Aj}, \overline{y_{spi}^{Aj}}] \subset [y_{spi}^T, \overline{y_{spi}^T}], \\ 0, \text{ если } \overline{D_{spi}} = (\overline{p_{spi}^T} \wedge \overline{p_{spi}^{Aj}}) \wedge [y_{spi}^{Aj}, \overline{y_{spi}^{Aj}}] \subset [y_{spi}^T, \overline{y_{spi}^T}]. \end{cases}$$

$$I_{sB}^{A_j} = \sum_{i=1}^z a_{sbi}^{A_j} \delta_{sbi}^{A_j}, \quad (16)$$

$$\delta_{sbi}^{A_j} = \begin{cases} 1, \text{если } D_{sbi} = (b_{sbi}^T \wedge b_{sbi}^{A_j}) \wedge (t_{sbi}^T \wedge t_{sbi}^{A_j}) \wedge [(\mu_{sbi}^{A_j} \leq \mu_{sbi}^T) \wedge (\gamma_{sbi} = -1)] \vee [(\mu_{sbi}^{A_j} \geq \mu_{sbi}^T) \wedge (\gamma_{sbi} = 1)] \\ 0, \text{если } \overline{D_{sbi}} = (b_{sbi}^T \wedge b_{sbi}^{A_j}) \wedge (t_{sbi}^T \wedge t_{sbi}^{A_j}) \wedge [(\mu_{sbi}^{A_j} \leq \mu_{sbi}^T) \wedge (\gamma_{sbi} = -1)] \vee [(\mu_{sbi}^{A_j} \geq \mu_{sbi}^T) \wedge (\gamma_{sbi} = 1)] \end{cases}$$

В выражениях (14)-(16) $a_{sli}^{A_j}$, $a_{spi}^{A_j}$, $a_{sbi}^{A_j}$ – соответственно коэффициенты важности скалярных компонент для каждого свойства s , причём

$$\sum_{i=1}^k a_{sli}^{A_j} + \sum_{i=1}^f a_{spi}^{A_j} + \sum_{i=1}^z a_{sbi}^{A_j} = 1.$$

Удовлетворение требований по совокупности свойств каждого функционального признака $I_v^{A_j}$ образца оценим по критерию

$$I_v^{A_j} = \sum_{s=1}^m a_s^{A_j} I_s^{A_j}, v = \overline{1, \psi}; \quad \sum_{s=1}^m a_s^{A_j} = 1, \quad (17)$$

где $a_s^{A_j}$ – коэффициент важности свойства s образца A_j .

Удовлетворение требований по совокупности функциональных признаков I^{A_j} образца A_j будем оценивать по критерию

$$I^{A_j} = \sum_{v=1}^{\psi} a_v^{A_j} I_v^{A_j}; \quad \sum_{v=1}^{\psi} a_v^{A_j} = 1, \quad (18)$$

где $a_v^{A_j}$ – коэффициент важности функционального признака v образца A_j .

Методика решения задачи гипервекторного ранжирования средств автоматизации с использованием метода идеальной точки в пространстве критериев

1. Провести анализ исходной информации, формирование критериев оценок свойств (13)-(16) образцов выбора. Определить коэффициенты важности критериев или группы коэффициентов важности в выражениях (14)-(16).

2. Вычислить оценки векторных компонент по выражениям (13)-(16). Ранжировать образцы с использованием метода идеальной точки в пространстве критериев по множеству скалярных критериев каждой векторной компоненты (каждого свойства).

3. Построить частные кортежи Парето по векторным компонентам (по параметрам свойств).

4. Определить коэффициенты важности критериев в выражении (17). Ранжировать образцы методом идеальной точки в пространстве критериев по множеству векторов (свойств).

5. Построить частные кортежи Парето по векторным компонентам.

6. Определить коэффициенты важности критериев в выражении (18). Ранжировать системы с использованием метода идеальной точки в пространстве критериев по множеству многовекторных компонент (функциональных признаков), используя выражение (18). Построить кортеж Парето.

7. Провести анализ результатов решения.

8. В случае необходимости уточнить исходные данные, изменить коэффициенты важности критериев. Перейти к шагу 2. В противоположном случае перейти к шагу 9.

9. Конец решения.

При определении коэффициентов важности критериев рекомендуют использовать модифицированный метод анализа иерархий (МАИ), а при формировании матрицы парных сравнений – шкалу предпочтений, предложенную Т. Саати [7, 14].

Вычисление оценки векторных и многовекторных компонент можно проводить как определённые нормы вектора с определённой важностью его координат либо как определение линейной свёртки его координат (см. (17), (18)).

В качестве процедуры можно использовать метод «жесткого» ранжирования [8].

Результатом решения задачи многокритериальной оптимизации является не одно значение, а множество значений, которое называется областью Парето. Все оптимальные решения, образующие область Парето, подчиняются принципу оптимальности по Парето: при переходе от одной точки области Парето к другой происходит разнонаправленное изменение векторных или многовекторных компонент.

В процессах принятия решения для наглядности положение точки в области Парето представляют на плоскости или трёхмерном пространстве координат. Значениями координат могут быть оценки скалярных и векторных компонент.

Например, на практике заказчика интересуют как минимум два основных показателя выбираемого образца:

1. Удовлетворение требованиям ТЗ по свойствам и параметрам.
2. Стоимость выбираемого образца (стоимость приобретения или разработки + изготовления и стоимость эксплуатации).

В соответствии с указанным интересом для представления в плоскости формируются два вектора-критерия:

I_1 – характеризует выполнение условий технического задания.

I_2 – характеризует стоимость A_j -го образца.

Тогда многовекторный критерий имеет вид

$$\bar{I}(A_j) = (\bar{I}_1(A_j), \bar{I}_2(A_j)). \quad (19)$$

В рассматриваемом примере если A_j^0 как решение Парето оптимально, то не существует других решений A_j ($j = \overline{1, n}$), для которых

$$\begin{aligned} I_1(A_j) &\geq I_1(A_j^0); \quad \text{или} \quad I_1(A_j) > I_1(A_j^0); \\ I_2(A_j) &\leq I_2(A_j^0). \quad I_2(A_j) \leq I_2(A_j^0). \end{aligned}$$

Неравенства (20) формализуют принцип оптимальности Парето, то есть если образец A_j^0 – оптимальное решение, то не существует другого A_j образца ТС, для которого при таких же функциональных возможностях, то есть $I_1(A_j) = I_1(A_j^0)$ или лучших функциональных возможностях $I_1(A_j) \geq I_1(A_j^0)$, была бы меньше цена $I_2(A_j) < I_2(A_j^0)$.

На рисунке представлен укрупнённый алгоритм решения задачи оптимального выбора образца индивидуальных средств автоматизации АСУ ТП. Вначале формулируется техническое задание (ТЗ), то есть определяется информационное описание ТЗ (информационная модель ТЗ). Далее задается критерий $I_2^{нач}$ – стоимость выбираемого образца. Выбираются только те A_j образцы, стоимость которых равна $I_2^{нач}$. Среди них выбирается A_j^0 образец, для которого критерий $I_1^0 = \max I_1$. Этот образец определяет точку области Парето. Далее выбирается новая большая стоимость образца, которая увеличивается на ΔI_2 . Аналогично для нее определяется новая оптимальная по Парето модель. Построение области Парето заканчивается тогда, когда будет достигнута максимально возможная стоимость образца I_2^{max} .

Заключение

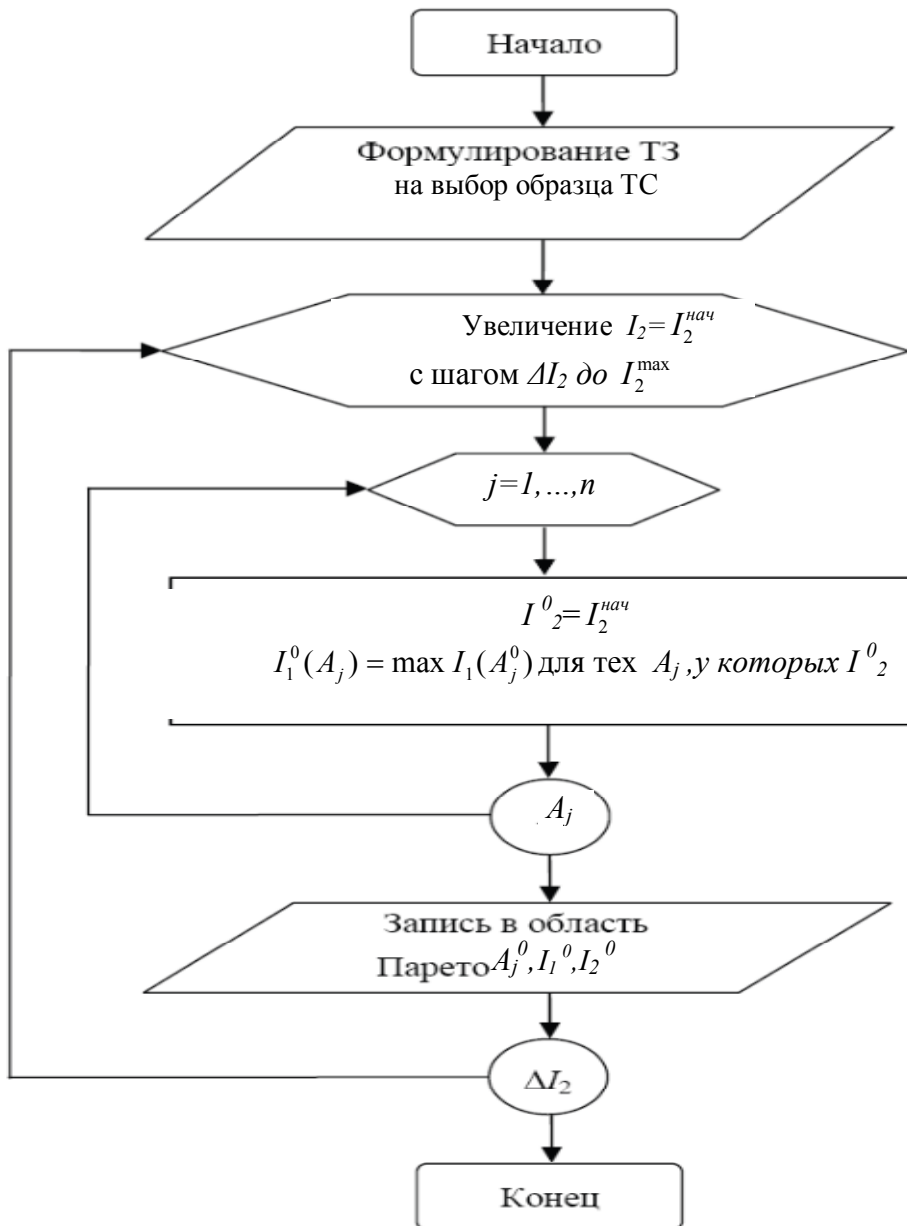
1. При формировании документов проектирования АСУ ТП имеет место задача обоснованного выбора оптимального образца средства автоматизации.

2. Для формирования информационного описания и оценивания образцов средств автоматизации предлагается использовать иерархию отношений в свойствах образца. Это позволяет сформировать гипервекторное оценивание по многовекторным, векторным и скалярным компонентам.

3. Задача выбора оптимального образца средств автоматизации сводится к задаче гипервекторного ранжирования. Решение задачи гипервекторного ранжирования проводится методом идеальной точки в пространстве критериев.

4. Для наглядности представления результатов решения задачи ранжирования предлагается представление результатов решения в плоскости двух оценок или в пространстве трёх оценок скалярных и векторных компонент.

5. Использование предлагаемого подхода к сравнению и выбору оптимального образца индивидуальных средств автоматизации позволит специалистам, связанным с разработкой АСУ ТП, быть более объективными при решении этой задачи.



Укрупнённый алгоритм выбора образца

ЛИТЕРАТУРА

1. Меньков А.В. Теоретические основы автоматизированного управления / А.В. Меньков, В.А. Острейниковский. М.: Оникс, 2005. 640 с.
2. Структура управления организацией и факторы, её определяющие [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?dir=2&tutindex=3&index=51&layer=2
3. Созинов В.А. Исследование систем управления. Сайт цифровых учебно-методических материалов ВГУЭС / В.А. Созинов // abc.vvsu.ru [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://abc.vvsu.ru/Books/issled_sist_upr/default.asp
4. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: справ. пособие / под ред. А.С. Ключева. М.: Энергоатомиздат, 1990. 464 с.
5. ГОСТ 21.404-85. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условных приборов и средств автоматизации в схемах.

6. Теория выбора и принятия решений / И.М. Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубчинский, В.Б. Соколов. М.: Наука, 1982. 328 с.
7. Сафронов В.В. Выбор стенда для испытания макетных образцов детонационных двигателей с использованием метода гипервекторного ранжирования / В.В. Сафронов, В.А. Поршнева, А.С. Жербаков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 9. С. 65-70
8. Сафронов В.В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования: монография / В.В. Сафронов. Саратов: Научная книга, 2009. 329 с.
9. Сафронов В. В. Гипервекторное ранжирование сложных систем / В.В. Сафронов // Информационные технологии. 2003. № 5. С. 23-26.
10. Дубов Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. М.: Наука, 1986. 296 с.
11. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. 488 с.
12. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. М.: Физматлит, 2007. 256 с.
13. Руа Б. Проблемы и методы решений в задачах с многими целевыми функциями / Б. Руа // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 20-58.
14. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.

Великанов Андрей Михайлович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey M. Velikanov – Undergraduate
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Тырин Евгений Александрович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Eugeny A. Tyrin – Undergraduate
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Чуркин Геннадий Максимович – доцент кафедры «Техническая кибернетика и информатика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Gennady M. Churkin – Ph. D., Associate Professor
Department of Technical Cybernetics and Informatics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 519.95

О.А. Шабалина

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ И ЕЕ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ В ОБУЧАЮЩЕЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИГРЕ

Рассмотрены подходы к моделированию процесса обучения. Показаны ограничения применения существующих моделей процесса обучения для разработки обучающих компьютерных игр. Разработан подход к моделированию процесса обучения как управляемого процесса освоения пространства знаний. Построена модель пространства знаний на основе математической решетки, отражающей ключевые свойства пространства знаний как системно организованной структуры, и построено исчисление процесса освоения этого пространства. Разработан способ интерпретации модели процесса обучения в игровом контексте. Описана разработка обучающей ролевой игры «Камми», в которой реализована разработанная модель.

Обучающие компьютерные игры, модель обучающего курса, пространство знаний, модель процесса обучения, управление процессом обучения

O.A. Shabalina

EDUCATIONAL GAMES DEVELOPMENT: LEARNING PROCESS MODEL AND ITS INTEGRATION INTO THE GAME CONTEXT

Approaches to learning process modeling are observed. The limitations of using existing models in educational games are shown. A new approach to modeling learning

process as a wave-like process of knowledge space learning is described. A lattice-based learning course model which reflects the essential knowledge space features is described. The calculation of learning process as the knowledge space learning is built. Implementation of suggested model to educational role-playing games development is shown. An example of implementation of the suggested model in the «Kammy» game is presented.

Educational computer games, learning course model, knowledge space, learning process model, learning process management

Введение

Использование обучающих игр в образовании становится все более актуальной тенденцией. Компьютерная обучающая игра представляет собой игру, имеющую обучающие цели. С другой стороны, обучающая игра может рассматриваться как обучающая система, в которой процесс обучения интегрирован в игру. Качественные обучающие игры сохраняют достоинства обучающих систем и в то же время обладают большим мотивационным потенциалом.

Ключевой системной характеристикой качества обучающей игры является баланс игровой и обучающей компоненты, обеспечивающий целостность восприятия игры и возможность достижения целей обучения. Способ интеграции процесса обучения с игровым процессом определяется способом взаимодействия в игре игровых и обучающих действий.

Для организации обучения в обучающих системах используются формальные модели процесса обучения. Однако [прямой перенос](#) таких [моделей](#) в [обучающие игры не позволяет учесть](#) все [аспекты, связанные со спецификой обучения в игре](#), поэтому применение этих моделей для разработки обучающих игр существенно ограничивает возможности разработчиков.

Анализ подходов к моделированию процесса обучения

В зависимости от назначения существующие модели процесса обучения отражают динамические, когнитивные, психологические и другие аспекты процесса обучения или их комбинации. Динамика изменения уровня знаний обучаемого в процессе обучения описывается как функция от параметров процесса, определенных разработчиком модели. Когнитивные модели описывают процессы восприятия человеком информации с точки зрения памяти, внимания, воображения и других характеристик познавательной деятельности человека. Модели, отражающие психологические аспекты процесса обучения, учитывают индивидуальные особенности личности обучаемого.

Для описания процесса обучения используют континуальные и дискретные модели. Континуальные модели процесса обучения используются преимущественно для анализа и планирования процесса обучения, т.к. позволяют устанавливать какие-либо характеристики процесса обучения, и отображать с разной степенью адекватности процесс обучения [1, 3, 6]. Однако такие модели не связаны со структурными особенностями изучаемой области знаний и не устанавливают способов организации процесса его освоения.

Дискретные математические модели описывают процесс обучения как последовательность переходов обучаемого между, определяемых действиями обучаемого над фрагментами знаний изучаемой предметной области. Для представления предметной области используются различные виды графов, узлам которого соответствуют фрагменты знаний, а дугами обозначают отношения между фрагментами. В качестве отношений задаются отношения логической связности фрагментов, определяющие возможные последовательности изучения фрагментов в процессе обучения [1-3]. Для представления процесса обучения, основанного на структуре предметной области, используются модели, основанные на сетях Петри [12], цепях Маркова [4], конечных автоматах [10] и др. Различные варианты дискретных моделей задают шаблоны возможных последовательностей элементов обучающего курса, т.е. траекторий обучения, заданных разработчиком. Процесс обучения моделируется как движение по траектории в рамках заданных правил [9].

Применение рассмотренных моделей для организации обучения в игре существенно ограничивает возможности разработчиков обучающих компьютерных игр. Игровой процесс в отличие от процесса обучения характеризуется большим числом параметров. Игрок, по определению, гораздо более свободен в выборе игровых действий, количество альтернатив выбора существенно больше, могут присутствовать элементы случайности, игровых характеристик, влияющих на процесс, существенно больше, игровой процесс может развиваться не только во времени, но и в пространстве. Обучающая игра должна с одной стороны обеспечивать свободу выбора игрока, с другой – формировать

стратегию обучения, позволяющую достичь обучающей цели. Модели процесса обучения, основанные на траекторном подходе, не позволяют в полной мере реализовать такие требования.

Целью данной работы является разработка модели процесса обучения, учитывающей характеристики игрового процесса, и также способа интеграции модели обучения в игру, позволяющего обеспечивать достижение целей обучения и сохранять при этом баланс между игровой и обучающей компонентой.

Концептуальная модель процесса обучения

Процесс обучения моделируется как динамический процесс взаимодействия обучаемого с обучающим курсом. Обучающий курс представляется как совокупность взаимосвязанных элементов курса, образующая системно организованную структуру, обладающую свойствами целостности и делимости, и определяющая таким образом пространство знаний обучающего курса. Целостность пространства знаний означает принципиальную несводимость знания в целом к сумме фрагментов знаний. Делимость пространства знаний означает наличие в нем подпространств, обладающих свойствами пространства. Обучаемый обладает способностью выполнять действия по освоению элементов пространства знаний в их логической связности. Оценка обучающим результатов выполнения действий обучаемого, сопоставленных соответствующим элементам пространства знаний, определяет состояние обучаемого в этом пространстве. Взаимодействие обучаемого с обучающим курсом представляется как изменение состояния обучаемого в соответствии с выполняемыми им действиями по освоению пространства знаний. Управление процессом обучения заключается в организации обучаемым такой деятельности, при которой обучаемый в результате обучения достигает состояния, отвечающего заданной цели обучения.

Для моделирования процесса обучения, отвечающего предложенной концепции, требуется разработка трех взаимосвязанных моделей: модели обучаемого, модели обучающего курса и модели взаимодействия обучаемого и обучающего курса.

Математическая модель процесса обучения

Модель обучающего курса

Обучающий курс представляется набором связанных элементов, каждому элементу структуры сопоставляется фрагмент обучающего курса. Связи между элементами задают логическую связность курса, отражающую его внутреннее устройство. В общем случае обучающий курс можно описать как конечное множество с заданным на нем бинарным отношением:

$$LC = \langle C, \leq \rangle, \quad (1)$$

где LC – обучающий курс, $C = \{a, b, c, \dots\}$ – множество элементов курса, \leq – бинарные отношения между элементами, отражающие их логическую связность.

Логическая связность как бинарное отношение обладает следующими свойствами:

- элементы a и b логически связаны отношением $a \leq b$, если освоение a является с точки зрения разработчика курса необходимым для освоения b , т.е. a является основанием для b ;
- никакой элемент не может быть опосредованно основанием самого себя, т.е. набор отношений $a \leq b$ и $b \leq c$ и $c \leq a$ недопустим;
- каждый элемент курса является основанием для всех элементов, с ним связанных, и для всего курса в целом, т.е. если $a \leq b$ и $b \leq c$, то $a \leq c$ (отношение \leq является транзитивным).

Свойства логической связности позволяют определить множество (1) как упорядоченное множество, и отношение \leq как отношение порядка на нем.

Для обеспечения целостности пространства знаний модель пространства должна обладать свойствами связности и полноты. Связность модели определяется логическими связями между элементами пространства знаний с точки зрения их содержания. Полнота задается наличием для любых двух фрагментов знаний такого фрагмента, который объединяет эти знания в новое знание. Свойство делимости пространства определяется структурным подобием подпространств модели пространства.

Для отображения системных свойств пространства знаний, отвечающего обучающему курсу, множество (1) введённым отношением порядка вкладывается в наименьшую математическую решетку (*lattice*) $KS \supset LC$ [8].

На решетке KS как универсальной алгебре определены две идемпотентные бинарные операции: \oplus и $*$. Идемпотентность операций решетки отражает «идемпотентность» процесса освоения знаний: повторное освоение элемента не приводит к появлению нового знания.

В контексте обучающего курса элемент $a \oplus b$ является основанием для любых элементов, для которых элементы a и b являются основанием. Элемент $a * b$ является основанием к освоению элементов a и b . Отношение $a \leq b$, что эквивалентно $a * b = a$ и $a \oplus b = b$, определяет связность модели.

Существование в математической решетке KS как частично упорядоченном множестве для каждой пары элементов a, b точной верхней $\sup(a, b) = a \oplus b$ и точной нижней $\inf(a, b) = a * b$ грани определяют полноту модели пространства знаний. Наименьший элемент $O = \inf(KS)$ решетки KS определяет начало освоения курса, наибольший элемент $I = \sup(KS)$ представляет собой обучающий курс в целом. Свойства связности и полноты модели определяют целостность пространства знаний (рис. 1).

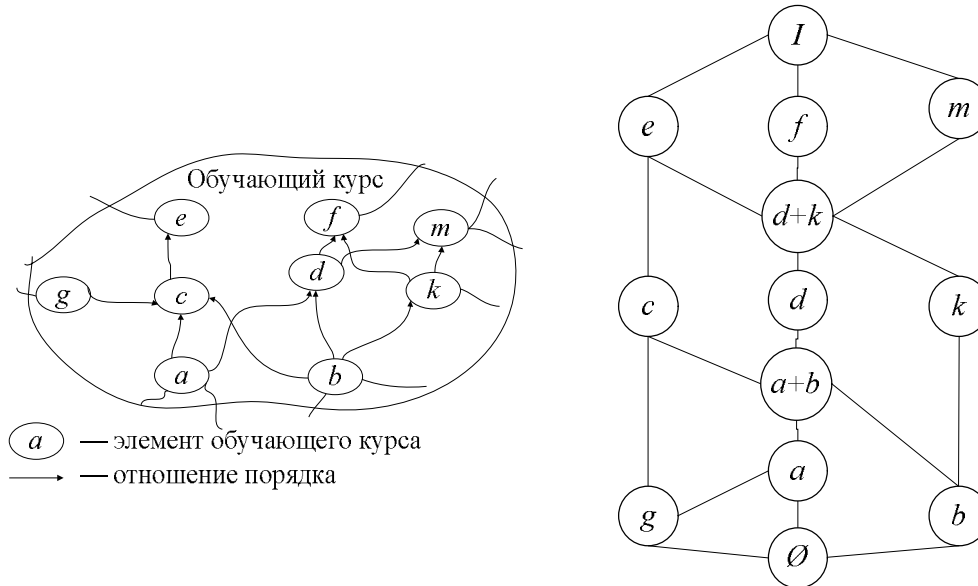


Рис. 1. Структура обучающего курса и пространство знаний, отвечающее этой структуре

Математическая решетка адекватно отражает системные свойства пространства знаний, что позволяет представить модель обучающего курса в виде

$$KS = \langle S, \oplus, * \rangle, \tag{2}$$

где S – множество элементов математической решетки, $\oplus, *$ – операции над элементами.

Для пары a, b элементов решетки, связанных отношением $a \leq b$, множество элементов x таких, что $x \in KS : a \leq x \leq b$, составляют интервал I_a^b , представляющий собой подструктуру решетки KS . Существование в решетке подструктур $I_a^b \subset KS$ определяет структурное подобие решетки и отражает свойство делимости пространства знаний на подпространства.

В силу конечности структуры KS для каждого интервала I_a^b существует подмножество его элементов $a \leq y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_k \leq y_{k+1} \leq \dots \leq b$ таких, что каждый интервал $I_{y_k}^{y_{k+1}}$ содержит только два элемента y_k и y_{k+1} , т.е. делимость интервала конечна. Такой набор элементов интервала определяет максимальную цепь C_a^b , представляющую собой линейную подструктуру интервала I_a^b .

Возможность освоения любого фрагмента знаний определяется освоенностью связанных с ним линейных подструктур как предшествующих ему фрагментов знаний. Алгебраическое представление совокупности предшествующих фрагментов описывается идеалом. Каждый элемент $a \in KS$ определяет собой идеал $\Delta(a)$ и фильтр $\nabla(a)$, которые являются главным идеалом $\Delta(a) = \{b \in KS : b * a = b\}$ и главным фильтром $\nabla(a) = \{b \in KS : b * a = a\}$. Главный идеал $\Delta(a)$ состоит из всех элементов, которые нужно изучить, чтобы приступить к изучению a . Главный фильтр $\nabla(a)$ определяет все элементы, которые могут быть изучены после изучения a (рис. 2).

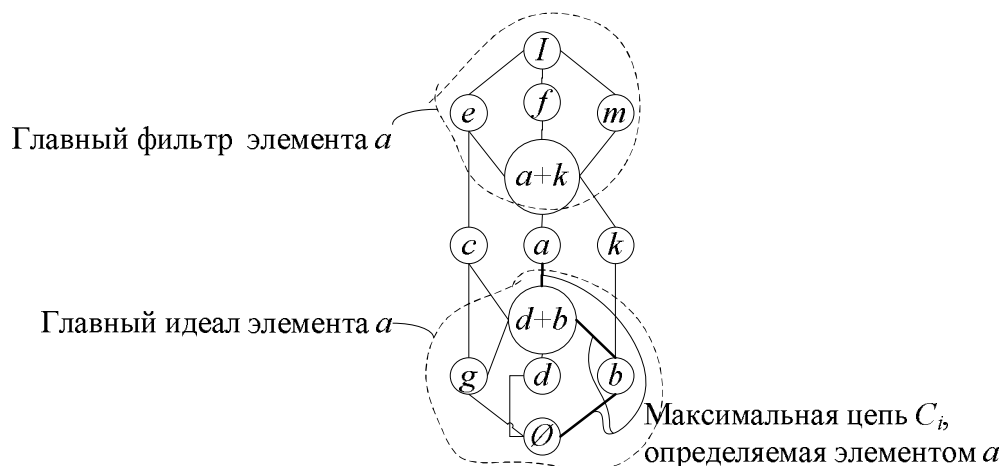


Рис. 2. Подмножества элементов пространства знаний, определяющие главный идеал и главный фильтр элемента a

Модель обучаемого

Обучаемый в процессе освоения пространства знаний выполняет действия, сопоставленные элементам пространства знаний KS в их логической связности. Каждому действию d , выполненному обучаемым, сопоставляется оценка освоенности Λ_φ этого элемента, определяющая его состояние φ на этом элементе. Таким образом, состояние обучаемого φ является отображением множества элементов решетки KS на множество оценок освоенности этих элементов: $\varphi \in \Phi \leftrightarrow \varphi: KS \rightarrow \Lambda_\varphi$, где Φ – множество состояний, KS – множество элементов решетки, $\Lambda_\varphi = \{\lambda_{\min}, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_{\max}\}$ – линейно-упорядоченное множество оценок выполнения действия.

Каждое действие, выполняемое обучаемым, изменяет его состояние: $d \in D \leftrightarrow d: \Phi(KS, \Lambda_\varphi) \rightarrow \Phi(KS, \Lambda_\varphi)$. Тем самым d представляется как оператор, действующий на пространстве состояний Φ , и обладающий таким свойством, что никакое действие не ухудшает меры освоенности соответствующего элемента: $d(\varphi)(a) \geq \varphi(a)$.

Таким образом, модель обучаемого представляет собой кортеж вида

$$Learner = \langle \Phi, D \rangle, \quad (3)$$

где Φ – множество состояний обучаемого; D – множество действий обучаемого, определяемых элементами пространства знаний.

При этом пространство действий структурно эквивалентно пространству знаний: $\forall a \in KS \exists! d \in D$, т.е. $d = \beta(a)$, где β – биекция множества KS на множество D . $\forall b \in KS b \geq a \Rightarrow \beta(b) \geq \beta(a)$, т.е. действие $\beta(b)$ может быть выполнено после выполнения действия $\beta(a)$.

Модель процесса взаимодействия обучаемого с обучающим курсом

Процесс взаимодействия обучаемого с обучающим курсом представляется как зависимость состояния обучаемого φ в пространстве знаний KS от действий d , совершаемых обучаемым над элементами пространства и изменяющих состояние освоенности этого пространства.

Модель процесса взаимодействия обучаемого с обучающим курсом представляется уравнением эволюции состояния обучаемого в дискретном времени:

$$\varphi_{i+1} = d_{i+1}(\varphi_i), \quad (4)$$

где φ_i – состояние, в которое переходит обучаемый после выполнения действия d_{i+1} , определяемого предшествующим состоянием φ_i .

Модель определяет состояние обучаемого φ_i как функцию его действия d_i над подпространством знаний $KS(\varphi_i)$, расширяющим это подпространство, т.е. $KS(\varphi_i) \subset KS(\varphi_{i+1})$.

Управление процессом обучения

Управление процессом обучения заключается в организации такой деятельности, при которой достигается состояние освоенности пространства знаний, удовлетворяющее цели обучения:

$$\begin{array}{ccccccc} \varphi_0 & \xrightarrow{d_1} & \varphi_1 & \xrightarrow{d_2} & \dots & \xrightarrow{d_i} & \dots & \xrightarrow{d_n} & \varphi^{obj} \\ \downarrow & & \downarrow & & & \downarrow & & & \downarrow \\ KS(\varphi_0) & \subset & KS(\varphi_1) & \subset & \dots & \subset & KS(\varphi_i) & \subset & \dots & \subset & KS(\varphi^{obj}) \end{array}, \quad (5)$$

где φ_i – состояние освоенности пространства знаний KS после выполнения i -го действия; $KS(\varphi_i)$ – подпространство освоенных знаний, соответствующее состоянию φ_i ; φ^{obj} – состояние, удовлетворяющее цели обучения.

Действие d_{i+1} выбирается из набора:

$$D_{i+1} = F(\varphi_i), \quad (6)$$

где $F(\varphi_i)$ – функция управления, задающая набор возможных действий D_{i+1} обучаемого в зависимости от результата выполнения текущего действия d_i (обратная связь).

Для оценки завершенности обучения на множестве состояний выделяется подмножество $\Phi^{obj}(KS, \Lambda_\varphi) \subset \Phi(KS, \Lambda_\varphi)$. Если $\varphi_m \in \Phi^{obj}(KS, \Lambda_\varphi)$, то цель обучения достигнута.

Процедура формирования функции управления

Для каждого элемента пространства знаний KS задается пороговое состояние $\varphi^*(a) \in \Phi$, определяющее требуемый уровень освоенности a , и $J^*(a)$ – пороговое значение уровня знаний, определяющее возможность освоения a . Если $\varphi(a) \geq \varphi^*(a)$, то элемент a считается освоенным. Для каждого элемента, для которого $\varphi(a) < \varphi^*(a)$, определяется возможность его освоения.

Возможность освоения элемента a зависит от уровня освоенности всех элементов, предшествующих ему, и определяемых главным идеалом $\Delta(a)$. Логика освоения предшествующих элементов определяется максимальными цепями идеала $c_i \in \Delta(a)$. Амплитуда максимальной цепи определяется как набор значений состояний на всех элементах цепи: $A(c_i) = \{\varphi(y_1), \varphi(y_2), \dots, \varphi(y_k)\}$. Состояние освоенности всех элементов идеала $\Delta(a)$ определяется как суперпозиция величин амплитуд максимальных цепей.

Процедура формирования функции управления включает следующие шаги:

1) находятся все максимальные цепи идеала $\Delta(a)$:

$$c_i = \{\{y_1, y_2, \dots, y_k\} : 0 \leq y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_k \leq a\} \in \Delta(a), \quad (7)$$

2) для каждой максимальной цепи (7) определяется величина амплитуды $A(c_i)$:

$$|A(c_i)| = f(\lambda(y_i)), \quad (8)$$

где f – способ суммирования $\lambda(y_i)$; $\lambda(y_i)$ – оценка выполнения действия, сопоставленного элементу y_i , определяющая состояние обучаемого $\varphi(y_i)$ на этом элементе;

3) определяется суперпозиция амплитуд $A(c_i)$:

$$J(\varphi, a) = \sum_i A(c_i), \quad (9)$$

4) если $J(\varphi, a) > J^*$, то элемент a считается доступным для освоения;

5) действие $d = \beta(a)$ принадлежит набору действий, определяющих функцию управления:

$$F(\varphi) = D_f = \{d \in D; d = \beta(a), J(\varphi, a) > J^*(a)\}. \quad (10)$$

Организация процесса обучения на основе предложенной модели позволяет управлять действиями обучаемого в соответствии с его уровнем знаний, индивидуальными особенностями, и предоставляет ему свободу выбора действий по освоению пространства знаний, определяемого его текущим состоянием. Обучаемый самостоятельно принимает решение по выбору нужного действия, требуемого для освоения пространства знаний. Таким образом, обучаемый выявляет логические связи между

элементами пространства, и осваивает пространство знаний как системно организованную структуру, что приводит к синтезу у обучаемого целостной системы знаний.

Механизм оценки результатов процесса обучения

Для оценки уровня знаний в обучаемом курсе LC выделяются подобласти, соответствующие отдельным разделам знаний, и задаются навыки, определяющие способность обучаемого применять полученные знания. Каждому разделу знаний сопоставляется подмножество $\Omega_i^{Kn} \subset LC$, влияющих на овладение этим разделом знаний. Каждому навыку сопоставляется подмножество $\Omega_j^{Sk} \subset LC$, влияющих на развитие этого навыка. Для обеспечения полноты и связности выделенных разделов подмножества Ω_i достраиваются до подпространств: $\Omega_i \rightarrow KS_i$.

Введено понятие меры освоенности μ раздела Ω_i :

$$\mu = \frac{J(\varphi, \sup(KS_i) | I_{\inf(KS_i)}^{\sup(KS_i)})}{J(\varphi_{\max}, \sup(KS_i) | I_{\inf(KS_i)}^{\sup(KS_i)})}, \quad (13)$$

Как отношение текущего состояния освоенности подпространства KS_i на интервале $I_{\inf(KS_i)}^{\sup(KS_i)}$ к состоянию освоенности KS_i , определяемому интервалом $I_{\inf(KS_i)}^{\sup(KS_i)}, \varphi_{\max} : \varphi_{\max}(a) = \lambda_{\max}, \forall a \in KS_i$.

Оценка результатов обучения включает множества оценок освоенности по разделам знаний *Knowledge* и навыков *Skills*:

$$Knowledge: \{\mu_1^{Kn}, \mu_2^{Kn}, \dots, \mu_n^{Kn}\} \rightarrow \Lambda,$$

где $\mu_i^{Kn} = \mu(KS_i^{Kn}, \varphi, \varphi^*)$ – уровень знания i -го раздела;

$$Skills: \{\mu_1^{Sk}, \mu_2^{Sk}, \dots, \mu_n^{Sk}\} \rightarrow \Lambda,$$

где $\mu_i^{Sk} = \mu(KS_i^{Sk}, \varphi, \varphi^*)$ – уровень владения i -м навыком.

Уровень освоенности знаний и навыков обучающего курса $LC \subset KS$ в целом:

$$\mu^{Kn} = \frac{J(\varphi, \sup(KS^{Kn}))}{J(\varphi_{\max}, \sup(KS^{Kn}))}, \quad \mu^{Sk} = \frac{J(\varphi, \sup(KS^{Sk}))}{J(\varphi_{\max}, \sup(KS^{Sk}))}$$

где KS – пространство знаний обучающего курса.

Интерпретация модели процесса обучения в ролевой обучающей игре

Обучающий курс как виртуальный мир

Ключевые понятия обучающего курса интерпретируются как система правил жизни в искусственно созданном виртуальном игровом мире. Каждый элемент структуры обучающего курса (1) интерпретируется как элемент игрового сценария: $a \in LC \rightarrow ga \in gC$, где a – элемент структуры обучающего курса LC , ga – элемент игрового сценария gC . Множество gC дополняется элементами сценария, не являющимися интерпретациями обучающего курса, таким образом, что при этом не нарушаются логические связи между элементами структуры обучающего курса: $\alpha : gC \rightarrow GC$, где α – гомоморфизм структур. Множество GC вкладывается в решетку: $GC \supset KS$, определяющую пространство знаний обучающего курса (2).

Таким образом, модель игрового сценария имеет вид

$$KS = \langle GC, *, \oplus \rangle, \quad (14)$$

где GC – множество элементов игрового сценария, $*, \oplus$ – операции над элементами.

Виртуальный мир, как модель обучающего курса, не имеющую оригинала в действительности, предложено назвать симулякционной моделью (*Simulacrum model*). Способ моделирования, при котором создается новый «виртуальный» объект (симулякр, *Simulacres*), для которого исходный объект является моделью, предложено назвать симулякционным моделированием. Для обеспечения возможности внешнего представления (визуализации) симулякционная модель может наде-

ляться дополнительными свойствами, не присущими объекту моделирования. В этом отличие симуляционного моделирования от моделирования реально существующих предметов и явлений, при котором модель является упрощенным сущностным описанием объекта.

Обучаемый как аватар

Игрока в игре представляет его аватар – игровой персонаж, с которым ассоциирует себя игрок. Состояние обучаемого интерпретируется как игровой опыт аватара: $\varphi \rightarrow \text{experience}$, действия обучаемого по освоению пространства знаний – как игровые действия: $d \rightarrow \text{gameAction}$. В процессе игры игрок выполняет действия и накапливает игровой опыт, который отражает достижения игрока в освоении обучающего курса: $\text{experience}: GC \rightarrow \text{Achievements}$, где GC – множество элементов игрового сценария; Achievements – множество оценок достижений игрока. Модель игрока как интерпретация модели обучаемого (3) имеет вид

$$\text{Avatar} = \langle \text{Experience}, \text{GameActions} \rangle, \quad (15)$$

где Avatar – игровой персонаж, с которым ассоциирует себя игрок; Experience – множество игровых состояний игрока; GameActions – множество игровых действий игрока.

Процесс обучения как жизнь аватара в виртуальном мире

Процесс обучения представляет собой жизнь аватара в виртуальном мире: освоение правил существования и выживания в мире, саморазвитие, создание и развитие других персонажей.

Модель жизни аватара в виртуальном мире как интерпретация модели взаимодействия обучаемого с обучающим курсом (4) имеет вид:

$$\text{experience}_{i+1} = \text{gameAction}_{i+1}(\text{experience}_i). \quad (16)$$

Пример применения модели процесса обучения для разработки обучающей игры

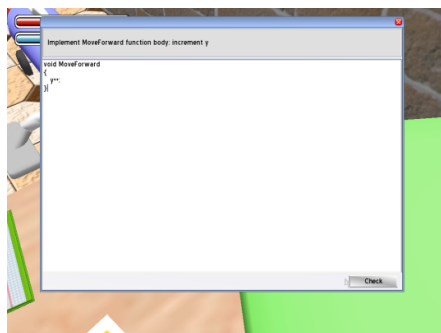
Разработанная модель процесса обучения реализована в ролевой обучающей игре «Камми» [11, 12]. Объектами изучения в игре являются объектно-ориентированная технология программирования (ООП) и язык программирования C#. Выделены ключевые понятия ООП, разработан виртуальный мир игры как симулякр объектно-ориентированной парадигмы. Главный персонаж игры - «Профессор Камаев» (с разрешения зав. кафедрой САПР и ПК Волгоградского государственного технического университета проф. Камаева В.А.), сознание которого в результате неудачных попыток переместилось в маленького робота Камми. Процесс обучения в игре интерпретируется как жизнь Камми в виртуальном мире.

Игрок должен управлять поведением Камми, который помещается в этот новый для него мир. В процессе игры каждый игрок по-своему осваивает пространство знаний в зависимости от уже накопленного уровня знаний и предпочтений, определяемых его текущим состоянием.

Выделены два уровня игры: базовый уровень и свободная игра. На базовом уровне игрок изучает основные принципы ООП. В режиме свободной игры игрок расширяет игровой мир и развивает навыки программирования. Задано пороговое значение освоенности $\varphi^* (a = \lambda_{\min} = 1)$. Для базового уровня задан порог освоения $J^*(a) = J(a)^{\min}$, что позволяет продвигаться в пространстве знаний при $\varphi = \varphi^*$. В режиме свободной игры $J^*(a) = (J(a)^{\min} + J(a)^{\max}) / 2$.

Для вычисления величины амплитуды $|A(C_i)|$ в качестве функции суммирования $f(\lambda)$ использована аддитивная свертка: $|A(C_i)| = \sum \lambda(y_i)$. Уровень освоенности знаний, определяющий возможность освоения элемента a , вычисляется по рекуррентной формуле: $J(\varphi, a) = \sum (J(\varphi, a_i) + \varphi(a_i)) |A(C_i)|$, где a_i – максимальные элементы идеала $\Delta(a) | \{a\}$.

Экранные формы игры показаны на рис. 3.



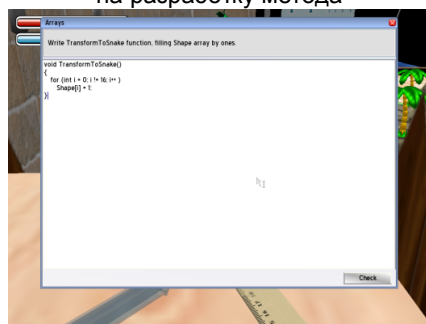
1 – Решение задания на разработку метода, обеспечивающего движение вперед



2 – Проверка решения задания на разработку метода



3 – Для перемещения вниз нужно изменить форму Камми



4 – Решение задания на разработку метода преобразования формы Камми

Рис. 3. Экранные формы игры «Камми»

Заключение

Разработанная игра «Камми» используется на кафедре САПР и ПК Волгоградского государственного технического университета в рамках обучения студентов второго курса дисциплине «Программирование на языках высокого уровня». Для оценки применимости разработанной модели процесса обучения было проведено анкетирование в группе из пятнадцати студентов. Все студенты отметили, что игра помогла им понять идею объектно-ориентированной парадигмы и базовые принципы объектно-ориентированного программирования и повысила их интерес к изучению дисциплины в целом. При этом студенты отметили высокое качество игры: привлекательность сюжета и богатые игровые возможности.

Результаты анкетирования показывают, что предложенная модель процесса обучения применима для разработки обучающих компьютерных игр, т.к. она позволяет достигать цели обучения в игровом процессе и сохранять при этом баланс обучающей и игровой компоненты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимова И.Б. Системный подход к анализу и управлению качеством обучения на основе триад знаний / И.Б. Герасимова, Л. Р. Уразбахтина // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 9. С. 51-55.
2. Кривцов В.Е. Модель и алгоритмы построения учебных курсов / В.Е. Кривцов, Е.А. Ларшин // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2005. Т. 14. С. 156-162.
3. Соловов А.В. Дискретные математические модели в исследовании процессов автоматизированного обучения / А.В. Соловов, А.А. Меньшикова // Дистанционное и виртуальное обучение. 2011. № 12. С. 64-79.
4. Дорофеев А.С. Модели обучающего курса в разработке систем дистанционного обучения / А.С. Дорофеев, С.С. Соснинская // Прикладная информатика. 2007. № 3. С. 25-37.
5. Лаптев В.В. Изучение поведения моделей обучения с использованием марковского процесса / В.В. Лаптев, В.И. Сербин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 1. С. 42-48.
6. Кудрявцев В.Б. Компьютерные Системы Обучения / В.Б. Кудрявцев, П.А. Алисейчик, К. Вашик и др. // Интеллектуальные Системы. 2004. Т. 8. Вып. 1-4. С. 45-56.

7. Давтян А.Г. Структурный синтез пространства знаний / А.Г. Давтян, О.А. Шабалина // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе ИТ+SE`2012 : приложение к журналу «Открытое образование»: матер. XXXX юбил. Междунар. конф. молодых учёных (майская сессия, Крым, Ялта-Гурзуф, 25 мая – 4 июня 2012 г.) / ИПУ РАН, ГУ-ВШЭ, МГУПИ [и др.]. М., 2012. С. 55-56.

8. Шабалина О.А. Моделирование пространства знаний на основе математической структуры / О.А. Шабалина // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. 2012. Т. 11. № 4. С. 87-90.

9. Шабалина О.А. Разработка обучающих игр: интеграция игровой и обучающей компоненты / О.А. Шабалина, П.Н. Воробкалов, А.В. Катаев // Открытое образование. 2011. № 2. С. 290-294.

10. Shabalina O. 3I-Approach for IT Educational Games Development / O. Shabalina, P. Vorobkalov, A. Kataev, A. Tarasenko // Proceedings of the 3rd European Conference on Games-Based Learning, Graz, Austria, 12-13 October 2009 / FH JOANNEUM University of Applied Science. [UK], 2009. P. 339-344.

11. Шабалина О.А. 3i-подход к разработке компьютерных игр для обучения техническим дисциплинам / О.А. Шабалина, П.Н. Воробкалов, А.В. Катаев // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. № 4. С. 45-51.

12. Шабалина О.А. Применение 3i-подхода для разработки обучающих игр по объектно-ориентированному программированию / О.А. Шабалина, П.Н. Воробкалов, А.В. Катаев // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. № 6. С. 46-52 + 3-я стр. обл.

Шабалина Ольга Аркадьевна –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Системы автоматического проектирования
и поискового конструирования»
Волгоградского государственного
технического университета

Olga A. Shabalina –
Ph. D., Associated Professor
Department of Computer-Aided Design (CAD)
Volograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 10.04.13

УДК 004.8.032.26

Н.С. Эрдниева

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ МУЛЬТИПРОЦЕССОРНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Разработаны модели многослойных искусственных нейронных сетей прямого распространения (МИНСПР) для прогнозирования показателей эффективности передачи сообщений мультипроцессорной архитектуры SOME-Bus. Приведено сравнение результатов модели МИНСПР с результатами моделей обобщенных регрессионных нейронных сетей (ОРНС), опорного вектора регрессии (ОВР) и множественной линейной регрессии (МЛР).

Искусственные нейронные сети, мультипроцессорные архитектуры, передача сообщений, оценка эффективности

N.S. Erdnieva

USING THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR PREDICTING THE EFFICIENCY FOR TRANSMITTING THE MULTIPROCESSOR ARCHITECTURE DATA

The article presents the new multi-layer feedforward artificial neural network (MFANN) models for predicting the performance efficiency indicators of transmitting multiprocessor architecture SOME-Bus data. The performance results of the MFANN models are com-

pared with the results obtained by means of the generalized regression neural network (GRNN), support vector regression (SVR) and multiple linear regression (MLR).

Artificial neural networks, multiprocessor architectures, message passing, performance evaluation

1. Введение

В настоящее время создание и использование параллельных систем связывают с необходимостью повышать быстродействие и надежность систем. Прогресс в развитии технологии БИС приводит к дальнейшему улучшению характеристик многопроцессорных параллельных систем [1]. Быстрыми темпами развиваются модели параллельного программирования. Наиболее популярными из них являются модели передачи сообщений и с разделяемой памятью. В модели передачи сообщений множество узлов во время вычислений используют свою локальную память. В модели с разделяемой памятью задачи разделяют общее адресное пространство, которое они читают и записывают асинхронно [2].

В [3] архитектура мультипроцессора на основе трансляции называется SOME-Bus. Было проведено статистическое моделирование архитектуры с использованием распределенной разделяемой памяти для создания набора данных. Набор данных содержит следующие переменные: отношение среднего времени канала передачи сообщений к среднему времени выполнения потоков (T/R), вероятность нахождения блока в измененном состоянии (P_m), вероятность связи сообщения данных с записью мисс (P_w), вероятность заполнения кэша (P_{cf}) и вероятность обновления запроса собственности (P_{ior}). ОВР были использованы для создания моделей для предсказания среднего времени отклика сети (ВОС), среднего времени ожидания канала (ВОК), и средней загрузки процессоров (ЗП). Сделан вывод, что ОВР модель является перспективным инструментом для прогнозирования показателей эффективности мультипроцессоров с распределенной разделяемой памятью.

В [4] были разработаны модели МИНСПР для прогнозирования показателей эффективности архитектуры SOME-Bus с использованием протокола передачи сообщений (АСК). Производительность модели была оценена путем расчета средней абсолютной ошибки (САО), среднеквадратичной ошибки (СКО), относительно абсолютной погрешности (ОАП) и среднеквадратичной относительной ошибки (СКОО). Результаты моделей на основе МИНСПР сравнивались с результатами моделей ОРНС, ОВР и МЛР.

OPNET Modeler [5] используется для статистического моделирования SOME-Bus архитектуры передачи сообщений. Входные переменные модели прогнозирования включают T/R , номер узла, номер нити и схему движения. Выходные переменные модели прогнозирования включают среднее ВОК, среднюю загрузку канала (ЗК), среднее ВОС, среднее ЗП и среднее время входного ожидания (ВВО). Производительность моделей прогнозирования была оценена путем расчета их стандартной ошибки оценки (SEE) и коэффициента множественной корреляции (R). Полученные результаты сравниваются с результатами ОРНС, ОВР, и МЛР.

2. Одновременная оптическая мультипроцессорная шина обмена (SOME-Bus)

Архитектура SOME-Bus [6] включает оптико-электронные приборы высокопроизводительной сетевой архитектуры. Она обеспечивает сильную интеграцию передатчика, приемника и аппаратного контроллера кэш-памяти для получения высокой степени интеграции слаженности в системе механизма. Это низкое время ожидания, высокая пропускная способность волоконно-оптической сети, в которой каждый из узлов N имеет выделенный канал вещания (ГБайт/с). На рис. 1 показана архитектура SOME-Bus сети. Массив приемника содержит оптический интерфейс, выполняющий фильтрацию адресов, длину мониторинга и тип декодирования. Если адрес обнаружен в заголовке сообщения, сообщения помещаются в очередь, иначе сообщение будет проигнорировано. Массив приемника содержит набор очередей, в которых одна очередь связывается с входным каналом, при этом одновременно прибывают сообщения с любого числа узлов и становятся буфером, пока локальный процессор не будет готов удалить их. Способность поддерживать многократные одновременные передачи является уникальной особенностью SOME-Bus, которая эффективно поддерживает распределенные механизмы синхронизации барьера и протоколы согласования кэшей.

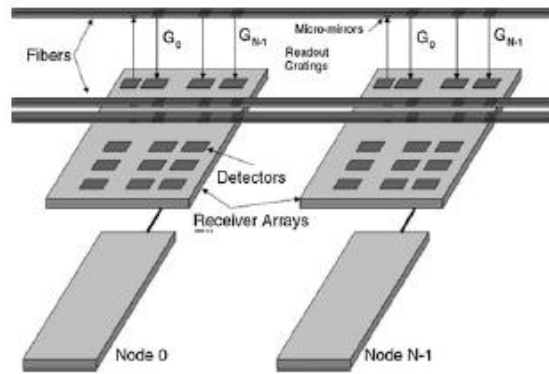


Рис. 1. Параллельный массив приемника

3. Протоколы передачи сообщений

Системы передачи сообщений сочетают локальную память и процессор в каждом узле соединения сетей. Глобальной памяти нет, поэтому необходимо перемещать данные из одной локальной памяти в другую посредством передачи сообщений. Это осуществляется путем отправки/получения пары команд. Одновременная обработка сообщений и проблема вычисления отслеживаются операционной системой и протоколами. Преимуществом этой формы обмена данными является исключение необходимости синхронизации конструкций (семафоры), что приводит к повышению производительности. Схема передачи сообщений обеспечивает гибкость в размещении большого числа процессоров. Базовая модель программирования основана на идее согласования отправки запроса на один процессор с просьбой получения на другом. В такой схеме выполняется отправка блоков до соответствующего приемника, прежде чем могут быть переданы данные. Для каждого пакета, отправленного в источник узла, возвращается АСК после того, как пакет достигнет узла назначения. Это позволяет источнику узлов обнаружить потерю пакетов. Если в течение времени не будет получено АСК, то производится повторная передача пакета [7].

4. Обзор методов

4.1. Многослойные искусственные нейронные сети прямого распространения

ИНС использует модель структуры нейронной сети, которая является мощной вычислительной техникой для моделирования сложных нелинейных отношений, когда неизвестна в явном виде связь между переменными. МИНСПР состоит как минимум из трех слоев: входа, выхода и скрытого слоя. Каждый нейрон в слое принимает взвешенные входы от предыдущего слоя и передает свой выход нейронам в следующем слое. Вычисляется суммирование взвешенных входных сигналов и это суммирование передается по нелинейной функции активации. Результаты сети сравниваются с фактическими результатами наблюдений и ошибка сети обучается, пока не достигнет приемлемого значения.

4.2. Обобщенные регрессионные нейронные сети

ОРНС является обобщением радиальных базисных функций сетей и вероятностных нейронных сетей, выполняющих линейную и нелинейную регрессию. Эти сети прямого распространения используют архитектуру базисной функции для аппроксимации произвольной функции между входными и выходными векторами из обучающей выборки. Основной функцией ОРНС является оценка поверхности линейной (нелинейной) регрессии на независимых переменных U , учитывая зависимые переменные X . То есть сеть вычисляет наиболее вероятные значения выхода, O_x , учитывая векторы обучения U . Сеть вычисляет совместную функцию плотности вероятности U и X . Значение X для U выражается в виде

$$E[X/U] = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} Xf(U, X)dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f(U, X)dx} \quad (1)$$

Важным преимуществом ОРНС являются ее простота и быстрая процедура приближения. В отличие от обратного распространения ОРНС не сходится к локальным минимумам [8]. Топология ОРНС состоит из четырех частей. Во-первых, существует входной слой, полностью подключенный к образцу слоя. Во-вторых, есть образец слоя, имеющий одну величину для каждого образца. Он вычисляет образец гауссовой функции, выраженный как

$$h_i = \exp\left[-D_i^2/2\sigma^2\right]; \quad (2)$$

где

$$D_i^2 = (u - U_i)^T (u - U_i) \quad (3)$$

σ – параметр сглаживания, u – вход, представленный в сети и U_i – обучающиеся векторы. В-третьих, есть слой суммирования, имеющий две величины N и P . Первый блок вычисляет взвешенную сумму выходов скрытого слоя. Второй блок имеет вес, равный 1, и суммы экспоненциальных членов (h_i). В-четвертых, есть выход блока, который делит N на P для обеспечения результата прогнозирования.

4.3. Опорный вектор регрессии

4.3.1. Опорный вектор линейной регрессии

Нам известны данные обучения (x_i, y_i) , $(i=1, \dots, l)$, где x – это d -мерный вход и $y \in \mathfrak{R}$ – выход, где \mathfrak{R} – множество вещественных чисел. Модель линейной регрессии записывается

$$f(x) = \langle \omega, x \rangle + b, \quad \omega, x \in \mathfrak{R}^d, b \in \mathfrak{R}. \quad (4)$$

где $f(x)$ – это неизвестная целевая функция и $\langle \dots \rangle$ обозначает точечный продукт в \mathfrak{R}^d .

Для измерения эмпирического риска мы должны указать функцию потерь. Наиболее распространенной функцией потерь является функция потерь ε -регистра, предложенная Вапником [9] и определяемая следующей функцией:

$$L_\varepsilon(y) = \begin{cases} 0 & \text{for } |f(x) - y| \leq \varepsilon \\ |f(x) - y| - \varepsilon & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (5)$$

Оптимальные параметры $\bar{\omega}$ и \bar{b} в (4) находятся из решения прямой задачи оптимизации:

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i^- + \xi_i^+) \quad (6)$$

с ограничениями

$$\begin{aligned} y_i - \langle \omega, x_i \rangle - b &\leq \varepsilon + \xi_i^+, \\ \langle \omega, x_i \rangle + b - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i^+, \\ \xi_i^+, \xi_i^- &\geq 0, \quad i = 1, \dots, l \end{aligned} \quad (7)$$

где C – значение, определяющее обмен между плоскостью $f(x)$ и количеством, до которого отклонения большие, чем точность ε , допускаются. Слабые переменные ξ^- и ξ^+ представляют отклонения от ограничений ε -трубы. Будет решена двойственная задача, соответствующая оптимизация определяется как

$$\begin{aligned} \max_{x, x^*} & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_j) (\alpha_j^* - \alpha_i) \langle x_i, x_j \rangle \\ & - \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i^* - \alpha_i) - \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* + \alpha_i) \end{aligned} \quad (8)$$

с ограничениями

$$0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C, \quad i=1, \dots, l, \quad \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad (9)$$

Решение задачи оптимизации определяется (8) и (9) дает оптимальные множители Лагранжа α и α^* , пока $\bar{\omega}$ и \bar{b} получены как

$$\bar{\omega} = \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) x_i, \quad \bar{b} = -\frac{1}{2} \langle \bar{\omega}, (x_r + x_s) \rangle, \quad (10)$$

где x_r и x_s являются опорными векторами.

4.3.2. Опорный вектор нелинейной регрессии

Для нелинейной регрессии нелинейные отображения ϕ входного пространства могут быть использованы для более высокой размерности пространства признаков, а затем в этом пространстве может быть выполнена линейная регрессия. Нелинейная модель записывается:

$$f(x) = \langle \omega, \phi(x) \rangle + b, \quad \omega, x \in \mathfrak{R}^d, b \in \mathfrak{R}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned}\bar{\omega} &= \sum_{i=1}^{\ell} (\alpha_i - \alpha_i^*) \phi(x_i), \\ \langle \bar{\omega}, \phi(x) \rangle &= \sum_{i=1}^{\ell} (\alpha_i - \alpha_i^*) \langle \phi(x_i), \phi(x) \rangle \\ &= \sum_{i=1}^{\ell} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) \\ \bar{b} &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\ell} (\alpha_i - \alpha_i^*) (k(x_i, x_r) + k(x_i, x_s))\end{aligned}\quad (12)$$

где x_r и x_s – опорные векторы. Точку продукции выразим через ядро К функции, удовлетворяющей условиям Мерсера [9]. Если термин \bar{b} размещен в ядерной функции, (11) может быть записана следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{\ell} (\alpha_i - \alpha_i^*) k(x_i, x) \quad (13)$$

Радиальная базисная функция (РБФ) вычисляется с помощью гауссовой формы:

$$K(x, x') = \exp\left(-\frac{\|x - x'\|^2}{2\rho^2}\right) \quad (14)$$

где ρ – это ширина ядра РБФ.

4.4. Множественная линейная регрессия

МЛР представляет собой статистический метод, который использует несколько объяснительных переменных для предсказания результата переменной отклика. Цель МЛР заключается в моделировании отношений между объяснительными переменными и переменными отклика. МЛР модели часто используются в прогнозировании анализа производительности сети, которая представлена отношениями между входами сети и набора предикторов выходных переменных в (15).

$$y_i = B_0 + B_{|x_i|} + \dots + B_{\rho \lambda i \rho} + E_i, \quad (15)$$

где $i=1, 2, \dots, n$; B_i – остаток, E_j – разница между значением зависимой переменной для предсказания модели и зависимой переменной, и x – независимые параметры.

5. Моделирование и поколение наборов данных

OPNET Modeler [5] используется для моделирования архитектуры SOME-Bus с использованием протокола передачи сообщений с АСК. Базовая модель процесса, управляющая поведением очереди модулей, является OPNET встроенной моделью `acb_fifo`, показанной на рис. 2. Модель имеет свой сервер и может концентрировать многократные входящие потоки пакетов в единый внутренний ресурс очереди. Он поддерживает обслуживание вида First-in-First-out. Состояние «init» используется для инициализации процесса и установки переменных. Если пакет приходит, когда процесс находится в состоянии «init», процесс переходит в состояние «arrival», иначе он переходит в состояние «idle», где его ждет прибытие пакета. Состояние «arrival» используется для приема пакетов и запуска обслуживания. В состоянии «arrival», если сервер не занят, процесс переходит в состояние «svc_strt», которое, в свою очередь, переходит в состояние «idle», где его ждет либо прибытие пакета, либо завершение обслуживания. Во время состояния «idle», если обработка пакета завершена, процесс переходит в состояние «svc_cmp». Во время состояния «svc_cmp», если очередь не пуста, процесс переходит в состояние «svc_strt».

Важными параметрами моделирования являются число узлов (16, 32 и 64), число потоков выполнения каждого процессора (от 1 до 6), T/R , (от 0,05 до 1), нить времени выполнения (100) и схема движения. Набор данных, полученных в результате моделирования, содержит 4 входных и 5 выходных переменных. Входные переменные модели прогнозирования включают T/R , номер узла, номер нити и схемы движения. Выходные переменные модели прогнозирования включают среднее ВОК (интервал времени постановки пакета в очередь в выходном канале до прохождения пакета до обслуживания), среднюю ЗК (средняя доля времени, в течение которого канал сервера занят), среднее ВОС (интервал времени постановки сообщения в очередь в выходном канале до поступления под-

тверждающего сообщения на вход очереди), среднюю ЗП (средняя доля времени выполнения потоков), среднее ВВО (интервал времени постановки сообщения во входную очередь до обслуживания сообщения от процессора).

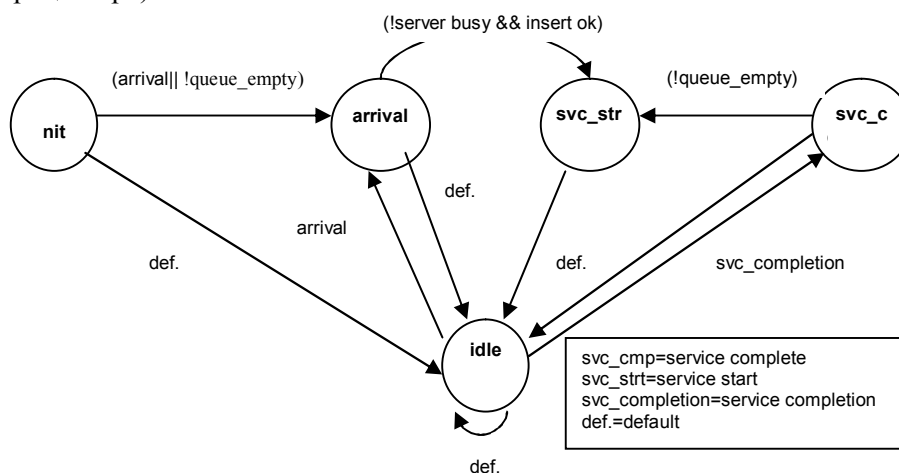


Рис. 2. Типовая модель процесса очереди

Набор данных, полученных в результате статистического моделирования, включает 792 образца. В табл. 1 приведены описательные статистики данных.

6. Результаты и обсуждение

Модель прогноза МИНСПР показана на рис. 3. Как видно на рис. 3, структура нейронной сети содержит два скрытых слоя. Первый скрытый слой имеет 9 нейронов, второй скрытый слой имеет 6 нейронов. В скрытых слоях используется тансигмоидная функция активации. В выходном слое используется линейная функция активации. Для обучения сети используется алгоритм Левенберга-Маркара (ЛМ). Также параметрами модели МИНСПР являются число эпох (500), скорость обучения (0,02) и импульс (0,5).

Таблица 1

Описательная статистика набора данных

| Статистические названия | Критерии производительности | | | | |
|-------------------------|-----------------------------|--------|------------|--------|----------|
| | ВОК | ЗК | ВОС | ЗП | ВВО |
| Среднее | 19.0801 | 0.2322 | 449.4143 | 0.4649 | 167.8480 |
| Максимум | 186.3973 | 0.8541 | 1,027.3580 | 0.9509 | 356.9148 |
| Минимум | 0.0031 | 0.0007 | 20.6056 | 0.0119 | 2.1585 |
| SD | 28.8380 | 0.2129 | 240.3182 | 0.2892 | 94.7545 |

Производительность модели прогнозирования ИНС оценивается с помощью R и SEE, формулы которых (12) и (13) соответственно:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y')^2}{\sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2}}, \tag{16}$$

$$SEE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y - Y')^2}. \tag{17}$$

где n – число точек данных, используемых для тестирования, Y – наблюдаемое значение, Y' – прогнозируемое значение и \bar{Y} представляет собой среднее из наблюдаемых значений.

Результаты модели прогнозирования МИНСПР сравниваются с результатами, полученными по ОРНС, ОВР, и МЛР. В табл. 2-9 показана работа всех моделей прогнозирования в значениях R и SEE с использованием различного числа кросс-проверок итераций, РБФ обозначает радиальную базисную функцию и L означает линейный.

На основании результатов могут быть сделаны следующие выводы:

1. Для всех показателей эффективности модели на основе МИНСПР работают лучше, чем модели на ОВР-основе, ОРНС-основе, и МЛР-основе.
2. По показателям прогнозирования модель ОВР-РБФ занимает второе место.

3. Показатель SEE модели прогнозирования на основе МИНСПР уменьшается, как только число итераций на тестовом наборе увеличивается с 10 до 80. Тем не менее показатель SEE модели на основе ИНС увеличивается, когда число итераций превышает 80.

4. Для прогнозирования ЗК и ЗП модель МИНСПР показывает хорошие результаты (SEE стремится к нулю). Прогноз ошибки, связанный с ВОС и ВВО выше, чем с ВОК, по причине высокого стандартного отклонения ВОС и ВВО в наборе данных.

5. Модели прогнозирования на основе МЛР дают хорошие результаты для прогнозирования ЗК и ЗП, но они не показывают такие же показатели для прогнозирования ВОК, ВОС, и ВВО. Это связано с нелинейными характеристиками ВОК, ВОС, и ВВО.

6. Так как в ОРНС нет этапов обучения, модель на основе ОРНС дает результаты гораздо быстрее, чем модели прогнозирования на основе МИНСПР и на основе ОВР.

7. Модели прогнозирования на основе МИНСПР дает низкий показатель SEE для прогнозирования ЗП, где SEE меняет значения от 0,0125 до 0,0143.

8. Модели прогнозирования на основе МИНСПР дают самый высокий показатель SEE для прогнозирования ВОС, где SEE меняет значения от 14,2463 до 22,3406.

9. Модели МЛР и ОВР-L показывают аналогичные показатели для прогнозирования.

10. Значения R для прогнозирования ВОК, ЗК, ВОС, ЗП, и ВВО стремятся к 1 для всех итераций.

11. Время обучения для моделей на основе МИНСПР намного ниже, чем для моделей на основе ОВР, приведены в табл. 10-12.

12. Этапы обучения моделей ОВР-РБФ занимают больше времени для составления прогноза сравнения с результатами других моделей в связи с использованием алгоритма поиска сетки.

13. Время выполнения для моделей прогнозирования ОВР-РБФ и ОВР-L изменяется от 5 до 6 с, а время выполнения для моделей МИНСПР, ОРНС, и МЛР стремится к нулю.

14. Для всех моделей МИНСПР были достигнуты глобальные минимумы.

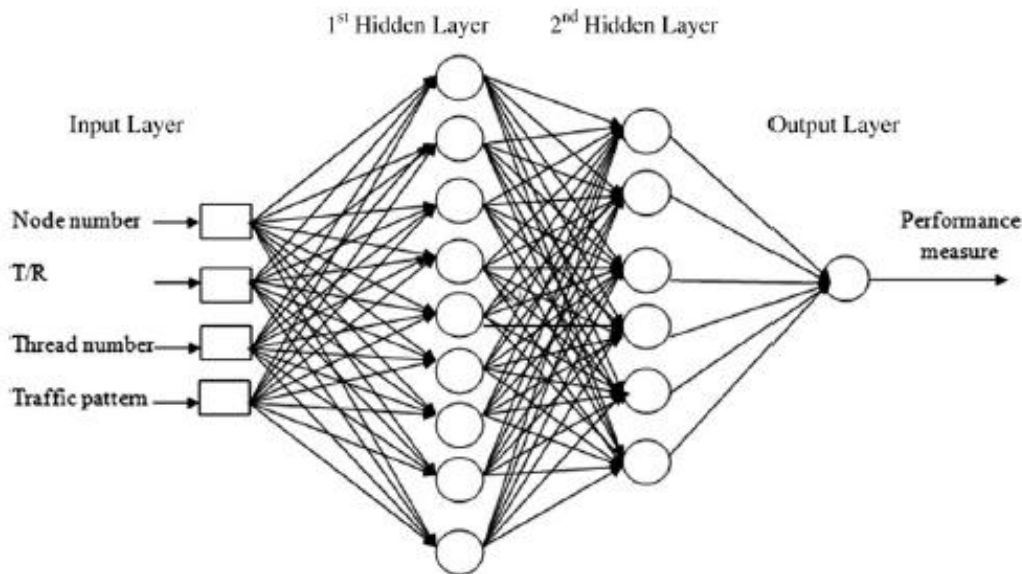


Рис. 3. Модель МИНСПР для прогнозирования показателей эффективности

Таблица 2

Значения R и SEE моделей МИНСПР, ОРНС, МЛР, ОВР-L и ОВР-РБФ путем десятикратной кросс-проверки

| Показатели эффективности | R | | | | | SEE | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|
| | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ |
| ВОК | 0.9956 | 0.9009 | 0.7719 | 0.7802 | 0.9926 | 2.5401 | 12.2491 | 17.7719 | 19.4299 | 3.5152 |
| ЗК | 0.9992 | 0.9888 | 0.8915 | 0.9911 | 0.9864 | 0.0088 | 0.0314 | 0.0948 | 0.0288 | 0.0573 |
| ВОС | 0.9955 | 0.9927 | 0.7689 | 0.7712 | 0.9893 | 22.3406 | 28.0563 | 151.3559 | 153.5735 | 35.1874 |
| ЗП | 0.9993 | 0.9988 | 0.9568 | 0.9566 | 0.9883 | 0.0106 | 0.0143 | 0.0834 | 0.085 | 0.0566 |
| ВВО | 0.9737 | 0.9554 | 0.8225 | 0.8251 | 0.9572 | 20.7994 | 27.6846 | 53.1487 | 53.6145 | 27.4746 |

Таблица 3

Значения R и SEE моделей МИНСПР, ОРНС, МЛР, ОВР-L и ОВР-РБФ путем 20-кратной кросс-проверки

| Показатели эффективности | R | | | | | SEE | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ |
| ВОК | 0.9961 | 0.9107 | 0.7449 | 0.7794 | 0.9925 | 2.3610 | 11.3501 | 17.4882 | 20.9333 | 3.5404 |
| ЗК | 0.9992 | 0.9924 | 0.8869 | 0.9926 | 0.987 | 0.0081 | 0.0243 | 0.0941 | 0.0261 | 0.0571 |
| ВОС | 0.9964 | 0.9934 | 0.76 | 0.7688 | 0.9899 | 19.9550 | 26.4159 | 151.9981 | 155.632 | 34.2684 |
| ЗП | 0.9994 | 0.9988 | 0.9548 | 0.9566 | 0.9883 | 0.0100 | 0.0134 | 0.0827 | 0.0851 | 0.0566 |
| ВВО | 0.9757 | 0.958 | 0.8106 | 82.76 | 0.9609 | 19.5336 | 25.3917 | 53.4062 | 53.1712 | 26.234 |

Таблица 4

Значения R и SEE моделей МИНСПР, ОРНС, МЛР, ОВР-L и ОВР-РБФ путем 30-кратной кросс-проверки

| Показатели эффективности | R | | | | | SEE | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|
| | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ |
| ВОК | 0.9973 | 0.9191 | 0.7556 | 0.7781 | 0.9925 | 1.9756 | 10.4803 | 17.2198 | 20.9609 | 3.5278 |
| ЗК | 0.9994 | 0.9938 | 0.8827 | 0.9931 | 0.9866 | 0.0074 | 0.0223 | 0.094 | 0.0252 | 0.0572 |
| ВОС | 0.9966 | 0.9933 | 0.7578 | 0.7685 | 0.9895 | 19.2222 | 25.9292 | 150.9108 | 155.6577 | 34.7925 |
| ЗП | 0.9994 | 0.9988 | 0.9493 | 0.9567 | 0.9884 | 0.0092 | 0.013 | 0.0831 | 0.0849 | 0.0566 |
| ВВО | 0.9792 | 0.957 | 0.7959 | 0.8279 | 0.96 | 17.7565 | 24.4516 | 52.6166 | 53.1414 | 26.5457 |

Таблица 5

Значения R и SEE моделей МИНСПР, ОРНС, МЛР, ОВР-L и ОВР-РБФ путем 40-кратной кросс-проверки

| Показатели эффективности | R | | | | | SEE | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|
| | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ |
| ВОК | 0.9975 | 0.9264 | 0.7074 | 0.779 | 0.992 | 1.7644 | 9.7633 | 17.0384 | 20.9565 | 3.659 |
| ЗК | 0.9994 | 0.9927 | 0.8713 | 0.8977 | 0.9869 | 0.0068 | 0.0236 | 0.0939 | 0.0941 | 0.0572 |
| ВОС | 0.9969 | 0.9923 | 0.7462 | 0.7692 | 0.9896 | 18.3303 | 26.5084 | 150.6976 | 155.4807 | 34.556 |
| ЗП | 0.9995 | 0.9988 | 0.9515 | 0.9566 | 0.9884 | 0.0090 | 0.0132 | 0.0812 | 0.0851 | 0.0565 |
| ВВО | 0.9811 | 0.9531 | 0.7977 | 0.8279 | 0.9611 | 16.1882 | 23.3667 | 52.8934 | 53.1395 | 26.2092 |

Таблица 6

Значения R и SEE моделей МИНСПР, ОРНС, МЛР, ОВР-L и ОВР-РБФ путем 50-кратной кросс-проверки

| Показатели эффективности | R | | | | | SEE | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|
| | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ |
| ВОК | 0.9973 | 0.9234 | 0.68 | 0.7788 | 0.9924 | 1.5529 | 9.3122 | 17.131 | 20.9541 | 3.5811 |
| ЗК | 0.9995 | 0.9922 | 0.8615 | 0.8976 | 0.9869 | 0.0064 | 0.0225 | 0.0931 | 0.0942 | 0.0573 |
| ВОС | 0.9974 | 0.9923 | 0.7191 | 0.7688 | 0.9896 | 16.6480 | 26.3149 | 150.6653 | 155.5459 | 34.7366 |
| ЗП | 0.9995 | 0.9987 | 0.9429 | 0.9571 | 0.9885 | 0.0083 | 0.0128 | 0.0822 | 0.0852 | 0.0564 |
| ВВО | 0.9836 | 0.9531 | 0.7929 | 0.8279 | 0.9609 | 14.5471 | 23.4087 | 51.7876 | 53.1319 | 26.249 |

Таблица 7

Значения R и SEE моделей МИНСПР, ОРНС, МЛР, ОВР-L и ОВР-РБФ путем 60-кратной кросс-проверки

| Показатели эффективности | R | | | | | SEE | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|
| | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ |
| ВОК | 0.9995 | 0.9264 | 0.6057 | 0.7791 | 0.9927 | 1.4062 | 9.4494 | 16.313 | 20.9487 | 3.4927 |
| ЗК | 0.9995 | 0.9934 | 0.8745 | 0.8976 | 0.987 | 0.0061 | 0.0213 | 0.0936 | 0.0941 | 0.0573 |
| ВОС | 0.9974 | 0.9929 | 0.6925 | 0.7686 | 0.99 | 16.3740 | 25.3646 | 148.9668 | 155.6017 | 34.0167 |
| ЗП | 0.9995 | 0.9986 | 0.9406 | 0.9571 | 0.9885 | 0.0076 | 0.0127 | 0.0814 | 0.0852 | 0.0565 |
| ВВО | 0.9851 | 0.9539 | 0.7769 | 0.8281 | 0.9616 | 13.6680 | 22.9766 | 52.0667 | 53.1063 | 26.0344 |

Таблица 8

Значения R и SEE моделей МИНСПР, ОРНС, МЛР, ОВР-L и ОВР-РБФ путем 70-кратной кросс-проверки

| Показатели эффективности | R | | | | | SEE | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|
| | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ |
| ВОК | 0.9981 | 0.9327 | 0.6057 | 0.7788 | 0.9921 | 1.3308 | 8.4841 | 16.313 | 20.9572 | 3.5788 |
| ЗК | 0.9995 | 0.9931 | 0.8214 | 0.8975 | 0.987 | 0.0057 | 0.0212 | 0.0924 | 0.0942 | 0.0571 |
| ВОС | 0.9979 | 0.9918 | 0.7137 | 0.7693 | 0.99 | 14.8896 | 25.5296 | 149.8528 | 155.4193 | 33.9499 |
| ЗП | 0.9995 | 0.9982 | 0.9411 | 0.957 | 0.9885 | 0.0075 | 0.0125 | 0.0806 | 0.0853 | 0.0566 |
| ВВО | 0.9893 | 0.9401 | 0.7298 | 0.8281 | 0.9619 | 12.5396 | 24.2335 | 51.7245 | 53.1109 | 25.9861 |

Таблица 9

Значения R и SEE моделей МИНСПР, ОРНС, МЛР, ОВР-L и ОВР-РБФ путем 80-кратной кросс-проверки

| Показатели эффективности | R | | | | | SEE | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|
| | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ | ИНС | ОРНС | МЛР | ОВР-L | ОВР-РБФ |
| ВОК | 0.9980 | 0.937 | 0.6198 | 0.7791 | 0.992 | 1.1782 | 8.1584 | 16.3505 | 20.9464 | 3.5854 |
| ЗК | 0.9996 | 0.9845 | 0.8578 | 0.9938 | 0.9868 | 0.0054 | 0.0213 | 0.091 | 0.0238 | 0.0573 |
| ВОС | 0.9979 | 0.9915 | 0.6367 | 0.7678 | 0.9894 | 14.2463 | 24.5993 | 147.0421 | 154.4348 | 34.8452 |
| ЗП | 0.9994 | 0.9986 | 0.9103 | 0.894 | 0.9885 | 0.0072 | 0.0127 | 0.0811 | 0.0956 | 0.0565 |
| ВВО | 0.9867 | 0.9357 | 0.757 | 0.8278 | 0.9618 | 11.9345 | 22.8651 | 51.0856 | 53.1457 | 25.9849 |

Таблица 10

Время обучения для моделей МИНСПР для различного числа итераций

| Число итераций | Время обучения (с) | | | | |
|----------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| | ВОК | ЗК | ВОС | ЗП | ВВО |
| 10 | 1.26 | 1.1700 | 1.1800 | 1.1500 | 1.2000 |
| 20 | 1.14 | 1.3200 | 1.1600 | 1.3500 | 1.1900 |
| 30 | 1.28 | 1.1700 | 1.1700 | 1.1700 | 1.2000 |
| 40 | 1.15 | 1.1800 | 1.3600 | 1.1600 | 1.2000 |
| 50 | 1.17 | 1.3400 | 1.2000 | 1.1500 | 1.2000 |
| 60 | 1.15 | 1.17 | 1.35 | 1.18 | 1.18 |
| 70 | 1.16 | 1.32 | 1.37 | 1.2 | 1.4 |
| 80 | 1.17 | 1.41 | 1.38 | 1.39 | 1.17 |

Таблица 11

Время обучения для моделей ОВР-L для различного числа итераций

| Число итераций | Время обучения (с) | | | | |
|----------------|--------------------|-------|--------|-------|--------|
| | ВОК | ЗК | ВОС | ЗП | ВВО |
| 10 | 1,723.46 | 73.95 | 201.17 | 96.53 | 175.22 |
| 20 | 1,579.7 | 75.74 | 202.33 | 98.09 | 176.8 |
| 30 | 1,607.4 | 75.81 | 204.11 | 98.42 | 176.69 |
| 40 | 1,642.06 | 76.13 | 203.56 | 97.97 | 176.31 |
| 50 | 1,692.74 | 75.5 | 203.25 | 98.08 | 176.47 |
| 60 | 1,572.32 | 75.67 | 203.13 | 98.53 | 176.84 |
| 70 | 1,658.4 | 75.88 | 203.77 | 98.8 | 175.58 |
| 80 | 1,760.57 | 75.78 | 203.2 | 98.75 | 176.86 |

Таблица 12

Время обучения для моделей ОВР-РБФ для различного числа итераций

| Число итераций | Время обучения (с) | | | | |
|----------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|
| | ВОК | ЗК | ВОС | ЗП | ВВО |
| 10 | 3,012.15 | 317.77 | 317.03 | 386.12 | 787.800 |
| 20 | 3,012.48 | 317.11 | 315.66 | 386.43 | 786.550 |
| 30 | 3,012.48 | 317.98 | 315.23 | 386.62 | 785.880 |
| 40 | 3,012.59 | 318.73 | 315.27 | 386.52 | 785.750 |
| 50 | 3,012.61 | 318.64 | 315.94 | 386.75 | 786.480 |
| 60 | 3,012.71 | 319.37 | 315.44 | 386.8 | 790.340 |
| 70 | 3,013.78 | 319.87 | 316.95 | 387.97 | 788.560 |
| 80 | 3,017.78 | 319.98 | 315.94 | 388.72 | 784.580 |

7. Заключение

Данная статья предлагает использовать МИНСПР для прогнозирования показателей эффективности передачи сообщений мультипроцессорной архитектуры. Основная идея состоит в сборе показателей эффективности путем прогнозирования производительности системы для большого набора входных параметров. OPNET Modeler используется для статистического моделирования передачи сообщений SOME-Bus архитектуры. Полученный набор данных содержит пять показателей эффективности (ВОС, ВОК, ЗП, ЗК и ВВО). Были разработаны модели МИНСПР с различным числом итераций для прогнозирования этих показателей эффективности. Для разработанных моделей были рассчитаны значения R и SEE. Модель МИНСПР показывает самое низкое значение SEE ЗП и самое высокое значение для прогнозирования ВОС. Показано, что показатели модели МИНСПР лучше, чем у моделей ОРНС, ОВР и МЛР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем / Н.И. Червяков и др. М.: Физматлит, 2003. С. 288.
2. Кулер Д. Параллельная архитектура компьютера: аппаратный / программный подход / Д. Кулер, Дж.П. Сингх, А. Гупта. 4-е изд. Нью-Йорк: Морган Кауфманн, 2009.
3. Акай М.Ф. Прогнозирование показателей эффективности оптической распределенной многопроцессорной общей памяти с помощью опорных векторов регрессии / М.Ф. Акай, И. Абасикелес // Экспертная Система Приложений. 2010. № 37. С. 6293-6630.
4. Заид Е.И.М. Вычисления и оценка показателей эффективности передачи сообщений многопроцессорной архитектуры с использованием искусственных нейронных сетей / Е.И.М. Заид, М.Ф. Акай // Труды 2-й международной конференции по вычислительным наукам и технологиям, ICCST-2, Нидж, Турция (9-11 Июля 2012). С. 76-77.
5. ОПНЕТ Модельер Инк. OPNET Университетская программа, http://www.opnet.com/university_program 2012.
6. Катсинис С. Анализ эффективности одновременной оптической многопроцессорной шины обмена / С. Катсинис // Параллельные Компьютеры. 2009. № 27. С. 1079-1115.

7. Фил Л. Анализ производительности многопроцессорной DSP: поток-ориентированная компонентная модель / Л. Фил, Е. Ванделер, С. Чакраборти // IEEE Журнал обработки сигнала. 2005. № 22. С. 38-46.

8. Фират М. Обобщенные регрессионные нейронные сети и нейронные сети прямого распространения для прогнозирования глубины промоины вокруг опор моста / М. Фират, М. Гунгор // Расширенный инженер-программист. 2009. № 40. С. 731-737.

9. Вапник В.Н. Характер статистической теории обучения / В.Н. Вапник. Нью-Йорк: Спрингер, 2000.

Эрдниева Надежда Сергеевна –
аспирант Северо-Кавказского
Федерального университета

Nadezhda S. Erdnieva –
Postgraduate
North Caucasus Federal University

Статья поступила в редакцию 13.04.13, принята к опубликованию 20.05.13

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 539.42

И.И. Овчинников

МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ЗАМЕДЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ

Рассмотрено построение модели деформирования и замедленного разрушения материалов, подвергающихся низкотемпературному наводороживанию, учитывающей появление наведенной анизотропии и неоднородности механических свойств. Учитывается влияние схемы напряженного состояния как на механические, так и на диффузионные характеристики материалов.

Водород, неоднородность, деградация, длительная прочность, ползучесть, долговечность, водородная коррозия

I.I. Ovchinnikov

THE MODELS FOR DEFORMATION AND DELAYED FRACTURE OF MATERIALS IN HYDROGENOUS ENVIRONMENT

The article presents creation of the model for deformation and delayed fracture of materials exposed to low-temperature hydrogenation, which considers anisotropy emergence and heterogeneity of mechanical properties. The influence of the tension scheme on both the mechanical and diffusive characteristics of materials is taken into consideration.

Hydrogen, heterogeneity, degradation, long-term strength, creep, durability, hydrogen attack

Введение

Водородсодержащая среда является фактором, оказывающим деструктирующее воздействие на материалы и конструкции, причем водород может действовать на конструкции как при высоких температурах и давлениях, так и при нормальных температурах, которые условно называют низкими.

Водород при высоких температурах и давлениях в процессе взаимодействия с материалом конструкций может вызвать так называемую водородную коррозию, при которой происходит обезуглероживание части сечения, приводящее к снижению и кратковременных (предел прочности, модуль упругости, диаграмма деформирования, коэффициент поперечной деформации), и длительных (кривые ползучести, длительной прочности, предел пластичности, предельная деформация) характеристик. В результате в конструкциях изменяется напряженно-деформированное состояние, снижается их долговечность. Обзор экспериментальных данных по влиянию водорода высоких температур приведен в [1]. К настоящему времени разработан ряд моделей деформирования и разрушения конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии, обзор и анализ которых содержится в [2-4].

В отличие от высокотемпературного водорода водород при низких температурах оказывает избирательное воздействие на материал конструкций так, что механические свойства не изменяются в сжатых зонах, но изменяются в растянутых, причем величина изменения зависит и от концентрации водорода, и от схемы напряженного состояния в рассматриваемой точке. При одной и той же схеме напряженного состояния большая концентрация водорода вызывает более сильное изменение механических свойств, а при одной и той же концентрации водорода более жесткая схема напряженного состояния вызывает значительное изменение механических свойств.

Обзор и анализ экспериментальных данных по влиянию низкотемпературного наводороживания на механические характеристики материалов, вызывающего коррозионное растрескивание, приведены в [5-6].

Анализ показывает, что возможны следующие случаи взаимодействия водорода с металлами:

– во время электрохимических процессов при невысоких температурах, когда атомы водорода адсорбируются на поверхности конструкций и поглощаются металлом (по такому механизму происходит наводороживание при травлении, обезжиривании, нанесении гальванических покрытий);

– во время коррозии, когда происходит химическое освобождение водорода, проникающего затем в металл;

– при непосредственном контакте водорода или водородсодержащих сред с металлом, когда водород проникает в металл под собственным давлением (известны многочисленные аварии на нефтепромыслах, связанных с добычей нефти с большим содержанием водорода, которые приводили к огромным материальным затратам, а иногда и человеческим жертвам).

Такое отрицательное воздействие водорода на механические характеристики металлов приводит к необходимости учета этого воздействия при проектировании и расчете конструкций; в результате будет обеспечена безопасная работа конструкций, найдены более эффективные решения для рассматриваемых условий, будет предотвращаться загрязнение окружающей среды.

К настоящему времени разработан ряд моделей для расчета конструкций, подвергающихся наводороживанию.

Б.Ф. Юрайдо [10] предложена методика расчета цилиндрического сосуда с учетом влияния водорода, вида напряженного состояния и температуры на пластичность металла.

В [7] построена модель водородного воздействия, учитывающая влияние водорода на растянутую зону конструкции с зависимостью механических свойств от концентрации водорода. В [8] предложена модель взаимодействия конструкций с водородсодержащей средой с учетом влияния не только знака, но и схемы напряженного состояния на кинетику изменения свойств конструкции при взаимодействии с водородом. А.А. Трещевым [9] предложена теория пластичности материалов, подвергающихся водородному охрупчиванию, приводящему к появлению разносопротивляемости материалов.

Во всех указанных работах предприняты попытки учесть влияние концентрации водорода и схемы напряженного состояния на изменение свойств материалов, но не учтено влияние напряженного состояния на проникание водорода в объем конструкции.

1. Построение модели деформирования и разрушения материалов, подвергающихся наводороживанию

При построении моделей следует учитывать следующие эффекты взаимодействия конструкций с водородом:

– водород проникает в конструкцию по механизму активированной диффузии, причем имеет место диффузия водорода в зоны с преобладанием компонентов растяжения и возможен отсос водорода из зон с преобладанием компонентов сжатия, то есть схема напряженного состояния влияет на кинетику наводороживания;

– проникший в металл водород приводит к снижению его прочности и пластичности в зависимости от концентрации водорода, причем изменение механических свойств зависит от концентрации водорода и не зависит от характера наводороживающей операции;

– вид и уровень напряженного состояния влияют на взаимодействие металла с водородом так, что при преобладании компонентов сжатия металл и после интенсивного наводороживания сохраняет свои свойства, а при преобладании компонентов растяжения прочностные и пластические свойства снижаются, причем с ужесточением схемы напряженного состояния изменения свойств проявляются значительно сильнее.

Для построения моделей деформирования и разрушения конструкций, подвергающихся наводороживанию, используется подход, основанный на рассмотрении системы моделей [11]: модели проникания водорода, модели деформирования материала, модели наступления предельного состояния, модели конструктивного элемента.

1.1. Модель проникания водорода в материал конструкции

Кинетика проникания водорода в конструкцию описывается уравнением диффузии вида

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad} C) \quad (1)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями [12]. Здесь D – коэффициент диффузии, являющийся функцией локальных параметров – концентрации C и температуры T , t – время.

Для учета влияния напряженно-деформированного состояния на водородопроницаемость используются различные подходы.

В [13] процесс диффузии водорода в поле упругих напряжений предложено описывать уравнением

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \left(\frac{DV_H}{RT} \right) \nabla C \nabla \sigma_0 - \left(\frac{DV_H}{RT} \right) C \nabla^2 \sigma_0, \quad (2)$$

где V_H – парциальный молярный объем водорода, $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ – среднее напряжение, R – газовая постоянная. Равновесная концентрация водорода C_δ в поле упругих напряжений σ_0 определяется выражением

$$C_\delta = C_0 \exp \left(\frac{\sigma_0 V_H}{RT} \right), \quad (3)$$

где C_0 – равновесная концентрация водорода при отсутствии поля напряжений.

В (2) последние два члена учитывают направленную диффузию водорода в зоны с преобладанием компонент растяжения ($\sigma_0 > 0$) и отсос водорода из зон с преобладанием компонент сжатия ($\sigma_0 < 0$). К (3) следует присоединить соответствующие начальное и граничные условия.

Другой подход к учету влияния напряженного состояния на проникание водорода заключается в предположении, что коэффициент диффузии водорода D и предельное водородопоглощение C_* являются функциями специального безразмерного параметра:

$$S = \frac{3\sigma_0}{\sigma_U}, \quad (4)$$

характеризующего схему напряженного состояния, σ_U – интенсивность напряжений.

Значения параметра S для некоторых схем напряженного состояния приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Схема напряженного состояния | Двухосное сжатие | Одноосное сжатие | Сдвиг | Одноосное растяжение | Двухосное растяжение |
|------------------------------|------------------|------------------|-------|----------------------|----------------------|
| S | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 |

Выражения для D и C_* принимаются в виде

$$D = D_0 (1 + \alpha S^\beta), \quad (5)$$

$$C_* = C_*^0 (1 + \gamma S^\delta), \quad (6)$$

где D_0 и C_*^0 – значения D и C_* в ненапряженном состоянии, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты.

В этом случае уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\partial \left[\frac{C}{C_*(S)} \right]}{\partial t} = \text{div} \left(D(S) \text{grad} \left[\frac{C}{C_*(S)} \right] \right). \quad (7)$$

1.2. Модель деформирования материала с учетом влияния наводороживания

Для построения модели применим деформационную теорию А.А. Ильюшина, основные гипотезы которой скорректированы для учета влияния водорода:

Гипотеза 1. Шаровой тензор деформаций пропорционален шаровому тензору напряжений, а коэффициент пропорциональности является функцией параметра S и концентрации водорода C :

$$\sigma_0 = K(S, C) 3\varepsilon_0, \quad (8)$$

где ε_0 – средняя деформация, $K(S, C)$ – объемный модуль упругости.

$$K(S, C) = \begin{cases} K_0, & S \leq S_0 \\ K_1(S, C), & S > S_0 \end{cases} \quad (9)$$

$S \leq S_0$ – значение параметра S , соответствующее схеме напряженного состояния с преобладанием компонент сжатия, при которой начинается деградация свойств металла под влиянием водорода.

Гипотеза 2. В каждой точке тела девиатор напряжений прямо пропорционален девиатору деформаций, в скалярной форме записывается так:

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma_0 &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} (\varepsilon_x - \varepsilon_0); & \tau_{xy} &= \frac{\sigma_u}{3\varepsilon_u} \gamma_{xy}, \\ \sigma_x - \sigma_0 &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} (\varepsilon_y - \varepsilon_0); & \tau_{yz} &= \frac{\sigma_u}{3\varepsilon_u} \gamma_{yz}, \\ \sigma_z - \sigma_0 &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} (\varepsilon_z - \varepsilon_0); & \tau_{zx} &= \frac{\sigma_u}{3\varepsilon_u} \gamma_{zx}. \end{aligned} \quad (10)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – компоненты тензора напряжений, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – компоненты тензора деформаций.

Гипотеза 3. Принимается, что интенсивность напряжений σ_u является функцией интенсивности деформаций ε_u , параметра схемы напряженного состояния S и концентрации водорода C :

$$\sigma_u = \varphi(\varepsilon_u, S, C), \quad (13)$$

причем эта функция имеет вид

$$\varphi(\varepsilon_u, S, C) = \begin{cases} \varphi_0(\varepsilon_u); & S \leq S_0 \\ \varphi_1(\varepsilon_u, S, C), & S > S_0 \end{cases}, \quad (14)$$

Очевидно, для определения функций $\varphi_0(\varepsilon_u)$ и $\varphi_1(\varepsilon_u, S, C)$ нужны экспериментальные кривые деформирования металла при разных схемах напряженного состояния S и концентрации водорода C в образцах.

В частном случае можно принять

$$\varphi_1(\varepsilon_u, S, C) = \varphi_0(\varepsilon_u) \cdot y(S, C), \quad (15)$$

где $\varphi_0(\varepsilon_u)$ – функция, аппроксимирующая кривую деформирования материала при $S \leq S_0$, а функция влияния схемы напряженного состояния и концентрации водорода $y(S, C)$ задается в виде

$$y(S, C) = \begin{cases} 1 & \text{при } S \leq S_0 \\ \exp[-kC^a(S - S_0)^b], & \text{при } S > S_0 \end{cases} / \quad (16)$$

Здесь k, a, b – некоторые константы.

Вид функции $y(S, C)$ в форме (16) был предложен в [8] на основе анализа экспериментальных данных по влиянию схемы напряженного состояния и концентрации водорода на механические свойства материалов.

1.3. Модель наступления предельного состояния

Большое внимание задаче построения моделей предельного состояния конструкций в условиях наводороживания уделено А.А. Трещевым [9]. Мы при построении модели предельного состояния будем учитывать тот экспериментально наблюдаемый факт, что материал, находящийся в пластичном состоянии до наводороживания, под влиянием водорода охрупчивается. Для учета этого эффекта введем параметр охрупчивания:

$$\xi(S, C) = \sigma_B(S, C) / \sigma_B^0, \quad (17)$$

представляющий собой отношение предела прочности материала после водородного воздействия $\sigma_B(S, C)$ к исходному пределу прочности σ_B^0 ненаводороженного материала.

При отсутствии водородного воздействия $\sigma_B(S, C) = \sigma_B^0$ и параметр охрупчивания $\xi=1$. При действии водорода на напряженный материал происходит уменьшение $\sigma_B(S, C)$ и параметр ξ уменьшается.

По аналогии с (15) можно принять:

$$\sigma_B(S, C) = \sigma_B^0 \psi(S, C), \quad (18)$$

где $\psi(S, C)$ – функция влияния вида (16).

Условие прочности материала, подвергающегося наводороживанию, примем в форме

$$\sigma_U \xi + (1 - \xi)\sigma_1 \leq \sigma_B^0(S, C), \quad (19)$$

Видно, что при $\xi=1$ условие (19) превращается в условие прочности пластичного материала $\sigma_U \leq \sigma_B^0$, а при водородном охрупчивании по мере уменьшения параметра ξ включается второе слагаемое в условии (19), отражая процесс водородного охрупчивания. Принимая во внимание (17), выражение (19) можно преобразовать к виду

$$\sigma_U + \left(\frac{1}{\xi} - 1\right)\sigma_1 \leq \sigma_B^0, \quad (20)$$

Если, наконец, учесть (18) и (16), то окончательно условие прочности запишется в виде

$$\sigma_U + \begin{cases} \sigma_B^0 & \text{при } S \leq S_0 \\ \{\exp[kC^a(S - S_0)^b] - 1\}\sigma_1 & \text{при } S > S_0 \end{cases} \leq \sigma_B^0 \quad (21)$$

1.4. Модель замедленного разрушения металлов в среде водорода

Под замедленным разрушением конструкций в условиях водородного воздействия будем понимать процесс накопления дисперсных повреждений, кинетика которого определяется схемой напряженного состояния и концентрацией водорода.

При моделировании замедленного разрушения в водороде будем полагать справедливыми следующие гипотезы:

а) влияние водорода на механические свойства металлов одинаково как при кратковременном, так и при длительном нагружении;

б) в случае преобладания компонентов сжатия ($S \leq S_0$) металл сохраняет свои длительные свойства независимо от концентрации водорода;

в) в случае преобладания компонентов растяжения ($S > S_0$) длительные механические свойства под влиянием водорода снижаются, причем степень снижения возрастает с увеличением жесткости схемы напряженного состояния S и концентрации водорода C .

Для описания кинетики замедленного разрушения можно использовать либо подход Л.М. Качанова, основанный на использовании параметра сплошности ψ , либо подход Ю.Н. Работнова, основанный на использовании параметра поврежденности Π , либо подход А.Р. Ржаницына, основанный на использовании понятия мгновенной прочности материала R [14].

Так как в процессе взаимодействия металла конструкций с водородом происходит изменение механических свойств, приводящее к изменению напряженно-деформированного состояния конструкции, для описания замедленного разрушения логично использовать модель накопления повреждений В.В. Москвитина [15], которая пригодна для случаев как стационарного, так и нестационарного напряженного состояния.

Модель В.В. Москвитина применительно к случаю замедленного разрушения металла в водородной среде имеет вид

$$\Pi = \int_0^t (t - T)^m \eta[\sigma_3(\tau), S(\tau), C(\tau)] d\tau, \quad (22)$$

Функция $\eta[\sigma_3, S, C]$ в этом уравнении может быть принята в виде

$$\eta[\sigma_3, S, C] = \frac{m(S, C) + 1}{t_p^{m(S, C) + 1}(\sigma_3)}, \quad (23)$$

причем зависимость времени до разрушения t_p от эквивалентного напряжения (кривая длительной прочности) аппроксимируется следующей функцией:

$$t_p(\sigma_3) = \frac{A(S, C)}{\sigma_3^{b(S, C)}}. \quad (24)$$

Подставляя (23) с учетом (24) в (22), запишем

$$\Pi = \int_0^t \frac{[m(S, C) + 1] \sigma_3^{b(S, C)[m(S, C) + 1]}}{[A(S, C) + 1]^{[m(S, C) + 1]}} (t - T)^{m(S, C)} d\tau, \quad (25)$$

Как видно, влияние водородного воздействия учитывается через зависимость коэффициентов A , b , m от параметра схемы напряженного состояния S и концентрации водорода C .

В случае преобладания компонентов сжатия ($S \leq S_0$) уравнение (25) упрощается и приводится к виду

$$\Pi = \frac{m_0 + 1}{A_0^{m_0 + 1}} \int_0^t \sigma_3^{b_0(m_0 + 1)} (t - T)^{m_0} d\tau, \quad (26)$$

где коэффициенты A_0 , b_0 , m_0 соответствуют металлу в ненаводороженном состоянии.

Выводы:

1. Построенная модель деформирования материалов в водородосодержащей среде учитывает избирательное действие среды на механические характеристики материалов, приводящее к появлению наведенной и изменяющейся анизотропии по мере насыщения материала водородом. Избирательность выражается в зависимости величины наведенной анизотропии не только от концентрации водорода, но и от жесткости схемы напряженного состояния.

2. В предложенной модели учитывается влияние вида и уровня напряженного состояния материала на кинетику проникания в него водородосодержащей среды через зависимость коэффициента диффузии и предельного водородопоглощения от специального параметра, характеризующего схему напряженного состояния.

3. Использование модели накопления повреждений В.В. Москвитина для описания замедленного разрушения позволяет учесть и происходящее из-за влияния водородосодержащей среды перераспределение напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.И. Влияние водородосодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников // Наукоедение: Интернет-журнал. 2012. №4. С.1-28.

2. Бубнов А.А. Моделирование напряженного состояния и разрушения толстостенных трубопроводов в условиях водородной коррозии и неоднородного теплового поля / А.А. Бубнов, С.А. Бубнов, И.И. Овчинников. М.: Горячая линия – Телеком, 2011. 135 с.

3. Бубнов С.А. Исследование разрушения и кинетики обезуглероживания толстостенной трубы в условиях водородной коррозии / С.А. Бубнов, И.И. Овчинников, А.А. Бубнов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та, 2012. №1 (26). С. 1-9.
4. Овчинников И.И. Напряженно-деформированное состояние и долговечность толстостенного трубопровода в условиях воздействия неоднородного теплового поля и водородной коррозии / И.И. Овчинников // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. №4. С. 16-20.
5. Моделирование коррозионного растрескивания оболочечных конструкций / В.В. Кабанин, В.С. Мавзовин, И.И. Овчинников, С.Н. Мавзовина. Саратов: Изд-во СГУ, 2006. 124 с.
6. Овчинников И.И. Исследование поведения оболочечных конструкций, эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание / И.И. Овчинников // Научное ведомство: Интернет-журнал. 2012. № 4. С. 1-30.
7. Кириллова Л.А. О деформировании гибкой круглой пластины из материала, чувствительного к водородному воздействию / Л.А. Кириллова, И.Г. Овчинников; Саратов. политехн. ин-т. Саратов, 1989. Деп. в ВИНТИ 7.02.90. №698-В90.
8. Овчинников И.Г. Модель взаимодействия нагруженных элементов конструкций с водородсодержащей средой и ее приложения / И.Г. Овчинников, А.Б. Рассадка // Прикладные проблемы прочности и устойчивости деформируемых систем в агрессивных средах / Саратов. политехн. ин-т. Саратов, 1989. С. 12-16.
9. Полтавец П.А. К теории пластичности материалов, подверженных водородному охрупчиванию / П.А. Полтавец, А.А. Трещев // Известия вузов. Строительство. 2006. №1 (565). С. 18-23.
10. Юрайдо Б.Ф. К расчету статической несущей способности цилиндрического элемента сосуда, находящегося под внутренним давлением водорода / Б.Ф. Юрайдо // Исследования по механике деформируемых сред. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1982. С. 136-139.
11. Овчинников И.И. Применение теории структурных параметров к моделированию взаимодействия железобетонных элементов конструкций транспортных сооружений с агрессивными средами / И.И. Овчинников, В.Н. Мигунов // Дороги и мосты. М. Росдорнии. 2012. Вып. 27. С. 13-19.
12. Лыков А.В. Теплообмен: справочник / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1978. 479 с.
13. Akhurst K.N. The threshold stress intensity for hydrogen-induced crack growth / K.N. Akhurst, T.I. Baker // J. Met. Trans. 1981. A12. P.1059-1070.
14. Овчинников И.И. Моделирование коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры с использованием теории длительной прочности А.Р. Ржаницына / И.И. Овчинников // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. № 2. С. 19-24.
15. Москвитин В.В. Сопrotивление вязкоупругих материалов (применительно) к зарядам ракетных двигателей на твердом топливе / В.В. Москвитин. М. Наука, 1972. 328 с.

Работа выполнена в рамках работы над грантом РФФИ № 12-01-31130 Мол_а «Нелинейные модели деформирования и методы определения долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и полями».

Овчинников Илья Игоревич –
докторант, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Транспортное строительство»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Ilya I. Ovchinnikov –
Ph. D., Associate Professor
Department Transport Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.04.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 539.42

И.И. Овчинников

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДЛИННОГО ПОЛОГО ЦИЛИНДРА В ВОДОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ДИФФУЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТОРОЙ ЗАВИСЯТ ОТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Рассматривается моделирование поведения длинного полого цилиндра в водородсодержащей среде. При построении методики расчета цилиндра работа конструкции была представлена в виде трех последовательных стадий. Рассмотрены три случая нагружения и воздействия водородсодержащей среды.

Водород, деформирование, деградация, водородсодержащая среда, полый цилиндр, долговечность, водородная коррозия

I.I. Ovchinnikov

SIMULATION OF THE LONG HOLLOW CYLINDER BEHAVIOUR IN THE HYDROGENOUS ENVIRONMENT WITH DIFFUSIVE CHARACTERISTICS DEPENDING ON THE TENSION

The article considers simulation of the long hollow cylinder behavior in the hydrogenous environment. For creating the cylinder calculation method, the performance of the design was presented as three consecutive stages. Three cases of loading and influence of the hydrogenous environment have been presented.

Hydrogen, deformation, degradation, hydrogenous environment, hollow cylinder, durability, hydrogen corrosion

1. Основные уравнения

В [1] приведена модель деформирования материалов в водородсодержащей среде, диффузионные характеристики которой зависят от напряженного состояния.

Рассмотрим применение этой модели к задаче моделирования поведения длинного полого цилиндра (толстостенной трубы) в водородсодержащей среде при осесимметричном воздействии нагрузки и водородсодержащей среды. В этом случае тензоры напряжений и деформаций будут иметь отличные от нуля компоненты $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z, \varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$. Все три деформации сдвига и касательные напряжения будут равны нулю в силу симметрии относительно оси цилиндра и постоянства условий вдоль оси. Соотношения между напряжениями и деформациями имеют вид [1]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1}{\psi} (\sigma_r - \nu (\sigma_\varphi + \sigma_z)), \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{\psi} (\sigma_\varphi - \nu (\sigma_r + \sigma_z)), \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{\psi} (\sigma_z - \nu (\sigma_r + \sigma_\varphi)),\end{aligned}\quad (1)$$

где r, φ, z – радиальная, окружная и продольная координаты, а $\psi(\varepsilon_u, C, S)$ – функция интенсивности деформаций ε_u , концентрации водорода C (в растянутых зонах полого цилиндра), и параметра $S = \sigma_\theta / \sigma_u$, характеризующего жесткость схемы напряженного состояния, σ_θ – среднее напряжение, σ_u – интенсивность напряжений. Функция $\psi(\varepsilon_u, C, S)$ в соответствии с [1] примет вид

$$\psi(\varepsilon_u, C, S) = \begin{cases} A_0 - B_0 \varepsilon_u^{m-1} & \text{при } S < S_0 \\ A_0 - B_0 \theta^{1-m}(C, S) \varepsilon_u^{m-1} & \text{при } S \geq S_0 \end{cases}. \quad (2)$$

Коэффициент поперечной деформации ν также принимается зависящим от ε_u, C и S

$$\nu(\varepsilon_u, C, S) = \begin{cases} \nu_0 & \text{при } S < S_0 \\ \frac{1}{2} - \frac{1-2\nu_0}{\psi_0} \psi(\varepsilon_u, C, S) & \text{при } S \geq S_0 \end{cases}. \quad (3)$$

Функция $\theta(C, S)$ в (2) принимается в виде

$$\theta(C, S) = \begin{cases} 1 & \text{при } S < S_0 \\ \exp(-kC^a (S - S_0)^b) & \text{при } S \geq S_0 \end{cases}, \quad (4)$$

где k, a, b – коэффициенты.

Выражая σ_z через σ_r и σ_φ в третьем уравнении (1) и подставляя в первые два уравнения, найдем

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1-\nu^2}{\psi} \left(\sigma_r - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_\varphi \right) - \nu \varepsilon_z, \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1-\nu^2}{\psi} \left(\sigma_\varphi - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r \right) - \nu \varepsilon_z.\end{aligned}\quad (5)$$

Подставляя выражения для ε_r и ε_φ в уравнения неразрывности деформаций:

$$\frac{d\varepsilon_\varphi}{dr} = (\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi) / r, \quad (6)$$

и учитывая, что согласно уравнению равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0, \quad (7)$$

$$\sigma_\varphi = \sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr}, \quad \frac{d\sigma_\varphi}{dr} = 2 \frac{d\sigma_r}{dr} + r \frac{d^2\sigma_r}{dr^2}. \quad (8)$$

После некоторых преобразований получим следующее нелинейное разрешающее уравнение в напряжениях:

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \lambda \frac{d\sigma_r}{dr} + \eta\sigma_r = F. \quad (9)$$

Коэффициенты λ и η в этом уравнении представляют собой нелинейные функции ψ и v и их производных:

$$\lambda = \frac{3}{r} - \frac{2vv'}{(1-v^2)} - \frac{\psi'}{\psi}, \quad (10)$$

$$\eta = -\left((1-4v)v' + (1-v-2v^2)\psi'/\psi \right) / r(1-v^2).$$

Правая часть F имеет вид

$$F = \psi \varepsilon_z v' / r^2 (1-v^2). \quad (11)$$

Штрих в выражениях (10) и (11) означает дифференцирование по радиусу r .

Продольная деформация ε_z определяется из условия равновесия полого цилиндра в продольном направлении:

$$N = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \sigma_z r dr, \quad (12)$$

откуда, подставляя выражение для σ_z , получим

$$\varepsilon_z = \left(\frac{N}{2\pi} - \int_{r_1}^{r_2} v(\sigma_r + \sigma_\varphi) \right) / \left(\int_{r_1}^{r_2} \psi r dr \right). \quad (13)$$

где r_1 и r_2 – соответственно внутренний и наружный радиусы полого цилиндра.

Если цилиндр загружен внешним и внутренним давлением, как показано на рис. 1а, то граничные условия для дифференциального уравнения (9) запишутся

$$\sigma_r(r=r_1) = -P_1, \quad \sigma_r(r=r_2) = -P_2. \quad (14)$$

Распределение концентрации водорода по толщине полого цилиндра находится из уравнения диффузии, учитывающего влияние напряжений:

$$\frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \frac{V_H}{RT} \left(\frac{\partial C}{\partial r} \cdot \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} \right) - \frac{CV_H}{RT} \left(\frac{\partial^2 \sigma_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} \right), \quad (15)$$

где среднее напряжение σ_0 находится из выражения $\sigma_0 = (\sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_z)/3$, t – время, D – коэффициент диффузии, R – газовая постоянная.

К уравнению (15) следует добавить начальное и граничное условия, учитывающие особенности действия водородсодержащей среды на полый цилиндр.

Если водород действует на внутреннюю и внешнюю поверхности цилиндра (рис. 1б), то граничные и начальные условия будут

$$C(r=r_1) = C(r=r_2) = C_\infty, \quad C(t=0) = C_{нач}. \quad (16)$$

Если водород проникает в полый цилиндр изнутри, а отток с наружной поверхности не учитывается (рис. 1в), то имеем

$$C(r=r_1) = C_\infty, \quad \frac{\partial C}{\partial r}(r=r_2) = 0, \quad C(t=0) = C_{нач}. \quad (17)$$

При действии водорода на внешнюю поверхность цилиндра и отсутствии оттока с внутренней поверхности (рис. 1г) имеем

$$\frac{\partial C}{\partial r}(r = r_1) = 0, \quad C(r = r_2) = C_\infty, \quad C(t = 0) = C_{нач}. \quad (18)$$

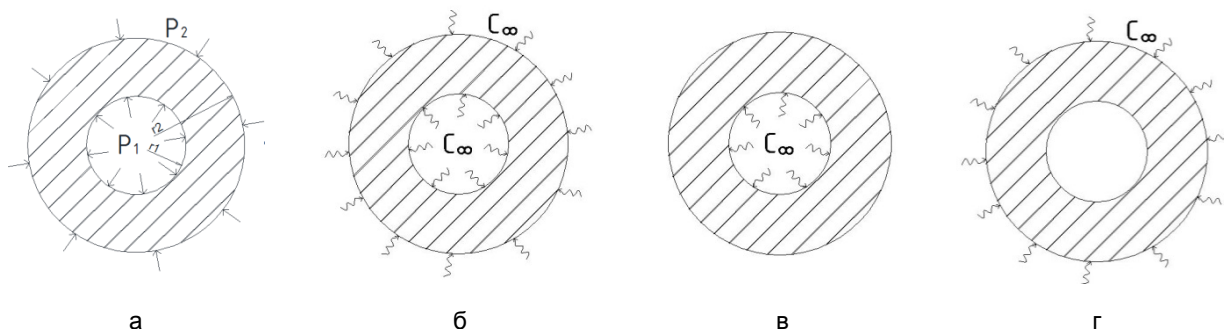


Рис. 1. Варианты воздействия водородсодержащей среды и давления на полый цилиндр

2. Методика расчета полого цилиндра

При построении методики расчета полого цилиндра, подвергающегося совместному действию нагрузки и водородсодержащей среды, программу работы конструкции представим в виде последовательности трех стадий [2]:

- а) стадия силового нагружения;
- б) стадия установления граничных условий на поверхностях контакта с водородсодержащей средой;
- в) стадия деформирования цилиндра вследствие изменения свойств материала под влиянием водородсодержащей среды в соответствии с (2) и (3).

На стадии силового нагружения расчет полого цилиндра сводится к решению однородного дифференциального уравнения вида

$$\frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial r^2} + \lambda \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \eta \sigma_r = 0, \quad (19)$$

с граничными условиями (14).

Коэффициенты λ и η определяются для исходных характеристик материала.

Для решения нелинейной части задачи (19), (14) используется методика последовательных приближений, причем в качестве нулевого приближения можно брать решение линейно-упругой задачи для полого цилиндра (задача Ламе), которое имеет вид

$$\sigma_r^o = I + J/r^2, \quad \sigma_\phi^o = I - J/r^2, \quad (20)$$

где

$$I = (P_1 r_1^2 + P_2 r_2^2) / (r_2^2 - r_1^2), \quad J = (P_2 - P_1) r_1^2 r_2^2 / (r_2^2 - r_1^2). \quad (21)$$

Для решения краевой части задачи (19), (14) используется метод прогонки, причем для нахождения производных применяется формула Лагранжа, а интегралы в выражениях для λ и η находятся по формуле Симпсона 4 порядка.

На следующей стадии установления граничных условий принималось, что нужная концентрация водорода на поверхностях полого цилиндра устанавливалась не сразу, а в течение определенного времени t_2 , задаваемого выражением

$$t_2 = \Delta r / 4D. \quad (22)$$

Соответствующее распределение механических параметров (и, соответственно, коэффициентов λ , η и правой части F уравнения (9)) находилось по концентрационному полю водородсодержащей среды, соответствующему времени t_2 .

Третья стадия посвящена изучению процесса деформирования полого цилиндра, вызванного воздействием водородсодержащей среды. Задача решается шагами по времени. Сначала методом сеток решается уравнение диффузии (15) с соответствующими начальными и граничными условиями с учетом закона распределения среднего напряжения σ_0 по толщине полого цилиндра. По найденному распределению концентрации водорода C и с учетом жесткости схемы напряженного состояния S по формулам (10), (11) в узлах сетки находятся значения коэффициентов λ и η и правой части F уравне-

ния (9), которое затем решается методом прогонки. Затем задается следующий шаг по времени Δt и процесс расчета повторяется. Задача решается шагами по времени до тех пор, пока не будет выполнено условие разрушения в какой-либо точке полого цилиндра.

Для того чтобы оценить достоверность получаемого решения, рассматривался тестовый пример расчета полого цилиндра из нелинейного материала с диаграммой деформирования $\sigma = A\varepsilon - B\varepsilon^m$, где $A = 3 \cdot 10^4$ МПа, $B = 2 \cdot 10^5$ МПа, $m = 1,5$. В расчетах принималось $P_1=0$, $P_2=30$ МПа, $r_1=30$ см, $r_2=50$ см, $\nu=0,2$.

Результаты расчета приведены на рис. 2 пунктиром. Там же сплошной линией показаны результаты расчета из [3]. Некоторое отличие в эпюрах напряжений объясняется использованием авторами [3] гипотезы о несжимаемости материала ($\nu=0,5$), а в наших расчетах принималось $\nu=0,2$. Расчет при $\nu=0,5$ приводит к полной идентичности результатов.

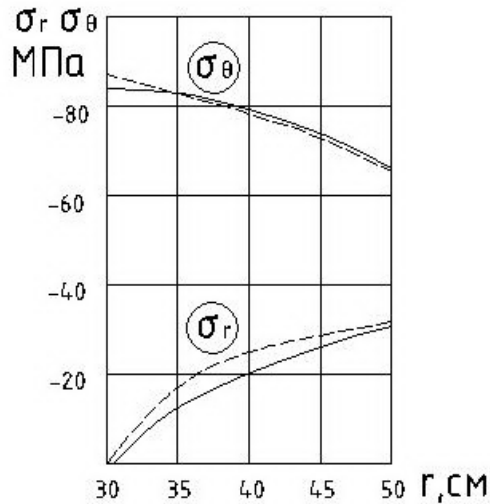


Рис. 2. Результаты расчета полого цилиндра

С целью оценки влияния размера конечно разностной сетки (по радиусу полого цилиндра) на результаты расчета проводился тестовый расчет для цилиндра из материала с характеристиками $A = 2850$ МПа, $B = 22,1$ КПа, $m = 3$. В расчетах принималось $P_1=20$ МПа, $P_2=0$, $r_1/r_2=0,5$. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Количество узлов сетки | Значения величин | |
|------------------------|------------------|---------------------|
| | σ_r/P_1 | $\varepsilon_r, \%$ |
| 11 | 2,1458 | 0,2255 |
| 21 | 2,1437 | 0,2218 |
| 41 | 2,1570 | 0,2241 |
| 81 | 2,1466 | 0,2220 |
| 161 | 2,1380 | 0,2225 |

В дальнейшем расчеты выполнялись на сетке с 81 узлом.

3. Анализ влияния напряженного состояния на водородопроницаемость полого цилиндра

Для оценки влияния напряженного состояния на кинетику диффузии водорода в цилиндр расчет производился сначала без учета влияния напряженного состояния на кинетику диффузии, а затем с учетом влияния. Исследования проводились для трех случаев нагружения и воздействия водородосодержащей среды:

- 1) нагрузка P_1 и водородосодержащая среда действуют на внутреннюю поверхность полого цилиндра;
- 2) нагрузка действует на внешнюю поверхность цилиндра, а водород – на внутреннюю поверхность;
- 3) нагрузка действует на внутреннюю поверхность цилиндра, а водород – на внешнюю поверхность.

Давление во всех расчетах принималось $P_1=P_2=20$ МПа, размер цилиндра $r_1=5$ см, $r_2=10$ см.

На рис. 3 приведены эпюры концентрации водорода по радиусу цилиндра для случая 1 при отсутствии влияния напряжений на кинетику диффузии (пунктир) и при учете этого влияния (сплошная линия).

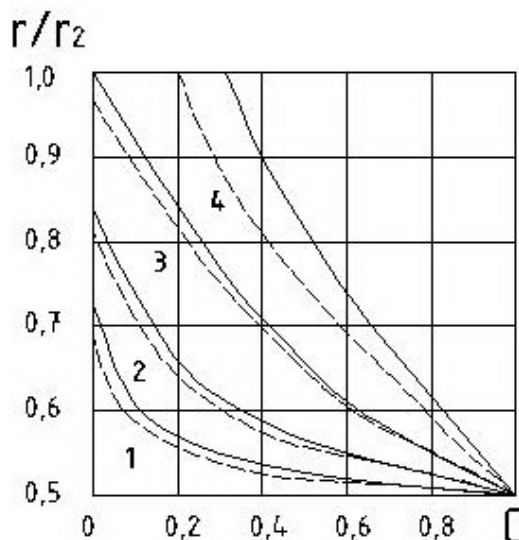


Рис. 3. Эпюры концентрации водорода по радиусу цилиндра для случая 1 (1 – $t=0,076$; 2 – $t=0,15$; 3 – $t=0,31$; 4 – $t=t_p=1$)

Анализ показывает, что напряженное состояние оказывает интенсифицирующее влияние на водородонасыщаемость стенки цилиндра, причем с увеличением времени влияния напряжений увеличивается и увеличение достигает 34%.

Влияние напряжений на кинетику водородонасыщения для случая 2 показано на рис. 4.

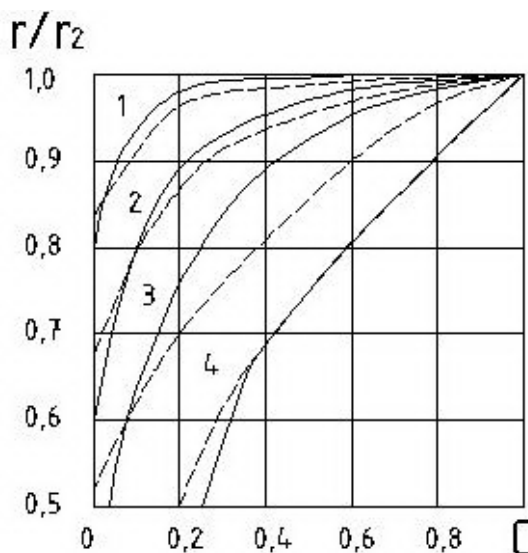


Рис. 4. Эпюры концентрации водорода по радиусу цилиндра для случая 2 (пунктир – без учета влияния напряжений, сплошная линия – с учетом).

Цифры у кривых соответствуют рис. 3

В данном случае имеет место тормозящее влияние напряжений на водородонасыщаемость стенок цилиндра, так как нагрузка вызывает появление сжимающих напряжений. Наибольшее отличие в эпюрах концентрации водорода составляет 29% при $t_3/t_p=0,31$.

Рис. 5 иллюстрирует влияние напряженного состояния на кинетику диффузии водорода для 3 случая, когда нагрузка действует изнутри, а водород – снаружи.

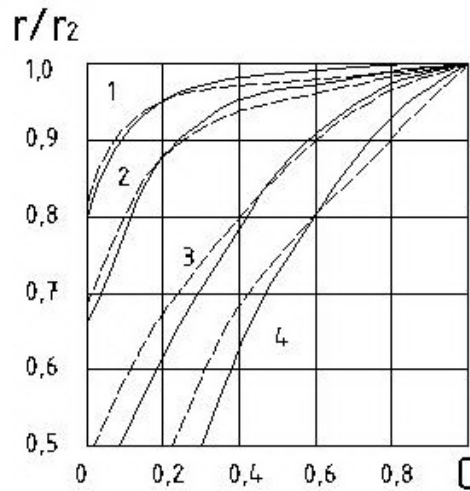


Рис. 5. Эпюры концентрации водорода по радиусу цилиндра для случая 3. Обозначения соответствуют рис. 3

Как видно, в отдельных точках цилиндра отличия в величине концентрации водорода может достигать 50% (при $t_2=0,15$), а при разрушении $t_2=t_p$ достигает 26%.

Проведенный анализ позволяет заключить, что учитывать влияние напряженного состояния на водородопроницаемость конструкций необходимо как при действии сжимающих напряжений (рис. 4), так и при преобладании растягивающих напряжений (рис. 3 и 5).

4. Анализ влияния схемы нагружения на характер напряженного состояния полого цилиндра при действии нагрузки и наводороживании

Для оценки влияния жесткости схемы напряженного состояния, характеризуемой параметром S , использовались приведенные выше уравнения, учитывающие взаимное влияние и водородсодержащей среды на механические характеристики материала, а следовательно, и на напряженно-деформированное состояние цилиндра, и напряженного состояния на кинетику диффузии водорода в стенке цилиндра. То есть рассматриваемая задача относится к связанным задачам нелинейного деформирования.

Рассматривались те же случаи нагружения и воздействия агрессивной среды.

Для случая 1 (нагрузка и водород действуют изнутри) результаты расчета в виде эпюр концентрации водорода C и окружного напряжения σ_φ приведены на рис. 6. Видно, что в зоне около внутренней поверхности полого цилиндра, на которую действуют и нагрузки и водород, происходит перестройка полей напряжений, сводящаяся к тому, что более наводороженные зоны разгружаются, а менее наводороженные – догружаются.

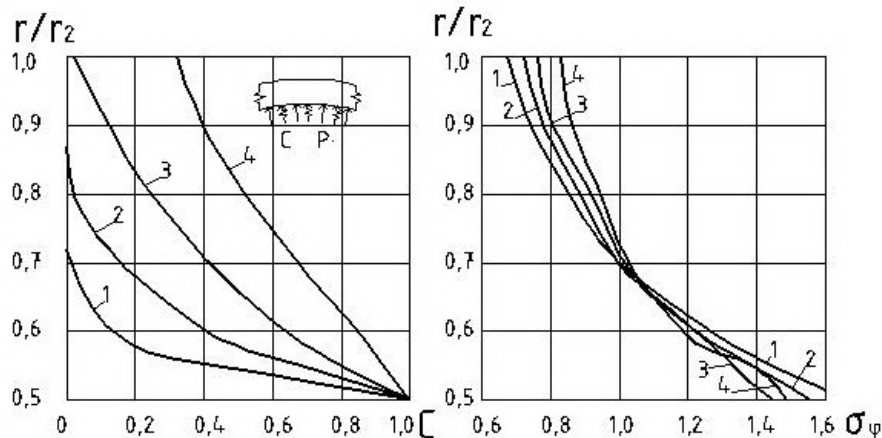


Рис. 6. Эпюры концентрации водорода и напряжений σ_φ в разные моменты времени. Цифры на кривых соответствуют обозначениям на рис. 3

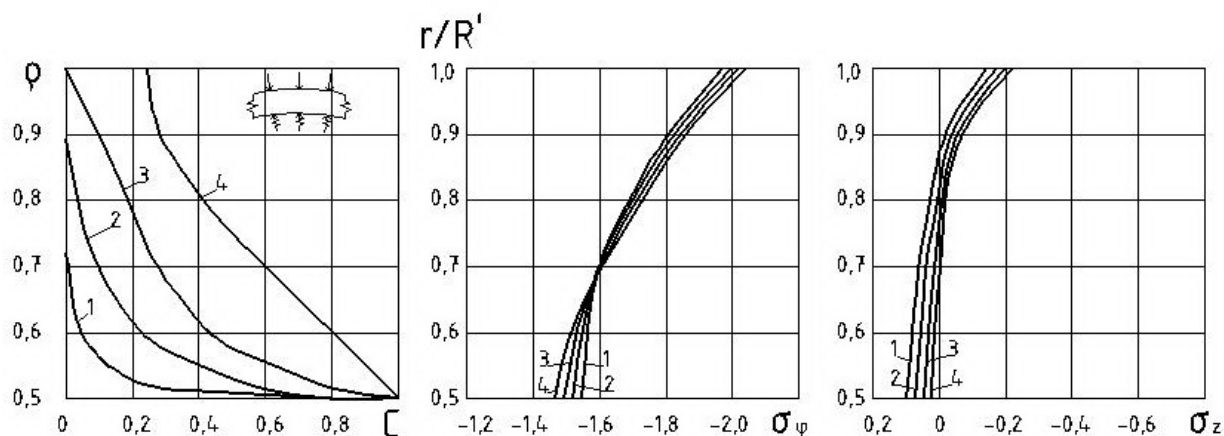


Рис. 7. Эпюры концентрации водорода C , окружных σ_ϕ и продольных напряжений σ_z в цилиндре для случая 2 в различные моменты времени, соответствующие рис. 3

На рис. 7 приведены эпюры концентрации водорода C , окружных напряжений σ_ϕ и продольных напряжений σ_z для случая 2 (нагрузка снаружи, водород изнутри). Как видно, в этом случае изменение напряженного состояния менее значительное, что объясняется тем, что стенки цилиндра находятся в сжатом состоянии, и потому изменение механических характеристик незначительное.

Наконец, рис. 8 иллюстрирует характер распределения концентрации водорода C , окружных напряжений σ_ϕ по толщине стенки полого цилиндра для случая 3 (нагрузка изнутри, водород снаружи). Как видно, под действием растягивающих напряжений и водородсодержащей среды происходит изменение механических свойств материала, приводящее к изменению характера распределения напряжений, причем наибольшие изменения напряженного состояния происходят во внутренних зонах стенки цилиндра и величины этих изменений достигают 18%.

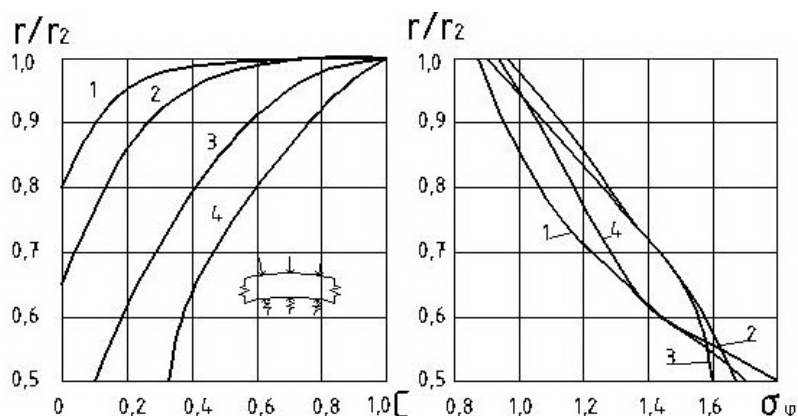


Рис. 8. Эпюры концентрации водорода и напряжений σ_ϕ для случая 3. Обозначения соответствуют рис. 3

Выводы:

1. Проведенный анализ показывает, что приведенные соотношения достаточно корректно описывают поведение полого цилиндра в условиях совместного действия нагрузки и наводороживания с учетом деструкционного действия водорода и позволяют учесть основные эффекты, сопровождающие взаимодействие полого цилиндра с водородом.

2. Предложенная методика и алгоритм расчета позволяют провести корректный анализ кинетики изменения наводороживания и напряженного состояния полого цилиндра с учетом связанности решаемой задачи, то есть совместного влияния водорода на механические свойства материала и далее на напряженное состояние цилиндра и влияния напряженного состояния на кинетику диффузии водорода в стенки полого цилиндра.

3. Проведенное численное моделирование показало, что из рассмотренных случаев нагружения и воздействия водорода наиболее опасным является случай одновременного действия и нагрузки и водорода на внутреннюю поверхность стенки полого цилиндра, ибо в этом случае сочетание дейст-

вия растягивающих напряжений и водорода приводит к наиболее интенсивной деградации материала цилиндра. Следует заметить, что такой случай воздействия нагрузки и водородсодержащей среды наиболее характерен для реальных условий эксплуатации полых толстостенных цилиндров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.И. Деформирование и разрушение материалов в водородсодержащей среде, диффузионные характеристики которой зависят от напряженного состояния / И.И. Овчинников // Наукоедение: Интернет-журнал. 2013. Вып. 1(14) [Электронный ресурс]. С. 1-8.
2. Овчинников И.И. Исследование влияния жидкометаллической среды на поведение толстостенного трубопровода. Методика и результаты расчета / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников // Наукоедение: Интернет-журнал. 2012. Вып. №4 [Электронный ресурс]. С. 1-10.
3. Андреев В.И. Расчет толстостенной трубы из нелинейно-упругого материала / В.И. Андреев, Ю.Н. Малашкин // Строительная механика и расчет сооружений. 1983 № 6. С. 70-72.

Работа выполнена в рамках работы над грантом РФФИ № 12-01-31130Мол_а «Нелинейные модели деформирования и методы определения долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и полями».

Овчинников Илья Игоревич –
докторант, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Транспортное строительство»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Цыа I. Ovchinnikov –
Ph. D., Associate Professor
Department Transport Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.04.13, принята к опубликованию 20.05.13

ТРАНСПОРТ

УДК 629.113.012

И.И. Любимов, Ю.А. Буйлов

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ УВОДА КОЛЕС АВТОМОБИЛЯ С ЖЕСТКОСТЬЮ ПОДВЕСКИ

Исследуется влияние на увод колес жесткости подвески, а также угла поворота управляемых колес и скорости установившегося движения автомобиля в повороте. Показано, что при сохранении неизменной жесткости задней подвески увеличение жесткости передней подвески увеличивает склонность автомобиля к недостаточной поворачиваемости; установлена связь увода колес с углом поворота управляемых колес и скоростью установившегося движения автомобиля в повороте.

Увод колес, управляемость, поворачиваемость автомобиля, жесткость подвески

I.I. Lyubimov, Yu.A. Buylov

A RESEARCH ON THE CONNECTION OF THE AUTOMOBILE WHEEL SLIP WITH RIGIDITY IN THE SUSPENSION BRACKET

The article presents the research on the influence of the suspension bracket rigidity on the wheel slip, as well as the wheel turning angle and the speed of the automobile entering the turn. It is shown that if the rigidity in the back suspension bracket remains unchangeable, the increase in the rigidity of the front suspension bracket increases the possibility of the automobile understeering. The relation between the wheel slip and the wheel turning angle, the speed of the established automobile movement entering the turn has been established.

Wheel slip, controllability, turnability of the automobile, rigidity of a suspension bracket

При движении в повороте вследствие бокового увода колес, вызванного действием поперечной составляющей силы инерции и эластичностью шин, траектория автомобиля отклоняется от направления, задаваемого управляемыми колесами. Свойство автомобиля изменять направление движения без поворота управляемых колес – поворачиваемость – зависит от соотношения углов увода колес передней и задней осей. В данной работе с использованием расчетной модели автомобиля, представленной на рис. 1, исследуется влияние на увод колес жесткости упругих элементов подвески.

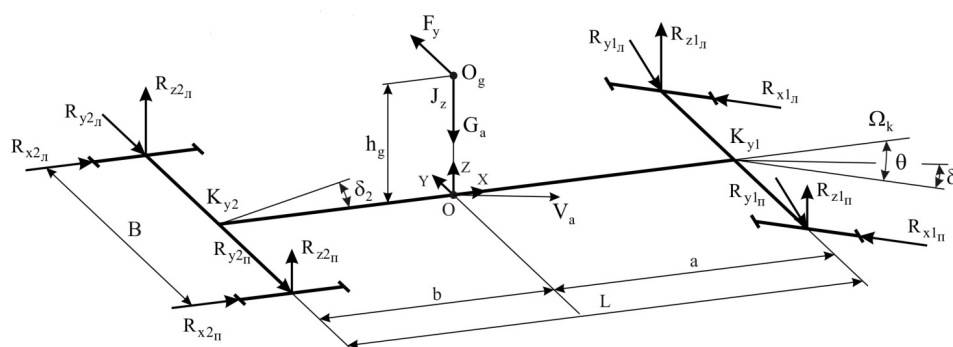


Рис. 1. Схема одномассовой пространственной модели автомобиля

На представленной схеме приняты обозначения: O_g – центр крена поддрессоренной массы автомобиля; B – колесная колея; a и b – расстояния от центра масс до передней и задней осей соответственно; L – база автомобиля; h_g – высота центра масс; G_a – вес поддрессоренных частей автомобиля; J_z – момент инерции автомобиля относительно оси OZ ; F_y – поперечная составляющая силы тяжести поддрессоренных масс автомобиля, действующая на кузов при повороте; V_a – скорость движения центра масс автомобиля; δ_1 и δ_2 – углы увода передней и задней осей; K_{y1} и K_{y2} – коэффициенты сопротивления уводу передних и задних колес; $R_{z1л}, R_{z1п}, R_{z2л}, R_{z2п}$ – вертикальные реакции дороги, действующие на колеса (здесь и далее индексы л и п соответствуют левому и правому колесам, а индексы 1 и 2 – передней и задней осей); $R_{y1л}, R_{y1п}, R_{y2л}, R_{y2п}$ – боковые реакции дороги; $R_{x1л}, R_{x1п}, R_{x2л} = R_{x2п}$ – касательные реакции дороги; θ_{cp} – средний угол поворота управляемых колес; Ω_k – скорость угла поворота управляемых колес.

Движение автомобиля в повороте рассматривалось при упрощающих расчет допущениях [1]: действие на автомобиль боковой силы F_y распределяется между мостами пропорционально жесткостям их подвесок; углы развала управляемых колес равны нулю; кинематический увод колес от их наклона в поперечной плоскости не учитывается; также не учитывается действие весового и скоростного стабилизирующих моментов (продольных и поперечный углы наклона шкворня равны нулю); углы поворота управляемых колес равны между собой ($\theta_{л} = \theta_{п} = \theta_{cp}$); углы бокового увода колес одной оси одинаковы и равны углам увода осей: $\delta_{1л} = \delta_{1п} = \delta_1$ и $\delta_{2л} = \delta_{2п} = \delta_2$; коэффициенты сопротивления уводу колес постоянны и $K_{y1} = K_{y2}$; скорость движения центра масс автомобиля и касательные реакции, действующие на колеса передней и задней осей постоянны. В соответствии с принятыми допущениями качение колес при установившемся движении автомобиля с заданными радиусом поворота и скоростью V_a описывается одностепенными неоднородными дифференциальными уравнениями второго порядка с постоянными коэффициентами m, p :

$$\begin{aligned} \ddot{\delta}_1 + m\delta_1 + p\delta_1 &= q_1; \\ \ddot{\delta}_2 + m\delta_2 + p\delta_2 &= q_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{V_a} \cdot [(K_{y1} + K_{y2}) \cdot \frac{g}{G_a} + \frac{1}{J_z} \cdot (K_{y1} \cdot a^2 + K_{y2} \cdot b^2)]; \quad p = \frac{K_{y2} \cdot b - K_{y1} \cdot a}{J_z} + \frac{K_{y1} \cdot K_{y2}}{G_a \cdot J_z \cdot V_a^2} \cdot g \cdot L^2; \\ q_1 &= \frac{K_{y2} \cdot b}{J_z} \cdot \theta_{cp} + \frac{K_{y2}}{V_a} \cdot \left(\frac{g}{G_a} + \frac{b^2}{J_z} \right) \cdot \Omega_k; \quad q_2 = \frac{K_{y1} \cdot a}{J_z} \cdot \theta_{cp} + \frac{K_{y1}}{V_a} \cdot \left(\frac{g}{G_a} - \frac{a \cdot b}{J_z} \right) \cdot \Omega_k. \end{aligned}$$

Решение каждого из уравнений (1) представляется в виде суммы частного решения $\delta_{ч}$ и общего решения δ_o уравнения без правой части $\delta = \delta_o + \delta_{ч}$. В общем решении используются вещественные корни k_1 и k_2 ($k_1 \neq k_2$) характеристического уравнения

$$k^2 + m \cdot k - p = 0. \quad (2)$$

После подстановки в (2) решений δ_o и $\delta_{ч}$ получаем

$$\begin{aligned} \delta_1 &= c_1 \cdot e^{k_1 \cdot t} + c_2 \cdot e^{k_2 \cdot t} + \alpha_1 \cdot t + \beta_1; \\ \delta_2 &= c_3 \cdot e^{k_1 \cdot t} + c_4 \cdot e^{k_2 \cdot t} + \alpha_2 \cdot t + \beta_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $c_1, c_2, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ – постоянные, определяемые через параметры m, p, q_1 и q_2 . Полные выражения функций δ_1 и δ_2 не приводятся ввиду их громоздкости.

Расчеты выполнены для автомобиля ВАЗ-2123 с параметрами: полная масса автомобиля $M_a = 1631$ кг; масса, приходящаяся на переднюю и заднюю оси соответственно: $M_{a1} = 806$ кг и

$M_{a2} = 825$ кг; момент инерции $J_z = 2200$ Н·с²·м, коэффициенты сопротивления уводу колес $K_{y1} = K_{y2} = 25$ кН/рад; конструктивные параметры автомобиля: $a = 1,09$ м; $b = 1,36$ м; $h_g = 1$ м. При исследовании жесткость передней подвески изменялась от 20 до 100 кН/м, а жесткость задней подвески сохранялась неизменной.

В соответствии с ранее принятым допущением о распределении момента от поперечной составляющей центробежной силы инерции автомобиля между осями пропорциональным жесткостям их подвесок [2], с увеличением жесткости передней подвески момент и часть боковой силы F_y , действующие на передний мост, будут возрастать, следствием чего является увеличение углов увода передних колес δ_1 и уменьшение углов увода задних δ_2 (рис. 2), что улучшает управляемость автомобиля, усиливая склонность его к недостаточной поворачиваемости.

В ходе исследования оценивалось также влияние жесткости подвески на перераспределение нормальных реакций дороги между колесами каждого из мостов, что позволит, используя более полную модель, повысить точность описания процессов, происходящих при движении автомобиля повороте, учитывать, связанное с перераспределением нормальных нагрузок на колеса в поперечной плоскости, изменение коэффициента сопротивления боковому уводу колес, а также изменение боковых реакций дороги, определяющих управляемость автомобиля.

Влияние изменения жесткости передней подвески на перераспределение вертикальных реакций на колесах переднего ΔR_{z1} и заднего ΔR_{z2} мостов, отнесенных к весу автомобиля, в зависимости от угла поворота управляемых колес показано на рис. 3а.

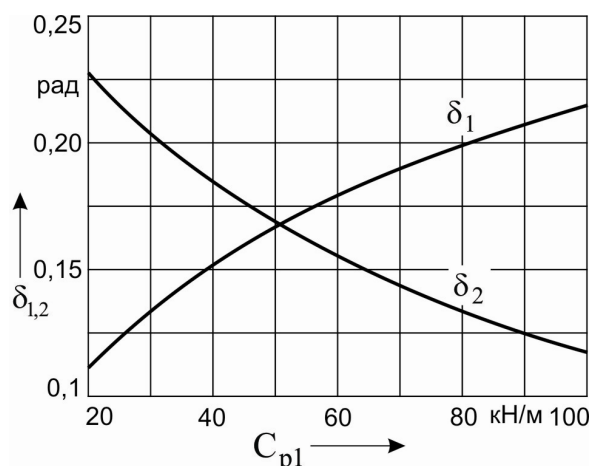


Рис. 2. Влияние жесткости передней подвески на углы увода переднего – δ_1 и заднего – δ_2 мостов при установившемся повороте радиусом 35 м и $V_a = 42$ км/ч

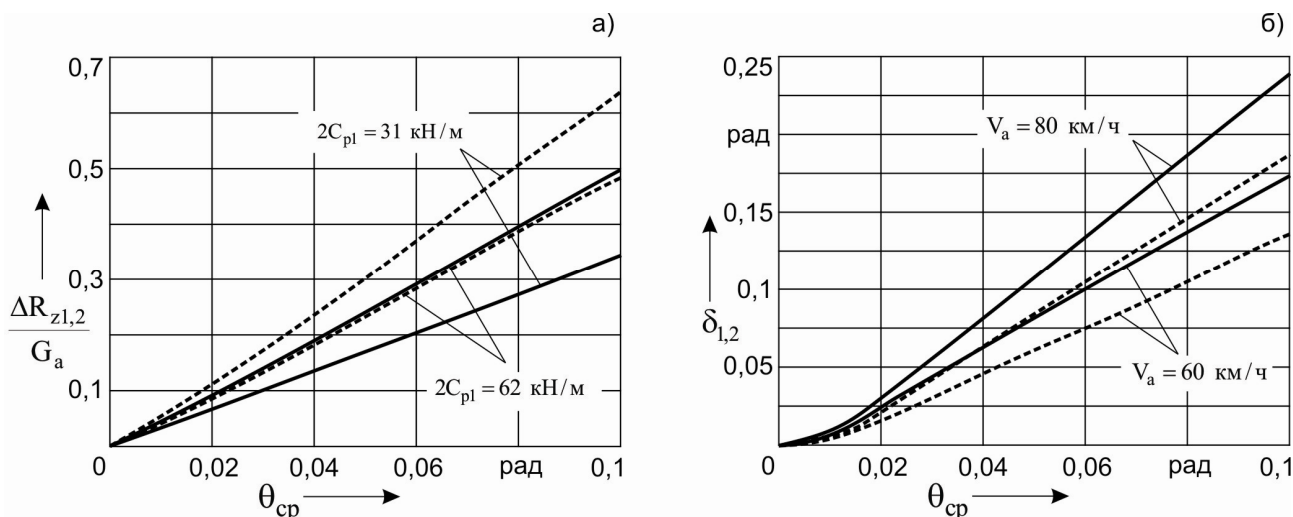


Рис. 3. Влияние угла поворота управляемых колес на: а – перераспределение нормальных реакций на колесах передней (—) и задней (---) осей автомобиля при различной жесткости передней подвески; б – углы увода передней (—) и задней (---) осей при различной скорости установившегося движения автомобиля в повороте

Представленные графики получены при двух значениях жесткости передней подвески 31 кН/м и 62 кН/м с сохранением жесткости задней. Из рассмотрения данного рисунка следует: при допущении, что момент от поперечной составляющей центробежной силы инерции автомобиля распределяется между его мостами пропорционально жесткостям их подвесок, с увеличением жесткости передней подвески величина момента, действующего на передний мост, возрастает и сопровождается

увеличением перераспределения нормальных реакций между колесами с уменьшением величины реакции, действующей на внутреннее по отношению к центру поворота управляемое колесо, что снижает способность его воспринимать боковые нагрузки, повышая тем самым вероятность заноса и снижая безопасную скорость прохождения поворотов.

Углы δ_1 и δ_2 бокового увода зависят от действующих на колеса боковых сил и сопротивления шин действию этих сил. Оба этих фактора зависят как от конструктивных, так и от эксплуатационных факторов. При повороте автомобиля на каждое из колес действует боковая сила, вызванная центробежной силой инерции в результате криволинейного движения центра масс автомобиля. Углы δ_1 и δ_2 пропорциональны боковым силам, которые, в свою очередь, пропорциональны квадрату скорости движения автомобиля и обратно пропорциональны радиусу поворота. С увеличением скорости V_a автомобиля и угла поворота θ_{cp} управляемых колес действующие на колеса боковые силы также увеличиваются, вызывая рост углов увода и передних, и задних колес (рис. 3б). При этом соотношение δ_1/δ_2 , определяющее тип поворачиваемости автомобиля и характеризующее изменение заданной водителем кривизны траектории (вследствие влияния бокового увода колес), изменяется незначительно.

Выводы

Увеличение жесткости передней подвески при сохранении неизменной жесткости задней подвески улучшает управляемость автомобиля вследствие усиления склонности его к недостаточной поворачиваемости. Повышение жесткости передней подвески сопровождается увеличением неравномерности распределения нормальных нагрузок между наружным и внутренним управляемыми колесами с уменьшением способности внутреннего колеса воспринимать боковые нагрузки и необходимостью снижения безопасной скорости прохождения поворотов. Полученные результаты, учитывая принятые упрощения и допущения, носят приближенный характер и могут быть использованы только в предварительных расчетах. Точность может быть существенно повышена при использовании в расчетах более полной трехмассовой модели, позволяющей учитывать влияние на кинематику поворота не только подрессоренных, но и неподрессоренных масс автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. М.: Машиностроение, 1971. 416 с.
2. Литвинов А.С. Шасси автомобиля: конструкция и элементы расчета / А.С. Литвинов, Р.В. Ротенберг, А.К. Фрумкин. М.: Машгиз, 1963. 503 с.

Любимов Иван Иванович –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Автомобили и двигатели» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Ivan I. Lyubimov –
Ph. D., Associate Professor
Department of Automobiles and Engines
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Буйлов Юрий Алексеевич –
инженер
ОАО «ВНИПИГаздобыча», г. Саратов

Yuriy A. Buylov –
Engineer
Institute of Gas Recovery VNIPIgazdobycha

Статья поступила в редакцию 21.04.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 629.113.012

И.И. Любимов, Ю.А. Буйлов

О ВЛИЯНИИ ЗАГРУЖЕННОСТИ АВТОМОБИЛЯ НА КАЧЕСТВО ПОДРЕССОРИВАНИЯ

Приведены результаты аналитического исследования влияния на колебания автомобиля массы подрессоренных частей. Показано, что при нерегулируемой подвеске уменьшение подрессоренной массы сопровождается ухудшением плавно-

сти хода и снижением стабильности контакта колес с дорогой – показателя, характеризующего связанную с безопасностью движения динамическую устойчивость автомобиля.

Подвеска, колебания, резонанс, стабильность контакта колес с дорогой

I.I. Lyubimov, Yu.A. Bujlov

THE IMPACT OF THE AUTOMOBILE LOADING ON THE SPRINGING QUALITY

The article presents the analytical research on the influence of the springing parts weight on the automobile oscillation. It is shown, that if at the noncontrollable suspension bracket, the reduction in the springing weight is accompanied by the ride deterioration and reduction in the stability the contact between the wheels and the road, which is the indicator of the safety and dynamic stability of an automobile.

Suspension, oscillation, resonance, stability contact of wheels with a road

При различной степени загруженности масса поддресоренных частей, приходящаяся на заднюю подвеску грузового автомобиля, может изменяться в широких пределах. Влияние величины поддресоренной массы на плавность хода автомобиля хорошо изучено. При нерегулируемой подвеске уменьшение массы поддресоренной части сопровождается ухудшением плавности хода автомобиля как при периодических, так и при случайных колебаниях [5]. Менее исследовано влияние загруженности на динамическую устойчивость автомобиля, которая, как и плавность хода, характеризует качество поддресоривания. Устойчивость движения автомобиля определяется стабильностью вертикальных, продольных и боковых реакций на колесах. Изменение величины реакций происходит при колебаниях автомобиля, при движении в повороте и торможении. При небольших изменениях реакций обеспечивается большая надежность сцепления шин с дорогой, а, значит возможность быстрого прохождения поворотов, быстрого разгона и торможения. С увеличением изменения реакций ухудшаются не только тяговая, тормозная динамика и управляемость автомобиля, ухудшается также топливная экономичность, повышается нагруженность трансмиссии и двигателя, увеличивается износ шин [6]. Все это говорит о необходимости при оптимизации параметров подвески учитывать ее влияние не только на плавность хода, но и на стабильность силового контакта колес автомобиля с дорогой [4].

Основной целью данной работы была оценка влияния массы поддресоренной части на стабильность контакта колес с дорогой при использовании нерегулируемой подвески. Оценивались также плавность хода и параметры собственных колебаний.

Объектом исследования выбрана задняя подвеска автомобиля ЗиЛ-130. Полагая колебания передней и задней частей автомобиля не связанными между собой, в качестве эквивалентной колебательной системы принята двухмассовая линейная упруго-диссипативная система с численными значениями параметров: поддресоренная масса, приходящаяся на подвеску при полной загрузке автомобиля – $M_p = 5000$ кг, в снаряженном состоянии – 1000 кг; неподдресоренная масса $M_n = 1000$ кг; жесткость упругих элементов подвески $2C_p = 700$ кН/м; радиальная жесткость шин $2C_n = 3200$ кН/м; коэффициент сопротивления амортизаторов $2K_p = 30$ кН·с/м; коэффициент демпфирования колебаний шинами $2K_n = 2$ кН·с/м. Исследовались установившиеся колебания вследствие кинематического возбуждения со стороны дороги, формирующегося при вертикальном смещении неподдресоренной массы в процессе копирования колесом линии микропрофиля. Оценочными параметрами колебаний автомобиля приняты: перемещения и ускорения поддресоренной массы (кузова), перемещения неподдресоренной массы (колес) и стабильность контакта колес с дорогой.

Для принятой к расчету динамической системы уравнения движения поддресоренной и неподдресоренной масс при кинематическом возбуждении колебаний имеют вид

$$\begin{aligned} M_p \cdot \ddot{Z}_p + 2C_p \cdot (Z_p - Z_n) + 2K_p \cdot (\dot{Z}_p - \dot{Z}_n) &= 0; \\ M_n \cdot \ddot{Z}_n - 2C_p \cdot (Z_p - Z_n) - 2K_p \cdot (\dot{Z}_p - \dot{Z}_n) + 2C_n \cdot (Z_n - q) + 2K_n \cdot (\dot{Z}_n - \dot{q}) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где Z_p и Z_n – вертикальные координаты центров подрессоренной и неподрессоренной масс, отсчитываемые от положения статического равновесия; $q = q_0 \cdot \sin \omega t$ – возмущающая функция, характеризующая микропрофиль дороги; q_0 – высота неровности; ω – частота колебаний, связанная с длиной l волны неровности и скоростью V_a автомобиля зависимостью $\omega = 2\pi \cdot V_a / l$.

При исследовании использовался частотный метод анализа с оценкой качества работы подвески по ее амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ), которые дают полное представление об установившихся колебаниях автомобиля при периодическом возмущении и служат основой для расчета случайных колебаний при заданной спектральной плотности дисперсии ординат микропрофиля дороги [2]. АЧХ перемещений и ускорений подрессоренной массы, перемещений неподрессоренной массы и оценочного показателя стабильности колесной нагрузки рассчитывались по их передаточным функциям, а сами передаточные функции находились из решения уравнений движения системы (1) методами операционного исчисления с преобразованиями по Лапласу [1]. В ходе исследования рассчитывались также параметры свободных колебаний системы: собственные частоты ω_p , ω_n и коэффициенты относительного затухания ψ_p , ψ_n колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс, дающие косвенное представление о качестве подрессоривания. Численные значения параметров собственных колебаний находились как корни частотного (характеристического) уравнения, соответствующего дифференциальным уравнениям свободных колебаний системы, точное решение которого приводится в [3].

Изменение собственных частот и коэффициентов затухания в зависимости от массы подрессоренной части показано на рис. 1 и представлено в табл. 1.

Уменьшение величины подрессоренной массы сопровождается возрастанием частоты ω_p и коэффициента затухания собственных колебаний ψ_p . В отличие от подрессоренной, частота собственных колебаний неподрессоренной массы ω_n при уменьшении величины массы M_p снижается, что при неизменной регулировке амортизаторов ($2K_p = \text{const}$) ведет к возрастанию коэффициента затухания высокочастотных колебаний ψ_n . С уменьшением величины подрессоренной массы влияние ее на низкочастотные собственные колебания возрастает в большей степени, чем на высокочастотные.

АЧХ перемещений кузова и колеса при различных значениях массы подрессоренной части приведены на рис. 2. Уменьшение подрессоренной массы смещает область низкочастотного резонанса в сторону больших значений частот с уменьшением амплитуды резонансных колебаний (рис. 2а), что объясняется увеличением частоты и коэффициента затухания собственных колебаний. Небольшой рост амплитуды резонансных колебаний кузова при $M_p = 1$ т вызван усилением влияния колебаний неподрессоренных масс при малых абсолютных значениях M_p вследствие увеличивающегося сближения низкочастотного резонанса с высокочастотным.

При больших абсолютных значениях M_p на частотной характеристике перемещений колеса наблюдаются два выраженных максимума: один при высокочастотном (колесном) резонансе и второй, меньший по величине, – при низкочастотном резонансе, где увеличение перемещений колеса вызвано влиянием на него колебаний подрессоренных масс. При уменьшении массы подрессоренной части низкая собственная частота повышается, а высокая – снижается и сопровождается увеличением амплитуд перемещений колеса при резонансных режимах и особенно значительно в межрезонансной области, где при $M_p = 1$ т перемещения колеса достигают наибольших значений, вследствие значи-

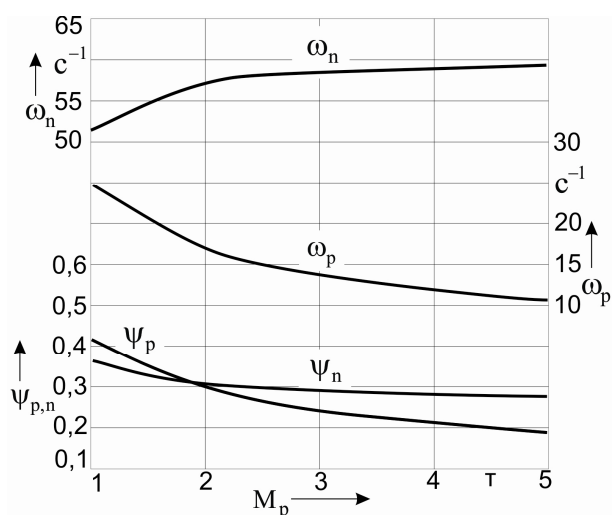


Рис. 1. Влияние массы подрессоренной части на собственные частоты и коэффициенты затухания колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс

тельного сближения при малых абсолютных значениях M_p высокочастотного и низкочастотного резонансов. Уменьшение амплитуды колебаний колеса в зарезонансной области объясняется смещением высокочастотного резонанса при уменьшении массы поддрессоренной части в сторону меньших частот колебаний.

Таблица 1

Частоты и коэффициенты затухания собственных колебаний поддрессоренной и неподдрессоренной масс при различной величине поддрессоренной массы

| M_p , т | ω_p , рад/с | Ψ_p | ω_n , рад/с | Ψ_n |
|--------------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| 1 | 24,7 | 0,41 | 51,4 | 0,36 |
| 2 | 16,9 | 0,29 | 57,0 | 0,31 |
| 3 | 13,8 | 0,24 | 58,3 | 0,29 |
| 4 | 11,9 | 0,21 | 58,9 | 0,28 |
| 5 | 10,7 | 0,19 | 59,2 | 0,28 |

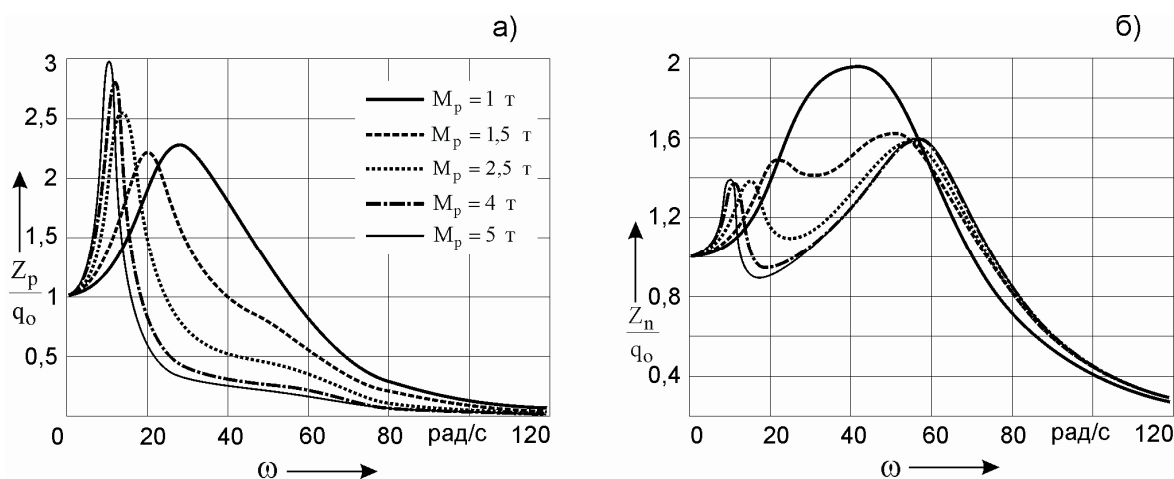


Рис. 2. АЧХ при различной величине поддрессоренной массы: а – перемещений кузова; б – перемещений колеса

Влияние поддрессоренной массы на перемещения колеса показано на рис. 2б.

Влияние массы поддрессоренной части на плавность хода автомобиля представлено на рис. 3а и 3б АЧХ вертикальных ускорений кузова. В диапазоне изменения M_p от 5 до 2,5 т характеристика ускорений имеет два максимума: первый – при низкочастотном резонансе и второй – при высокочастотном резонансе, вызванный влиянием колебаний неподдрессоренной массы на поддрессоренную. При значительно меньшей по величине амплитуде перемещений кузова (см.рис. 2а) высокочастотный максимум ускорений кузова превышает низкочастотный максимум. Это означает, что при линейной зависимости ускорения от перемещения и квадратичной от частоты колебаний, увеличение частоты на величину ускорения кузова здесь влияет больше, чем уменьшение амплитуды перемещения. С уменьшением массы поддрессоренной части ускорения кузова увеличиваются на всех частотах, начиная от области низкочастотного резонанса. Рост ускорений кузова объясняется усилением влияния неподдрессоренных масс на поддрессоренную при кинематическом возбуждении колебаний со стороны дороги вследствие возрастания относительной массы неподдрессоренных частей M_n / M_p . Помимо этого, увеличение ускорений обусловлено смещением всей АЧХ перемещений кузова в сторону более высоких частот колебаний (см. рис. 2а). Низкочастотный максимум ускорений кузова с уменьшением массы поддрессоренной части увеличивается, но проявляется менее заметно и при $M_p=1$ т уже не наблюдается из-за более значительного возрастания ускорений в межрезонансной зоне, обусловленного усилением влияния колебаний неподдрессоренных масс при сближении высокочастотного и низкочастотного резонансов.

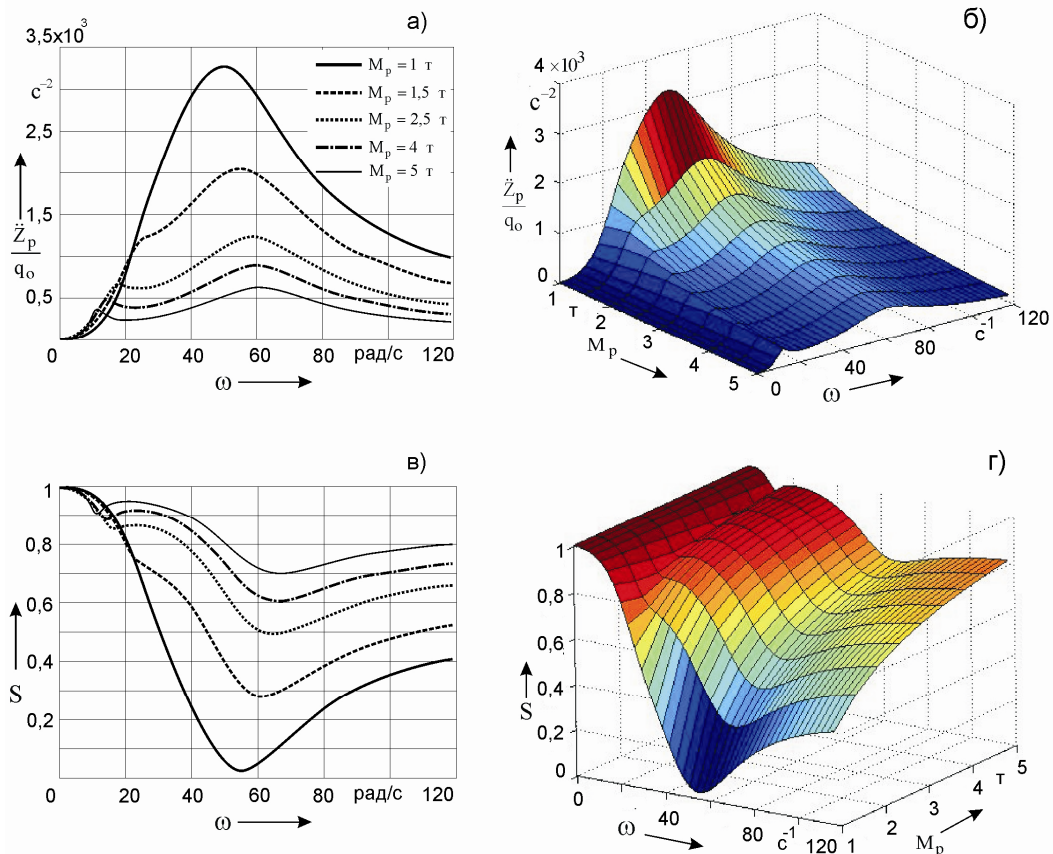


Рис. 3. АЧХ при различной величине подрессоренной массы: а, б – ускорений кузова; в, г – стабильности колесной нагрузки (при $q_0 = 2$ мм)

При колебаниях автомобиля колесная нагрузка на дорогу непрерывно изменяется, совершая колебания относительно среднего значения, соответствующего нагрузке в статическом состоянии. Величину колесной нагрузки образуют: нагрузка G_k от веса подрессоренной и неподрессоренной частей, определяемая загруженностью автомобиля и переменная по величине и направлению нагрузка от сил сопротивления вертикальному перемещению колеса, создаваемая упругими элементами и амортизаторами подвески при изменении ее деформации. Оценочным показателем стабильности колесной нагрузки на дорогу при данной частоте колебаний принята относительная величина

$$S = \frac{N_{\min}}{G_k} = \frac{G_k - \tilde{N}_{\max}}{G_k} = 1 - \frac{\tilde{N}_{\max}}{G_k}. \quad (2)$$

Здесь: N_{\min} – наименьшее при данной частоте колебаний усилие в зоне контакта шины с дорогой; \tilde{N}_{\max} – максимальная при данной частоте колебаний нагрузка от сил упругого и неупругого сопротивлений подвески перемещению колеса при отбое. Величину \tilde{N}_{\max} можно рассчитать по изменению радиальной деформации шины. При линейной зависимости упругого и неупругого сопротивлений шины от деформации и скорости деформации шины

$$\tilde{N}_{\max} = \left| -C_n \cdot (Z_n - q) - K_n \cdot (\dot{Z}_n - \dot{q}) \right|_{\max}. \quad (3)$$

Величина показателя стабильности колесной нагрузки принимает значение $S = 1,0$ – при отсутствии колебаний ($\tilde{N}_{\max} = 0$) и значение $S = 0$ – при интенсивных колебаниях с нарушением силового контакта колеса с дорогой ($\tilde{N}_{\max} = G_k$). Чем больше величина S , тем меньше изменение нагрузки на колесо, что равнозначно улучшению контакта колеса с дорогой. Согласно (2), величина показателя стабильности зависит от переменной и постоянной составляющих колесной нагрузки: значения S уменьшаются при увеличении составляющей \tilde{N}_{\max} и с уменьшением статической нагрузки G_k .

Частотные характеристики показателя стабильности при различной величине подрессоренной массы приведены на рис. 3в и г. При сравнительно больших абсолютных значениях M_p на графиках характе-

ристик $S(\omega)$ наблюдаются два выраженных минимума, расположенные в зонах низкочастотного и высокочастотного резонансов. С уменьшением массы поддресоренной части стабильность контакта снижается на всех частотах, начиная от области низкочастотного резонанса и выше. В зонах резонансных колебаний и в межрезонансной области ухудшение стабильности обусловлено как уменьшением статической нагрузки G_k , так и увеличением переменной составляющей \tilde{N}_{\max} колесной нагрузки, вследствие возрастания амплитуды колебаний колеса. В зарезонансной области при малых абсолютных значениях M_p величина составляющей \tilde{N}_{\max} уменьшается вследствие уменьшения амплитуды перемещения колеса (см. рис. 2б), поэтому в этой частотной области ухудшение стабильности контакта связано только со уменьшением величины действующей на колесо статической нагрузки G_k . При изменении в широких пределах массы поддресоренной части перемещения колеса и связанная с ними колесная нагрузка \tilde{N}_{\max} от сил, создаваемых упругими элементами и амортизаторами, в сравнении с изменением статической нагрузки G_k , изменяется мало, следовательно, с уменьшением загруженности автомобиля снижение стабильности колесной нагрузки на дорогу связано в основном с уменьшением статической нагрузки G_k . Как видим, в межрезонансной области в сравнении с областью низкочастотного резонанса при уменьшении поддресоренной массы величина показателя стабильности контакта снижается заметно быстрее. Это объясняется усилением влияния на амплитуду перемещений колеса в этой зоне колебаний неподдресоренных масс из-за смещения колесного резонанса в сторону меньших частот колебаний вследствие снижения собственной частоты ω_n . С уменьшением массы поддресоренной части это влияние возрастает и низкочастотный минимум на характеристике стабильности проявляется все меньше и при малых абсолютных значениях поддресоренной массы ($M_p = 1$ т) уже не наблюдается.

Выводы

При нерегулируемой подвеске ($2C_p = \text{const}$ и $2K_p = \text{const}$) уменьшение массы поддресоренной части сопровождается ухудшением плавности хода автомобиля и снижением стабильности силового контакта колес с дорогой. Ухудшение плавности хода связано с возрастанием относительной массы неподдресоренных частей M_n / M_p , что при кинематическом возбуждении колебаний со стороны дороги приводит к возрастанию усилий, передаваемых через подвеску от неподдресоренных масс на кузов и ускорений, вызываемых этими усилиями. В отличие от плавности хода ухудшение стабильности контакта колес с дорогой при уменьшении загруженности автомобиля обусловлено, главным образом, снижением статической колесной нагрузки, создаваемой весом поддресоренных частей. С уменьшением массы поддресоренной части влияние величины статической нагрузки на стабильность контакта колес с дорогой возрастает и при малых абсолютных значениях M_p становится определяющим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Любимов И.И. Динамика колесной нагрузки при колебаниях автомобиля / И. И. Любимов // Вестник СГТУ. 2004. № 4 (5). С. 33-38.
2. Любимов И.И. Об аналитическом определении показателей динамики колесной нагрузки транспортных машин при случайных колебаниях / И. И. Любимов, А. М. Сычѳв // Вестник СГТУ. 2005. № 4(9). С. 71-79.
3. Любимов И.И. О расчете собственных колебаний автомобиля / И. И. Любимов // Вестник Саратовского госагроуниверситета. 2005. № 1. С. 42-45.
4. Акопян Р.А. Об оптимизации параметров пневматической подвески автобусов / Р.А. Акопян, П.Н. Гашук, Я.И. Пидгородецкий // Труды ВКЭИ автобуспрома. Львов, 1981. С. 97-111.
5. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля / Р.В. Ротенберг. М.: Машиностроение, 1972. 392 с.
6. Яценко Н.Н. Колебания, прочность и форсированные испытания грузовых автомобилей / Н.Н. Яценко. М.: Машиностроение, 1972. 382 с.

Любимов Иван Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и двигатели» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan I. Lyubimov – Ph. D., Associate Professor
Department of Automobiles and Engines
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Буйлов Юрий Алексеевич – инженер
ОАО «ВНИПИГаздобыча», г. Саратов

Yuri A. Buylov – Engineer
Institute of Gas Recovery VNIPIgazdobycha

Статья поступила в редакцию 21.04.13, принята к опубликованию 20.05.13

ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

УДК 128

С.В. Зеленкина**ПРОБЛЕМА КОНЕЧНОСТИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО БЫТИЯ В УСЛОВИЯХ
ТРАНСФОРМАЦИИ КУЛЬТУРНЫХ ОСНОВАНИЙ ОБЩЕСТВА**

Статья посвящена анализу проблемы конечности человеческого бытия в условиях трансформации культурных оснований общества. Целью исследования данной статьи является анализ границ человеческого бытия, которые фиксируют пребывание субъекта в мире в качестве человека в контексте той или иной культуры.

Человеческое бытие, культурные основания, смерть, постмодернизм

S.V. Zelenkina**ISSUES OF HUMAN EXISTENCE FINITENESS UNDER
THE TRANSFORMATION OF CULTURAL FOUNDATIONS IN SOCIETY**

The article is devoted to the issues of finiteness of the human existence under transformation of the cultural foundations of society. The purpose of the research paper is to analyze the limits of the human existence, which indicate the existence of a subject in the world as a person within a particular culture.

Human existence, cultural foundations, death, postmodernism

Проблема человеческого бытия широко исследуется в философии и гуманитарных науках: например, в социологии ставится проблема качества жизни человека, в экологии определяются условия человеческого существования. Целью исследования данной статьи является анализ границ человеческого бытия, которые фиксируют пребывание субъекта в мире в качестве человека в контексте той или иной культуры.

История философии полна различных концепций сущности человека с различным отношением к человеческому бытию – от его превознесения до полного пренебрежения к нему; от античности, где человек рассматривался как некий микрокосм с предзаданностью своей судьбы и подчиненностью ей, средневековья с его чуждостью мысли о конечности человеческого бытия до эпохи Возрождения с зарождением личности нового типа, осознающей свою независимость от универсума, наделенной свободой выбора, космически не закрепленной.

Если рассмотреть описываемую обычно в истории диалектику бытия и небытия в связи с человеком, то в таком контексте она предстанет как диалектика человеческого бытия и смерти, поскольку это бытие неизбежно конечно. Рефлексия в отношении объективной значимости своей жизни выражается в постановке человеком вопроса о ее смысле, поэтому одной из главных проблем является вопрос ее ценности, что логично – жизнь, не имеющая ценности, не будет иметь и смысла. Осознание смысложизненных предпосылок жизнедеятельности человека тесно переплетается в соотношении проблем жизни, смерти и бессмертия. В процессе рефлексии бытие может пониматься либо как свободное от осознания этой конечности, либо проходящее под знаком ее. Как писал Ю.М. Лотман, начало-конец и смерть неразрывно связаны с возможностью понять жизненную реальность как нечто осмысленное и с того момента, как индивидуальное бытие превращается в бытие сознательное (бытие сознания), противоречие между бесконечностью жизни как таковой и конечностью человеческой жизни из характеристики анонимного процесса превращается в трагическое свойство жизни [1].

Манифестация этого вопроса часто была различной, завися от мировоззренческой ориентации индивида и его времени, но в отношении его наиболее общих принципов существует преемствен-

ность благодаря культуре как типу социальной памяти общества, транслирующей передачу форм восприятия моральных установок людьми, живущими одновременно и связанными определенной социальной организацией. Их взаимодействие происходит не только вербально, но и посредством любых материальных выражений культуры, имеющих значение и служащих, таким образом, средством передачи смысла в виде общности норм, обычаев, передающихся из поколения в поколение и становящихся традицией в различных типах культуры, типах человеческого общества, на определенных этапах его исторического развития. Эти изменения обладают устойчивостью, существуя всегда в отношении к прошлому, через которое есть возможность лучше понять настоящее [2].

Будучи важнейшим компонентом культуры и одним из аспектов проблемы конечности, отношение к смерти получает отражение в коллективном сознании в виде относительно устойчивых значений [3] и, будучи в силу своей универсальности одним из самых устойчивых, на протяжении развития человечества постоянно менялось соответственно сменам парадигм мышления. Это изменение можно проследить, с одной стороны, через развитие всей совокупности ценностных и мировоззренческих установок, а с другой – найти обобщающий и определяющий момент в эволюции коллективных представлений. В этом качестве может рассматриваться вербализация данной темы, манифестирование средствами культуры или, напротив, отрицание ее существования.

В последние годы наблюдается возрастание интереса к данной теме в рамках конференций (например, конференция «Философская танатология: традиции и современность» в рамках Дней философии в Санкт-Петербурге–2012), в научных трудах Варавы В.В, Шенкао М.А., Янкелевича В. и других.

Как и рождение, смерть является естественным биологическим явлением, но тема ее если не закрыта, то кажется таковой по причине замалчивания того, что сопутствует ей экзистенциально. Признавая смерть как существующее явление, люди отказываются обсуждать ее онтологический статус [4], поскольку это равносильно обсуждению небытия, не передаваемому коммуникативно-герменевтическим путем по причине отсутствия носителя данного явления. Но, что касается феномена смерти, то в отличие от небытия смерть можно зафиксировать как явление, а небытие как наличие отсутствия эмпирически зафиксировать невозможно. К тому же признание существования чего-то неизвестного, непонятного, а значит, страшного и к тому же неотвратимого невыгодно для существования человека в настоящем – жизнь в таком случае априори должна приобрести статус бессмысленной. Потому представляются естественными попытки представить уход человека из жизни в не столь трагическом свете в форме мифологических и религиозных идей о переселении души, продолжении существования ее в загробном мире.

Религиозные представления о смерти – это, скорее, представления о ее последствиях: в одних она видится наказанием за грехи, совершенные в земной жизни, в других – освобождением от них. Но с отрицательным или положительным модулем загробная жизнь в любом случае противопоставляется земной, служит ее антиподом с той или иной целью, а все представления о ней мифологичны, так как не существует никаких обоснованных фактов о ее реальности. На загробный мир, в принципе непредставимый, как невозможно представить небытие, переносятся черты все того же бытия, но бытия-наоборот. Будучи своего рода заложником рамок своего познания бытия, человек и небытие наделяет антропоморфическими характеристиками, в данном случае загробную жизнь, что можно наблюдать и в христианстве, и в мусульманстве, и в язычестве.

Бессмертие души – одна из важнейших идей в религии, где обретает смысл борьба со смертью как предустановленным порядком, который невозможно изменить, но которому можно противостоять, обеспечив себе «правильную» загробную жизнь, в том числе путем спасения своей априори грешной души. Например, жизнь христианина – подготовка к вечному посмертному бессмертию, и если человек живёт в согласии с библейскими заповедями, чем более он религиозен, тем больше шансов у него после физической смерти очутиться в раю.

Ни одна из современных религий не обходится без идеи личного бессмертия, однако религиозный догмат о бессмертии не дает ответа на вопрос о том, что такое смерть. В буддизме идея личного бессмертия выступает в форме учения о перевоплощении, согласно которому общественное положение человека есть результат деятельности его души в прошлых перевоплощениях. В христианстве и исламе идея личного бессмертия приобрела вид обещания загробного райского блаженства для праведников и вечных адских мучений для грешников, а понятие греха характерно для модуса обладания. В отношении почти всех религий мира справедливо то, что вечные муки загробной жизни служат для устрашения верующих. В противоположность христианству земная жизнь в исламе расценивается высоко, но это не означает снисходительного отношения к неправедным. Это видно из красноречивого описания ада ирая в Коране.

Принцип воздаяния имеет под собой мировоззренческое значение, основанное на онтологической структуре бытия (в отношении к каждому человеку соответственно его достоинству и заслугам) в качестве возмездия за деяния, совершенные им в земной жизни. Принятие человеком системы ценностей как составляющей культурного контекста означает согласие с ней, потому как даже отторжение ее будет означать принадлежность ей же. Вера в загробную жизнь, с одной стороны, должна снизить страх смерти, но с другой – она замещает его страхом потусторонней кары.

Первая заинтересованность в происхождении жизни и смерти получила свое выражение в мифических повествованиях, указывая на присутствие высшего начала и зависимость от него – первый человек является и первым смертным. Тема смерти превалирует в ранних мифах: в рассказах о загробных путешествиях, об умирающих и воскресающих богах, а также эсхатологических мифах, означающих буквально всеобщую смерть; смерти придаются символическое значение и сакральный смысл. Миф как способ цельного, не расчлененного мироощущения, отражающий бессознательные желания, иррациональное человека отдаленных времен представляет ценный материал для изучения данного вопроса, в частности, для Фромма, обращавшегося к мифам и их глубинному смыслу при анализе бытия как существования и бытия как обладания.

По его мнению, именно страх перед смертью утверждает жизнь, и самым существенным доказательством этого он называл глубоко укоренившуюся жажду бессмертия, проявляющуюся в ритуалах и верованиях, направленных на сохранение человеческой плоти [5]. За этим стремлением скрывается реализация стремления к бессмертию, когда человек отождествляет свое бытие с вещами, перенося на них его, в неразрушимости вещей видя собственную неразрушимость. Но обладание жизнью, а точнее, иллюзия обладания ею как постоянной и неразрушимой материей неминуемо влечет за собой страх утратить ее, вследствие чего появляется желание обладать ею в жизни загробной. Привязанные к материальным ценностям, люди хотели бы обладать ими и там, куда они попадут после смерти, свое прошлое они намерены перенести и в будущее, даже загробное. И даже знание того, что все люди смертны, не мешает создавать иллюзию обратного, рождать практики создания таковой, например, верования Древнего Египта. С его культом мертвых они представляются парадоксальными: с одной стороны, они как никакие другие выражают отношение к земному существованию не более чем как к подготовке к настоящему бытию – загробному, а значит, ориентированы на обладание, но не столько обладание жизнью в смерти, сколько смертью в жизни, а с другой – именно на бытие, а вовсе не обладание.

Как пишет Фромм, упоминая Юнга, «западный человек не может до конца постичь философские системы Востока...» вследствие своей «ориентации на обладание», для него естественно обладать не только жизнью, но и смертью, обладанием-себя-в-смерти. Различие это прослеживается в использовании слов в западных языках, и, приводя множество примеров, он приходит к выводу, что «современный стиль речи свидетельствует о наличии высокой степени отчуждения», являющейся «скрытым, бессознательным» [5]. Отчуждается не только бытие человека, но и смерть человека.

В современном обществе, особенно с развитием медицины, смерть стала восприниматься не как неотъемлемая часть жизни, но как посягательство на нее, необоснованная агрессия извне. Человек, ранее называвший себя не более чем «смертным», теперь избегает даже самого этого слова. Смерть теперь – это антиномия жизни, а умерший – ушедший и оттого как бы проигравший, и долженствующий быть забытым [6].

В традиционной культуре смерть высоко ритуализирована. Высшим видом смерти считалась насильственная, жертвенная, как более значимая, чем естественная, например, подвиг во имя великой цели. Чем выше социальный статус человека, тем более значимой является его смерть, чем больше смерть вписана в социальный контекст, тем более она осмысленна. Естественная смерть происходила в кругу семьи, ей предшествовали ритуалы исповеди и причащения, прощания с близкими. В современном же обществе смерть вообще, а тем более естественная смерть, теряет свой смысл. Жизнь в эпоху постмодерна – имитация жизни, равно как и смерть, уже даже не присутствующая, вытесненная. Но позитивное начало, отсутствие отрицательных частиц и понятий, употребление исключительно позитивных речевых оборотов парадоксальным образом свидетельствует об инстинкте саморазрушения и смерти [7].

Современная культура, характеризующаяся «состоянием постмодерна» (по выражению Ж.-Ф. Лиотара) как стилем мышления, и постмодернизм как характеристика нового периода в ее развитии [8] определяет такое мышление человека, в котором превалирует игровое отношение к действительности, языку и собственному бытию; бытию, в котором важнейшие категории заменяются симулякрами, и языку, в котором вытесняются важнейшие экзистенциальные категории, а традиционное це-

лостное восприятие их сменяется фрагментарным. Все это признаки перевернутой модели мира, базовые составляющие которой тоже будут перевернутыми, как и перевернутая модель смерти.

Об этом пишет Филипп Арьес, который в своем труде «Человек перед лицом смерти» определил ее как «смерть перевернутую» [9], вытесненную из общественного сознания. Исследование Арьесом табуирования темы смерти и проявления ее сквозь различные слои содержания разного рода источников (искусство, быт), отчего многие факторы при всей их разностатусности, разноконтекстности оказываются нивелированы, но по стилю исследования оно отлично вписывается в культуру постмодерна, принадлежит ей, когда, вычлняя восприятия смерти из общего контекста истории, игнорируя многие немаловажные данные, например, демографические или экономические, Арьес идет обратным путем, акцентируя внимание именно на каком-либо аспекте отношения к смерти, и находя ему подтверждение и в контексте исторической реальности.

Он выделяет пять моделей смерти («прирученная смерть»; «смерть своя»; «смерть далекая и близкая», «смерть твоя», «смерть перевёрнутая») по типу отношения к ней как собственности и проводя последовательный анализ, показывает, как первая модель, называемая им традиционной, в дальнейшем потерпела трансформацию, при которой смыслы и значения этих элементов смещались в сторону индивидуального начала, в том числе и в отношении потустороннего мира, затем спасения своей души, и, наконец, появления страха перед смертью, переходящего в стыд, и как следствие, запрет. Стыд, в свою очередь, появляется с исчезновением зла, идеей ада и понятием греха. Именно в устранении зла Арьес видит главную причину того, что смерть стала «неприрученной», находя связь в «удалении» смерти и возвращении ее в «пугающе диком виде». Смерть не принадлежит человеку, так же как не принадлежит и жизнь, и в дальнейшем легко будет проследить тенденцию к изменению этого фактора – с возрастанием самосознания своей индивидуальности, уникальности и ценности своей жизни соответствующим образом изменится и отношение к смерти.

Ритуализированность, церемониальность и публичность – неперенные признаки смерти «прирученной», в отличие от стыдливо сокрытой, смерти «дикой», когда обряды, ранее имевшие важное значение, сейчас выполняются, скорее, для соблюдения традиции, а не из уважения к традиции. Именно появление страха перед смертью, отвращения как к грязному и неприличному явлению и стало, по мнению Арьеса, причиной «дикого отношения», того, что в XX веке смерть «прирученная» трансформировалась в смерть «враждебную». Ее также можно было бы назвать смертью изгнанной, исключенной, оттянутой, отдаленной, молчаливой, не чувствующей потребности в последнем слове, диалоге с кем-либо, самодостаточной. Уйдя из мира повседневности, она приобрела статус темы, на которую наложено табу, как попытка замаскировать ее реальность, только в отличие от эпохи ее романтизации через замалчивание. Смерть в неведении – теперь благо, а не несчастье, как в далеком прошлом, когда по причине ее внезапности человек не успел подготовиться [9].

Как пишет Гроф, путь души после смерти к желанной цели чреват опасностями и испытаниями различного типа, для благополучного завершения которого необходимо знание законов иного мира. Поэтому многие из культур выработали сложные обряды, знакомящие человека с опытом смерти, существовавшие во все времена в различных культурах ритуалы, в ходе которых люди испытывали мощное переживание смерти в символической форме. Ритуалы такого рода выполняли две важные задачи: с одной стороны, человек должен был осознать, что его ожидает процесс трансформации, в результате которого откроется новый способ познания мира; с другой – они служили подготовкой к настоящей физической смерти [6].

Были созданы специальные «руководства», объясняющие, как действовать при соприкосновении со смертью, рассматриваемой как на символическом уровне в русле духовной практики, так и на уровне физической гибели биологической оболочки (Тибетская «Книга мертвых», «Египетская книга мертвых», и литературное произведение средневековой Европы, известное как «Искусство смерти»). «Каждый человек должен уметь умирать правильно», – как учит древний текст [10]. Одни обряды направлены на облегчение и ускорение процесса перехода умерших в мир духов, другие – на установление связи между живыми и мертвыми с целью обеспечить свою безопасность и получить покровительство, третьи – могут быть одновременно интерпретированы и как помогающие мертвым в их посмертных путешествиях, и как мешающие им вернуться. Как отмечает А. Я. Гуревич, «смерть, по представлениям средневековых людей, не была завершением, полным концом человеческого существования», имея в виду не бессмертие души, а связь между миром живых и миром умерших [11].

Сродни таким практикам инициации по поводу совершеннолетия, умирание в одной роли как неизбежное условие для перехода в другую. Практиковавшиеся практически во всех культурах обряды инициации обозначали черту между прошлым и будущим, перейдя которую, их посредством человек рождался для новой жизни. Символическая смерть в этом случае означала умирание для старо-

го статуса и переход в новый, к жизни в другом качестве, в ином статусе, в иной роли. Можно предположить, что и последующая физическая смерть воспринималась как явление своего рода инициативное, точно также переводящее в иное качество индивида. Ускорившийся ритм жизни в XXI веке зачастую не только не дает осознать себя в новом качестве, но и переводит на новый уровень людей, часто не соответствующих ему ввиду отсутствия испытания. Неаутентичность занимаемому месту в жизни никак не могла состояться раньше, так же как это происходит сейчас, когда человеку не на чем научиться воспринимать смерть как естественное физическое явление в отношении себя и своей жизни. Прежнее инициативное восприятие смерти, умирание как своего рода инициация сменилось нежеланием быть к ней готовым, иллюзией обладания жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.М. Лотман и тартуско-московская семиотическая школа. М.: Гнозис, 1994. С. 417.
2. Лотман Ю.М. Беседы о русской культуре. Быт и традиции русского дворянства (XVIII-начало XIX века) / Ю.М. Лотман. СПб.: Искусство – СПб, 1994. С. 7.
3. Крайг Г. Психология развития / Г. Крайг. СПб.: Питер, 2000. 900 с.
4. Парахневич О.С., Портнова А.Г. // Вестник Кемеровского государственного университета. 2005. №2 (22). С. 140.
5. Фромм Э. Иметь или быть? / Э. Фромм // Величие и ограниченность теории Фрейда. М.: ООО «Издательство АСТ», 2000. С. 212, 343.
6. Гроф С. Человек перед лицом смерти / С. Гроф, Дж. Хэлифакс. М.: Изд-во Трансперсонального Института, 1996. С. 6, 8.
7. Дуплинская Ю.М. Ценности, риски, коммуникации в изменяющемся мире / Ю.М. Дуплинская // Материалы шестых Аскинских чтений: сб. науч. тр. Саратов: КУБиК, 2012. С. 175.
8. Мокин Б.И. Философский постмодернизм. Саратов: ООО Издательский Дом «Полиграфия Поволжья», 2006. С. 5.
9. Арьес Ф. Человек перед лицом смерти / Б.И. Мокин. М.: Прогресс – Прогресс-Академия, 1992. С. 453, 482.
10. Гуревич П.С. О жизни и смерти / П.С. Гуревич // Жизнь земная и последующая: сб. М.: Политиздат, 1991. С. 401-412.
11. Гуревич А. Средневековый мир / А. Гуревич. М.-СПб.: Университетская книга, 1999. С. 150-151.

Зеленкина Светлана Владимировна – аспирант кафедры «Философия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana V. Zelenkina – Postgraduate Department of Philosophy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 316.347+316:61

Д.В. Михель

ИЗУЧАЯ КУЛЬТУРУ, ЗДОРОВЬЕ И БОЛЕЗНЬ: МЕДИЦИНСКАЯ АНТРОПОЛОГИЯ КАК ОБЛАСТЬ ЗНАНИЯ

Рассматривается становление медицинской антропологии как особой области социально-гуманитарного знания, изучающей культурные представления и практики, касающиеся здоровья и болезни. Анализируется процесс становления профессионального сообщества медицинских антропологов и формирование предметного поля новой дисциплины.

Медицинская антропология, культура, здоровье, болезнь, профессиональное сообщество, область знания, дисциплина

D.V. Mikhel

STUDYING CULTURE, HEALTH AND ILLNESS: MEDICAL ANTHROPOLOGY AS A FIELD OF KNOWLEDGE

The article considers the establishment of medical anthropology as a distinct field of social sciences and humanities which studies cultural beliefs and practices related with health and diseases. The formation process of the professional community and the subject field in the new discipline is analyzed.

Medical anthropology, culture, health, illness, professional community, field of knowledge, discipline

На рубеже 1950-х и 1960-х гг. на Западе начинается сближение интересов медицинского сообщества и антропологов, результатом которого оказывается быстрое формирование медицинской антропологии как новой области знания. Экспертные решения, предлагаемые антропологами, позволяют пересмотреть целый ряд острых вопросов медицинской практики и наметить новые подходы к охране общественного здоровья. Последующее развитие медицинской антропологии способствует превращению ее из прикладной дисциплины в самостоятельную сферу академических исследований. За полвека медицинская антропология пересекает национальные, культурные и дисциплинарные границы, драматически расширяет свое предметное поле, демонстрирует разнообразие методологических перспектив и исследовательских подходов. В данной статье предлагается рассмотреть основные эпизоды становления медицинской антропологии, а также дать определение ее предметной области на современном этапе развития дисциплины.

По мере развития каждой области научного знания неизбежно возникают вопросы об ее исторических истоках. Это характерно и для медицинской антропологии, которая в качестве дисциплины впервые формируется в США на рубеже 1950-х и 1960-х гг. Уже в первое десятилетие ее развития пионеры медицинской антропологии предпринимают попытки реконструировать истоки собственной дисциплины, проследить логику развития новой области знания, связав ее с кругом актуальных социальных проблем, стимулирующих работу научных экспертов [1, 2]. Не прекратились эти попытки и сегодня, поскольку вот уже полувековое развитие медицинской антропологии оказалось способным оказать серьезное влияние на различные сферы научной и общественной жизни в разных странах, требуя еще большего внимания к истокам дисциплины [3-7].

Чаще всего ранние истоки медицинской антропологии усматриваются в работах врачей XIX в., посвященных анализу различных социально-экономических и культурных контекстов общественного здоровья. В Германии это Рудольф Вирхов, во Франции – Луи-Рене Виллерме, в США – Лемуэл Шетток, в России – Фридрих Эрисман и целый ряд других представителей «общественной медицины». Наиболее значимыми для последующей медицинской антропологии, по-видимому, оказались тезисы Вирхова о том, что «болезнь – это социальное явление», а «политика – это не что иное, как медицина в большом масштабе» [8].

Внимание к культурным контекстам здоровья, болезни и врачевания было характерно и для врачей, которые исследовали опыт аборигенных культур. Характерным примером этого были работы британского доктора Уильяма Риверса, представившего отчет о медицинских традициях пастушеского народа Тода в Индии, а затем изложившего свои взгляды в рамках лекций, прочитанных в Лондонском королевском колледже врачей в 1915-1916 гг. [9, 10]. Для немецкого врача Эрвина Аккеркнехта интерес к аборигенным представлениям и практикам, касающимся болезни и врачевания, был частью его фундаментального интереса к истории медицины, однако его статьи по этим вопросам, начавшие выходить в 1940-е гг., также оказали большое влияние на позднейшую медицинскую антропологию [11].

В исторической ретроспективе врачи-общественники XIX в., как врачи-этнографы первой половины XX в., могут рассматриваться как приверженцы *антропологии в медицине*. Но для подавляющего большинства их коллег развитие медицины ассоциировалось не столько с работой в библиотеке или составлением этнографических отчетов, сколько с исследованиями у постели больного и лабораторными экспериментами. К началу Второй мировой войны во всех развитых странах прогресс в медицине обеспечивался, прежде всего, связью с естествознанием и применением все более сложного технического оборудования. Антропологические штудии врачей становились делом все более редких энтузиастов и не были связаны с профессиональными заботами медицинского сообщества. В этих условиях новое обращение медицины к антропологии, наметившееся в 1950-е гг., было весьма неожиданным для большинства докторов.

Вторая мировая война привела к новому разделу мира между великими державами. Советский Союз сплотил вокруг себя прокоммунистические режимы Азии и Восточной Европы. США стали во главе стран Запада. Великобритания и Франция, ослабленные войной, начали быстро терять свои колониальные владения в Азии и Африке. Формирующийся мировой порядок был отражением «политики блоков» и стратегических амбиций. Все мировые лидеры, как прежние, так и новые, пытались активно упрочить свое влияние далеко за пределами собственных границ. США и Советский Союз в огромных масштабах предоставляли военно-техническую и гуманитарную помощь своим союзникам и зависимым от них странам. Темпы роста геополитического влияния США в качестве лидера «свободного мира» после 1945 г. были самыми значительными.

Гуманитарная помощь, предоставляемая США странам Латинской Америки и некоторым азиатско-тихоокеанским союзникам, включала поставку медикаментов, осуществление санитарно-медицинских программ и внедрение западных стандартов гигиены. Между тем уже во второй половине 1940-х гг. американское правительство неоднократно отмечало, что многие санитарно-медицинские мероприятия реализуются неэффективно, а местное население равнодушно к предоставляемой помощи. Американские чиновники и руководители служб здравоохранения столкнулись с необходимостью объяснить свои неудачи и перестроить работу в сфере обеспечения «глобального здоровья».

Проблемы, с которыми столкнулись руководители американского здравоохранения, привлекли к себе внимание некоторых культурных антропологов США. Для тех из них, кто в годы войны начал воспринимать антропологию не как академическую, а как прикладную науку, стремление применить свои знания в практической плоскости было вполне естественным. Бенджамин Пол, Джордж Фостер и Уильям Кодилл – наиболее яркие представители этого поколения. Разрабатывая антропологию как науку о культурах и культурных различиях, они одними из первых заявили о себе в качестве экспертов, способных обсуждать острые вопросы медицинской практики и предлагать новые подходы к охране здоровья обществ, чуждых западной культурной традиции [12-14]. Весьма примечательно было то, что не только антропологи впервые для себя проявили интерес к медицинским вопросам, но и то, что некоторые лидеры медицинской общественности оказались внимательными к рекомендациям представителей иного профессионального цеха.

Наибольшую значимость для руководителей американских санитарно-медицинских программ, осуществляемых в развивающихся странах, получили рекомендации антропологов о том, как преодолевать «культурные барьеры», возникающие на пути медицинских работников, а также сведения, касающиеся местных гигиенических обычаев и представлений о теле, здоровье и болезни. К удивлению многих медиков, антропологи объясняли, что для подавляющей части населения в развивающихся странах микробная концепция заболевания не имеет никакого значения, в то время как продолжают оставаться востребованными представления о «балансе горячего и холодного», а также вера в духов и колдовские чары.

Быстрый успех, которого добились в медицинской среде представители *прикладной антропологии*, привел к тому, что уже в 1950-е гг. в учебные программы медицинских школ в США стали вводиться различные социально-гуманитарные курсы, и особенно востребованной оказалась антропология. Многие антропологи обнаружили, что имеют возможность делать карьеру, преподавая в медицинских вузах и активно сотрудничая с санитарно-медицинскими организациями. Возникшая в эти годы новая линия развития антропологического знания непосредственно привела к появлению медицинской антропологии. В значительной мере она ассоциировалась с проблематикой *общественного здоровья*, которая, в сущности, и стала первым элементом предметного поля новой области знания.

В начале 1960-х гг. в США началось формирование профессионального сообщества медицинских антропологов. Большинство из них чувствовали острую потребность установить профессиональные контакты и грамотно наладить преподавание своих курсов в университетах. Бенджамин Пол и Джордж Фостер стали теми фигурами, вокруг которых началось объединение нового поколения энтузиастов. Под покровительством двух главных профессиональных ассоциаций – Американской ассоциации антропологов и Общества прикладной антропологии – стали собираться специалисты, причисляющие себя к числу антропологов, занятых проблемами здоровья и болезни. После того, как в 1959 г. Джеймс Рони впервые ввел термин «*медицинская антропология*» [15], сторонники применения антропологии для решения медицинских вопросов стали воспринимать себя как «медицинских» антропологов. Менее двадцати лет спустя Фостер со своей ученицей Барбарой Андерсон в первом американском учебнике по медицинской антропологии отмечали, что антропологи пришли в медицинскую область из различных профессиональных локусов. Фостер и Андерсон выделили четыре главных истока: 1) физическую антропологию, 2) «этномедицину», или ранние этнографические ис-

следования аборигенных систем медицины, 3) антропологическую школу культуры и личности, связанную с именами Рут Бенедикт, Маргарет Мид и супругами Лейтон, 4) международные программы здравоохранения, с которыми были связан Фостер, Пол и другие [16].

Тем не менее указанные Фостером и Андерсон истоки американской медицинской антропологии, в сущности, можно свести всего к двум основным течениям – физической антропологии и культурной антропологии. Именно так поступает и Питер Браун, сводя все разнообразие подходов в медицинской антропологии к двум группам – 1) «биокультурным подходам» и 2) «культурным подходам» [17]. В 1960-е гг. в США лидерство в сообществе медицинских антропологов, бесспорно, принадлежало выходцам из культурной антропологии, которые распределяли свои интересы между традициями школы культуры и личности, этномедициной и прикладными исследованиями общественного здоровья. Приверженцы культурно-ориентированной медицинской антропологии проявляли наибольшую активность в деле профессиональной самоорганизации.

Ученица Пола и Кодилла культурный антрополог Хэзел Вейдман сыграла одну из решающих ролей в формировании профессиональной ассоциации медицинских антропологов в США. С середины 1960-х гг. она стала душой растущего сообщества, возглавив в ноябре 1968 г. *Группу медицинской антропологии* в составе Общества прикладной антропологии и тогда же начав публиковать первый журнал по дисциплине – “Medical Anthropology Newsletter” [18, 19]. Два года спустя под эгидой Американской ассоциации антропологов было образовано Общество медицинской антропологии, первым президентом которого стала доктор Доротея Лейтон.

Объединение американских медицинских антропологов в профессиональную ассоциацию оказало влияние на развитие антропологии в других странах. Уже в 1970-е гг. отмечается распространение медико-антропологических идей в Канаде, Великобритании, Австралии, а также за пределами англоязычного мира. В зависимости от особенностей развития местного научного сообщества медико-антропологические исследования в той или иной стране первоначально приобретали конкретную направленность. В Великобритании, например, медицинская антропология стала развиваться как преимущественно академическая дисциплина, а в Канаде она оказалась способна успешно сочетать академизм и склонность к прикладным исследованиям [3, 4]. Однако практически для всех национальных школ медицинской антропологии – от Европы до Северной и Латинской Америки – характерной оказалась одна черта: преобладание культурных и социокультурных моделей в рамках организации медико-антропологического знания.

В Советском Союзе ситуация с самого начала складывалась иначе. После того, как к началу 1930-х гг. было покончено с традициями «общественной медицины», идейно связанной с либерально-демократическими течениями дореволюционных времен, сфера медицинских исследований оказалась максимально удалена от сферы социально-гуманитарного знания. Кроме того, с 1930-х гг. профессиональное развитие социально-гуманитарных наук надолго приостановилось, и советские обществоведы, в сущности, не имели серьезных возможностей обсуждать медицинские и около-медицинские вопросы. Явный идеологический характер советского общественнознания побуждал медицинское сообщество держаться в стороне от любых контактов с обществоведами. Тем самым серьезные социально-гуманитарные исследования по проблемам, родственными западной медицинской антропологии, за редким исключением, не велись [20].

По указанным выше причинам более плодотворными в СССР оказались научные контакты между медиками и физическими антропологами, которые были более свободны от идеологических ограничений. На исходе 1980-х гг. целая группа отечественных физических антропологов в своих исследованиях по эволюционной проблематике, археологии, палеопатологии, адаптации и антропометрии вплотную приблизилась к области медицинских вопросов, выйдя на тот же уровень, что и их зарубежные коллеги [21, 22]. Достигнутые успехи, однако, привели к тому, что в 1990-е гг. в постсоветской России медицинская антропология стала устойчиво ассоциироваться с физико-антропологической традицией.

Лишь в 2000-е гг. ситуация постепенно стала меняться. Демонстрируя чувствительность к социокультурным моделям, характерным для зарубежной медицинской антропологии, в Саратовском государственном техническом университете в 2001 г. для студентов – социальных антропологов начал читаться пионерный для России курс по медицинской антропологии [23]. В 2005 г. в Институте антропологии и этнологии РАН по инициативе Валентины Харитоновой была образована группа медицинской антропологии, первоначально сосредоточившая свое внимание на изучении здоровья народов Севера и Сибири и традициях народного врачевания. Спустя всего лишь несколько лет культурно-ориентированные российские медицинские антропологи обратились к активной публикационной деятельности и начали проводить собственные научные мероприятия, расширяя число их участ-

ников [24, 25]. Ожидается, что, как и в других странах, эта дисциплина в России приобретет многие черты, характерные для интернациональной по своей природе медико-антропологической науки.

В 1960-е гг., когда в США началось формирование медицинской антропологии как особой области знания, большинство ее приверженцев рассматривали дисциплину как форму приложения культурно-антропологического анализа к проблемам общественного здоровья. Норман Скотч предположил, что новая дисциплина сможет сосредоточиться на таких направлениях, как культурный анализ эпидемиологии, «этномедицинских исследованиях», т.е. изучении традиций народного врачевания, и оценке современных программ по здравоохранению в различных культурных условиях [1].

В 1970-е гг. одно из выделенных Скотчем направлений – «этномедицина» – стало развиваться особенно быстро. Важной причиной этого был традиционный интерес культурных антропологов к аборигенным культурам и характерным для них традициям врачевания. Но, очевидно, еще большее значение имело то обстоятельство, что руководители служб здравоохранения развитых стран пришли к пониманию того, что для обеспечения «наивысшего уровня здоровья» для населения развивающихся стран имеющихся ресурсов конвенциональной медицины оказывается недостаточно и поэтому целесообразно использовать потенциал местных врачей и народной фармакопеи. В 1976 г. в рамках организованной ВОЗ Алма-Атинской конференции по обеспечению первичной медико-санитарной помощи в глобальном масштабе тезис о необходимости эффективного использования народного врачевания был озвучен для самой широкой медицинской общественности [26].

В те же самые годы ведущие медицинские антропологи выдвинули собственные аргументы в пользу необходимости изучения *практик неконвенциональной (комплементарной и альтернативной) медицины*. В 1974 г. Фостер указал на пользу изучения «незападных медицинских систем» [27]. В 1975 г. врач-антрополог Хорас Фабрега обосновал необходимость развития особой «этномедицинской науки» [28]. В 1976 г. Чарльз Лесли с коллегами указал на важность изучения «азиатских медицинских систем», чья эффективность во многом сопоставима с возможностями западной «космополитической медицины» [29]. В СССР в том же году Юлиан Бромлей и Николай Воронов заявили о ценности изучения «народной медицины» средствами этнографического знания [20].

Обратившись к изучению различных форм неконвенциональной медицины, антропологи выступили не только в роли экспертов по «незападным» медицинским традициям, но и естественными союзниками тех медицинских специалистов, которым в соответствии с рекомендациями ВОЗ предстояло оценить эффективность и безопасность давно забытых или долгое время отвергаемых традиций врачевания. Поворот к неконвенциональной медицине, начавшийся в 1970-е гг., позволил существенно расширить предметное поле медицинской антропологии и подтолкнул многих антропологов к тому, чтобы стать адвокатами и адептами различных форм целительства.

В 1950-е гг. в развитых странах Запада некоторые представители медицинской общественности увидели пользу от прикладного применения антропологии в преодолении «культурных барьеров», возникающих между санитарно-медицинскими работниками и местным населением в рамках осуществления профилактических мероприятий. Однако в те же самые годы медики начали формулировать более широкий перечень пожеланий к социально-гуманитарному, в частности антропологическому, знанию. В условиях, когда в развитых странах произошел эпидемиологический переход, и основными причинами смертности стали хронические болезни, врачи столкнулись с необходимостью более полного понимания культурных и социально-экономических факторов нездоровья. С этой точки зрения антропологи оказывались способными выступить в роли «экспертов по поведению» и применить социальный анализ в интересах медицины. Размышляя о возможном применении медицинской антропологии, Рони отмечал, что она может быть использована для решения трех задач: 1) осмысления ролей медицинского персонала и пациентов, 2) изменения поведения тех и других с целью лучшего контроля болезни, 3) предсказания направления и степени культурных изменений [30].

В 1970-е гг. прогресс биомедицинского знания в развитых странах привел к тому, что продолжительность жизни населения достигла небывалых прежде пределов, но при этом значительная часть пациентов превратилась в хронически нездоровых людей, чье состояние было невозможно улучшить одними лишь средствами клинической медицины. Тысячи врачей вынуждены были примеривать на себя роль культурно-чувствительных практиков и знатоков человеческих душ. Между тем это плохо согласовывалось с повсеместной ставкой на активное использование «объективного биомедицинского знания» и широкое привлечение новых технологий. В этих условиях некоторые доктора начали говорить о кризисе господствующей «биомедицинской модели» и необходимости обращения к более универсальной, «био-психо-социальной модели» предоставления медицинской помощи [31, 32].

В середине 1970-х гг. группа врачей и антропологов, объединившихся в рамках «гарвардской школы» медицинской антропологии, начала разрабатывать такую форму анализа новых медицинских

вопросов, которая вскоре была названа *клинически-прикладной антропологией*. Психиатр Леон Айзенберг ввел значимое для позднейшей антропологии различие между «заболеванием» как биомедицинским представлением о человеческом страдании и «болезнью» как популярным представлением о том же феномене [33]. Как и Айзенберг, его коллега психиатр и антрополог Артур Клейнман пришел к пониманию, что антропологию следует использовать для освобождения современной клинической медицины от увлечения «объективными методами» и технологиями, а также для того, чтобы вернуть в самый центр «клинической реальности» говорящего и действующего пациента [34].

На рубеже 1970-х и 1980-х в США и Великобритании развернулась дискуссия по поводу возможностей клинически-прикладной антропологии. В отличие от исследователей из Гарварда большинство участвовавших в ней специалистов были склонны к тому, чтобы придать новому направлению явный прикладной характер. В духе традиций прикладной антропологии 1950-х гг. многие специалисты видели цель клинически прикладной антропологии в том, чтобы устранять «культурные барьеры», возникающие между врачами и пациентами, и тем самым способствовать более эффективной работе лечебных учреждений [35].

В начале 1980-х гг. британский врач и медицинский антрополог Сесил Хельман стал приводить доводы в пользу того, что антропология может быть полезна не только в клинических условиях, но и в работе семейного врача, занятого общей практикой вне стен клиники. В подавляющем большинстве случаев врачу общей практики для успешной работы с пациентами требуются не столько глубокие биомедицинские познания, сколько культурная чувствительность и умения выстраивать доверительные отношения. Расширяя представления о предметной области медицинской антропологии, Хельман дал одно из самых известных определений дисциплины. «Медицинская антропология изучает, как люди в разных культурах и социальных группах объясняют причины плохого здоровья, формы лечения, которым они доверяют, и то, к кому они обращаются, когда становятся больными... Это изучение человеческого страдания и тех шагов, которые люди предпринимают, чтобы объяснить и уменьшить это страдание» [36].

В те годы, когда была развернута дискуссия о целях и задачах клинически-прикладной антропологии, в крупных клиниках США и Великобритании антропологи стали реальными агентами процессов модернизации лечебных учреждений. Многие из них получили оплачиваемые рабочие места при больницах, занимаясь прикладными исследованиями и обучая медицинский персонал «культурной чувствительности» в работе с пациентами. Эти эпизоды в развитии медицинской антропологии совпали с масштабной работой по гуманизации клинической медицины, развернувшейся в 1980-е и 1990-е гг.

На рубеже 1970-х и 1980-х гг. на арену истории вышло новое поколение исследователей, многие из которых не были склонны к тому, чтобы рассматривать медицинскую антропологию как исключительно прикладную дисциплину. Напротив, они стали позиционировать ее как особую область знания, обладающую автономией по отношению к медицине. Хорошая профессиональная подготовка позволяла им применять весьма широкую перспективу для рассмотрения тех или иных вопросов, касающихся культуры, здоровья и болезни. При этом выяснилось, что проблематика общественного здоровья, уже долгие годы находящаяся в фокусе внимания прикладных медицинских антропологов, может быть рассмотрена с самых разных сторон.

Один из подходов состоял в том, чтобы рассматривать общественное здоровье как результат гармоничного существования отдельного сообщества в условиях конкретной среды обитания. Этот подход предполагал широкое использование не только культурно-антропологических, но и биоэкологических данных. Приверженцы этого подхода Энн Мак-Элрой и Патришиа Таунсенд предложили называть его *медицинской экологией* или «экологической перспективой в медицинской антропологии» [37]. Отталкиваясь от идей немногочисленных предшественников [38], они сосредоточили свое внимание на том, как биологическая и культурная адаптация позволяет различным группам выживать и сохранять свое здоровье, а также на том, как ослабление адаптивных способностей ведет к росту числа стрессов и распространению болезней. Демонстрируя широту «экологической перспективы», Мак-Элрой и Таунсенд сумели включить в поле своего внимания наряду с рамочной проблематикой общественного здоровья и более частные вопросы: питание, репродукцию и народное врачевание. Другой подход предполагал воспринимать общественное здоровье как продукт социально-экономического и политического развития, что требовало учитывать данные, предоставляемые такими областями знания, как история, социология и экономическая теория. Воодушевляясь идеями Фридриха Энгельса и Рудольфа Вирхова, австрало-американский антрополог Ханс Баер назвал его *политической экономией здоровья* или *критической медицинской антропологией* [39]. Вслед за Баером другие исследователи придали проблематике общественного здоровья новое содержание, сосре-

доточившись на том, как современный капитализм способствует росту неравенства в сфере здоровья как в национальном масштабе, так и на глобальном уровне [40-42]. Тем самым, в отличие от тех антропологов, которые углубились в изучение представлений о здоровье и болезни в разных культурах, а также клинически прикладных антропологов, работающих на «микроуровне», критические медицинские антропологи перенесли свой анализ на «макроуровень».

Критический подход, предложенный Баером, побудил некоторых антропологов пойти еще дальше с целью обновить всю медицинскую антропологию. Реформаторские настроения наиболее сильно проявились в Калифорнийском университете в Беркли, где во главе кафедры антропологии в начале 1990-х гг. стала Нэнси Шейпер-Хьюз. После долгих лет полевых исследований, предпринятых в Бразилии и Ирландии, Шейпер-Хьюз пришла к пониманию, что антропологи имеют дело не столько с медицинскими вопросами, сколько с реальными человеческими страданиями. Задачу медицинской антропологии она увидела в том, чтобы стать на сторону тех, кто страдает и борется за существование. По этой причине Шейпер-Хьюз призвала антропологов перестать быть «агентами медицины» и порвать с политикой скрытого колониализма, которая, по ее мнению, была воплощена в работе прикладных антропологов, помогающих докторам устранять «культурные барьеры», разделяющие их с пациентами [43].

Становление таких направлений как «медицинская экология» и «критическая медицинская антропология» в начале 1980-х гг. знаменовало усиление «теоретического начала» в медицинской антропологии и ее превращение в самостоятельную академическую дисциплину, обладающую собственным предметным полем, терминологией и исследовательскими задачами. Значительно выросло число исследователей и проводимых ими исследований, журналы по дисциплине стали толще, а издательства стали с большей охотой публиковать книги по медицинской антропологии, способствуя росту интереса читающей публики к проблемам, поднимаемым антропологами. Характерным следствием растущей «теоретизации» медицинской антропологии было также возрастание теоретико-методологического плюрализма.

В 1970-е гг. многие медицинские антропологи на Западе стали активно исследовать различные традиции народного врачевания и народной фармакопеи, что вполне соответствовало новым веяниям ВОЗ, поощрявшей врачей и антропологов шире изучать традиции народной медицины. В Советском Союзе некоторые этнографы и собиратели народного фольклора также более охотно стали сосредотачивать свое внимание на изучении народной медицины [20]. Растущий интерес к «этническому» привел к появлению в профессиональной среде таких терминов, как «этномедицина», «этнопсихиатрия», «этнофармакология» и т.п. К началу 1980-х гг. в медико-антропологических исследованиях широко присутствовали такие темы, как «медицинский плюрализм», «медицинские системы», «интеграция медицинских традиций» и т.п. Некоторые антропологи, предпочитали анализировать ситуацию не «сверху», а «снизу», т.е. с точки зрения пациента, и поэтому продвигали такие темы, как «медицинский синкретизм» [44] и «терапевтический выбор» [45]. Общая тенденция состояла в том, чтобы анализировать те культуры, где наиболее привычным типом медицины являлась неконвенциональная медицина.

Однако в первой половине 1980-х гг. впервые стали предприниматься попытки переключить внимание на изучение западной медицинской традиции. Пионерами здесь выступили американские антропологи Роберт Хан и Этвуд Гейнс [46, 47]. Они предложили рассматривать западную медицину как случай еще одной «этномедицины», как особую «культурную систему», что предполагало отказ от привычного даже для медицинских антропологов различия между «наукой» и «культурой». Они выделили три характерные черты западной медицины: 1) ее культурное своеобразие и отличие от других областей культуры, таких, как религия, политика и экономика, 2) отчетливое иерархическое разделение труда и профессиональных ролей, хорошо понятное для остальных членов общества, 3) внутреннее воспроизводство социальных и культурных смыслов через неформальную социализацию. Довольно скоро работа Хана и Гейнса привлекла внимание других коллег-антропологов [48, 49], вследствие чего произошло формирование особого направления исследований, которое принято называть *антропологией биомедицины*.

Принятие большинством медицинских антропологов термина «биомедицина» несколько шло вразрез с присущим медицинскому сообществу разграничением между «клинической медициной», «социальной медициной» и «биомедициной» как областью передовых лабораторных исследований. Для антропологов вся современная западная медицина отныне воспринималась как биомедицина. Причиной этого стало осознание того факта, что передовые биомедицинские исследования уже в 1980-е гг. фактически стали определять все содержание медицинского знания и медицинской практики.

В 1990-е гг. некоторые антропологи стали проводить полевые исследования в стенах научно-медицинских центров, лабораториях и других пространствах, где развернулась так называемая «био-

технологическая революция». По понятным причинам пальма первенства принадлежала североамериканским исследователям, причем особенно успешно продвигались в этом направлении канадские антропологи. Одним из примечательных проявлений такой работы стал сборник статей «Живя и работая с новыми медицинскими технологиями», подготовленный антропологами из университета имени Мак-Гилла в Монреале [50]. В фокусе внимания исследователей оказались такие проблемы, как влияние биомедицины на социальную природу, клиническая и лабораторная материальная культура, появление новых биомедицинских сетей в связи с развитием новых медицинских технологий.

Растущий интерес медицинских антропологов к биомедицине стал свидетельствовать о том, что антропологи способны фокусироваться не только на «экзотических», но и на вполне «мейнстримных» культурах. Привнеся собственные методы в мир западной медицинской традиции, они осмелились превратить всю медицину в собственное поле исследования специфическими для антропологии средствами. По сравнению с клинически-прикладной антропологией, которая начиналась с анализа взаимоотношений врача и пациента в условиях «клинической реальности» [34], антропология биомедицины решительно продвинулась в тех направлениях, где нередко отсутствовали врачи, пациенты и даже клиническая реальность. При этом речь все равно шла о медицине, которая, однако, уже не была прежней. Новые рубежи, которых достигла биомедицина в самом начале XXI в., оказались не менее увлекательным местом для исследования, чем те миры, в которых продолжала обретаться медицинская традиция, восходящая к культурному опыту Нового времени. Показательным примером такого антропологического любопытства стала работа одной из наиболее авторитетных канадских исследовательниц Маргарет Лок и ее коллеги Вин-Ким Нгуена, посвященная биомедицине как культурному явлению и одновременно ансамблю быстро развивающихся технологий [51].

Характерной чертой антропологических исследований применительно к биомедицине стало своего рода освобождение от ее магических чар. Биомедицина предстала не просто как порождение культуры Запада, но и как детище западного капитализма, выступающее в роли особого культурно-идеологического ресурса, способствующего обеспечению социального неравенства и легитимации существующего общественного порядка. В постколониальном мире биомедицина, кроме того, оказалась предметом демонстративного потребления, позволяющим наиболее обеспеченным слоям местного общества подчеркивать свою цивилизованность и утверждать престиж. Ведущие представители критической медицинской антропологии, такие, как Ханс Баер и Мерилл Зингер, задали весьма высокую планку для оценки социальной ценности биомедицины, когда усомнились в том, что биомедицина и используемые ею средства способны сделать этот мир более здоровым. Им удалось показать, что биомедицина часто выступает не только средством модернизации постколониальных обществ Третьего мира, но и средством для усугубления их проблем в сфере здоровья [42].

В 1970-е гг. в медицинскую антропологию впервые стали проникать феминистские идеи, что привело к росту интереса к таким проблемам, как гендер, сексуальность и репродукция и, как выражаются некоторые авторы, к «гендеризации медицинской антропологии» [52]. Будучи весьма чувствительными к интересам уязвимых социальных групп, антропологи закономерным образом акцентировали свое внимание на проблемах, связанных с женским здоровьем и женской репродуктивной физиологией.

Идеи социального и культурного освобождения женщин побудили некоторых антропологов критически посмотреть на практики репродуктивной медицины и современные системы родовспоможения. Анализируя опыт американской репродуктивной медицины 1970-х и 1980-х гг., антропологи, пришли к выводам о том, что она является чрезмерно технократичной и нечувствительной к женским эмоциональным потребностям. Кроме того, было обнаружено, что в большинстве медицинских учреждений медицинская помощь роженицам осуществляется с поправкой на их классовую и расовую принадлежность. Начиная со знаменитого исследования Бриджит Джордан о «родах в четырех культурах», стали предприниматься попытки предложить гуманистическую альтернативу, которая чаще всего связывалась с опытом домашних родов, в присутствии членов семьи и с приглашением специально обученных повитух, а также с опытом родовспоможения в некоторых европейских странах и в сельских обществах [53-55].

Критические настроения и поиск гуманистической альтернативы, характерные для медицинской антропологии 1970-х и 1980-х гг., позднее сменились более реалистичными соображениями. По мере того, как в рамках феминистского движения произошел переход от идей «женского освобождения» к «женскому развитию», в антропологии также были представлены многочисленные доказательства того, что большинство женщин не желают совершенно отказываться от услуг репродуктивной медицины. Напротив, они считают ее более эффективной, чем традиционное повивальное искусство, но при этом исповедуют здравый смысл и особенный «женский прагматизм». Исследования, выполненные как в развитых, так и в развивающихся странах, показывали, что женщины в роддомах

часто готовы терпеть определенные неудобства во имя достижения более значимых для них результатов – медицинской помощи новорожденным, надежного врачебного контроля, использования современных технологий и т.п. [56-58].

Проблематика родов стала своеобразным прологом к изучению других вопросов в рамках *антропологии репродукции*. Многие антропологи попытались исследовать социальные и культурные аспекты остальных сторон репродуктивной жизни, всех эпизодов жизненного цикла. Так, в поле зрения исследователей вошли проблемы грудного вскармливания, ухода за детьми, полового созревания, менопаузы, регулирования рождаемости, бесплодия и многие другие. Было показано, что по каждому из таких примеров необходимо вести серьезную научную дискуссию. Если в западном мире в течение последнего столетия вся репродуктивная жизнь людей превратилась в предмет пристального внимания со стороны врачей, то в других культурах она оказалась не охвачена медиализацией и теми коннотациями, которые ею предписываются. Так, по наблюдениям Маргарет Лок, в странах Северной Америки женская менопауза уже давно воспринимается как возрастное отклонение от физиологической нормы, допускающее, к тому же, терапию с применением гормонов, в то время как в Японии она таковой не считается [59]. Грудное вскармливание в одних культурах воспринимается как приемлемая публичная практика, а в других в качестве таковой совершенно недопустима; при этом альтернатива между материнской грудью и бутылочкой с молочной смесью часто обусловлена не столько личным выбором матери, сколько уровнем материального благополучия конкретной семьи и целого общества [60, 61]. Бесплодие, как мужское, так и женское, во всех культурах социально стигматизируется, но с развитием вспомогательных репродуктивных технологий оно впервые превращается в решаемую медицинскую проблему – но в первую очередь для представителей обеспеченного среднего класса [62, 63].

Некоторые антропологии попытались анализировать проблемы репродукции с позиций биокультурного подхода. Акцент был сделан на том, чтобы демедиализировать представления о репродуктивных событиях и показать, что каждое из них не только нагружено культурными смыслами, но и укоренено в биологии человечества. В исследованиях антропологов-эволюционистов подчеркивается, что менструации, беременность, трудные роды, грудное вскармливание, менопауза, забота о потомстве и материнство являются продуктами адаптации нашего вида, давшего ему преимущество перед другими живыми существами, в том числе ближайшими биологическими родственниками из числа приматов [64, 65]. Критикуя практику разделения рожениц и новорожденных в современных роддомах, Венда Тревазан подчеркнула биокультурную значимость контакта матери и ребенка в первый час после рождения [66].

Многие выводы, впервые полученные западными медицинскими антропологами, нашли поддержку отечественных исследователей социокультурных проблем репродукции [67]. Активность антропологов репродукции, объединившихся в особую секцию в рамках давно уже ставшего международным *Общества медицинской антропологии*, оказывает влияние на дискуссии о женском и мужском репродуктивном здоровье, ведущиеся в разных странах. Целый ряд острых вопросов в сфере организации медицинской помощи беременным и роженицам, попавших в поле зрения медицинских антропологов в последней четверти XX в., уже благополучно сняты. Наиболее значимый успех связан с гуманизацией практик медицинского родовспоможения, которая началась на рубеже 1990-х и 2000-х гг. во многих развитых странах.

Расширение предметного поля медицинской антропологии началось фактически сразу же после зарождения дисциплины. Проблемы общественного здоровья, находившиеся в поле зрения пионеров медицинской антропологии, стали отправным пунктом для последующих исследований различных аспектов здоровья. Так, в фокусе антропологов оказались вопросы, касающиеся психического здоровья, репродуктивного здоровья, детского здоровья, здоровья пожилых людей и т.д. Изучение вопроса о способах сохранения здоровья привело к разноплановым исследованиям потенциала народной (неконвенциональной) медицины, травничества, духовного целительства, магики-религиозного врачевания, практик альтернативной помощи, а также, как уже отмечалось, биомедицины. Справедливо подчеркивалось, что во всех обществах, независимо от уровня их развития, проблемы здоровья всегда находятся в центре внимания. Комплекс связанных с ними представлений и практик является устойчивым элементом всякой культуры, поэтому антропологам всегда есть что добавить к той информации, которой в современном мире обладают врачи и другие медицинские работники.

Бурное развитие медицинского знания в последние десятилетия породило у многих образованных людей своеобразную веру в то, что медицина держит в своих руках ключи от всех дверей, ведущих в царство здоровья. Между тем опыт развития самой медицины показывает, что уже с 1950-х гг. многие врачи и руководители служб здравоохранения в развитых странах регулярно предприни-

мали попытки заручиться поддержкой экспертов в области социально-гуманитарного знания, поскольку практикуемая «биомедицинская модель» оставляла вне поля медицинского зрения многие аспекты здоровья, обусловленные культурой. Привычка видеть такие объекты, как тела, ткани, клетки, бактерии, вирусы, гены, часто делала «невидимыми» такие вещи, как ценности, верования, идеи, а кроме того, социальные институты и сети. В результате таких альянсов в 1960-е гг. возникла особая область знания, именуемая медицинской антропологией, которая весьма быстро превратилась из прикладной по характеру дисциплины в самостоятельную, насыщенную теоретическим содержанием науку. При этом большинство антропологов никогда не были приверженцами чистого академизма. Среди них всегда находятся те, кто рассматривает медицинскую антропологию как «дисциплину в действии» [68, 69].

Развитие медицинской антропологии никогда не происходило по какому-то одному шаблону. Американская версия медицинской антропологии, оказавшая большое влияние на медико-антропологические традиции других стран, все же никогда не была доминирующей. За пределами Северной Америки мы встречаем много других, весьма самобытных академических традиций изучения культуры, здоровья и болезни [3, 4]. Это касается и России, где медицинская антропология вырастает в рамках набирающего силу диалога между физической антропологией, этнологией, социологией и медициной. По этой причине большинство попыток сформулировать лаконичное определение предмета дисциплины не всегда оказываются приемлемыми. Сознвая этот факт, исследователи из разных стран, объединившиеся под эгидой Общества медицинской антропологии, предпочитают ориентироваться на расширительную форму его трактовки.

«Медицинская антропология – область антропологии, которая черпает из социальной, культурной, биологической и лингвистической антропологии, чтобы лучше понять те факторы, что влияют на здоровье и благополучие (в широком его определении), опыт и распространение болезни, профилактику и лечение заболеваний, процессы врачевания, социальные отношения, касающиеся выбора лечения, культурную значимость плюралистических медицинских систем и их применение. Медицинская антропология как дисциплина черпает из самых разных теоретических подходов. Она внимательна как к популярным формам заботы о здоровье, так и к научной эпидемиологии, как к социальному конструированию знания и научной политики, так и к научным открытиям и проверке гипотез. Медицинские антропологи изучают как на здоровье индивидов, больших сообществ и среды влияют взаимоотношения между людьми и другими видами, культурные нормы и социальные институты, микро- и макрополитику, движущие силы глобализации и их воздействие на локальные культурные миры» [70].

ЛИТЕРАТУРА

1. Scotch N.A. Medical Anthropology / N.A. Scotch // *Biennial Review of Anthropology*. 1963. Vol. 3. P. 30-68.
2. Fabrega H. Medical Anthropology / H. Fabrega // *Biennial Review of Anthropology*. 1971. Vol. 7. P. 167-229.
3. Saillant F. Medical Anthropology: Regional Perspectives and Shared Concerns / F. Saillant, S. Genest (eds.). Malden, Ma: Blackwell Publishing, 2007.
4. Михель Д.В. История социальной антропологии (медицинская антропология): учеб. пособие / Д.В. Михель. Саратов: Научная книга, 2010.
5. Ожиганова А.А. Антропология и медицина: перспективы взаимодействия (дискуссия 1980-х – 2000-х годов) / А.А. Ожиганова // *Этнографическое обозрение*. 2011. №3. С. 10-21.
6. Sobo E.J. Medical Anthropology in Disciplinary Context: Definitional Struggles and Key Debates (or Answering the Cri Du Coeur) / E.J. Sobo // Singer M., Erickson P.I. (eds.) *A Companion to Medical Anthropology*. Oxford: Blackwell Publishing, 2011. P.9-28.
7. Михель Д.В. Медицинская антропология: фокусируясь на здоровье и болезни / Д.В. Михель // *Общество ремиссии: на пути к нарративной медицине: сб. науч. тр. / под общ. ред. В.Л. Лехциера*. Самара: Изд-во «Самарский университет», 2012. С.34-53.
8. Baer H.A. Medical Anthropology and the World System / H.A. Baer, M. Singer, I. Susser. 2 ed. Westport, Ct: Praeger, 2003. P.8, 53-54.
9. Rivers W.H.R. The Todas / W.H.R. Rivers. London: Macmillan and Co., 1906.
10. Rivers W.H.R. Medicine, Magic, and Religion / W.H.R. Rivers. London: Kegan Paul, Trench, Trubner and Co., 1924.
11. Ackerknecht E.H. Medicine and Ethnology: Selected Essays / E.H. Ackerknecht. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1971.

12. Paul B. *Health, Culture and Community: Case Studies of Public Reactions to Health Programs* / B. Paul (ed.). Russell Sage Foundation, 1955.
13. Foster G.M. *Problems in Intercultural Health Programs: Memorandum to the Committee on Preventive Medicine and Social Science Research* / G.M. Foster. N. Y.: Social Science Research Council, 1958.
14. Caudill W. *Effects of Social and Cultural Systems in Reactions to Stress* / W. Caudill. N. Y.: Social Science Research Council, 1958.
15. Roney J.G. *Medical Anthropology: A Synthetic Discipline* / J.G. Roney // *The New Physician*. 1959. Vol. 8 (1). P.32-33.
16. Foster G.M., Anderson B.G. *Medical Anthropology* / G.M. Foster, B.G. Anderson. N. Y.: John Wiley & Sons, 1978. P.1-10.
17. Brown P.J. *Understanding and Applying Medical Anthropology* / P.J. Brown. London: Mayfield Publishing, 1998.
18. Weidman H.H. *On the Origins of the SMA* / H.H. Weidman // *Medical Anthropology of Quarterly*. 1986. Vol. 17 (5). P.115-124.
19. Михель Д.В. Хэзел Вейдман и возникновение медицинской антропологии в США (к пятидесятилетию образования Общества медицинской антропологии) / Д.В. Михель // *Медицинская антропология и биоэтика*. 2012. №2 (4) // <http://jmaib.iea.ras.ru/ru/practice/stories/item/179-khezel-vejdman-i-voznikновение-meditsinskoj-antropologii-v-ssha-k-pyatidesyatiletiju-obrazovaniya-obschestva-meditsinskoj-antropologii>.
20. Бромлей Ю.В. *Народная медицина как предмет этнографических исследований* / Ю.В. Бромлей, А.А. Воронов // *Советская этнография*. 1976. № 5. С. 3-18.
21. *Антропология – медицине* / под ред. Т.И. Алексеевой. М.: Изд-во МГУ, 1989.
22. Ковешников В.Г. *Медицинская антропология* / В.Г. Ковешников, Б.А. Никитюк. Киев: Здоровья, 1992.
23. Ярская-Смирнова Е.Р. *Социальная антропология современности: теория, методология, методы, кейс-стади: учеб. пособие* / Е.Р. Ярская-Смирнова, П.В. Романов, Д.В. Михель. Саратов: Научная книга, 2004. С.61-105.
24. *Проблемы сохранения здоровья в условиях Севера и Сибири: труды по медицинской антропологии* / отв. ред. В.И. Харитонова. М.: ОАО «Типография «Новости», 2009.
25. Харитонова В.И. *Медицинская антропология на Западе и в России* / В.И. Харитонова // *Этнографическое обозрение*. 2011. №3. С.3-10.
26. *Primary Health Care: Report of the International Conference on Primary Health Care*. Alma-Ata, USSR, 6-12 September 1978. Geneva: WHO, 1978.
27. Foster G.M. *Medical Anthropology: Some Contrasts with Medical Sociology* / G.M. Foster // *Medical Anthropology Newsletter*. 1974. Vol.6 (1). P.1-6.
28. Fabrega H. *The Need for an Ethnomedical Science* / H. Fabrega // *Science*. 1975. Vol. 189 (4207). P. 969-975.
29. Leslie C. *Asian Medical Systems: A Comparative Study* / C. Leslie (ed.). Berkeley: University of California Press, 1976.
30. Roney J.G. *Medical Anthropology: An Introduction* / J.G. Roney // *Journal of National Medical Association*. 1963. Vol. 55 (2). P. 95-99.
31. Engel G.L. *The Need for a New Medical Model: A Challenge for Biomedicine* / G.L. Engel // *Science*. New Series. 1977. Vol. 196 (4286). P. 129-136.
32. Helman C.G. *Medicine and Culture: Limits of Biomedical Explanation* / C.G. Helman // *Lancet*. 1991. May 4. Vol. 337 (8749). P. 1080-1083.
33. Eisenberg L. *Disease and Illness: Distinctions Between Professional and Popular Ideas of Sickness* / L. Eisenberg // *Culture, Medicine, and Psychiatry*. 1977. Vol.1 (1). P.9-23.
34. Kleinman A. *Patients and Healers in the Context of Culture: An Exploration of the Borderland between Anthropology, Medicine, and Psychiatry* / A. Kleinman. Berkeley: University of California Press, 1980.
35. Chrisman N.J. *Clinically Applied Anthropology: Anthropologists in Health Science Settings* / N.J. Chrisman, T.W. Maretzki (eds.). Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1982.
36. Helman C.G. *Culture, Health and Illness* / C.G. Helman. 5 ed. London: Hodder Arnold, 2007. P. 1.
37. McElroy A., Townsend P.K. *Medical Anthropology in Ecological Perspective* / A. McElroy, P.K. Townsend. 5 ed. Boulder: Westview Press, 2009.
38. Alland A. *Adaptation in Cultural Evolution: An Approach to Medical Anthropology* / A. Alland. N. Y.: Columbia University Press, 1970.

39. Baer H. On the Political Economy of Health / H. Baer // *Medical Anthropology Newsletter*. 1982. Vol. 14 (1). P. 1-2, 13.
40. Morgan L. Dependency Theory in the Political Economy of Health: An Anthropological Critique / L. Morgan // *Medical Anthropology Quarterly*. 1987. Vol.1 (2). P.131-154.
41. Morsy S. Political Economy in Medical Anthropology / S. Morsy // Johnson T.M., Sargent C.F. (eds.) *Medical Anthropology: Contemporary Theory and Method*. Westport: Praeger, 1990. P. 26-46.
42. Baer H. *Medical Anthropology and the World System* / H. Baer, M. Singer, I. Susser. Medical. Westport: Praeger, 2003.
43. Scheper-Hughes N. Three Propositions for a Critically Applied Medical Anthropology / N. Scheper-Hughes // *Social Science and Medicine*. 1990. Vol.30 (2). P.189-197.
44. Last M. The Importance of Knowing about Not Knowing / M. Last // *Social Science and Medicine*. 1981. Vol.15 (3). P.387-392.
45. Sargent C. *Cultural Context of Therapeutic Choice* / C. Sargent. Dordrecht: Kluwer, 1982.
46. Hahn R.A., Gaines A.D. *Physicians of Western Medicine: An Introduction* // *Culture, Medicine, and Psychiatry*. 1982. Vol.6 (3). P.215-218.
47. Hahn R.A., Gaines A.D. (eds.) *Physicians of Western Medicine: Anthropological Approaches to Theory and Practice*. Dordrecht: Reidel, 1985.
48. Hahn R.A., Kleinman A. *Biomedical Practice and Anthropological Theory: Frameworks and Directions* / R.A. Hahn, A. Kleinman // *Annual Review of Anthropology*. 1983. Vol. 12. P. 305-333.
49. Rhodes L.A. *Studying Biomedicine as a Cultural System* / L.A. Rhodes // Johnson T.M., Sargent C.F. (eds.) *Medical Anthropology: Contemporary Theory and Method*. N. Y.: Praeger, 1990. P. 159-173.
50. Lock M. *Living and Working with the New Medical Technologies: Intersections of Inquiry* / M. Lock, A. Young, A. Cambrosio (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
51. Lock M. *An Anthropology of Biomedicine* / M. Lock, V.-K. Nguyen. Oxford: Wiley-Blackwell, 2010.
52. Browner C.H. *Gender: Engendering Medical Anthropology* / C.H. Browner, C.F. Sargent // Saillant F., Genest S. (eds.) *Medical Anthropology: Regional Perspectives and Shared Concerns*. Malden, Ma: Blackwell Publishing, 2007. P.233-250.
53. Jordan B. *Birth in Fourth Cultures: A Crosscultural Investigation of Childbirth in Yucatan, Holland, Sweden, and the United States* / B. Jordan. 4 ed. Prospect Heights, Illinois: Waveland Press, 1992.
54. Martin E. *The Woman in the Body: A Cultural Analysis of Reproduction: With a New Introduction* / E. Martin. Boston: Beacon Press, 2001.
55. Davis-Floyd R. *Birth as an American Rite of Passage* / R. Davis-Floyd. 2 ed. With a New Preface. Berkeley: University of California Press, 2004.
56. Sargent C.F. *Ways of Knowing about Birth in Three Cultures* / C.F. Sargent, G. Bascope // *Medical Anthropology Quarterly*. 1996. Vol.10 (2). P.213-236.
57. Lazarus E. *What Do Women Want? Issues of Choice, Control, and Class in American Pregnancy and Childbirth* / E. Lazarus // Davis-Floyd R.E., Sargent C.F. (eds.) *Childbirth and Authoritative Knowledge: Cross-Cultural Perspectives*. Berkeley: University of California Press, 1997. P.132-158.
58. Михель И.В. *Женщина в роддоме: увидеть невидимое глазами фотографов* / И.В. Михель // *Визуальная антропология: новые взгляды на социальную реальность: сб. науч. ст. / под ред. Е.П. Ярской-Смирновой, П.В. Романова, В.Л. Круткина*. Саратов: Научная книга, 2007. С. 102-123.
59. Lock M. *Encounters with Aging: Mythologies of Menopause in Japan and North America* / M. Lock. Berkeley: University of California Press, 1993.
60. Smith P.H. *Beyond Health, Beyond Choice: Breastfeeding Constraints and Realities* / P.H. Smith, B.L. Hausman, M. Labbok (eds.). New Brunswick, N. Y: Rutgers University Press, 2012.
61. Van Esterik P. *The Politics of Breastfeeding* / P. Van Esterik // Counihan C., Van Esterik P. (eds.) *Food and Culture: A Reader*. N. Y.: Routledge, 2008. P. 467-481.
62. Inhorn M.C. *Middle Eastern Masculinities in the Age of New Reproductive Technologies: Male Infertility and Stigma in Egypt and Lebanon* / M.C. Inhorn // *Medical Anthropology Quarterly*. 2004. Vol. 18 (2). P. 162-182.
63. Becker G. *The Elusive Embryo: How Women and Men Approach New Reproductive Technologies* / G. Becker. Berkeley: University of California Press, 2000.
64. Hrdy S.B. *Mother Nature: Maternal Instincts and How They Shape the Human Species* / S.B. Hrdy. N. Y.: Ballantine Books, 1999.
65. Wiley A.S. *Medical Anthropology: A Biocultural Approach* / A.S. Wiley, J.S. Allen. N. Y.: Oxford University Press, 2009. P.138-183.

66. Trevathan W.R. Human Birth: An Evolutionary Perspective / W.R. Trevathan. N. Y.: Akline de Gruyer, 1987.
67. Здоровье и доверие: гендерный подход к репродуктивной медицине: сб. ст. / под ред. Е. Здравомысловой и А. Темкиной. СПб.: Изд-во Европейского университета в Санкт-Петербурге, 2009.
68. Singer M. Medical Anthropology: A Discipline in Action / M. Singer, H. Baer. N. Y.: AltaMira Press, 2007.
69. Winkelman M. Culture and Health: Applying Medical Anthropology / M. Winkelman. San Francisco: Jossey-Bass, 2009.
70. What is Medical Anthropology? // <http://www.medanthro.net/feature/what-is-medical-anthropology/>

Михель Дмитрий Викторович –
доктор философских наук, профессор кафедры
«Социология, социальная антропология и соци-
альная работа» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry V. Mikhel –
Dr. Sc., Professor
Department of Sociology, Social Anthropology
and Social Work
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 93

Е.Н. Моисеева

ОРГАНИЗОВАННЫЙ ТУРИЗМ И САМОСТОЯТЕЛЬНЫЕ ПУТЕШЕСТВИЯ В ПОСЛЕДНЕЙ ТРЕТИ XIX ВЕКА: ФРАНЦУЗЫ В СЕВЕРНОЙ АФРИКЕ

В статье анализируется феномен путешествий европейцев по странам Востока в эпоху империализма; рассматривается путевая повседневность европейцев, путешествовавших самостоятельно и организованно в последней трети XIX века.

Путешествие, туризм, туристы, Восток, империя

E.N. Moiseeva

TOURISM XIX: TRAVEL MADAM BLANCHE LEE SCHILD IN EGYPT

In the article analyzes the memories of traveling. They were published in France in the late 19th century. This article explores the one aspect of a larger problem: the image of a «foreign culture», the study of the phenomenon of «the Other» – travel daily travel-Europeans in the East in the last third of the XIX century.

Travel, tourism, tourists, East, empire

В последней трети XIX в. Франция создала вторую по величине колониальную империю. Изучение межкультурного, межцивилизационного взаимодействия в рамках колониальных империй – одно из приоритетных направлений как в зарубежной, так и в отечественной историографии. Европейский человек, став свидетелем колониальной эпопеи, смог воочию познакомиться с неевропейскими обществами. Благодаря возросшим техническим возможностям современных средств связи планета стала открытой для межкультурных контактов. Работа в колониальной администрации, служба в колониальных войсках, работа журналиста сделали эти контакты непосредственными. Но не только те, кто связал свою жизнь со строительством колониальной империи, могли путешествовать по экзотическим странам. В последней трети XIX в. зарождается организованный туризм. Британский пастор Томас Кук признан основоположником современного туризма. С его именем связаны первые организованные путешествия на Восток. Первый экскурсионный железнодорожный тур был организован в 1843 г. С 1856 г. было создано туристское агентство Томаса Кука [8]. От-

крытие в 1869 г. Суэцкого канала облегчило доступ европейцев в Египет. В 1870-е гг. Агентство Томаса Кука покупает первые два паровых суда и добивается у египетского правительства права курсировать по Нилу [11]. После того как в 1882 г. Египет попал под протекторат Англии, он стал для агентства Томаса Кука важнейшей туристской дестинацией.

В данной статье рассматриваются заметки о путешествиях французов, побывавших в Северной Африке в последней трети XIX века, их впечатления от Марокко, Туниса, Египта, а также их отношение к организованным туристам Томаса Кука. В 1830 г. Франция начала завоевание Алжира, в 1881 г. утверждается протекторат над Тунисом. Египет после 1882 г. окончательно стал сферой влияния Великобритании. Вплоть до начала XX в. Марокко оставалось независимым государством, при этом вожделенным для европейских колонизаторов. В конце XIX – начале XX веков во Франции возросло количество публикаций, посвящённых самым различным сюжетам колониальной эпопеи: путевые заметки, репортажи, туристская литература, научные и научно-популярные труды, художественные произведения. Большинство европейцев, не имея возможности личных контактов с народами колонизируемых стран, осуществляли эти контакты опосредованно, с помощью колониальной литературы. Читателей интересовало все: живописное описание природы, сведения о быте, традициях туземцев, их внешнем облике. Путешественники охотно излагали на бумаге все увиденное ими в пути. В XIX веке человек путешествующий воспринимался современниками как, безусловно, интересная личность.

В своем распоряжении историк, решивший изучить путешествие, имеет в качестве источника текст о путешествии, который, как верно отметили в своей статье А. В. Толстяков и О. Е. Кошелева не всегда совпадает с реальными событиями путешествия [1]. Человек путешествующий раскрывался для себя и окружающих с другой стороны. «Если вы благоразумны, вы увидите в этом длинном периоде наступательного движения не просто переезд с места на место до цели вашего путешествия, но одну из тех редких эпох жизни, в которые преобразовывается характер человека» [2], – писал англичанин Александр Уильям Кинглек в произведении под названием «Путешествие английского туриста по Востоку». Путешествие на Восток в XIX в. было долгим и нелегким по сравнению с путешествием по Европе. При изучении заметок о путешествиях последней трети XIX в. обращает на себя внимание тот факт, что путешествия были довольно длительными. Часто они длились по нескольку месяцев. Так, например, Морис Палеолог (1859-1944), чьи воспоминания о путешествиях мы изучали, с 1880 г. служил в МИД Франции в качестве французского дипломата, благодаря чему и пробыл несколько месяцев в Марокко [3]. Вместе с посольством путешествовал известный и влиятельный во Франции последней трети XIX века журналист Габриель Шарм (1850-1886). Он провел полгода в Египте, путешествовал также по Марокко и Тунису и издал ряд произведений, доставивших ему громкую литературную известность [4]. Не только мужчины, но и женщины в 80-е гг. XIX в. с достаточной долей комфорта могли путешествовать, например по Египту. Наше внимание привлекла работа Мадам Бланш Ли Шильд «Зима в Каире», изданная в Париже в 1883 г. [6]. Мадам Бланш Ли Шильд была дочерью скульптора Генриха де Трикети и племянницей американского генерала Роберта Ли. Известный во Франции в последней трети XIX века писатель Пьер Лоти называл ее «честной, отважной, благородной, изысканной» женщиной [7]. Мадам Бланш Ли Шильд провела в Египте несколько зимних месяцев.

Каждый из путешественников столкнулся с определенными сложностями, посещая регион Северной Африки. Но французских путешественников привлекала в городах Востока не их модернизация, которая несла комфорт, а их самобытность. Мадам Бланш Ли Шильд побывала зимой 1884 г. в Тунисе и в форме дневника опубликовала свои путевые заметки «В Тунисе. Воспоминания о путешествии». Дневник изобилует описанием природы Туниса, архитектурных памятников. «Неизвестно на самом деле, что древнее, а что современнее в этой стране, где всё кажется новым под постоянно обновляемым слоем побелки, и всё, однако, кажется древним, настолько обычай, нравы мало изменились за 12 веков» [10]. На арабов путешественница смотрела свысока, так же как и на кривые улочки тунисских городов. Единственное, чем по-настоящему восхищалась путешественница в Тунисе, – это римскими развалинами, «остатками цивилизации на варварской земле». Г. Шарм оказался в Марокко после того, как уже посетил Египет, Триполитанию, Тунис и Алжир. В Марокко он испытал ряд неудобств. «Нет ничего более неудобного, чем путешествовать по Марокко, где нет ни дорог, ни безопасности для туристов... Единственное средство посетить эту страну, так близко расположенную, и, тем не менее, полностью закрытую, – отмечает он, – это ехать с посольствами, которые европейские державы посылают иногда ко двору марокканского султана в города Марокко, Фес, Мекнес» [5, Т. 75. 15 juin p. 839]. Г. Шарм сопровождал в поездке Господина Ферро, который до этого был консулом в Триполи, а теперь направлялся на службу в Танжер. Подолгу жить и путешествовать по экзо-

тическим странам в последней трети XIX века могли люди обеспеченные, а путешествуя с посольством, и Морис Палеолог, и Габриэль Шарм чувствовали себя еще и в безопасности. Известно, что Мадам Бланш Ли Шильд также в пути пользовалась покровительством властей, а именно консульской поддержкой [6]. Несмотря на плохие дороги, грязь и ямы, в Каире дама поселилась в довольно комфортабельном отеле. Отель Луксора она описывала как живописный, утопающий в цветах отель [6].

Наши путешественники могли свободно передвигаться по городам, куда приезжали, бродить по Медине, гулять по узким улочкам, посещать достопримечательности, даже прогуливаться по мусульманским кладбищам, а женщины могли проникнуть и в гарем. Очевидно, что большую часть времени они проводили в богатых кварталах, бывали на официальных приемах, о чем они подробно написали в своих воспоминаниях. Г. Шарму очень понравились сады марокканского города Феса. «Они не похожи на европейские сады, – пишет он, – растения растут не рядами и не формируют каких-либо элегантных фигур; это скорее заросли, чем сады. Кустарники и цветы посажены бессистемно, все перепутано, смешано, но это восхитительный беспорядок» [5]. Г. Шарм посетил все достопримечательности города Танжер: рынок, арабское кафе, заглянул даже в окна тюрьмы крепости Казбах. Но люди в городе больше, чем сам город, интересовали Г. Шарма. Это относится и к М. Палеологу, который описывает и праздники в гареме визиря, и аудиенцию у султана. Однако в пути путешественников привлекали не только достопримечательности, красота садов и богатые приемы. Экзотику видели в самом образе жизни местного населения, а знакомясь с этим образом жизни, европейцы сталкивались с бедностью и болезнями. В столице Марокко М. Палеолога поразило еврейское гетто (меллах), которое окружали высокие стены, а по вечерам ворота, ведущие в меллах, закрывали, и солдаты охраняли его. Внутри, отмечает М. Палеолог, «отвратительный запах, так как мусор выбрасывали из окон». Повсюду в гетто царили нищета и ее спутница грязь. Даже дома богатых евреев снаружи имели убогий вид, в то время как внутри можно было встретить роскошную европейскую мебель [3].

Необходимо отметить, что наши путешественники время от времени прибегали к услугам гидов. Бланш Ли Шильд с помощью гидов осматривала достопримечательности Египта. Гидами могли быть и арабы, и европейцы, живущие и работающие в Египте. В своей книге она не раз писала: «нас повели», «нам показали» [6]. Например в один из дней «замечательный гид Господин Масперо рассказывает нам о предстоящем визите, который мы не сможем забыть» [6] – писала Бланш Ли Шильд. Господин Масперо возглавлял в то время египетскую службу древностей, которая пыталась остановить разграбление гробниц.

Французы, путешествующие по Северной Африке, передвигались, используя разный транспорт. Наряду с новыми современными видами транспорта, такими как железная дорога, использовались ослы, верблюды и лошади. Бланш Ли Шильд по городу могла передвигаться на осле, верхом на лошадах она отправилась в Гизы смотреть пирамиды. По песку было нелегко идти, но путникам помогали бедуины. Во время своего пребывания в Египте Бланш Ли Шильд 8 дней путешествовала по Нилу на небольшом судне, дойдя до Нубии. На острове Филэ, куда Бланш Ли Шильд добралась в шлюпке, она посетила храм Исиды [6]. В следующие дни Бланш Ли Шильд посетила долину царей. К сожалению, по словам путешественницы, многое утрачено из-за арабов и туристов, прибывающих туда [6]. «Путешественники виноваты даже больше, чем арабы» [6], – пишет она, отделяя себя от остальных европейцев, путешествовавших по Египту.

Бланш Ли Шильд встретила в храме Рамзеса II одну из групп организованных туристов, путешествующих с фирмой «Томас Кука». Этот отрывок из источника очень важен для понимания того, как относились к туристам и как они вели себя в поездке. Вот что пишет наша героиня: «Ужас! Храм Рамзеса II атакован бандой «туристов Кука». Их много, они шумят, кричат... Расползлись как муравьи... Мы замедляем шаг, чтобы дать им уйти» [6]. Далее она описывает, как один из этих «современных паразитов», так она называет туриста, забрался прямо на статую. «Они приехали, кто откуда, ничего не знающие, они и уедут также, несведущими, гордые тем, что три недели побывали на берегу Нила... Нам необходимо теперь некоторое время, чтобы прийти в себя и забыть то впечатление, которое осталось у нас от этих вандалов – послушных настоящему фараону современного Египта – сеньору Томасу Куку» [6]. Мадам Бланш Ли Шильд столкнулась в Египте с одной из первых групп организованных туристов. Их поведение повергло Мадам в шок. Сама она не раз подчеркивала своё преклонение перед древними руинами Египта. На следующий день после встречи с туристами, впечатление от них осталось таким же сильным. «Мои вчерашние враги – «туристы Кука», – вспоминает она их [6].

Довольно резко высказывался о туристах Кука популярный во Франции на рубеже XIX – XX веков писатель Пьер Лоти (псевдоним Жюльена Вио). За свою тридцатилетнюю творческую жизнь Лоти написал более 40 томов. Все наиболее известные произведения созданы в 80–90-х гг. XIX в. Лоти – автор множества описаний путешествий и путевых заметок. Когда в 1907 г. он прибыл в Луксор, то с горечью писал: «Луксору пришёл конец! Какая толпа людей здесь! По всему Нилу эти туристские корабли, которые засоряют Нил, они шумят, а их динамо-машины издают страшный рев» [10].

Мы видим, что зарождающийся массовый туризм воспринимался современниками (возможно, не всеми) довольно негативно. Самостоятельные путешественники отделяли себя от организованных групп, хотя объекты их туристского интереса совпадали. Тем не менее именно в последней трети XIX века организованный туризм набирает свои обороты. За период с 1880 по 1910 гг. в Луксоре огромными темпами развивалась туристская инфраструктура: количество мест размещения увеличилось с нескольких десятков до примерно 500 [11]. Возможно, в одном из таких новых отелей останавливалась Мадам Бланш Ли Шильд во время своего путешествия. Строители колониальных империй завоевывали не только новые земли для своих метрополий, они волей-неволей прокладывали дорогу все новым и новым туристам Томаса Кука. Несмотря на резкие замечания в адрес туристов наших путешественников, XX век стал веком организованного туризма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстикова А.В. Homo Viator / А.В. Толстикова, О.Е. Кошелева // Одиссей: человек в истории / Ин-т всеобщей истории РАН. М.: Наука, 2009 Путешествие как историко-культурный феномен / Гл. ред Чубарьян А.О., сост. С.И. Лучицкая. С. 5-11.
2. Кинглек А.В. Путешествие английского туриста по Востоку/ А.В. Кинглек // Современник, 1848. Т. 8. 1. № 3. // http://www.vostlit.info/Texts/Dokumenty/Turk/XIX/1820-1840/Kinglake_A_V/text1.htm
3. Paléologue M. Le Maroc. Notes et souvenirs / M. Paléologue // Revue des Deux Mondes. 1885. Т. 68. 15 avril.
4. Charme G. Cinq mois au Caire et dans la Basse Egypte / G. Charme. Paris, 1880.
5. Charme G. Une Amdassade au Maroc // Revue des Deux Mondes. 1886. Т. 75. 15 juin; Т. 76. 1, 15 juillet, 1, 15 août, Т. 77. 1 sept.
6. Blanche Lee Childe Un hiver au Caire. Journal de voyage en Egypte. Paris: Calman Levy, 1883. 335 p.
7. Loti P. A la memoire de Madame Lee Childe Paris: Calmann Lévy, 1893-1911 <http://www.needocs.com/document/ebooks-ebooks-romans-a-la-memoire-de-madame-lee-childe-de-pierre-loti,17705>
8. Биржаков М.Б. Введение в Туризм: учеб. / М.Б. Биржаков 6-е изд., перераб. и доп. СПб.: Издательский дом Герда, 2004. 448 с.
9. Mme Blanche Lee Childe En Tunisie. Souvenirs de voyages // Revue de Deux Mondes. 1884. Т. 64. 15 août. P. 850.
10. Loti, Pierre, La Mort de Philae, Paris, Calman Lévy. 1909.
11. Sandrine Gamblin Thomas Cook en Égypte et à Louxor : l'invention du tourisme moderne au XIXe siècle // Téoros, 25-2 | 2006, 19-25.

Моисеева Екатерина Николаевна – кандидат исторических наук, доцент кафедры «Менеджмент туристического бизнеса» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina N. Moiseeva – Ph. D., Associate Professor
Department of Tourism Management
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 13.04.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 1:316.4

В.А. Ручин

СИНТЕЗ КУЛЬТУРНЫХ КОДОВ В ЭПОХУ ГЛОБАЛИЗАЦИИ: РОССИЯ И КИТАЙ

Статья посвящена гармонизации культурных кодов в контексте образовательного диалога. Социальная память и образ страны представляют собой

факторы современного культурного взаимодействия. Синтез культурных кодов есть консолидация культурного многообразия в эпоху глобализации.

Культурный код, архетип, образование, культура, духовность, социальная память, эпоха глобализации, Россия и Китай

V.A. Ruchin

SYNTHESIS OF CULTURAL CODES IN THE ERA OF GLOBALIZATION: RUSSIA AND CHINA

The article is devoted to the harmonization of cultural codes in the context of the dialogue through education. Social memory and the image of a country are the factors of contemporary cultural interaction. Synthesis of cultural codes is a way to consolidation of cultural diversity in the era of globalization.

Cultural code, archetype, education, culture, spirituality, social memory, era of globalization, Russia and China

С древнейших времен идёт диалог Запада и Востока, особенно напряженный в одном из самых важных регионов мира - Евразии. Трудно спрогнозировать, какие возможные «модели взаимодействия разнородных цивилизаций будут доминировать на этом пространстве: а) столкновение (по С. Хантингтону); б) диалог (по М. Хатами и др.) или в) синтез?»¹. Для России восточное направление культурного диалога всегда было традиционным с точки зрения как географического положения страны, так и методов его реализации². В наши дни стремление россиян понять восточную культуру, в том числе китайскую, усиливается особенностями современного международного взаимодействия: динамичного и массового с точки зрения личных контактов.

В данной статье на примере сравнения ключевых характеристик архетипов и анализа специфики межкультурной коммуникации России и Китая, стремительно втягивающихся в современные интеграционные процессы³, делается попытка определить перспективу гармонизации культурных кодов в современных условиях. Интерес представляет сочетаемость различных культурных кодов, в нашем случае построенных на основе православия и конфуцианства.

У российской и китайской культур многовековая история добрососедских отношений, кроме того, обе страны прошли тяжёлый для национальных культур путь революционного освоения западных ценностей. Отметим, что для нашего Отечества «потаенная суть трагедии и марксизма, и либерализма, и вообще любой политической идеологии... - в попытке осуществить модернизацию страны вне какой-либо существенной связи с её национальной сущностью, а если быть точнее – за счет её преодоления в истории»⁴. В последнее десятилетие сближение наших стран происходит в условиях процесса глобализации, проводимой по западному сценарию. Унификация по социальным стандартам, как показывает опыт, ведёт мировое сообщество к новой поляризации, то есть в сторону исторического тупика.

Выход из тупика может быть только в гармонизации многообразия традиций, поддерживаемых социальной памятью. Социальная память как фактор социального взаимодействия⁵ тесно связана с культурными кодами, служит не столько сохранению прошлого, сколько поддержанию целостности группы, сообщества, утверждая тенденции социальной инклюзии⁶. Социальная память и культурный

¹ Лузянин С.Г. Россия и Китай в Евразии. Международно-региональные измерения российско-китайского партнерства / отв. Ред. академик Титаренко. М.: ИД «ФОРУМ», 2009. С. 7.

² См.: Китай в диалоге цивилизаций: К 70-летию академика М.Л. Титаренко / Гл. ред. С.Л. Тихвинский. М.: Памятники исторической мысли, 2004; Лукин А.В. Медведь наблюдает за драконом. Образ Китая в России в XVII–XXI веках. М.: Восток-Запад: АСТ, 2007; Лузянин С.Г. Россия и Китай в Евразии. Международно-региональные измерения российско-китайского партнерства / отв. ред. акад. РАН М.Л. Титаренко. М.: ИД «ФОРУМ», 2009; Коростовец И.Я. От Чингис Хана до Советской республики (краткая история Монголии с особым учетом новейшего времени). Улан-Батор: ЭМГЭНТ, 2004.

³ Жерносенко А.А. Межконфессиональный диалог как культуuroобразующий феномен в постиндустриальном обществе на примере Алтайского края // Мир науки, культуры, образования. № 5 (36). 2012. С. 2014.

⁴ Козин Н.Г. Россия. Что это? В поисках идентификационных сущностей. М.: Академический проект; Альма Матер, 2012. С. 9.

⁵ См.: Власть времени: социальные границы памяти / под ред. В.Н. Ярской-Смирновой. М.: ООО «Вариант», ЦСПГИ, 2011, 224 с.

⁶ См.: Социальная политика современной России: социологический анализ тенденций инклюзии: монография / под ред. Д.В. Зайцева и В.Н. Ярской. Саратов: СГТУ, 2010. 132 с.

код – взаимосвязанные явления, определяющие характер культурного диалога, важным фактором которого является ценностный образ страны как интегрирующий элемент в структуре идентичности. Образ страны – это одновременно и духовный ориентир, и символ национальной культуры, и рациональное выражение устойчивых представлений. Конструктивность международного диалога предполагает сохранение положительного образа иной культуры в массовом сознании, что невозможно без образования как массового социального явления.

Следует подчеркнуть, что сегодня в условиях противостояния глобализации и традиции обнажается механизм формирования идентичности, действующий по формуле «образование – архетип – идентичность». Навязчивое желание применить единую формулу социального развития для всех приобретает в каком-то смысле религиозный оттенок, приводя к открытому давлению на культурные коды. Вот почему приходится вновь и вновь утверждать, что не может быть «такой национальной, этической или религиозной формулы свободы совести, с которой согласились бы все культуры и которая могла бы затем служить для этого стандарта основой»¹. Время требует поиск и отбор моделей сотрудничества имеющих историческую перспективу.

Одной из таких моделей сотрудничества является модель российско-китайского диалога. Для её описания целесообразно ответить на ряд вопросов: Что представляют собой русский и китайский архетипы? Каким образом с учетом этих архетипов складывался культурный диалог? Как осуществлялась гармонизация культурных кодов? Иначе, что вызывало и вызывает взаимную симпатию и уважение, то есть что создавало и создаёт условия для культурного взаимодействия? Поиск ответов на поставленные вопросы неминуемо приведёт нас к истокам: к традиционным жизненным укладам, в которых формировались русский и китайский архетипы.

Общеизвестно, что русский человек – дитя традиции, его многовековой уклад – община, мир. Причём русская община является и хозяйственным объединением, и религиозным союзом. Русский мир рождал цельность личности, заключенной в православии, и формировал образ русской идентичности, выраженный спектром личных качеств: патриотизмом, коллективизмом, жертвенностью, открытостью. Так, коммунизм российского типа как синкретическая квазизападная идеология, успешно паразитировал на традиционности российских этических идеалов. Коммунистические лидеры, обещая фальшивую свободу, призывали к максимальной самоотверженности во имя общественного, читай общинного, блага. Идеи, внешне совпадающие с российским культурным кодом, позволяли беспощадно эксплуатировать советский народ и в итоге подорвать его силы. Отметим, что традиционализм и опора на нравственные идеалы также присущи большинству этносов, входящих в российскую цивилизацию, а положительное отношение к общине в российской культуре имеет устойчивый характер и религиозный оттенок, что, несомненно, влияет как на социальное развитие, так и на диалог с другими культурами.

Н. Ф. Федоров так оценивал среду русского человека: «Говоря об общине в самом действии, в работе, или труде, и притом в деле святом, в священнодействии, в литургии, так как при таком только действии община и бывает действительно общиною, то есть единением, а не разобщением, внутренним общением без внешнего гнета, внутренним общением без внутреннего разобщения, сдерживаемого лишь внешнею силою. Вопрос о храмах обыденных есть вопрос о самой народности русской, о духе народном и об его проявлениях в делах хозяйственных, государственных и церковных...»². Следовательно, общинность есть важнейшая особенность в русском архетипе.

Другая особенность – сочетание самоотверженности и открытости. «Русские люди, – говорит Ф.М. Достоевский, – долго и серьезно ненавидеть не умеют». Но более всего, пожалуй, ценит Достоевский в русском народе смирение, отсутствие гордости и самодовольства. Русский народ, особенно великорусская ветвь его, народ, создавший в суровых исторических условиях великое государство, в высшей степени мужественен; но в нем особенно примечательно сочетание мужественной природы с женственной мягкостью. Корреспондент английской газеты, видя подобные случаи [великодушия] в русско-турецкую войну, выразился так: это армия джентльменов. Достоевский ссылается на великих знатоков русского народа А. С. Пушкина, который говорил, что «русский человек не раб и никогда не был им, несмотря на многовековое рабство», и М. Ю. Лермонтова, который «чуть лишь коснётся народа, тут он светел и ясен»³.

Третью особенность русского архетипа хорошо выразил В.В. Зеньковский, который пишет: «Прежде всего мы должны особо отметить русский «максимализм», проходящий красной чертой через всю историю духовной жизни России. Несомненно, этот максимализм сам по себе не религиозного происхождения, –

¹ Орлов М.О., С.А. Данилов С.А. Религиозное и светское мировоззрение в условиях модернизации. Саратов: ИЦ «Наука», 2012. С. 7.

² Федоров Н.Ф. Философия общего дела: в 2 т. Т. 1. М.: ООО «Издательство АСТ», 2003. С. 581-583.

³ Лосский Н. О. Бог и мировое зло / сост. А.П. Поляков, П.В. Алексеева, А.А. Яковлев. М.: Республика, 1994. С. 224-225.

он связан с природными особенностями русской души, создававшимися на всем протяжении русской истории. Безмерность русских пространств, отсутствие внутри России высоких гор, все «геополитические влияния» определяли эти особенности русской души. Но, будучи «природными» и определяя стиль и формы духовной жизни, эти особенности русской души получили для себя особое подкрепление в некоторых основных чертах христианства, с которыми они глубоко срослись. Я имею в виду мотив «целостности», который придает христианству оттенок радикализма; он учит бояться всякой «серединности» и умеренности, всякой теплохладности. Христианство по самому ведь по существу своему обращено ко всему человеку, хочет обнять его всего, хочет просветить и освятить его всю его душу... духовная трезвость... очень высоко ценится в религиозном сознании русских людей»¹ В подтверждение сказанному выше приведем точку зрения ещё одного знатока русской души А. К. Толстого, содержащуюся в первоначальном варианте его известного стихотворения «Коль любить, так без рассудку». Здесь наиболее точно синтезирован образ русского человека: «Коль гибнуть, так за Русь, Коль кричать, так «С нами Бог!»².

Четвёртая особенность российского архетипа, которая по-своему значению близка первой, – это религиозность. По Н. Я. Данилевскому, «религия составляла самое существенное, господствующее (почти исключительно) содержание древней русской жизни, и в настоящее время в ней же заключается преобладающий духовный интерес простых русских людей...»³. Итак, «мы можем сказать, что религиозная сторона культурной деятельности составляет принадлежность славянского культурного типа, и России в особенности, есть неотъемлемое его достояние как по психологическому строю составляющих его народов, так и по тому, что им досталось хранение религиозной истины; это доказывается как положительною, так и отрицательною стороною религиозной жизни России и Славянства»⁴.

В китайской культуре в отличие от российской господствует принцип *чжун юн* (принцип середины). Принцип середины, реализуемый в человеческом обществе, по мнению Конфуция, «являет собой наивысшую добродетель»⁵. Путь «*чжун юн*» представляет жизненный путь, для которого присущи взгляды сравнительно уравновешенные, почти без радикализма⁶. Следование такому пути и есть истинный смысл жизни каждого китайца. Однако любой культуре всегда необходим некоторый радикализм, а потому общение с максимализмом российской культуры крайне благодатно для культуры китайской, то есть китайцы интуитивно стремятся к тому, чего недостает в их духовной жизни. В связи с этим существует много высказываний, отражающих такое благотворное влияние. Вот одно из них: «Мое видение и понимание всех вещей в этом мире и даже весь мой духовный мир неотделимы от того воспитания, которое она [русская литература] мне дала»⁷.

В целом китайская культура отличается житейскими чертами, её другой особенностью является традиционализм, но без оформившейся религиозности. Идеалы китайской культуры были всегда ориентированы главным образом на совершенствование человеческой этики и морали, а не на потусторонний мир⁸. Такие идеалы заложены прежде всего конфуцианством. Однако в китайской философии, помимо конфуцианства, существует даосизм, учение умозрительного характера, где Дао понимается как закон мироздания. «Мириады вещей Поднебесной рождаются в бытии, бытие рождается в небытии [Дао]»⁹. В даосизме человек должен стремиться к Дао, отрешившись от любых желаний, размышлений, мыслей, чтобы «внешне выглядеть скромно, внутри сохранять первозданную духовную простоту, быть бескорыстным и бесстрастным»¹⁰. Можно констатировать, что оба направления в китайской философии созвучны духовному строю российской культуры и в каком-то смысле дополняют и переплетаются с ним. Говоря о китайском архетипе, можно утверждать о его религиозности: подобно индуизму, для китайского мировоззрения присуща традиция, объединяющая и различные философские взгляды, и религиозные верования.

В основе социального уклада китайского народа лежат коллективный труд и равенство: сама китайская цивилизация могла возникнуть и сохраниться только как результат общественных усилий. Это воспро-

¹Зеньковский В. В. История русской философии. Т. 1. Ч. 1. Л.: Эго, 1991. С. 40.

²Толстой А.К. Собр. соч.: в 4 т. М.: Худож. лит., 1963-1964. Т. 1. С. 708.

³Данилевский Н.Я. Россия и Европа / сост., послесловие и комментарии С.А. Вайгачева. М.: Книга, 1991. С. 480.

⁴Там же. С. 482.

⁵Лунь Юй. Гл. VI. Что касается Юна / пер. Л.С. Переломова // Переломов Л.С. Конфуций: Лунь Юй. М., 1998.

⁶Чжан Байчунь. Национальные идеи России и Китая // Китай в диалоге цивилизаций: К 70-летию академика М.Л. Титаренко / гл. ред. С.Л. Тихвинский. М.: Памятники исторической мысли, 2004. С. 619.

⁷Чень Цзяньхуа. Китайско-русские литературные связи в 20 в. Сюэлинь, 1998. С. 1-2.

⁸Чжан Байчунь. Указ. соч.

⁹Лао-цзы. Чжан. 40 / пер. А.Е. Лукьянова // Лукьянов А.Е. Лао-цзы и Конфуций. Философия Дао. М., 2001.

¹⁰Лао-цзы. Чжан 19.

изводится и в традициях «иероглифической письменности восточноазиатской цивилизации», которые «аккумулировали огромный опыт создания и практического применения уравнилельных идей»¹.

Если говорить об особенностях культурного взаимодействия, то, бесспорно, наиболее значимы мнения людей, непосредственно связанных с различными аспектами российско-китайских отношений. Так, выдающийся российский дипломат И.А. Рогачев в своей статье «Мой Китай» утверждает, что исторически Россия всегда была заинтересована в суверенном Китае, аргументируя своё утверждение словами известного политического деятеля начала XX века С.Ю. Витте о том, что «в интересах России иметь на Востоке своим соседом сильный и целостный Китай»². Из сказанного следует, что стабильный и единый Китай – это цель внешней политики России и её основной вектор. На протяжении истории это подтверждается убедительными историческими фактами, а именно: 1) отсутствием военного противостояния России и Китая, исключая пограничные конфликты (однако сравним историю чайной торговли России и Англии, где в первом случае – взаимовыгодные условия, равноправные договоры, а во втором – открытая колониальная политика, опиумные войны); 2) уникальностью роли русской православной духовной миссии, которая с XVII века действовала в столице Поднебесной; 3) открытием 29 октября 1957 первого из обществ дружбы с зарубежными странами – Общества китайско-советской дружбы»³; 4) наконец, открытием в Шанхае в 1937 г. первого в Азии памятника гению русской культуры А.С. Пушкину.

Самая высокая активность непосредственного общения Китая и России наблюдалась в советское время. В деле укрепления взаимопонимания в те годы грандиозную роль сыграла народная дипломатия. В обществах дружбы, объединявших представителей различных социальных групп, работали и по сей день работают люди с особым складом характера и удивительным внутренним настроем. Знаменательно высказывание известного деятеля народной дипломатии Куликовой Г.В.: «Летопись истории, как и память живущих поколений, бережно хранит высокие проявления дружбы и солидарности народов России и Китая»⁴. Другой пример подвижничества в области культурного диалога – китаевед Людмила Исаева утверждает: «Китай притягивает, Китай увлекает, засасывает и уже никогда не отпускает. Я отношусь к нему как родному, которого хоть и осуждаешь порой, но всё же любишь»⁵. Со стороны россиян, связанных с российско-китайскими отношениями, мы неизменно находим положительную оценку последним, лишённую всякого высокомерия. Как правило, мы видим аналогичную позицию и большую работу по укреплению дружеских связей, которую проводила и проводит народная дипломатия Китая (Китайское народное общество связей с зарубежными странами и Общество китайско-российской дружбы)⁶.

В начале XXI века конструктивная тенденция в российско-китайском диалоге сохраняется. Известный российский академик РАН М.Л. Титаренко по случаю заключения российско-китайского договора 16 июля 2001 года отмечает: «Москва и Пекин пришли к твердому убеждению, что... добрососедство, дружба и сотрудничество в полной мере соответствуют жизненным потребностям двух стран»⁷.

Уважение к нашей стране и прежде всего память о совместной борьбе за независимость, за экономическую помощь в деле создания КНР сохраняется. В разных городах Китая в хорошем состоянии содержатся могилы советских воинов. Вот мнение одного из лидеров современного Китая, Председателя КНР Ху Цзиньтао: «У нас самым ценным достоянием была, есть и навсегда останется исторически сложившаяся взаимная симпатия и скрепленная в годы войны боевая дружба. Свои коренные интересы по жизненно важным вопросам мы можем эффективно защищать, только поддерживая и уважая друг друга»⁸. Дополняет картину сотрудничества мнение ученого: «Социалистический строй в Китае фактически построен с помощью советских людей»⁹. Обращаясь к оценке современных отношений России и Китая, мы видим стремление китайцев к дальнейшему сотрудничеству и в то же время его критическую оценку: «У Китая и России очень много общего, но иногда не удается избежать и небольших противоречий, а также разногласий по

¹ Белелюбский Ф.Б. Идеи равенства в Китае // Китай в диалоге цивилизаций: К 70-летию академика М.Л. Титаренко / гл. ред. С.Л. Тихвинский. М.: Памятники исторической мысли, 2004. С. 622.

² Рогачев И.А. Мой Китай (Российско-китайские отношения глазами дипломата) // Китай в диалоге цивилизаций: К 70-летию академика М.Л. Титаренко / гл. ред. С.Л. Тихвинский. М.: Памятники исторической мысли, 2004. С. 329.

³ Тихвинский С.Л. К читателю // Россия-Китай: Народная дипломатия / Г.В. Куликова. М.: ИД «Форум», 2012. С. 4.

⁴ Россия-Китай: Народная дипломатия / Г.В. Куликова. М.: ИД «Форум», 2012. С. 10.

⁵ Исаева Л.И. Жизнь среди символов. 2-е изд. М.: Диалог культур, 2009. С. 316.

⁶ Тихвинский С.Л. Моя встреча с Китаем // Китай глазами российских друзей / Общество российско-китайской дружбы. М.: «ФОРУМ», 2012. С. 12.

⁷ Россия и ее азиатские партнеры в глобализирующемся мире. Стратегическое сотрудничество: проблемы и перспективы / М.Л. Титаренко. М.: ИД «ФОРУМ», 2012. С. 215.

⁸ Ху Цзиньтао. Вместе в боях и труде // Россия-Китай: Народная дипломатия / Г.В. Куликова. М.: ИД «Форум», 2012. С. 9.

⁹ Ли Цзиньцзе. Теоретические размышления о проблемах социализма // Китай в диалоге цивилизаций: К 70-летию академика М.Л. Титаренко / гл. ред. С.Л. Тихвинский. М.: Памятники исторической мысли, 2004. С. 316.

отдельным вопросам, что ни в коей мере не создает помех в отношениях между нашими странами, не говоря уже об их ухудшении»¹. Интересен взгляд на отношения Китая и России с Западом члена правления Общества российско-китайской дружбы Юй Суя: «Китай и Россия испытали на собственном опыте опасность гегемонизма и терроризма. После «холодной войны»... односторонняя политика правительств США приняла угрожающий характер»². Отношение китайцев к русской культуре отражается в любви к русской музыке и русской литературе. Известный литературовед ЧженьЧженьдо так охарактеризовал влияние русской литературы на китайских писателей: «Во-первых, китайская литература обратилась к правдивости, которой ей раньше крайне недоставало; во-вторых, «наша бесчеловечная литература стала человеческой»; в-третьих, «наша безличностная, бесхарактерная литература изменилась в сторону изображения личности, приблизилась к человеческой жизни»; в-четвертых, произошла демократизация литературы, и, наконец, в-пятых, «наша литература стала трагедийной»³. Бесспорно, что современный российско-китайский диалог не идеален. После перестройки Китай считает нас «учителем наоборот (учителем того, чему не следует учиться)» по сравнению со взглядами на нас образца октября 1917 года как на «настоящего учителя»⁴.

Альтернативой современной конфронтационной модели Запад-Восток может стать модель российско-китайского сотрудничества, которая наиболее успешно выражена языком народной дипломатии. В этом контексте исторически сложившийся опыт гармонизации культурных кодов видится в использовании всего арсенала форм и методов, хранимых социальной памятью народов. Конфигурации различных типов рациональности и культурных кодов создают уникальность культурного взаимодействия, складывающегося в новое «культурное пространство», пространство нового типа, совпадающее с социальным пространством. Следовательно, «межкультурные отношения охватывают всю систему общественных отношений: политических, экономических, социально-распределительных, духовно-интеллектуальных»⁵.

Специфика межкультурной коммуникации нового типа состоит и в том, что её будут осуществлять не столько политическая элита, сколько общество в целом, чему способствует новый экраный тип культуры. В период различных форм мобильности, нарастающего количества личных контактов, в том числе в киберпространстве, о другом народе всё больше начинают судить на основе собственных впечатлений, не зависящих от стереотипов, навязываемых СМИ. Перманентная интеракция представителей различных культур даёт более яркую, чувственную окраску другой страны, определяя, в конечном итоге, симпатии и антипатии отдельного человека и в целом характер современного культурного взаимодействия.

Субъективный процесс интеграции представлений о другой культуре отражается в конституируемом образе страны, который фундирован образованием в широком смысле этого слова, то есть межкультурное взаимодействие как согласование ценностей трансформируется в диалог образований. Как известно, образование человека тесно связано с социальной памятью, традициями, культурными кодами и, наконец, архетипом, который не подвержен немедленным и радикальным переменам. Это значит, перспектива гармонизации культурных кодов, путь к сближению культур должны лежать не столько в глобализации как универсализации, сколько в глобализации как консолидации культурного многообразия, то есть в событии.

Ручин Владимир Алексеевич – кандидат философских наук, доцент кафедры «Социология, социальная антропология и социальная работа» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir A. Ruchin – Ph.D., Associate Professor
Department of Sociology, Social Anthropology and Social Work
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.05.13, принята к опубликованию 20.05.13

¹Юй Суй. Отношения нового типа между Китаем и Россией // Китай в диалоге цивилизаций: К 70-летию академика М.Л. Титаренко / гл. ред. С.Л. Тихвинский. М.: Памятники исторической мысли, 2004. С 350.

²Там же.

³Ли Иннань. Русская литература в Китае – краткий исторический срез // Образ России в странах Центральной Азии: культурно-образовательный и антропологический аспект (анализ опыта работы в Китае и Монголии) / под ред. В.А. Ручина. Саратов: ИЦ «Наука», 2007. С. 124-125.

⁴Галенович Ю.М. Россия в «китайском зеркале». Трактровка в КНР в начале XXI века истории России и русско-китайских отношений. М.: Восточная книга, 2011. С. 9.

⁵Рожков В.П. Теоретико-методологические основания философской традиции России и Китая // Традиции России и Китая в глобализирующемся мире (опыт анализа культурно-философского процесса) / Под ред. проф., д.ф.н. В.П. Рожкова. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2012. С. 5.

Е.С. Сметанина

**О НАУЧНЫХ ОБОСНОВАНИЯХ КОНЦЕПЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЕМЕЙНОЙ ПОЛИТИКИ**

Актуальность выбранной темы связана с насущной для России необходимостью развития учреждений, предоставляющих разнообразные социальные услуги семье. Благополучие любой российской семьи зависит от реализации ряда потребностей, которые зачастую определяются не только потенциалом и возможностями самой семьи, но и развитостью семейной инфраструктуры, существующей в конкретном регионе.

Семья, семейная инфраструктура, рождаемость

E.S. Smetanina

SCIENTIFIC ANALYSIS OF THE CONCEPT OF STATE FAMILY POLICY

Importance of the selected theme is determined by the necessity for the development of agencies providing families with various social services. The well-being of a family in Russia depends on satisfying a set of demands defined not only by the family itself, but mainly by the family infrastructure existing in a certain area.

Family, family infrastructure, fertility

Россия за последние 25 лет пережила революционные преобразования практически во всех сферах социальной, политической и экономической жизни. В результате условия жизнедеятельности семьи претерпели серьезные изменения, причем далеко не всегда в лучшую сторону [1]. Разложение сложившейся социальной инфраструктуры в конце XX века отразилось на благополучии и социальном самочувствии семьи, что привело к ряду негативных тенденций, затронувших российское общество в целом. Сегодня особую актуальность приобретают вопросы изучения благоприятных условий существования семьи, могущих помочь ей в решении многих жизненно важных проблем. Основные вопросы жизнеобеспечения семьи напрямую зависят от развитой семейной инфраструктуры, существующей в конкретном регионе. Семейная инфраструктура проявляется в характере жилищно-коммунального строительства и обустройстве территории; в создании оздоровительных комплексов, кинотеатров, парков, музеев, стадионов, туристических баз; в создании производственных объектов, образовательных, правоохранительных и других учреждений. Значимыми объектами семейной инфраструктуры являются естественные ресурсы, в частности леса, горы, реки, озера и т.п. Эффективное функционирование данных служб и объектов способно положительно влиять на самочувствие семьи и способствовать распространению здорового образа жизни членов семьи.

Одним из ключевых моментов современности является повышение рождаемости, многие государства (в том числе и РФ) проводят политику пронатализма. Демографы, политики и социологи предлагают всевозможные меры и программы, стимулирующие деторождение, ни одна из которых на сегодняшний момент не дала ощутимых результатов. Небольшое увеличение показателей рождаемости в начале XXI века расценивается как кратковременное и связанное, скорее, с глубинными процессами, происходящими в обществе, чем с реальным воздействием мер демографической политики. Многие исследователи склонны считать, что заслугой материального поощрения рождаемости (материнский капитал, содействие в решении жилищного вопроса, пособие по беременности и родам и пр.) является лишь ускорение вторых рождений по времени, но не реальный рост количества детей в семье. Отечественный демограф А.Г. Вишнеvский указывает на несостоятельность существующих оценочных показателей демографической ситуации. Например, коэффициент суммарной рождаемости (КСР) является лишь средней величиной, не отражающей реального количества рождений в рамках поколения. Придерживаясь данной точки зрения, можно сказать, что причины повышения рождаемости в начале XXI века кроются в тенденции к более позднему материнству, а средняя рождаемость поколения продолжает падать [2]. Таким образом, система демографических показателей требует дальнейшей проработки и научной обоснованности используемых критериев.

В целом научный потенциал демографической политики РФ развит слабо, образовательных учреждений, подготавливающих специалистов в области демографии, практически нет. В итоге там, где должны работать специалисты по демографическим проблемам, работает «кто угодно», что приводит к некомпетентным действиям и сводит попытки государства исправить демографическую ситуацию практически на нет. Специалист по проблемам демографии должен обладать знаниями в области демографии, социологии, экономики, педагогики, математики, статистики. Подобная междисциплинарная подготовка позволила бы применять качественно новые знания при сборе, обработке и интерпретации демографических данных.

Единая специализированная профильная общедоиниональная управленческая структура по вопросам семейной и демографической проблематики отсутствует. На региональном уровне существуют единицы, как правило, входящие в состав других ведомств и не обладающие самостоятельным статусом. Отсюда нарушается комплексность реализуемых мер по преодолению демографического кризиса.

Безусловно, пытаться поднять рождаемость, игнорируя проблемы семьи, представляется весьма сложной задачей. Для большинства российского населения (что подтверждается и данными авторского исследования) семья продолжает оставаться важнейшим приоритетом. Другой вопрос заключается в том, что современные реалии предполагают более позднее вступление в брак и рождение детей, что объясняется стремлением молодых людей «встать на ноги» и получить материальную независимость.

Представляется, что приоритетной задачей государственной семейно-демографической политики должно стать **повышение качества жизни семьи и ее членов**. Для подавляющего большинства российских семей проблемы материального и жилищного плана являются первичными. В подобных условиях рассуждать о повышении рождаемости и увеличении количества детей в семье бессмысленно. Причем целесообразно не столько повышать пособия для малоимущих (которые на сегодняшний день являются недостаточными), сколько создавать условия, способствующие экономическому благополучию семьи. Среди таких мер, прежде всего, создание рабочих мест, повышение заработной платы, обеспечение доступным жильем, поддержка и развитие семейного предпринимательства. Улучшение качества жизни россиян обеспечит решение как минимум трех демографических задач – снижение смертности, повышение рождаемости и продолжительности жизни.

Следующая важнейшая задача семейной политики – это **создание благоприятных условий, способствующих совмещению профессиональной и родительской ролей женщины**. Сегодня настаивать на возврате ценностей традиционной семьи, когда мужчина является единственным кормильцем, «добытчиком», а женщина полностью отдает себя дому и детям, не представляется возможным. Заработок многих женщин составляет достаточно существенную часть семейного бюджета. Поэтому очень важно обеспечить такие условия на месте работы потенциальной матери, которые вели бы к наименьшим социальным и материальным издержкам, гарантировали бы сохранение за ней рабочего места на время декрета, предполагали бы гибкий график работы. Тем более в ситуации, когда каждый третий ребенок в стране воспитывается в неполной семье (как правило, без отца), поддержка женщин является достаточно актуальной. При этом ограничиваться созданием соответствующей законодательной базы ни в коем случае нельзя, необходимо обеспечить контроль за соблюдением принимаемых мер. В повседневной жизни достаточно много примеров, когда работодатели не совсем приветствуют трудоустройство молодой женщины, ввиду возможного декрета и частых больничных, а молодая мама вынуждена менять место работы в связи с появлением ребенка. На работающих мужчин проблема наличия семьи распространяется в меньшей степени, тем не менее в обществе сложился стереотип, что работник, обремененный семейными обязанностями, не выгоден организации, на практике это не совсем так. Как правило, семейные работники более ответственные и надежные, они в большей степени заинтересованы в стабильной заработной плате, и реже идут на риск, связанный с новой работой; более тщательно соблюдают правила техники безопасности. Во многих странах одним из показателей успешности человека и важной составляющей авторитета общественных и политических деятелей является наличие благополучной семьи, причем обязательно с детьми. Если обратиться к истории, можно найти множество примеров, когда государство поощряло, а порой и обязывало население к вступлению в брак (Др. Греция, законодатель Солон), а общество негативно относилось к не желающим обзаводиться семьей. Например, на Руси неженатых часто считали людьми второго сорта; в Афинах неженатый мужчина не имел права занимать государственную должность; безбрачие у евреев приравнивалось к преступлению; в Древней Спарте человек без семьи вызывал презрение.

В современной популярной литературе всячески подчеркивается холостяцкий образ жизни и преимущества бессемейных работников, которые могут уделять больше времени работе и согласны на частые и длительные командировки. Подобная ориентация способствует укреплению тенденции к более позднему браку и, как следствие, старению первоначальных. Очевидно, что сегодня необходимо смещение

акцентов на работников, имеющих семью, как на категорию лиц с социально одобряемым поведением. Безусловно, изменить отношение, сложившееся в обществе и у работодателя, достаточно сложно и требует длительного периода времени.

Совмещение профессиональных и семейных обязанностей часто предполагает изменение условий труда. Например, там, где важен результат, а не количество часов, проведенных на рабочем месте, вполне могут быть допустимы индивидуальные условия работы, такие как сокращенный рабочий день, работа на дому, режим гибкого рабочего времени. Тем более что опыт многих зарубежных стран доказывает: возможность гибкого графика работы способствует улучшению показателей труда. К сожалению, в России подобные формы мало распространены и часто наталкиваются на негативное отношение со стороны работодателя, коллег, родственников.

Кроме условий труда и повышения престижа работников с семейными обязанностями, необходимо соответствующее развитие адекватной семейной инфраструктуры, предполагающее наличие доступной сети детских дошкольных учреждений и разветвленной системы социально-бытового обслуживания, что могло бы значительно облегчить нагрузку на работающего семьянина. В расширении услуг и улучшении их качества особую роль следует отвести социальному предпринимательству, поддержка и развитие которого позволит выработать качественно новый подход к решению социальных вопросов. В настоящее время социальное предпринимательство в России развито слабо, имеет низкую привлекательность и недостаточную информативность, отсутствует законодательная основа. Несмотря на возрастающий интерес к этому явлению, можно говорить лишь о стадии становления социального предпринимательства в России, для успешного формирования которого необходима поддержка органов государственного и муниципального управления. Государство, создавая благоприятные условия для социального предпринимательства, одновременно способствует решению нескольких задач – создание новых рабочих мест, решение острых социальных проблем, повышение благосостояния региона.

Специфику многих проблем, существующих в отдельно взятых территориальных образованиях, невозможно учесть на государственном уровне, тогда как социальное предпринимательство максимально приближено к целевому потребителю (клиенту) и призвано решить конкретную задачу с учетом индивидуальных особенностей контингента. Деятельность социального предпринимательства может быть направлена на немедленный эффект, а также иметь долгосрочную перспективу и способствовать решению социально-экономических проблем в обществе. Подобные организации и учреждения могут успешно функционировать в различных областях, включая образование, воспитание, здравоохранение, социальное обслуживание и пр. Особая ценность социального предпринимательства в том, что оно является носителем инноваций и выступает как агент позитивных социальных перемен в обществе. Сегодня, когда проблемы общества становятся более сложными, один из главных вопросов – насколько мы сможем преобразовать способы их решения. Традиционных мер, таких как принятие законодательства, установка минимального размера оплаты труда, выплата социальных пособий, явно недостаточно, социальные проблемы в сфере образования, воспитания, здоровья и окружающей среды требуют инновационных решений по многим направлениям.

В современном обществе существование семьи невозможно без создания соответствующих условий, обеспечивающих ее функционирование. Адекватная семейная инфраструктура призвана оказать преобразующее воздействие на семью и избавить ее членов от решения многих второстепенных вопросов. Построение семейной инфраструктуры требует значительных затрат, времени и усилий, но социально-экономические выгоды очевидны. Развитая семейная инфраструктура, отвечающая современным потребностям семьи в рамках конкретных территориальных образований, существенно экономит время, делает жизнедеятельность семьи более эффективной, повышает качество жизни.

Представляется, что оптимальное сочетание профессиональной деятельности и семейных обязанностей, которое возможно при условии наличия адекватной семейной инфраструктуры, перестанет быть значительным препятствием к созданию семьи и рождению детей.

В настоящее время существуют устойчивые тенденции вырождения населения страны, тогда как для решения государственных задач необходима обратная тенденция. Такая тенденция может возникнуть и прогрессировать только в условиях социально здорового общества, в котором институт семьи занимает особое место и служит важнейшим приоритетом в стратегических планах реализации государственной идеологии. Большое значение имеет решение проблемы создания социально-экономической инфраструктуры, полноценной социально здоровой инфраструктуры семьи как первичной ячейки развивающегося общества. При этом отсутствие безотлагательных мероприятий в направлении народосбережения в социально-демографической, медицинской, научно-образовательной сферах в ближайшие десятилетия может привести к резкому уменьшению численности населения с убылью до 2 млн. человек в год [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Сметанина Е.С. Социологический анализ проблемы рождаемости в современной российской семье / Е.С. Сметанина // Вестник Поволжской академии государственной службы. 2013. №1(34). С. 107-112.
2. Вишневский А.Г. Есть ли альтернативы у безальтернативного? / А.Г. Вишневский // Общественные науки и современность. 2012. № 2. С. 78-91.
3. Потапова О.Н. Социально-демографическая структура предотвратимых потерь населения в России / О.Н. Потапова // Вестник СГТУ. 2011. № 2. С. 245-249.

Сметанина Елена Сергеевна –
аспирант кафедры «Психология»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Elena S. Smetanina –
Postgraduate
Department of Psychology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 13.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 008:316.34

Н.В. Тищенко

ТЮРЕМНАЯ СУБКУЛЬТУРА: ПОНЯТИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКА, ОСОБЕННОСТИ

Предлагается определение понятия тюремная субкультура, выявляются основные характеристики и специфика взаимодействия тюремной субкультуры с доминирующей культурой в условиях современного российского общества. Критическому осмыслению подвергаются теории, сопоставляющие тюремную субкультуру с архаичной культурой, и указываются принципиальные различия между ними. Выявляются способы интерпретации ценностей массовой культуры посредством смыслов и значений тюремной субкультуры. В результате выявляются три аспекта распространения влияния тюремной субкультуры на современную отечественную культуру и намечаются пути преодоления этого влияния.

Тюремная субкультура, ценности тюремной субкультуры, архаичная культура, массовая культура, криминализация

N.V. Tishchenko

PRISON CULTURE: THE CONCEPT, CHARACTERISTICS, AND FEATURES

The article presents a definition of the prison subculture, identifies the main characteristics and distinguishing features of interaction between the prison subculture and the dominant culture in the modern Russian society. Critical understanding is provided for the theories comparing the prison subculture with archaic culture, and identifying their fundamental distinctions. Explanation is given to the differences between the processes of criminalization of culture and spreading the influence of the prison subculture in Russia, as an example with a strong influence of the prison subculture, and Latin America, where criminal culture is dominating. Methods for interpreting the values of popular culture through the meanings and values of the prison subculture are identified. Three aspects of the spreading influence of the prison subculture on the contemporary national culture have been identified, and ways for overcoming this influence have been outlined.

Prison subculture, values of the prison subculture, archaic culture, popular culture, criminalization

М. Фуко в работе «Надзирать и наказывать» с некоторой иронией и скепсисом замечает: «Очевидность» тюрьмы, с которой нам так трудно расстаться, основывается, прежде всего, на том, что она – простая форма «лишения свободы». Как же тюрьме не быть преимущественным средством наказания в обществе, где свобода – достояние, которое принадлежит равным образом всем и к которому каждый индивид привязан «всеобщим и постоянным» чувством?» [9]. Если М. Фуко констати-

ровал наличие в культуре XX века устойчивого восприятия пенитенциарной системы как необходимой процедуры наказания, то в XXI веке неотъемлемыми и очевидными становятся социальные и культурные последствия лишения свободы. С большой долей вероятности можно констатировать наличие и в повседневной культуре, и в общественной риторике эффекта «привыкания» к явлениям, связанным с тюремной субкультурой. Ценности, модели поведения, способы субъективизации, языковые формы тюремной субкультуры воспринимаются как должное, как неотъемлемая часть общественной жизни и индивидуальных стратегий. Места лишения свободы, изоляция, надзор, режим – эти понятия стали распространенными выражениями, используемыми в качестве метафоры для определения характера процессов и явлений общественной жизни. Возникает парадоксальная ситуация: места лишения свободы воспринимаются как явно негативное, дискриминационное явление, но нормы и правила тюремной субкультуры присутствуют на сегодняшний день в большинстве сфер деятельности людей, например в искусстве, языке повседневного общения, способах взаимодействия между людьми, жизненных ценностях. Границы между местами лишения свободы и остальным обществом размываются, но это ведет не к гуманизации отношения к осужденным и улучшению условий содержания, а к проникновению норм тюремной субкультуры в повседневную жизнь и культуру в целом. Целью статьи является концептуализация проблемы влияния ценностей тюремной субкультуры на различные сегменты социальной и культурной жизни современной России.

Распространению и «вживлению» в культуру ценностей тюремной субкультуры способствуют такие негативные явления, как рост преступности, нестабильность экономической и социальной системы. В России процесс распространения влияния тюремной субкультуры на доминирующую культуру интенсифицирован частотой периодов нестабильности – неустойчивость политических, экономических элит провоцирует потребность в поиске максимально простой картины мира и эффективной системы объяснения, в качестве которой и выступает мифология тюремной субкультуры. Связь между тюремной субкультурой и архаичными обществами прослеживается как на уровне аналогий между ритуалами, отношением к слову, так и на уровне внутренней социальной дифференциации. На схожесть между трехкастовостью тюремного сообщества («авторитеты и связанные с ними касты», «мужики – осужденные, не имеющие криминального прошлого», «опущенные») и трехуровневой системой первобытных обществ («дифференцированная знать», «крестьяне», «рабы и изгои») обратил внимание в очерках о тюремной субкультуре Л. Клейн. Он указывает не только на смысловое и символическое сходство архаичного общества и тюремной субкультуры, но и на наличие внутренних структурных совпадений [6]. Подобное сходство может служить, в том числе, и объяснением устойчивости и распространенности ценностей тюремной субкультуры в обыденной жизни. Повседневная жизнь тяготеет к рутинизации, повторяемости и антирефлексивности (восприятию происходящего как данности), не критичности и долженствования (повседневная жизнь насыщена однотипными приказами, организующими жизнь индивида, – есть, спать, гулять и пр.). Именно эти черты характерны и для архаичной культуры, и для тюремной субкультуры как вариант модификации и экстраполирования архаики в современной культуре. Поэтому на уровне повседневной жизни ценности тюремной субкультуры достаточно легко утрачивают негативную моральную оценку и возводятся в ранг должного. При наличии достаточно большого числа «тюремного населения» в сравнении с общим числом россиян распространение ценностей тюремной субкультуры становится симптоматичным и узнаваемым процессом.

Однако между структурами тюремной субкультуры и архаичной культуры существует принципиальное отличие, которое большинство исследователей не фиксируют, – стабильность, консервативность представлений архаичной культуры в тюремной субкультуре утрачивает свое значение и трансформируется в своеобразную симуляцию. Выполнение тех или иных предписаний, следование правилам не ведет к поддержанию равновесия социальной структуры, сохранению статуса и т.д. В результате тюремная субкультура больше соответствует структуре постмодернового общества, характеризующегося дискретностью социальных связей, «двойным кодированием» или «поликодированием» смыслов и значений, интерпретативной поливалентностью [4].

Для того, чтобы выявить соответствие между тюремной субкультурой и культурой постмодерна, необходимо дать четкое развернутое определение самого понятия «тюремная субкультура» и непосредственно связанного с ним понятия «ценности тюремной субкультуры». Тюремная субкультура является разновидностью криминальной субкультуры, сформированной в местах лишения свободы. Ряд исследователей полагают, что тюремная субкультура представляет собой явление, которое возможно только в изолированных социальных пространствах тюрьмы, лагеря, каторги и т.д.: «тюремная субкультура существует только в рамках закрытого мира исправительных колоний, каторги и тюрем, опирается на жесткую социальную иерархию, сложившуюся среди осужденных, и управляет-

ся довольно консервативными нормами и ценностями, которые в неизменном виде могут существовать многие десятилетия» [1]. Однако можно констатировать, что в современной российской культуре ценности и нормы поведения тюремной субкультуры преодолели барьеры пенитенциарных учреждений и стали неотъемлемой частью легитимных социальных и культурных практик. Наблюдаются активная эскалация тюремной субкультуры в свободное общество и приобщение к ней не только иных маргинальных субкультур (наркозависимые, страдающие алкоголизмом, маргинальные молодежные субкультуры), но и традиционно лояльных к официальной культуре групп.

Исследователи, признавая факт распространения тюремной субкультуры в российском обществе, связывают этот процесс с явлением криминализации населения. Чем более распространены в обществе различные типы преступлений и правонарушений, тем более криминализировано общество и тем активнее в культуре используются установки тюремной субкультуры [3]. Однако можно предположить, что процесс распространения ценностей тюремной субкультуры и «криминализация» не совпадают полностью. Во-первых, криминализация общества – это явление социального и правового порядка, а распространение тюремных ценностей – культурного. Но самое принципиальное различие заключается в том, что криминализация (то есть масштабное распространение криминального поведения) не подразумевает влияние ценностей тюремной субкультуры. Существуют государства, где достаточно высок процент правонарушений (например, уровень уличной преступности в странах Латинской Америки), но в принципе отсутствует такое явление как тюремная субкультура. Процесс распространения ценностей тюремной субкультуры связан с наличием в культуре определенного ценностного отношения к самому институту наказания («тюрьме», «колонии», «зоне», «лагерю» если определять его посредством повседневной риторики). В культурах с высоким уровнем именно «криминализации культуры» (например, странах Латинской Америки) места лишения свободы интерпретируются как «преграда», прерывающая криминальную деятельность, которую необходимо «преодолеть». Отсюда в этих странах такое большое число массовых побегов и беспорядков в местах лишения свободы (одним из последних примеров могут служить беспорядки, вспыхнувшие в тюрьме в мексиканском штате Тамаулипас). Осужденные таким образом пытаются вернуться к привычному для них криминальному образу жизни, т.к. места лишения свободы не интерпретируются в этой культуре как пространство, способствующее повышению или укреплению криминального статуса. Именно поэтому в странах Латинской Америки возможны такие примеры как организованные властями поджоги тюрем, когда в огне погибает большинство тюремного населения: таким образом, официальная власть не только уничтожает представителей криминала, но и указывает на бессмысленность самого института наказания. Сложность борьбы с криминалом в таких государствах, как Мексика, Бразилия, Гондурас, заключается в том, он стал частью повседневной жизни и связан с характерным для этого региона культом бедности, преодолеть который не в состоянии даже правительственные социальные программы [11]. В России, где имеет место влияние тюремной субкультуры, места лишения свободы интерпретируются как социальные пространства, способствующие повышению социального статуса и приобретению уникального опыта. Пребывание в местах лишения свободы не означает прерывание криминального опыта, а, напротив, способствует его расширению и трансформации в более важный – тюремный опыт. В условиях российского общества тюремная субкультура стала доминантной для криминальной субкультуры, а затем распространилась и на другие сегменты социальной и культурной жизни.

Под ценностями тюремной субкультуры необходимо понимать обобщенные представления о должном, которые направлены на поддержание отношений между индивидами в местах лишения свободы. Наличие ценностей в любой субкультуре означает наличие определенного мировоззрения и моделей поведения, так как ценность подразумевает «осмысленное отношение субъекта к объекту» [2]. Отличительной характеристикой ценностей тюремной субкультуры является то, что их формирование происходило в условиях противостояния двух взаимосвязанных между собой систем ценностей: официальной, выраженной режимными правилами и культурой администрации пенитенциариев, и ценностей гражданского общества. Особенности мест лишения свободы (такие как изоляция, ограничение свободы перемещения, действия, выбора общения, темпоральные ограничения) стали причиной формирования ценностного ряда, номинально использующего ценности доминантной культуры, но предлагающего иную систему интерпретации ценностей. Для современной массовой культуры характерен следующий набор базовых ценностей: 1) жизненный комфорт (как духовный, так и физический); 2) социальная стабильность; 3) личностный успех [7], которые выражаются «массовой социальной мифологией, упрощающей сложную систему ценностных ориентаций человека и многообразии оттенков миропонимания до элементарных дуалистичных оппозиций» [8]. В интерпретации тюремной субкультуры эти ценности, сохраняя свою форму, реализуются через практики, на-

рушающие законы, и противоречащие моральным установкам. В условиях современной культуры тюремная субкультура адаптировала свои установки к ценностям массовой культуры. Ценность жизненного комфорта приобретает в тюремной субкультуре утривированные физические характеристики и выражается в поощрении «циничного отношения к женщине и половой распущенности, поощрении низменных инстинктов и любых форм асоциального поведения» [5]. Поддержание социальной стабильности трансформируется в тюремной субкультуре в систему жесткой сегрегации, выраженной в системе каст, и сопровождается такими моделями поведения, как «нечестность и двуличное отношение к представителям других каст и другим субкультурам, паразитизм, эксплуатация представителей «нижних каст», глумление над ними, обесценивание результатов человеческого труда» [5]. Идея личного успеха выражается в гиперболизации авторитета отдельных индивидов и связана с такими нормами поведения в тюремной субкультуре как «попрание прав личности, выражающееся в агрессивном, жестком и циничном отношении к «чужим», слабым и беззащитным, отсутствие чувства сострадания к людям, в том числе и к «своим», неуважение прав собственников, выражающееся в кражах и хищениях» [5].

Таким образом, можно сделать следующие выводы: распространение влияния тюремной субкультуры на отечественную культуру связано с тремя аспектами: историческим, социальным, культурным. Во-первых, в отечественной культуре исторический опыт не связывает тюрьму, исправительную систему с понятиями законности и справедливого наказания. В России опыт соотнесения тюремного наказания и законности вторичен в сравнении с опытом соотнесения тюрьмы с такими понятиями как «произвол власти» или «превратности судьбы». Кроме того, появление тюрем исправительного типа (пенитенциариев) в России не инициировалось общественными деятелями, организациями, населением, а было исключительно решением официальных властей а, следовательно, изначально пенитенциарии были помещены в чуждую им социальную, экономическую и культурную среду.

Во-вторых, социальный аспект влияния тюремной субкультуры определяется соотношением численности осужденных с общим количеством населения. По данным различных исследователей, общественных фондов, в России в XX веке были периоды, когда каждый 4-й мужчина имел опыт лишения свободы [10]. Но самое главное, что способствовало интенсивному влиянию тюремной субкультуры на отечественную культуру, – это социальная диффузия тюремного населения. В местах лишения свободы оказываются представители самых различных социальных групп, которые в условиях барачной системы содержания не отделены от уголовных преступников. Основной момент, на котором концепция тюремного населения, предложенная М. Фуко, теряет свою объяснительную способность на примере России, – это социальная характеристика. Фуко пишет о тюремном населении как достаточно устойчивой социальной группе, с помощью которой в обществе утверждается идея наказания [9]. В России эта группа расплыта, рассредоточена по всей социальной системе, что способствует масштабному распространению ценностей тюремной субкультуры.

В-третьих, культурный аспект влияния тюремной субкультуры связан с тем, что нормы тюремной субкультуры, не подвергаемые рефлексии и критическому анализу, стали частью повседневной культуры. Нормы и ценности тюремной субкультуры являются органичной составляющей повседневного языка, традиций, принципов взаимодействия. Одновременно нормы тюремной субкультуры проникли в профессиональные субкультуры, приведя к дегенерации профессиональных ценностей и искажению профессиональной деятельности (армия, полиция, строительство). И последнее проявление культурного аспекта – образы и ценности тюремной субкультуры становятся частью современных литературных текстов и кинотекстов, в которых они не осуждаются, а представляются наиболее эффективной стратегией выживания и достижения цели.

Для эффективного преодоления влияния тюремной субкультуры необходим целый комплекс мер, включающий кардинальное изменение отношения к тюремной субкультуре, к исправительным учреждениям со стороны и официальных властей, и граждан. Условно комплекс мер можно разделить на три направления: 1) реформирование государственной политики в сфере наказания, включающей изменения принципов наказания и способов осуществления наказания; 2) реформирование институтов гражданского общества, связанных с правозащитной деятельностью; 3) внесение существенных изменений в деятельность таких структур гражданского общества, как образовательная система, средства массовой информации, направленных на нивелирование влияния тюремной субкультуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добренев В.И. Фундаментальная социология: в 15 т. Т. 11. Культура и религия / В.И. Добренев, А.И. Кравченко. М.: ИНФРА-М, 2007. 1104 с.
2. Каган М.С. Философская теория ценности / М.С. Каган. СПб.: ТОО ТК «Петрополис», 1997. 205 с.
3. Клейменов М.П. Криминализация общества в России: культурологический аспект / М.П. Клейменов // Преступность и культура. М.: Криминологическая ассоциация, 1999. С. 19-23.
4. Лиотар Ж.-Ф. Ответ на вопрос: что такое постмодерн? / Ж.-Ф. Лиотар // Ad Marginem 93: ежегодник. М: Ad Marginem, 1994. С. 303-323.
5. Пирожков В.Ф. Законы преступного мира молодежи (криминальная субкультура) / В.Ф. Пирожков. Тверь: ИПП «Приз», 1994. 135 с.
6. Самойлов Л. Этнография лагеря / Л. Самойлов // Советская этнография. 1990. № 1. С. 96-108.
7. Тульчинский Г.Л. Свобода и смысл / Л. Г. Тульчинский // Новый сдвиг гуманитарной парадигмы. Lewiston-Queenston-Lampeter: The Edwin Mellen Press, 2001. 483 с.
8. Флиер А.Я. Массовая культура и ее социальные функции / А.Я. Флиер // ОНС: Общественные науки и современность. 1998. №6. С. 138-148.
9. Фуко М. Надзирать и наказывать / М. Фуко. М.: Ad Marginem, 1999. 482 с.
10. Центр содействия реформам уголовного правосудия Тюрма и воля [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.prison.org> (дата обращения: 19.04.2013).
11. Chioda L., de Mello J.M.P., Soares R.R. Spillovers from Conditional Cash Transfer Programs: Bolsa Familia and Crime in Urban Brazil. IZA Discussion Papers, Institute for the Study of Labor. 6371. 2012. URL: <http://ftp.iza.org/dp6371.pdf>

Тищенко Наталья Викторовна –
кандидат культурологии, доцент кафедры
«Культурология» Саратовского государственного
университета имени Гагарина Ю.А.

Natalia V. Tishchenko –
Ph. D., Associate Professor
Department of Culturology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 316.334.22

А.А. Шиленко

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СОЮЗОВ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ АМЕРИКАНСКИХ ПРОФСОЮЗОВ

Профессиональный союз как социальный институт, занимающийся мониторингом социально-трудовых прав впервые был образован в странах Запада и позже стал базой для организации сходной структуры в дореволюционной России. Эта организационная структура, претерпев преобразования в период первой половины XX века, сформировалась в советские профсоюзы. Однако в последнее время наблюдается тенденция снижения популярности профессиональных союзов в тех странах, в которых зародилось само понятие профсоюзов. Этому способствуют некоторые причины как экономического, так и политического характера.

Профсоюз, работник, работодатель, социально-трудовые права, «средний класс», трудовая миграция, акции протеста, бюрократическая структура

A.A. Shilenko

COMPARATING THE STRUCTURE OF FOREIGN TRADE UNIONS WITH THE SYSTEM OF AMERICAN TRADE UNIONS

Trade unions as a social institution in charge of monitoring social and labor rights was first formed in the west, and later became the basis for organization of a simi-

lar structure in pre-revolutionary Russia. This organizational structure, having undergone transformation in the first half of the XX century, has become the foundation for the Soviet trade unions. However, there has been a tendency to reduce the popularity of trade unions in the countries where the concept of trade unions originated. The tendency is motivated by both economic and political factors.

Trade union, employee, employer, social and labor rights, social institution, «middle class», labor migration, protest, bureaucratic structure

Западные страны являются родоначальником движения идей о необходимости контроля за соблюдением прав работников. Именно на Западе при складывавшемся стереотипе о так называемой идее «свободе и равенстве для всех» впервые рабочие стали коллегиально искать поддержки своих социально-трудовых прав касательно условий труда. Происходит возникновение профессиональных союзов и их легитимация с последующим образованием теоретической базы. Профессиональные союзы закрепляются на Западе как системные структуры, направленные на поддержание гарантии соблюдения социально-трудовых прав работников как непосредственно при исполнении их обязанностей, так и относительно условий их жизни [9].

Западные модели становились базисной основой для формирования профсоюзных организаций в других странах с относительно развитой экономикой и желанием работников коллективно контролировать соблюдение их социально-трудовых прав. Глобальное распространение профессиональных союзов сопутствовало развитию глобальной же законодательной базы по социально-трудовым правам рабочих [7]. Одной из стран, на которую повлияло распространение желания рабочих контролировать свои права, стала Российская империя. В то время в России конца XIX – начала XX века профсоюзы оформились так же, как и в других странах, с примерно схожей политико-экономической ситуацией. Эволюция российских профсоюзов протекала от неформальных собраний рабочих до организованных коллективов. Последние уже могли оказывать влияние на руководство предприятия различными способами, такими как документированные требования для начального этапа переговоров и проведения различных акций при нарастании критичности ситуации. Среди таких акций можно, например, указать отказ работников от исполнения трудовых обязанностей и проведение протестов. Однако такие события как революции и смена политического режима в начале XX века повлияли на многие сложнейшие институты в России, в том числе и на оформляющиеся профессиональные союзы. Для новой власти в первое время было крайне нежелательно существование в стране каких-либо сторонних собраний, которые могли бы повлиять на складывающуюся политическую ситуацию, даже если эта структура на первых порах не предъявляла политических требований [8]. Профессиональные союзы попадали под эту категорию как некое собрание людей, пытающихся влиять на вышестоящие органы. Впоследствии новое правительство было вынуждено вновь организовать структуру, регулиющую трудовые права. Как в свое время пришлось в начале XX века в рамках НЭП вернуть частную собственность, а в армию назначать офицеров царской армии, так пришлось создавать структуру профкомов, занимающихся регулированием условий труда работников. Но при ситуации, когда практически все предприятия находились в полной государственной собственности, новые профкомы теряли одну из главных характеристик – независимость. Профкомы стали такой же структурной единицей на предприятии как бухгалтерия и отдел кадров, и соответственно, не могли противодействовать собственному руководству. И лишь со временем, примерно во второй половине XX века, советские профессиональные союзы стали приобретать некоторые черты классических. После событий конца XX века в нашей стране под влиянием таких событий, как развитие частного предпринимательства и оформление новой законодательной базы согласно мировым стандартам, профсоюзы наиболее приблизились к идеалу классического объединения рабочих. Но при приобретении независимости профсоюзам приходится аргументированно требовать соблюдения прав рабочих. Парадоксальность заключается в том, что в те же годы конца XX века, если посмотреть на страны, в которых зародилось понятие «профессиональные союзы», можно проследить, что на Западе появилась тенденция к некоему отказу от профсоюзов и препятствованию их существованию [4].

Рассмотрим конкретный пример развития современной системы профессиональных союзов стран Запада. Американские профсоюзы показательны тем, что имеют одновременно достаточно развитую экономику и значительный территориальный охват. Экономическая система Америки определяется во многих сравнительных показателях как эталонный показатель при оценке экономического уровня развития других стран.

Прежде всего, стоит отметить, что зарубежные профсоюзы организуются по определенным критериям. Профсоюзы стран Запада подразделяются на «цеховые», то есть объединение людей оп-

ределенной специальности; это обусловливается тем, что на крупных предприятиях образуются несколько профессиональных сообществ [12]. Другой вариант – «производственные» профсоюзы, состоящие из работников одного предприятия. Также профессиональные союзы могут иметь специфические особенности, например «конфессиональные», где отбирают работников по религиозному принципу.

Теперь перейдем непосредственно к ситуации с американскими профсоюзами. За последние несколько десятилетий в США развивается тенденция развития настроений среди предпринимателей о нежелательности существования профессиональных союзов. Данный вывод можно сделать по ряду моментов, связанных с процессом исполнения американскими профсоюзами своих обязанностей [9].

1. Нежелание руководства соблюдать некоторые требования. Большинство требований работников в итоге обозначают увеличение издержек и расходов. В условиях предпочтительности максимизации прибыли правление ставит работников в условия, когда либо работают дальше по принятым в организации правилам, без всяких профсоюзов, либо пусть ищут себе другое предприятие с профсоюзом. Кроме того, руководитель откровенно проводит на предприятии политику по применению санкций к активистам или желающим вступить в профсоюз. Санкции эти варьируются от предупреждений и незначительных штрафов до увольнения.

2. Профсоюз является одним из важнейших факторов формирования «среднего класса» [1]. Сегодня наблюдается постепенное уменьшение прослойки среднего класса при том, что существуют две показательные статистики по увеличению численности класса нижнего, а вторая по росту материального состояния группа выше среднего класса.

3. Конфликт на почве распределения рабочих мест между мигрантами и местными. С одной стороны, привлечение мигрантов экономически выгоднее, чем постоянная должность местного гражданина. С другой стороны, возросшее в последнее время недоверие к мигрантам, например антиисламские настроения, вызывает волны гонений на иностранцев, работающих на некоторых должностях.

4. Снижение общей активности профсоюзов. Лидеры профсоюзов всё в меньшей степени заинтересованы в участии в политической жизни страны. Это оказывает существенное влияние на общий статус структур профессиональных союзов, крайне негативно сказывается на способности профсоюзов принимать участие в оформлении законодательной базы не только по вопросам социально-трудовых прав [5]. Также американские профсоюзные активисты проявляют некую пассивность и излишние стремление к компромиссам при решении конфликтов, в то время как их коллеги из европейских профессиональных союзов активно участвуют в проведении масштабных акций протеста в защиту своих прав совместно с другими категориями граждан, как, например, студенчество или эмигранты. Впрочем, для европейских профсоюзов, в частности стран Восточной Европы, актуальным становится отток из страны трудовых мигрантов из числа молодежи, стремящихся получить работу в соседних странах с более перспективной (на их взгляд) экономической ситуацией. В результате происходит «опустошение» «градообразующих» предприятий и уменьшение численности населения в некоторых населенных пунктах. Эта ситуация проявляется при анализе репортажей из стран Восточной Европы. Например, в репортаже И. Пивоваровой «Села-призраки» показаны несколько молдавских сел, опустевших после того, как молодежь уезжает работать в более крупные населенные пункты или зарубежье на работу [10]. Другой репортаж А. Яковлева «Латвийские медсестры уезжают работать в Германию» раскрывает проблему, что квалифицированным кадрам выгоднее работать за рубежом, чем в своей стране. В результате идет значительный отток кадров, и соответственно страдают отечественные отрасли [11].

Кроме того, отметим появление некоторых доводов, по которым отказ от сегодняшних американских профсоюзов может оказаться обоснованным.

1. Есть некоторые общественные структуры, чья деятельность совпадает с деятельностью профсоюзов. Например, департамент труда, также занимающийся решением проблем нарушения социально-трудовых прав работников, и в то же время и профсоюз, и департамент труда требуют от работников уплаты взносов, несмотря на дублирование функций.

2. Работа профсоюза непосредственно отражается на экономической деятельности организации, что влечет, например, увеличение издержек и увеличение стоимости продажи выпускаемой продукции или услуги.

3. Профсоюзные лидеры чрезмерно увлекаются «крайними мерами», с помощью которых они добиваются своих требований. Забастовки, прекращение выполнения трудовых обязанностей – хороший аргумент для руководства, чтобы прислушаться к требованиям работников, но это вариант на частных предприятиях. Когда ведется агитация за проведение забастовки среди государственных и муниципальных структур, последствия могут иметь крайне негативный эффект для всей системы и

спровоцировать нарушение жизнедеятельности граждан. Это характерно для забастовок медицинских работников, правоохранительных органов или городских служб. Требования бастующих выполнят, однако влияние на расходы общегородского бюджета будет несоизмеримо выше.

4. Профсоюз как типичная бюрократическая организация подвержен таким негативным явлениям как коррупция, протекция, дискриминация. Это проявляется в распределении должностей в организации на основе необоснованных привилегий или же препятствование занятию определенных мест представителями «с улицы».

5. Привлечение работников организации к работе в профсоюзе может привести к такому негативному явлению как снижение эффективности выполнения основного рода деятельности под предлогом необходимости совмещения с работой на профсоюз. Однако фактически эта «работа на профсоюз» может оказаться не такой уж объемной, а установленные нормы выработки придется перекрывать за счет сверхурочной работы других работников.

6. В крупных профсоюзах формируется достаточная материальная база, пополняемая членскими взносами. Основное назначение данных средств – использование их как резервных фондов по выплате компенсации рабочим при возникновении такой необходимости, например при невыплате зарплаты, а также из этой базы поступают материальные средства для проведения различных акций. Суть проблемы в том, что большие материальные активы профсоюзов могут сформировать стереотипное мнение о заинтересованности в их накоплении сторонних лиц, вплоть до представителей криминальных структур.

Итогом последних 20 лет является постоянная конфронтация американских руководителей организаций и работников, желающих создать профсоюз.

Работники ставят своей задачей доказать эффективность структуры профессионального союза для общего дела, показать другим работникам, что создание профсоюза – это не только своевременные взносы и дополнительные обязанности, но и реальный способ коллективно добиться исполнения обоснованных требований по соблюдению социально-трудовых прав [6]. Чем больше работников удастся привлечь, тем эффективнее будет профсоюз распоряжаться этим людским ресурсом. Более сложная задача – доказать руководству, что совместное с профсоюзом ведение деятельности позволит, несмотря на первоначальные издержки, повысить в конечном итоге эффективность производства. Далее для профсоюза необходимо добиться влияния на другие системные элементы, например на представителей политики для регулирования правовой базы. Данная цель достигается посредством поддержки кандидатов политических партий, на какую-либо должность различного уровня и/или предложений кандидатам включать в свою программу социально-трудовые аспекты. В итоге современный профсоюз будет обеспечен тремя важными ресурсами: людскими (материальные взносы и актив для проведения акций), экономическими (доказательство эффективности совместного планирования), законодательными (подтверждение требований в нормативной базе).

В противовес вышеизложенному руководство предприятия принимает меры по уже давно разработанным программам «ослабления профсоюзов». Прежде всего, провести «воспитательную беседу с работниками», применяя, как указано выше, различные меры воздействия, например, по увеличению норм работы, чтобы у работника не оставалось времени «заниматься» активистской деятельностью или угроза замещения на должности работника на нового, который относится к категории «низкооплачиваемого». К данной категории относят различных временных наемных рабочих с разной степенью квалификации от трудовых мигрантов до разовых квалифицированных специалистов путем применения процедуры аутсорсинга. Это совмещается с «работой с лидерами профсоюзов», которые чаще всего являются такими же работниками организации, только с более выраженной активной позицией. Дело в том, что в американском законодательстве установлен лимит на обязательное количество членов профсоюза, и при «недостижении» этого числа профсоюз не сможет претендовать на свою легитимность. Меньше людей – меньше ресурсов – меньше влияния. Вопрос максимизации прибыльности показывает, что издержки «сегодня» – это реальный расход предприятия «сегодня», а возможное увеличение эффективности «завтра» не всегда приведет к реальной прибыли «завтра». Что касается политики и взаимодействия с другими системами, руководство может симметрично ответить, привлекая на свою сторону кандидатов, предлагая им материальную поддержку их компании в случае помощи в принятии законодательных актов, «выгодных» руководству предприятия. И вот уже «ресурсы» работают на «другую сторону»: работники убеждены в том, что им спокойнее работать по-старому, без профсоюзов, требующих кардинальных и радикальных перемен; они согласны на зарплату, формируемую из «сегодняшней» прибыли, и не согласны «сегодня» отдавать свои «ресурсы» (материальные или активистские), средства ради призрачной выгоды; оформляются поправки

к законодательству, по которым профсоюзы если не полностью запрещаются, то хотя бы ограничиваются в своем влиянии.

«Вернемся» в нашу страну. После смены политического строя в конце XX века в новообразованной Российской Федерации пришлось «переделять» многие структурные элементы и системы государства. Многие, что существовало в Советском Союзе, уже не могло оставаться в том же виде по многим социально-экономическим факторам, например, отсоединение территорий новых самостоятельных теперь государств или же переход с практически тотального преобладания государственной собственности к набирающему обороты частному предпринимательству.

Перед нашей страной возник новый выбор: если мы не можем организовываться по старым принципам советских лет, а на выработку новых стратегий потребуется время, то выход – в заимствовании схожих стратегий. Проблема в том, что необходимо комбинирование различных стратегий в аспектах нашей страны. Принципы наших соседей из восточной Европы и ближней Азии не совсем подходят по тем критериям, что, несмотря на распад СССР, мы все еще являемся самым крупным государственным образованием. И наши масштабы, например, требуют разработки сложной системы взаимодействия центра и периферии. Но если основываться на опыте крупных сверхдержав (определяемых по соотношению территориально-экономического превосходства), то столкнемся с проблемой того, что, например, их экономика сформирована по несколько другим путям, нежели в нашей стране. Неоднозначность нашей страны не только по территориально-экономическим признакам, но и по другим критериям, например по культурным и демографическим, потребовала выработки комбинированных принципов и стратегий для нашей страны. Ситуация осложнялась тем, что с потерей территориальной в нашей стране произошло сокращение ресурсных баз, а также следует учитывать, что экономика страны в последние годы существования Советского Союза развивалась не самым лучшим образом. Оставшимися нам «в наследство» ресурсами надлежало распорядиться грамотно с минимальными потерями, чему явно не способствовали многие конфликты внутри страны в начале 1990-х годов. Так, методом проб и ошибок в течение уже около двадцати лет в нашей стране формируется стратегия развития, осложняемая, например, тем, что во взятых за образец государственных образованиях также происходят процессы как положительного, так и отрицательного характера: колебание валютных резервов, мировые кризисы, внутренние и внешние конфликты в странах, затрагивающие часто не только ближайших к ним соседей, но и страны, располагающиеся на «другом конце света».

Теперь пора сформулировать вопрос в рамках поставленной темы. Нужны ли в нашей стране структуры профессиональных союзов? Вышеперечисленные аспекты экономики и социально-трудовых отношений зарубежных стран, имеющих как позитивную, так и негативную окраску, аналогично представлены и в нашей стране [2]. Сегодняшний работник желает сформировать профсоюз по классическим принципам независимости и влиятельности. Необходимо доказать работникам, что образующаяся структура будет в некоторой степени отличаться от привычных советских профкомов, деятельность которых иногда стереотипно воспринималась как поверхностная и незначительная, убедить руководителей организаций в эффективности взаимодействия и обратной связи с рабочим коллективом. Это особенно актуально для частного предпринимательства, учитывая, что на крупных государственных структурах сохранился развитый бюрократический аппарат профкомов. И самое главное – это участие профсоюзов в формировании новой законодательной базы, которая также оформляется уже более 20 лет.

Отечественный работодатель, так же как и его западный коллега, стоит перед выбором о нужности профсоюза на его предприятии. Максимизация прибыли, издержки, установление уровня заработной платы – всё это неотъемлемая часть экономики организации. Кроме того, есть некоторые специфические моменты ведения хозяйственной деятельности в нашей стране. Например, это касается подбора рабочих кадров. У нас также есть своего рода группы граждан «с пониженной оплатой труда». Это различные возрастные группы, такие как молодые специалисты без опыта работы или старшевозрастная группа с опытом работы, но находящаяся в пред- и пенсионном возрасте. Особое место занимают трудовые мигранты. После распада СССР некоторые республики, приобретя независимость, вынуждены самоопределяться в своей стратегии экономического развития [3]. Будучи «оторванными от кормушки», новые страны вынуждены развивать собственные ресурсы. Это был один из факторов развития масштабной трудовой эмиграции работников в нашу страну из ближнего зарубежья. Отсюда конфликт дешевой рабочей силы и местных кадров.

Однозначно трудно судить о необходимости профсоюзов. На сегодняшний день существует необходимость в правоконтрольной структуре такого типа, так как многие вопросы слишком сложны

и требуют системного подхода. Очень сложно решить их силами отделов предприятия (кадрового отдела и бухгалтерии). И пока нет явной альтернативы, российские профсоюзы нужны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шкаратан О. И. Новый средний класс на Западе (Полвека дискуссий, полвека перемен) / О.И. Шкаратан, С.А. Иняевский. М.: Общественные науки и современность. 2007. № 4. С. 49-66.
2. Веселкова Н. В. Профсоюзы и пресса: реальность и мифы / Н. В. Веселкова. М.: Социологические исследования. 2002. № 8. С. 128-136.
3. Симонян Р. Х. Средний класс в современной России: миф или реальность? / Р. Х. Симонян. М.: Общественные науки и современность. 2008. № 1. С. 37-49.
4. Джеймс П. Политика европейского и американского рабочего класса: левые, правые и центристы. Портал «The Official James Petras Website» [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://petras.lahaine.org/?p=1871>
5. Джордж Ф.: «Кризис среднего класса угрожает могуществу Америки». Портал «Stratfor Global Intelligence News & Analysis» [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.stratfor.com/weekly/crisis-middle-class-and-american-power>
6. Михаил Б. Начало конца американских профсоюзов. Портал «Земляки» [Электронный ресурс] Режим доступа: http://mainru.zemliaky.org/index.php?option=com_content&task=view&id=26&Itemid=2
7. Михаэль Д. Последний бой профсоюзов США. Портал «новый смысл-артель аналитиков». [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://sensusunovus.ru/analytics/2011/02/20/5557.html>
8. Гидденс Э. Социология / Э. Гидденс; под ред. В.А. Ядова. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 704 с.
9. Латова Н. Профсоюзы. Портал «Энциклопедия Кругосвет Универсальная научно-популярная онлайн-энциклопедия» [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.krugosvet.ru/enc/gumanitarnye_nauki/sociologiya/PROFSOYUZI.html
10. Репортаж И. Пивоваровой «Села-призраки» Национальное представительство МТРК «МИР» в республике Молдова 2012 г. Портал «YouTube» [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.youtube.com/watch?v=mTQm5xmGwjg>
11. Репортаж А. Яковлева «Латвийские медсестры уезжают работать в Германию» Первый балтийский канал Латвия 2012 г. Портал «YouTube» [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.youtube.com/watch?v=OMcplel1grY>
12. Цеховые профсоюзы. Портал «Словари и энциклопедии на Академике» [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/sie/19683/цеховые>

Шиленко Александр Александрович – аспирант кафедры «Социология, социальная антропология и социальная работа» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander A. Shilenko – Postgraduate Department of Sociology, Social Anthropology and Social Work, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.02.13, принята к опубликованию 20.05.13

УДК 316.334.22

А.А. Шиленко

ПРОБЛЕМАТИКА СИСТЕМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОССИЙСКИХ ПРОФСОЮЗОВ В РЕГУЛИРОВАНИИ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ БАЗЫ ОТНОСИТЕЛЬНО СОЦИАЛЬНО-ТРУДОВЫХ ПРОЦЕССОВ

В нашей стране многие структурные элементы экономической системы претерпели глобальные перемены в период смены политического строя в начале девяностых годов. Одним из таких элементов является законодательная база со-

циально-трудовых прав работников. Новая нормативная база составлялась на основе старого советского законодательства и общемировых практик. Новые документы, находясь на стадии корректировки, имеют некоторые негативные моменты, такие как расхождения или дублирования полномочий. Существует необходимость коллегиального рассмотрения нормативной базы.

Экономическая система, трудовое законодательство, работник, работодатель, профсоюз, социально-трудовые права, Российская Трехсторонняя Комиссия

A.A. Shilenko

ISSUES OF INTERACTION BETWEEN THE TRADE UNIONS IN RUSSIA ON THE LEGAL FEAMEWORK RELATING SOCIAL AND LABOUR PROCESSES

In this country most structural components of the economic system have undergone significant changes during the political regime turnaround in the early nineties of the XX century. One of these components is the legal basis for the social and labor rights of workers. The new regulatory framework was based on the outdated Soviet legislation and global practices. The new documents while under the correction process have certain negative aspects relating the inconsistency or duplication of authority. There is a need for a peer review of the regulatory framework.

Economic system, labor laws, employee, employer, labor union, social and labor rights, the Russian Trilateral Commission

В советские годы структуры профессиональных союзов существовали как структурное подразделение при различных организациях. Профкомы были неоднозначными институтами регулирования социально-трудовых отношений. С одной стороны, они всё-таки вели свою деятельность по мониторингу соблюдения прав рабочих согласно общим законодательным актам, принятым в стране, однако в некоторых случаях их деятельность не всегда достигала до некоторого идеала, который определяется уровнем классических профсоюзных организаций зарубежного образца. Этому было много причин, как социально экономических, так и политических. Прежде всего, как отмечено ранее, профкомы были зависимы от непосредственного руководства, и проведение каких либо акций и предъявление требований означало конфликт собственно с работодателем. Разные законодательные акты формировались на федеральном уровне и в случае, когда члены профсоюза желали изменений, требовалось подтверждение на федеральном уровне, а это значит противостояние достаточно большой и развитой бюрократической системе. И, кроме того, сам политический строй того времени с первых лет своего существования не очень приветствовал какие-либо сторонние общественные организации, например профессиональные союзы, которые могли бы «вмешиваться в дела» партии. Профсоюзы в Советском союзе появились как одна из тех «капиталистических» вынужденных необходимостей, пока... что-то там... наступит «Коммунизм». Профком – как элемент организации во взаимосвязи с отделом кадров, бухгалтерией и отделом безопасности труда [5]. Но несмотря на это, с течением лет советские профсоюзы все-таки набирали вес, закрепляли свои требования в нормативных документах, позволили себе заниматься более глобальными проблемами социально-трудовой сферы как, например, вопросы материального обеспечения работников. Советские профсоюзы оформлялись из отдельного «кабинета» в развитую бюрократическую структуру [1].

События последних лет XX века в нашей стране имели глобальные последствия для многих сфер общественной жизни. Смена политического строя, кризис экономики и реорганизация государственных структур как одни из крупнейших факторов того времени. После нескольких лет произошло переформлирование состояния важнейших институтов «новой» страны, прежде всего образование новой законодательной базы. Новые нормативные акты федеральных и региональных уровней составлялись на базе положительных моментов старых документов советских лет и успешного опыта зарубежных аналогов [4].

Так и новообразованная структура российских профсоюзов сформирована на базе советских профсоюзов и с чертами классических западных профсоюзов. Новая, теперь уже относительно независимая структура должна регулировать социально-трудовые права рабочих в соответствии с основными федеральными и региональными законами о труде и социальных гарантиях. По ходу деятельности современные профсоюзы часто вступают в конфликт с руководством организаций различного

уровня по поводу различных нарушений социально-трудовых прав работников – членов профсоюзов. Это в равной степени относится и к частным предприятиям, и к государственным организациям. Одним из основных аргументов таких споров выступают именно законодательные акты, но, к сожалению все чаще в нормативных документах различного уровня встречаются несоответствия и противоречия, принимаются поправки, аннулирующие какие либо важные пункты базисных статей, либо наоборот – возводящие в абсолют, казалось бы, незначительные исключения и ограничения. Рассмотрим конкретные примеры из практики работы профсоюзных организаций по «борьбе» с координированием законодательной базы.

Прежде всего, деятельность профсоюзных организаций включает проведение различных акций, например касающихся забастовок, пикетирования. Перечисленные мероприятия в принципе являются крайней мерой в решении конфликтов, однако чаще всего именно этот аргумент является единственной действенной мерой [9]. Однако по некоторым нормативным актам такая деятельность может расцениваться как экстремистская деятельность, и влечет санкции со стороны правоохранительных органов вплоть до роспуска коллектива профсоюзов [7]. Налицо несоответствие двух моментов: с одной стороны, существуют поправки к законодательству относительно прав работников отстаивать свои права и устраивать общественные собрания (Конвенция МОТ № 87 «О свободе ассоциации и права на организацию»), а с другой – существуют поправки («О противодействии экстремистской деятельности»), по которым любое собрание людей можно квалифицировать с негативной оценкой. По той же причине профсоюзам могут отказать в получении сведений о хозяйственной деятельности организации, в том числе относительно материальной базы и бюджетного плана по оплате труда. Однако под предлогом препятствования возможной экстремистской деятельности налагается запрет по типу «коммерческой тайны» для сторонних организаций. Но в то же время новые поправки рекомендуют профсоюзам отчитываться о своей деятельности, а также предоставлять поименные списки принятых членов, руководства профсоюза и возможных кандидатов, желающих вступить в профсоюз. Все это можно расценивать как попытку сторонних органов влиять как на отдельных членов, так и на профсоюз в целом.

Например, уже существует конкретный прецедент изменения в трудовом кодексе, по которому руководство организации вправе увольнять членов профсоюза из его руководства. Профлидера можно уволить под большим спектром предлогов: как простое сокращение штата, так и с формулировкой «ненадлежащее исполнение обязанностей». Следует ли говорить о повсеместных распространенных случаях, когда официально руководство не препятствует образованию профсоюза, но по организации «проходит» негласное правило: «чтобы ни один работник не смел вступать в профсоюз» при угрозе санкций, вплоть до увольнения.

Законодательство, как отмечено выше, – хороший аргумент при решении трудовых споров, но этот аргумент имеет другую «сторону медали». Проблема все в тех же нормативных актах, которые уже почти два десятка лет все еще находятся в «дополняемом» состоянии. И эти дополнения формируются с учетом мнения как работников, так и работодателей. От этого противостоятся случаются «конфликтные» поправки: с одной стороны, запрос о снижении налоговой ставки для бизнеса, а с другой – требования к увеличению размера прожиточного минимума. Манипулируя поправками излишне либерального закона, руководство предприятия может отказать в некоторых требованиях работнику и профсоюзу, аргументируя пунктами официально принятых поправок нормативных актов.

Что же противопоставят профсоюзы? Отдельным структурам достаточно трудно влиять на события федерального значения. По этой причине приобретают значимость ФНПР (Федерация независимых профсоюзов России) и РТК (Российская Трехсторонняя Комиссия) [8]. Данные структуры вполне способны контролировать изменения социально-трудовой сферы нашей страны, а именно проводить анализ основных требований работников с учетом адекватных им требований работодателя, планировать нужную поправку и дополнения к законодательствам, выставлять на рассмотрение конечные пункты и контролировать доведение новых сведений до федеральных уровней. Кроме того, факт влиятельности данных структур особенно важен для системности мониторинга социально-трудовых процессов, это проявляется в регулировании не только непосредственно трудовых законодательств, но и «пересекающихся» с ними областей, касающихся, например, пенсионных отчислений, медицины, образования. Поэтому и важен факт периферийного взаимодействия региональных профсоюзов с федеральными управлениями. Отдельный российский профсоюз будет также слаб, как советский профком [6].

Подводя итоги о проблемах современной законодательной базы в области социально-трудовой сферы, можно сделать обобщающие выводы. Проблема законодательной базы – в поисках путей ее построения. Она складывается из двух компонентов: с одной стороны, база советских лет, от

которой вроде бы отказываются, но пока требуется опираться на нее как на основу; с другой – опыт других стран со сходным типом правления, но надо помнить о местной специфике [10]. Поэтому мы все собираемся «как у них, но по-нашему», «не по-старому, но не слишком ново». Развитие системного взаимодействия профессиональных союзов позволит центральным структурам оперативно связываться с периферией и сообщать посредством «обратной связи» о новых инцидентах, конфликтах, «несостыковках» законодательств или о принятии новых поправок и дополнений, которые могут оказаться важными для социально-трудовой сферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.И. 80 лет на страже интересов членов профсоюза. 1918-1988 / В.И. Иванов, Ю.Е. Казаков, А.И. Краснов; под общ. ред. В.П. Савченко. М.: Профсоюзы и экономика, 1998. С. 31.
2. Кермон Ж.-Л. Политизация государственной администрации или бюрократизация политики? / Ж.-Л. Кермон. М.: Зарубежная политическая наука, 1990. Вып. III.
3. Кремль пытается спасти престиж профсоюзов <http://www.mysob.ru> Обращение к ресурсу 16.10.2008.
4. Рогожин Е.С. Профсоюзы: история, лидеры, проблемы, 1906-1996 / Е.С. Рогожин. Саратов: Регион. Приволж. Изд-во «Детская книга», 1997. С. 358.
5. Гидденс Э. Социология / Э. Гидденс; под ред. В.А. Ядова. М.: Эдиториал УРСС, 1999. С. 460.
6. Профсоюзные организации, правовые основы деятельности, организационная, финансовая работа, налогообложение и бухгалтерский учет. / сост. Т.В. Вакалюк. 2-е изд. Екатеринбург: Правовед-2001, 2008. С. 9.
7. Айдар Бурибаев: Профсоюзы перестанут считать экстремистскими организациями // <http://www.solidarnost.org>
8. Юлия Рыженкова: Что такое РТК и зачем она нужна // <http://www.solidarnost.org>
9. Профсоюзное движение – способы и формы забастовок <http://studyhelps.ru>
10. Федеральный закон РФ от 12 января 1996 года №10-ФЗ «О профессиональных союзах, их правах и гарантиях».

Шиленко Александр Александрович – аспирант кафедры «Социология, социальная антропология и социальная работа» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander A. Shilenko – Postgraduate Department of Sociology, Social Anthropology and Social Work, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.02.13, принята к опубликованию 20.05.13

ЭКОНОМИКА

УДК 631.145:338.43

Т.И. Грудкина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ МОЛОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗАЦИИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Рассмотрена проблема эффективности и конкурентоспособности молочных комплексов на основе модернизации. Выбраны в качестве объектов для сравнительного анализа современные молочные комплексы Орловской области. Проанализирована их обеспеченность производственными ресурсами, эффективность использования ресурсного потенциала, производства молока. Выявлены конкурентные преимущества, роль в их формировании модернизации, их влияние на повышение эффективности и конкурентоспособности молочных комплексов в свете конкретного опыта государственной поддержки отрасли.

Эффективность, конкурентоспособность, молочные фермы и комплексы, модернизация, инновации, конкурентные преимущества

T.I. Grudkina

THE EFFECTIVENESS AND COMPETITIVENESS OF THE DAIRY COMPLEXES ON THE BASIS OF MODERNIZATION: COMPARATIVE ANALYSIS

The problem of the efficiency and competitiveness of the dairy complexes on the basis of modernization. Selected as sites for the comparative analysis of modern dairy complexes Orel. Analyzed the security of their production-governmental resources, the effectiveness of resource potential, the production of milk. Identified competitive advantages, their role in shaping the modernization of their impact on the efficiency and competitiveness of the dairy complexes in the light of the specific expertise of state support for the industry.

Efficiency, competitiveness, dairy farms and complexes, modernization, innovation, competitive advantage

Ключевым фактором повышения эффективности функционирования и, в конечном счете, конкурентоспособности организаций-производителей молока на средних по размеру и достаточно крупных фермах и комплексах продолжает оставаться реализация инновационного подхода и модернизация производства. Актуальность решения данной проблемы обосновывается необходимостью совершенствования используемых технологий, обновления технологического оборудования, техники, осуществления отдельных направлений государственных федеральных и региональных программ, тем более что соответствующая возможность у многих сельскохозяйственных организаций появилась только благодаря участию в ней.

Интерес к решению данной проблемы высказывали многие авторы в своих научных исследованиях [1, 17]. Оригинальная точка зрения автора на актуальность модернизации, ее роль в формировании конкурентных преимуществ и повышении качества продукции, отдельные организационно-экономические ее аспекты и практический опыт решения данной проблемы, в том числе инновационный подход к этому, также находила отражение в публикациях [13, 16-18].

В повышении эффективности производства молока ключевая роль отводится технологическим факторам. Речь идет, прежде всего, о применении современных ресурсосберегающих технологий производства и технических средств на основе инноваций и модернизации. Научно-технический прогресс является основной стратегией конкурентоспособности предпринимательской фирмы [13].

Акцентируем внимание на том, что еще совсем недавно, до начала реализации приоритетного национального проекта «Развитие АПК», во многих хозяйствах, занимающихся производством молока, свыше

80% оборудования на молочных фермах и комплексах физически и морально устарело и имеет сверхнормативный срок эксплуатации, что приводит к нарушению технологических процессов, снижению качества молока. Отсутствие современного молочного оборудования (молокопроводов, танков-охладителей и др.) практически лишает их возможности сбыта молока высшим сортом. Необходимо переоборудовать молочные дворы для доения коров в доильных залах с целью повышения качества молока и сокращения трудозатрат при его производстве, предусмотрев при этом замену молокопроводов, сокращение их длины и оснащение современным оборудованием, что будет способствовать росту качественных параметров молока [9, с.80]. Исследования прошлых лет свидетельствуют о том, что для этой отрасли характерна техническая и технологическая отсталость. Аграрным организациям не хватает современного оборудования и техники, велика их изношенность, денег на обновление нет, а существующая система кредитования слабо приспособлена к финансированию развития сельхозсектора [3]. Все это способствовало тому, что в России начался крупномасштабный процесс реконструкции и модернизации ферм и комплексов и в целом отрасли молочного скотоводства посредством реализации приоритетного национального проекта «Развитие АПК» по направлению «Ускоренное развитие животноводства» и ряда других программ федерального и регионального значения.

Рассмотрим организационно-экономические аспекты реализации модернизации молочного скотоводства с целью повышения конкурентоспособности молочных комплексов на примере сельскохозяйственных организаций Орловской области, где уделяют развитию этой отрасли повышенное внимание. Речь идет о таких предприятиях, как ООО «Юпитер», СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» ЗАО АПК «Орловская Нива», ЗАО «Славянское» и ООО «Маслово». СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» и ООО «Юпитер» участвовали в реализации приоритетного национального проекта «Развитие АПК» по направлению «Ускоренное развитие животноводства» и построили крупные молочные комплексы. В СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» за десять месяцев был построен, заполнен высокопродуктивным поголовьем и введен в эксплуатацию в 2007 г. с беспривязным содержанием первый комплекс в регионе проектной мощностью 1200 коров с объемом финансирования 493,6 млн.руб. [15]. ООО «Юпитер» в рамках реализации нацпроекта построило современный молочный комплекс на 640 коров. Во введенных летом 2009 г. в эксплуатацию животноводческих помещениях содержалось свыше 1000 голов КРС, в т.ч. 530 коров. Первая партия племенных животных поступила из Ирландии [18]. В 2012 году на молочных комплексах этого хозяйства содержится уже больше 1000 голов коров. ЗАО «Славянское» производит молоко с 1995 г., за последнее десятилетие построило два современных молочных комплекса средних размеров в основном за счет собственных средств. ООО «Маслово» взяло курс на молочное животноводство более 15 лет назад, когда агрофирма только делала первые шаги, и с тех пор следует этому курсу. За этот период влияние агрофирмы распространилось на 12 территорий, удалось реконструировать в основном собственными силами 86 животноводческих помещений, в которых содержалось 9 тысяч голов КРС, существенно увеличилось молочное поголовье [18]. К 2012 г. поголовье КРС существенно сократилось, в т.ч. и коров, но продолжает представлять собой самое крупное молочное стадо в регионе на уровне 2900 голов.

В табл. 1 представим показатели обеспеченности сельскохозяйственных организаций, имеющих современные молочные комплексы, производственными ресурсами, в том числе рассмотрим, насколько персонал вооружен ими.

Таблица 1

Обеспеченность производственными ресурсами организаций, производящих молоко на молочных комплексах, в 2012 г.*

| Показатель | ООО «Юпитер» | ЗАО «Славянское» | ООО «Маслово» | СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» |
|---|--------------|------------------|---------------|--|
| Площадь сельскохозяйственных угодий, га | 4275 | 4010 | 15357 | 11555 |
| Среднегодовая численность работников, чел. | 181 | 142 | 463 | 107 |
| Приходится на 100 га сельскохозяйственных угодий: | | | | |
| - основных производственных фондов, тыс. руб. | 23781,1 | 5408,3 | 1032,2 | 367,4 |
| - энергетических мощностей, л.с. | 373,6 | 357,7 | 162,2 | 116,9 |
| - трудовых ресурсов, чел. | 4,2 | 3,5 | 3,0 | 0,9 |
| - скота (условных голов) | 35 | 105 | 33 | 8 |
| Приходится на 1 среднегодового работника: | | | | |
| - сельскохозяйственных угодий, га | 23,6 | 23,3 | 33,2 | 107,9 |
| - пашни, га | 22,7 | 24,5 | 25,9 | 99,1 |
| - основных производственных фондов, тыс. руб. | 5616,8 | 1527,3 | 342,4 | 396,8 |
| - энергетических средств, л.с. | 88,2 | 101,0 | 53,8 | 126,3 |

Примечание: * здесь и далее по данным годовой бухгалтерской отчетности

В анализируемых субъектах молочного агробизнеса наблюдается существенный разброс площади сельскохозяйственных угодий и среднегодовой численности работников, о чем свидетельствуют данные

табл. 1. Это можно объяснить значительно отличающимися друг от друга размерами данных сельскохозяйственных организаций. Однако, в расчете на 100 га сельскохозяйственных угодий численность работников незначительно колеблется в диапазоне от 3,0 до 4,2 человек в ООО «Юпитер», ЗАО «Славянское», ООО «Маслово» (в 2011 году колебание было еще меньшим и приблизительно находилось на одном и том же уровне – от 3,1 до 3,5 человек [10]), тогда как в СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» ЗАО АПК «Орловская Нива» приблизительно приходится всего 1 человек. Фондовооруженность или стоимость основных производственных фондов в расчете на 1 работника является наибольшей в ООО «Юпитер», а именно превышает почти в 4,4 раза (в 2011 – в 3,4 раза [10]) сложившуюся в 2012 году в ЗАО «Славянское», в 23 и 64,7 раза соответственно – аналогичный показатель ООО «Маслово» и СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» (в 2011 г. – в 8,3 и 13,7 раза [10]). Если в 2011 году наиболее высокая энерговооруженность, т.е. наличие энергетических ресурсов в расчете на 1 работника, сложилась в ЗАО «Славянское» на уровне 96,9 л.с., что превысило на 18,2, 79,4 % и почти в 10 раз аналогичный показатель соответственно в ООО «Юпитер», ООО «Маслово» и СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» [10], то в 2012 году более энерговооруженным является СП «Комплекс по производству молока «Сабурово», которому уступает на 12,6% ЗАО «Славянское». Наличие пашни в расчете на 1 работника вполне сопоставимо на уровне 22,7-25,9 га в анализируемых организациях (в 2011 году – 28,2-32,6 га), тогда как в СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» из-за наименьшей среднегодовой численности работников почти в 4 раза больше. В целом можно сделать вывод, что все данные организации, производящие молоко на молочных комплексах, обеспечены в достаточном количестве производственными ресурсами, использование которых позволяет им стабильно осуществлять процесс производства сельскохозяйственной продукции, в т.ч. молока.

Для более объективной оценки использования производственных ресурсов, в частности основных производственных фондов, необходимо учитывать их состояние. Большое значение имеет анализ движения и технического состояния основных средств (табл. 2).

Таблица 2

Состояние и движение основных производственных фондов сельскохозяйственных организаций Орловской области

| Показатели | ООО «Юпитер» | ЗАО «Славянское» | ООО «Маслово» | СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» |
|---|--------------|------------------|---------------|--|
| 1. Наличие на начало года, млн. руб. | 852,6 | 203,9 | 154,0 | 54,7 |
| 2. Поступило за год, млн. руб. | 434,3 | 42,5 | 18,8 | 0,2 |
| 3. Выбыло за год, млн. руб. | 106,3 | 16,5 | 9,7 | 24,7 |
| 4. Наличие на конец года, млн. руб. | 1180,7 | 229,9 | 163,1 | 30,2 |
| 5. Износ на конец года, млн. руб. | 91,0 | 13,3 | 12,8 | |
| 6. Абсолютный прирост основных производственных фондов (+, -) за год, млн. руб. (стр. 4-стр. 1) | 328,1 | 26,0 | 9,1 | -24,5 |
| Коэффициент износа (амортизации) (стр. 5/стр. 4) | 0,08 | 0,06 | 0,08 | |
| Коэффициент выбытия (стр. 3/стр. 1) | 0,12 | 0,08 | 0,06 | 0,45 |
| Коэффициент обновления (стр. 2/стр. 4) | 0,37 | 0,18 | 0,12 | 0,007 |
| Коэффициент прироста (стр. 6/стр. 1) | 0,38 | 0,13 | 0,06 | -0,45 |

Более низкий коэффициент износа свидетельствует о лучшем физическом состоянии основных производственных фондов, в силу чего по данным табл. 2 можно сделать вывод, что это характерно, прежде всего, для ЗАО «Славянское», хотя уровень этого показателя не сильно отличается от других анализируемых субъектов молочного агробизнеса. Что касается обновления основных фондов, то конкурентное преимущество имеет ООО «Юпитер», которое в 2012 г. ввело в действие их на сумму 434,3 млн. руб., превышающую уровень по другим хозяйствам более чем в 10 раз. Коэффициент обновления составил 0,37, т.е. основные фонды обновились на 37% за год, что более чем в два раза превышает данные его основного конкурента ЗАО «Славянское». Оба этих хозяйства постепенно наращивают мощности по производству молока. Например, недавно, уже в 2013 г., в ЗАО «Славянское» приобретена в Дании очередная партия высокопродуктивного скота в количестве 132 нетелей черно-пестрой голштино-фризской породы, на что было затрачено 15 млн. руб. Наибольшее выбытие основных фондов, составившее 45%, произошло в 2012 году в СП «Комплекс по производству молока «Сабурово», в основном за счет продуктивного скота, что нельзя считать конкурентным преимуществом этого комплекса на сегодняшний день. Молочные комплексы осуществляют процесс производства с использованием не только высокотехнологичного молочного доильного и холодильного оборудования, техники, но и продуктивного скота, т.е. имеют дело с живыми организмами. Содержание его весьма отличается от содержания других основных средств. Животные могут быть подвергнуты достаточно резким и не всегда контролируемым со стороны персонала заболеваниям, их выздоровление зависит не только от воздействия человеческого фактора, но еще и от иммунитета, проблемы с которым периодически наблюдаются особенно у импортного скота, в результате чего может произойти быстрый многочисленный их падеж, что, к сожалению, периодически случается на животноводческих комплексах. И

восстановление поголовья продуктивного скота осуществляется не одномоментно, а постепенно. Но данный молочный комплекс за годы введения в эксплуатацию приобрел определенный опыт и неоспоримые конкурентные преимущества, поэтому восстановление поголовья на нем – дело времени.

В табл. 3 проанализируем эффективность использования ресурсного потенциала сельскохозяйственных организаций, производящих молоко на молочных комплексах.

Таблица 3

Эффективность использования ресурсного потенциала сельскохозяйственных организаций

| Показатели | ООО «Юпитер» | ЗАО «Славянское» | ООО «Маслово» | СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» |
|---|--------------|------------------|---------------|--|
| Производство на 100 га сельскохозяйственных угодий, тыс. руб.: | | | | |
| - товарной продукции | 3499,1 | 6030,9 | 1460,3 | 828,2 |
| - чистой прибыли (убытка) | 19,8 | 1945,9 | 305,0 | 31,5 |
| Произведено на 100 руб. стоимости основных производственных фондов, руб.: | | | | |
| - товарной продукции | 14,7 | 111,5 | 141,4 | 225,4 |
| - чистой прибыли (убытка) | 0,08 | 36,0 | 29,6 | 8,5 |
| Произведено на 1 среднегодового работника, тыс. руб.: | | | | |
| - товарной продукции | 826,4 | 1690,6 | 484,4 | 894,4 |
| - чистой прибыли (убытка) | 4,7 | 549,5 | 101,2 | 33,9 |
| Урожайность, ц/га: | | | | |
| - зерновых и зернобобовых | 28,7 | 55,3 | 19,2 | 40,6 |
| - кукурузы на силос и зеленый корм | 374 | 301,8 | 223,8 | 225,5 |
| Уровень рентабельности (убыточности), % | 46,4 | 39,6 | 30,9 | 4,5 |

Судя по данным табл. 3, наиболее эффективно используется ресурсный потенциал в ЗАО «Славянское» Верховского района Орловской области. Так, им было получено на 100 га сельскохозяйственных угодий больше выручки от реализации продукции в 1,7, 4,1, 7,3 и прибыли от реализации продукции в 98,3, 6,4 и 61,8 раз по сравнению с ООО «Юпитер», ООО «Маслово», СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» соответственно. Данным хозяйством в 2012 году было получено прибыли от реализации продукции в расчете на 1 среднегодового работника в 116,9, 5,4 и 16,2 раза больше, чем в этих же хозяйствах соответственно. Урожайность зерновых и зернобобовых превышает в 1,9, 2,9 и 1,4 раза соответственно, а кукурузы на зерно и зеленый корм – в 1,3 раза сложившуюся урожайность в ООО «Маслово» и СП «Комплекс по производству молока «Сабурово». Конкурентное преимущество по урожайности кукурузы на зерно и зеленый корм в 2012 г. имеет ООО «Юпитер» и превышает данный показатель в ЗАО «Славянское» на 23,9%. Кроме того, уровень рентабельности по хозяйству в целом в ООО «Юпитер» сложился на 6,8 и 15,5 процентных пунктов выше, чем в ЗАО «Славянское» и ООО «Маслово» соответственно, что также следует отнести к его конкурентному преимуществу.

Эффективность использования организациями-производителями молока производственных ресурсов, инноваций и модернизации в свою очередь характеризуется эффективностью их деятельности и отрасли молочного скотоводства, т.е. по сути, непосредственно молочных комплексов (табл. 4).

Таблица 4

Экономическая эффективность производства молока на комплексах Орловской области, 2012 г.

| Показатели | ООО «Юпитер» | ЗАО «Славянское» | ООО «Маслово»* | СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» |
|--|--------------|------------------|----------------|--|
| Среднегодовое поголовье коров, гол. | 1049 | 637 | 2900 | 602 |
| Объем производства молока, ц | 65297 | 52920 | 110066 | 41524 |
| Удой от одной коровы, кг | 6225 | 8308 | 3795 | 6898 |
| Производство молока на 1 чел.-час., ц | 1,1 | 0,9 | 0,7 | 0,7 |
| Трудоемкость производства 1 ц молока, чел.-час. | 0,9 | 1,1 | 1,5 | 1,4 |
| Производственная себестоимость 1 ц молока, руб. | 1559,3 | 773,2 | 743,1 | 1449,7 |
| Объем реализации молока, ц: | 63305 | 49436 | 93553* | 40050 |
| Уровень товарности молока, % | 96,9 | 93,4 | 84,5 | 96,5 |
| Полная себестоимость 1ц молока, руб. | 1558,5 | 773,3 | 994,6 | 1449,2 |
| Средняя цена реализации 1 ц молока, руб. | 1589,2 | 1513,1 | 1543,5 | 1576,8 |
| Выручка от реализации молока, тыс. руб.: | 100608 | 74800 | 144397 | 63150 |
| - на 100 га сельхозугодий, тыс. руб. | 2353,4 | 1865,3 | 940,3 | 546,5 |
| - на 100 руб. основных производственных фондов, руб. | 9,9 | 34,5 | 91,1 | 1,5 |
| - на 1 голову | 95,9 | 117,4 | 49,8 | 104,9 |
| Прибыль от реализации молока, тыс. руб.: | 1947 | 36571 | 51345 | 5111 |
| - на 100 га сельскохозяйственных угодий | 45,5 | 912,0 | 334,3 | 44,2 |
| - на 1 голову | 1,9 | 57,4 | 17,7 | 8,5 |
| - на 1 ц, руб. | 30,8 | 739,8 | 548,8 | 127,6 |
| Уровень рентабельности реализации молока, % | 2,0 | 95,7 | 55,2 | 8,8 |

Примечание: * Данные по молоку и молочным продуктам в пересчете на молоко.

Данные табл. 4 подтверждают, что более эффективным является производство молока на комплексах ЗАО «Славянское», которым сформировано в этом процессе больше конкурентных преимуществ, что повышает его конкурентоспособность как производителя молока. Данная организация достигла среднего удоя на одну корову в 2012 г. – 8308 кг. При этом самой высокой в регионе продуктивность коров достигнута этим хозяйством в 2011 г. – 8450 кг. Следует отметить, что до сих пор только двум производителям сырого молока в Орловской области удалось перешагнуть 8-тысячный рубеж по средней продуктивности молочного стада. Первым было СП «Комплекс по производству молока «Сабурово» в 2010 г., надовившее от каждой из 892 коров (наибольшее поголовье для данного комплекса, которое было достигнуто с момента введения его в действие) по 8130 кг высококачественного молока.

Структурное подразделение и в 2012 г. по уровню продуктивности коров занимает вторую конкурентную позицию, а по их поголовью – последнюю из анализируемых субъектов молочного агробизнеса, объяснение чему приведено выше. Прибыль в расчете на 1 корову, 1 ц молока и 100 га сельскохозяйственных угодий в ЗАО «Славянское» достигнута на максимальном уровне в сравнении с анализируемыми хозяйствами, на что повлиял минимальный уровень полной себестоимости 1 ц молока (773,3 руб.). При этом вторую конкурентную позицию занимает ООО «Маслово» в основном за счет собственной переработки большей части сырого молока и реализации молочной продукции через развитую торговую сеть. Наименьший уровень цены реализации 1 ц молока сложился в ЗАО «Славянское», но это не говорит об отсутствии конкурентного преимущества по данному показателю, т.к. диапазон ее вариации в анализируемых организациях относительно невелик и находится в пределах 1513,1-1589,2 руб. Самый высокий ее уровень достигнут ООО «Юпитер», который имеет и наивысший уровень товарности, т.е. на производственные нужды (выпойку телятам) используется минимальный объем молока – 3,1%.

Наиболее важное преимущество животноводческих комплексов, как показывает опыт их эксплуатации, заключается в достижении более высокого уровня производительности труда [13, с. 41]. Внедрение высокопроизводительного оборудования, позволяющего значительно увеличить производительность труда, улучшить качество продукции, а также достичь энергосбережения на всех стадиях технологии производства, обладает внушительным потенциалом снижения потребления ресурсов. Так, компьютеризация молочного скотоводства привела к резкому повышению производительности труда, которое также сказалось на значительном снижении затрат на получение центнера молока [8]. Самый высокий уровень производительности труда в отрасли молочного скотоводства в 2012 г. наблюдался в ООО «Юпитер», а затем в ЗАО «Славянское». Трудоемкость производства 1 ц молока в этих хозяйствах составила 0,9 и 1,1 чел.-ч. соответственно, что не превышает уровень эффективных зарубежных ферм.

Конкурентное преимущество по такому показателю как рентабельность реализации молока имеет ЗАО «Славянское», уровень которой – 95,7% в 2012 г. Следует отметить, что такой уровень рентабельности хозяйство поддерживает длительное время, в частности за последние 6 лет с 2007-2012 гг. в среднем он составлял 98,5%, самый высокий уровень в 2010 г. – 124,4%. Таким образом, данное хозяйство при производстве молока сформировало основополагающие конкурентные преимущества и занимает ведущие позиции лидера-конкурента.

Этому способствовало и то, что наряду с другими ключевым фактором повышения конкурентоспособности организаций, в том числе производящих молоко на молочных комплексах, важнейшим условием прибыльной их работы в современных условиях является эффективный кадровый менеджмент [10]. Конкурентоспособные кадры способны оказать позитивное влияние на эффективное функционирование объекта управления, развивать и укреплять его конкурентное положение [8]. Обеспеченность организаций кадрами, эффективность их использования влияют на объем, своевременность, качество выполнения всех видов технологических операций и работ, степень использования техники, машин, оборудования, а в результате – на объем производства и реализации, себестоимость продукции, ее прибыль, другие экономические показатели и в целом на конкурентоспособность товаропроизводителя [10].

Одним из конкурентных преимуществ производства субъектов агробизнеса в молочном скотоводстве, объективных условий модернизации, факторов инновационного развития и повышения их конкурентоспособности становится эффективное использование информационных технологий и собственно информатизация молочного стада [4].

Проанализируем отдельные аспекты модернизации и реконструкции производства наиболее конкурентоспособного хозяйства ЗАО «Славянское», в том числе обеспеченность оборудованием, отдельными видами техники, машин, которые, так или иначе, сказываются на эффективности его деятельности, формировании конкурентных преимуществ и в конечном счете непосредственно на конкурентоспособности. Повышению конкурентоспособности ЗАО «Славянское», кроме эффективного кадрового менеджмента, способствовала модернизация всех отраслей, в том числе и отрасли молочного скотоводства.

В ЗАО «Славянское» сложился инновационный тип воспроизводства, особенно в животноводстве, причем, наблюдается достаточно высокая инвестиционная активность. Его опыт показывает, что с целью решения стратегических задач по расширению и повышению эффективности производства чистая прибыль используется как источник финансирования инвестиций. Например, в строительство и оснащение оборудо-

ванием новой молочно-товарной фермы на 320 голов вложено более 18 млн. руб., которая была введена в действие в ноябре 2003 г. [8]. Хозяйство за счет собственного источника финансирования инвестировало около 8 млн. руб. в строительство новой молочно-товарной фермы проектной мощностью 320 коров и ее оснащение современным импортным молочным оборудованием, доильной установкой с компьютерным обеспечением, создание соответствующей кормовой базы [11]. Ферма была оснащена новейшим молочным оборудованием фирмы «Де Лаваль», доильной системой «Европараллель» с автоматизированной промывкой на 20 станков с одновременным выпуском коров после доения [6]. Приобретено около 60 голов черно-пестрого скота из Германии, а также скот закупали в Орловской и Московской областях [18]. В 2006 г. ЗАО «Славянское» закончило строительство еще одного коровника на 140 голов и приобрело «Евро-Параллель» с улучшенной системой обработки вымени и более совершенной компьютерной программой. В 2006 г. введен в действие еще один молочный комплекс, имеющий два коровника на 160 голов каждый, объединенных доильным залом. Приобретен холодильник новейшего поколения с моментальным охлаждением молока емкостью 8 т. Завезли 130 высокоудойных немецких черно-пестрых коров из Германии [18]. В результате производство молока полностью переведено на энергосберегающие технологии, основывающиеся на беспривязно-боксовом содержании коров на щелевых полах. Все работы полностью механизированы [7].

ЗАО «Славянское» ежегодно по мере необходимости улучшает машинно-тракторный парк, приобретая современную технику, в т.ч. импортную, на что затрачиваются с целью решения данной проблемы немалые средства, причем в большей степени за счет чистой прибыли, остающейся в распоряжении хозяйства. Так, в 2002 г. были куплены два навесных разбрасывателя минеральных удобрений «Амазоне», в 2004 г. – культиватор АПМ-6,8, импортный кормоуборочный комбайн «Кейс» [5]. Купили и кормоуборочный комбайн «ДОН-680». Также был приобретен шведский кормораздатчик «Отимикс» фирмы «Де Лаваль», который функционирует и как смеситель всех компонентов корма, улучшает поедаемость и экономит их расход. Отмечалось, что хозяйство ежегодно вносит удобрений на сумму 1,5 млн.руб. (в расчете на 1 га с учетом данных почвенного анализа – 260-270 кг действующего вещества), на такую же сумму – и ядохимикатов. В результате общество получает на протяжении ряда лет урожайность зерновых свыше 50 ц/га (в 2004 г. – 52 ц/га, самая же высокая урожайность достигнута в 2003 г. – 62 ц/га), кукурузы – 450 ц/га, сахарной свеклы – более 500 ц/га, гороха – свыше 30 ц/га [5]. В 2012 г. удобрений вносится уже на сумму 12,9 млн.руб., а химических средств защиты растений – на сумму 4,9 млн.руб.

В 2007 г. была куплена новая сенокосилка и 2 новых трактора. В 2008 г. ЗАО «Славянское» были приобретены новые один раздатчик-смеситель кормов для КРС и одна сенокосилка взамен выбывших в этом же году в таком же количестве, а также 3 новых трактора взамен 6 выбывших, одна новая жатка и 3 новых автомобиля взамен 4 выбывших. В 2009 г. были приобретены новые один раздатчик-смеситель кормов для КРС, одни грабли тракторные и 2 трактора, а также один подержанный зерноуборочный комбайн РСМ 10Б «ДОН» 1500Б. В 2010 г. было приобретено 2 новых смесителя-раздатчика кормов для КРС, известных под торговой маркой ИСРК «Хозяин», и столько же выбыло, а также 2 новых трактора взамен 8 выбывших, 2 новые сеялки и посевных комплекса взамен 6 выбывших и один новый автомобиль ГАЗель-32213-пассажирская взамен 2 выбывших. В 2011 г. также приобреталась новая техника, был куплен еще один самоходный кормоуборочный комбайн John Deere, один смеситель-раздатчик кормов для КРС торговой марки ИСРК «Хозяин», один пресс-подборщик, 3 жатки, 2 новых прицепа тракторных 2ПТС-5, а также 3 новые сеялки и посевных комплекса взамен 3 выбывших, в т.ч. сеялка свекольная СТП «РИТМ-24», сеялка пропашная MaterMass MS8100 (для высева кукурузы, подсолнечника, сои, рапса, свеклы и других пропашных культур), и автобус ПА3-320412-03 [17]. В 2012 году еще купили новый трактор взамен двух выбывших, 3 новых жатки вместо одной выбывшей.

В ЗАО «Славянское» всего поступило, в т.ч. приобретено, основных средств в 2011 г. на сумму 47662 тыс. руб. (в 2010 г. – 35992 тыс. руб.), зданий, сооружений и передаточных устройств на сумму 3027 тыс. руб. (в 2010 г. – 7559 тыс. руб.), машин и оборудования на сумму 24838 тыс. руб. (в 2010 г. – 10476 тыс. руб.), транспортных средств на сумму 2171 тыс. руб. (в 2010 г. – 2792 тыс. руб.). При этом на эти цели было использовано собственных средств, в частности прибыли, остающейся в распоряжении хозяйства, 47243 тыс. руб. (в 2010 г. – 36394 тыс. руб., из них 35995 тыс. руб. на приобретение основных средств и 399 тыс.руб. – на строительство и реконструкцию объектов, в 2009 г. – 29090 тыс. руб., из них 20969 тыс. руб. – на приобретение основных средств и 5121 тыс. руб. – на строительство и реконструкцию объектов). Также было приобретено семя племенных быков в 2011 г. в количестве 1800 доз [17]. Основные средства в 2012 г. поступили, в т.ч. были приобретены, на сумму 42,5 млн.руб., из них зданий, сооружений и передаточных устройств – на сумму 11,1 млн.руб., машин и оборудования – на сумму 8,7 млн.руб., транспортных средств – на сумму 2,9 млн.руб.

Следует отметить, что непосредственно на зарубежных фермах в качестве устройств для приготовления полнорационных кормовых смесей используются мобильные раздатчики-миксеры, которые позволяют приготавливать корма в соответствии с зоотехническими требованиями с последующей их раздачей животным [2]. На всех анализируемых молочных фермах и комплексах также используются раздатчики-смесители кормов для КРС. Так, ЗАО «Славянское» был приобретен первый шведский кормораздатчик

«Оптимикс» фирмы «Де Лаваль», в котором все компоненты смешиваются для получения животными полноценного, сбалансированного питания [8, 14]. Кроме того, приобретаются в необходимых количествах белково-минерально-витаминные добавки с целью сбалансирования рационов по всем питательным элементам [8]. Все это подтверждает тезис о том, что «рост эффективности производства на основе совершенствования кормовой базы, решения проблем воспроизводства стада и улучшения племенного дела, совершенствования системы и способов содержания животных, рационального использования трудовых ресурсов является предпосылкой для обеспечения конкурентоспособности молочных комплексов» [12].

Непосредственно на зарубежных фермах лабораторий по определению качества молока, как правило, нет из-за отсутствия необходимости. Определение качественных параметров молока осуществляется на предприятиях, куда продукция реализуется [2, 14]. Тогда как отечественные молочные фермы и комплексы, в т.ч. Орловской области, нуждаются как в самих лабораториях, так и в их модернизации. С целью улучшения контроля качества продукции при ее производстве и поставке на молкомбинат хозяйством был приобретен за 31 тыс. руб. прибор для своей лаборатории милкосканер «Анализатор качества молока АКМ-98», причем, данный прибор откалиброван [5].

Чем крупнее и энергонасыщеннее производство, тем большая роль отводится внешним факторам, поскольку за счет внутренних ресурсов трудно поддерживать в состоянии высокой эффективности и конкурентоспособности предприятия индустриального типа, к которым по классификации относятся и молочные комплексы [13, 12]. В научных исследованиях середины 90-х годов XX века отмечалось, что «многие комплексы, построенные 15-20 лет назад, работают на старом изношенном оборудовании. Их реконструкция и модернизация требует крупных капитальных вложений, которые без государственной поддержки осуществить практически невозможно» [12]. Следует отметить, что данные тезисы были и продолжают оставаться до сих пор актуальными.

Опыт стран с развитым и эффективным сельским хозяйством показывает, что модернизация молочного скотоводства невозможна без государственной поддержки, основанной на системном и долгосрочном подходе. Фактически, во многих странах мира именно финансовая поддержка со стороны государства гарантирует необходимый уровень доходности и конкурентоспособности сельскохозяйственному производителю молока [16]. Одним из направлений, без которых нельзя сохранить темпы модернизации, обеспечить выполнение задач, поставленных в Доктрине продовольственной безопасности страны, является совершенствование государственной поддержки и увеличение финансовых источников модернизации [1]. Модернизацию сельскохозяйственных организаций в молочном скотоводстве на сегодняшний день практически невозможно осуществлять за редким исключением без субсидий в рамках государственной поддержки программ и мероприятий по развитию животноводства, что и проанализируем на примере ЗАО «Славянское» по данным табл. 5.

Таблица 5

Государственная поддержка программ и мероприятий по развитию молочного скотоводства в ЗАО «Славянское» Орловской области, тыс. руб.*

| Виды государственной поддержки | 2007г. | 2008г. | 2009г. | 2010г. | 2011г. | 2012г. |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Государственная поддержка программ и мероприятий по развитию животноводства | 5787 | 4704 | 4159 | 3053 | 4819 | 7490 |
| в т.ч. из федерального бюджета | 1260 | 1988 | 2965 | 2390 | 2319 | 3925 |
| в т.ч.: субсидии бюджетам субъектов Российской Федерации на поддержку племенного животноводства | 5084 | 3023 | 3109 | 2515 | 4659 | 6595 |
| в т.ч. из федерального бюджета | 1260 | 1988 | 2488 | 2390 | 2319 | 3925 |
| из них на содержание племенного маточного поголовья сельскохозяйственных животных (молочного направления) | 1560 | 2705 | 2668 | 2515 | 2440 | 2547 |
| в т.ч. из федерального бюджета | 1260 | 1700 | 2223 | 2390 | 2319 | 2420 |
| - на приобретение семени племенных быков-производителей, которые улучшают качество потомства | - | 82 | 84 | - | - | 60 |
| - на приобретение племенных животных | 3524 | 236 | 357 | - | 2218 | 3988 |
| - в т.ч. по импорту | 3524 | - | - | - | 2218 | 2218 |
| - в т.ч. из федерального бюджета | - | 236 | 212 | - | - | 1505 |
| Субсидии на продукцию животноводства (молоко) | 703 | 1190 | 1050 | 538 | - | - |
| Субсидии из федерального бюджета бюджетам субъектов РФ на поддержку экономически значимых региональных программ развития сельского хозяйства субъектов РФ на развитие молочного скотоводства | - | - | - | - | 161 | 895 |
| Получено всего государственной поддержки: | 7742 | 8052 | 6389 | 5719 | 8534 | 9116 |
| в т.ч. на 1 га сельскохозяйственных угодий | 2,1 | 2,0 | 1,6 | 1,4 | 2,1 | 2,3 |
| на 100 руб. выручки от реализации продукции | 6,4 | 5,5 | 3,9 | 3,0 | 3,6 | 3,8 |

Как свидетельствуют данные табл. 5, ЗАО «Славянское» за последние шесть лет с 2007 по 2012 гг. получило на развитие сельскохозяйственных отраслей всего государственной поддержки в среднем за год в размере 7592 тыс. руб., причем из них 65,9%, а именно 5002 тыс. руб., было направлено на развитие живот-

новодства, причем в полном объеме – молочного скотоводства. Наибольший размер государственной поддержки развития этой отрасли в сумме 7,5 млн.руб. получен в 2012 г., из них 53,2% направлено на приобретение племенных негелей, причем больше половины из них (55,6%) по импорту, 34 % – на содержание племенного молочного стада. Субсидии на приобретение семени племенных быков-производителей, которые улучшают качество потомства, поступили только в 2008 г. и 2009 г. в размере 82 и 84 тыс. руб. За анализируемые годы были выплачены хозяйству субсидии из регионального бюджета на комбикорма в размере 491 тыс. руб. в 2008 г., и в 2011 г. – субсидии из федерального бюджета бюджетам субъектов РФ на поддержку экономически значимых региональных программ развития сельского хозяйства субъектов РФ, в частности, на развитие молочного скотоводства, в размере 161 тыс. руб. и в рамках реализации отраслевых программ: «Развитие молочного скотоводства и увеличение производства молока в РФ на 2009-2012 гг.» – в размере 159 тыс. руб. [17], а в 2012 г. – 895 тыс. руб. В среднем за год за анализируемый период в ЗАО «Славянское» господдержка составила в расчете на 1 га сельскохозяйственных угодий – 1920 руб., причем наибольший размер в 2012 г. в размере 2273 руб., что в пересчете на евро составляет чуть больше 50, а в предыдущие годы – и того меньше. Тогда как наименьший уровень субсидий в расчете на 1 га составляет в Португалии 194 евро, а наибольший – в Нидерландах – 458 евро. В связи с чем отечественные сельскохозяйственные организации нуждаются в большем объеме государственной поддержки, с этой целью им целесообразно более активно участвовать в реализации федеральных и региональных государственных программ развития сельского хозяйства, в т.ч. молочного скотоводства, в частности, Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы, в частности, подпрограммы «Развитие подотрасли животноводства, переработки и реализации продукции животноводства», а также долгосрочной целевой программы «Развитие молочного скотоводства и увеличение производства молока в Орловской области на 2012-2016 годы», за счет чего появятся дополнительные возможности для внедрения инноваций и модернизации производства.

В заключение сделаем вывод о том, что модернизация производства молока на молочных комплексах посредством внедрения современных инновационных и ресурсосберегающих технологий, приобретения новых более совершенных и высокотехнологичных тракторов, комбайнов, кормоуборочных комплексов, кормораздатчиков-смесителей, сельскохозяйственных машин, оборудования, племенных животных, удобрений, средств защиты растений и др. за счет собственных средств и государственной поддержки, в т.ч. за счет участия в реализации федеральных и региональных государственных программ, способствует росту урожайности сельскохозяйственных культур, в т.ч. кормовых, продуктивности животных, производительности труда, снижению себестоимости, увеличению прибыльности, повышению эффективности использования производственных ресурсов, производства молока и конкурентоспособности сельскохозяйственных организаций как его производителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белкина Е.Н. Сущность и содержание модернизации аграрной сферы / Е.Н. Белкина // Международный технико-экономический журнал. 2012. № 5. С. 14-20.
2. Грудкина Т.И. Гарантии качества при производстве молока в Германии / Т.И. Грудкина // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. 2009. Т. 6. № 4. С. 44-46.
3. Грудкина Т.И. Государственная поддержка сельхозтоваропроизводителей в контексте повышения их конкурентоспособности / Т.И. Грудкина // Никоновские чтения. 2005. № 10. С. 66-69.
4. Грудкина Т.И. Информатизация молочного стада как фактор инновационного развития и конкурентоспособности производителей молока: региональный опыт / Т.И. Грудкина // Никоновские чтения. 2012. № 17. С. 15-17.
5. Грудкина Т.И. Конкурентоспособность аграрной корпоративной структуры и социальная защищенность ее персонала / Т.И. Грудкина // Достижения науки и техники в АПК. 2005. №4. С. 2-5.
6. Грудкина Т.И. Конкурентоспособность коммерческих организаций в сфере агробизнеса (на примере ЗАО «Славянское» Орловской области) / Т.И. Грудкина // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2006. № 3. С. 27-30.
7. Грудкина Т.И. Менеджмент качества продукции в молочном скотоводстве как фактор ее конкурентоспособности / Т.И. Грудкина // Проблемы теории и практики управления развитием социально-экономических систем: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. Ч. I. Сб. науч. тр. / под ред. доцента Т.К. Абдуллаевой. Махачкала: ГОУ ВПО «ДГТУ», 2008. С. 141-145.
8. Грудкина Т.И. Повышение конкурентоспособности организаций в сфере агробизнеса: теория и практика // Вестник ОрелГАУ. Орел. 2006. № 2-3 (2-3). С. 97-104.
9. Грудкина Т.И. Реализации принципов НАССП в контексте повышения конкурентоспособности производителей молока / Т.И. Грудкина // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. 2007. Т. 13. № 1. С. 79-82.

10. Грудкина Т.И. Роль эффективного кадрового менеджмента в повышении конкурентоспособности молочных комплексов: теория, практика, сравнительный анализ / Т.И. Грудкина, Л.С. Печникова // Современные научные исследования. Вып. 1. Концепт. 2013. ART 53472. URL: <http://e-koncept.ru/article/845/> Гос. рег. Эл № ФС 77- 49965.

11. Грудкина Т.И. Социальная защищенность работников в корпоративных структурах АПК / Т.И. Грудкина // Рынок аграрного труда: трансформация занятости, оплата, производительность: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 16-18 марта 2005 г. М.: ГНУ ВНИЭТУСХ, 2005, С. 353-360.

12. Грудкина Т.И. Факторы конкурентоспособности молочных комплексов (вопросы методики и практики): автореф. дис. ... канд. экон. наук / Т.И. Грудкина. Всерос. науч.-исслед. ин-т экономики, труда и управления в сельском хозяйстве. М., 1997. 22 с.

13. Грудкина Т.И. Факторы конкурентоспособности молочных комплексов (вопросы методики и практики): дис. ... канд. экон. наук / Т.И. Грудкина. М., 1997. 170 с.

14. Грудкина Т.И. Формирование механизмов гарантий качества молока как основы повышения конкурентоспособности его производителей: опыт Германии и Орловской области / Т.И. Грудкина // Предпринимательство как стратегический ресурс и внутренний источник инновационного развития национальной экономики. Междунар. науч.-практ. конф. Орел, 23 декабря 2009 г.: материалы и доклады: в 2 ч. Ч. I / под общ. ред. Н.И. Лыгиной. Орел: Изд-во ОрелГИЭТ, 2009. С. 154-166.

15. Грудкина Т.И. Формирование новых механизмов гарантий качества продукции молочного скотоводства в Орловской области / Т.И. Грудкина // Инновационные процессы в АПК: сб. статей II Междунар. науч.-практ. конф. преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов, посв. 50-летию образования РУДН / под ред. В.Г. Плющикова. М.: РУДН, 2010. С. 453-456.

16. Модернизация аграрной экономики: проблемы и инструменты реализации: коллективная монография / под общей ред. к.э.н., доцента Белкиной Е.Н. и к.э.н. Айдиновой А.Т. Ставрополь: ООО «Изд.-инф. центр «Фабула», 2012. 416 с.

17. Стратегическое управление конкурентоспособностью аграрного сектора экономики региона: монография / Т.И. Грудкина и [др.]; под общей ред. Грудкиной Т.И. и Третьяковой Л.А. Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2012. 396 с.

18. Экономическая эффективность аграрного предпринимательства: коллективная монография / под общей ред. к.э.н., доцента Белкиной Е.Н. и к.э.н. Айдиновой А.Т. Ставрополь: ООО «Изд.-инф. центр «Фабула», 2011. 392 с.

Грудкина Татьяна Ивановна –
кандидат экономических наук, доцент кафедры
«Организация предпринимательской деятельности
и менеджмента в АПК» Орловского
государственного аграрного университета

Tatiana I. Grudkina –
Ph. D., Associate Professor
Department of Organization of Business
and Management in Agriculture
Orel State Agrarian University

Статья поступила в редакцию 15.03.13, принята к опубликованию 10.04.13

УДК 330.117

Ю.В. Евсеева

ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТРАНСНАЦИОНАЛЬНОЙ КОРПОРАЦИИ

В настоящее время изучению транснациональных корпораций уделено большое внимание. Но, тем не менее, единого понятия ТНК пока нет. Рассмотрены различные подходы к определению транснациональной корпорации. Определено понятие ТНК.

Мировая экономика, транснациональные корпорации, трансграничные операции, инвестиции, национальная экономика

Yu.V. Evseeva

APPROACHES TO DEFINING THE TRANSNATIONAL CORPORATION

Currently studying transnational corporations is the subject of most interest. Nevertheless, there is no uniform understanding of the concept of the transnational cor-

poration. The article discusses various approaches to the definition of the transnational corporation. The concept of the transnational corporation has been defined

World economy, transnational corporations, cross-border operations, investments, national economy

Одной из наиболее значимых тенденций развития мировой экономики в современном мире является нарастание процессов интеграции, углубления взаимодействия воспроизводственных структур разных стран на различных уровнях и в различных формах, чему особенно активно способствует деятельность транснациональных корпораций.

Изучению деятельности транснациональных корпораций уделено значительное внимание со стороны отечественных и зарубежных ученых. Подходы к изучению различных аспектов деятельности ТНК сформировались в 60-х гг. XX в., авторы этих подходов пытались объяснить сущность транснациональной корпорации, особенности их развития и влияние на международные экономические отношения и национальную экономику в целом.

Но все же в силу сложности и многогранности рассматриваемого явления единого понятия транснациональной корпорации до сих пор не сформировано. Корпорации называют многонациональными, транснациональными, планетарными, глобальными, мировыми, межнациональными, супернациональными, наднациональными, интернациональными, международными и др. Такое многообразие терминологии отчасти объясняется тем, что при анализе деятельности корпораций для их характеристики используются различные критерии как количественного, так и качественного порядка. Кроме того, западные ученые, стремясь подчеркнуть тот или иной аспект деятельности корпораций, используют определение, которое концентрирует внимание на выбранном аспекте анализа. Однако практически во всех определениях транснациональные корпорации рассматриваются как корпорации, осуществляющие деятельность международного характера и, следовательно, являющиеся субъектами международных экономических отношений.

В отечественной и зарубежной экономической литературе существуют различные подходы к определению транснациональной корпорации.

Зарубежные исследователи при определении сущности транснациональной корпорации повышенное внимание уделяют их монополистической природе. Например, Ч.П. Киндлебергер непосредственно связывает теорию роста фирмы с теорией монополии и приходит к выводу о необходимости выхода деятельности корпорации за рамки национальных границ, поскольку фирма должна постоянно расти за счет усиления своих монополистических преимуществ [1].

Исследователь Дж. Гэлбрейт связывает необходимость трансграничных операций ТНК технологическими причинами и отмечает, что из-за повышенной сложности современной продукции по сравнению с традиционной ее производство, сбыт и обслуживание требуют создания за рубежом соответствующих сетей производственных, сбытовых и других функциональных филиалов. Решение данной задачи по силам лишь транснациональным корпорациям [2].

Дж. Даннинг представляет ТНК как предприятие, осуществляющее прямые зарубежные инвестиции и владеющее или контролирующее механизмы получения сверхприбыли более чем в одной стране [3].

Существуют и другие подходы, учитывающие количество стран, в которых корпорации образуют свои филиалы, величину оборота филиалов в общем объеме продаж корпорации в целом, национальную принадлежность капитала и т.д. Например, по мнению американского экономиста Дж. Макдональда, если 20% капитала корпорации инвестированы в заграничные предприятия, то она может считаться не международной, а транснациональной, поскольку при достижении именно этого уровня происходит критический поворот в управлении от национальной к глобальной ориентации [4].

Ряд ученых-экономистов учитывает общую сумму прямых трансграничных инвестиций по отношению к активам корпорации в целом, количество работающих в зарубежных филиалах, склонность высших управляющих к национализму или глобализму, характер собственности и контроля над филиалами и т.д. К примеру, американский экономист Г. Перлмуттер считает, что решающим фактором, определяющим принадлежность корпорации к категории ТНК, является уровень глобального топ-менеджмента, т. е. способность мыслить и руководить компанией в глобальном масштабе, что определяет соответствующий стиль и методы управления [5].

Существуют и другие точки зрения. По определению Р. Вернона, «институт такой сложности и разносторонности, как многонациональная корпорация, не может быть охарактеризован как имеющий четкие, ясно очерченные намерения. Подобное предприятие представляет коалицию интересов,

члены которой сотрудничают в ряде случаев в достижении общих целей, а в других конфликтуют по поводу различных приоритетов» [6]. При таком подходе невозможно выделить категорию ТНК как таковую и определить, принадлежит ли данная рассматриваемая корпорация к ТНК.

Р. Робинсон относит к ТНК корпорацию, в которой зарубежное предпринимательство, как с точки зрения организационной структуры, так и осуществляемых операций, становится равнозначным деятельности материнской корпорации в стране ее происхождения [7]. В этом случае руководство корпорации стремится распределить ресурсы корпорации без учета национальных границ, с тем, чтобы только обеспечить достижение намеченных целей корпорации. Однако принятие решений осуществляется в интересах одной страны, поскольку управление головной корпорацией и владение активами продолжают оставаться национальными. Следует отметить, что последнее обстоятельство имеет большое значение, поскольку источником многочисленных острых конфликтов ТНК с принимающими странами являются действия филиалов (получающих распоряжения от материнской компании), когда они противоречат национальным интересам принимающей страны.

В большинстве публикаций советских и российских исследователей при определении понятия транснациональной корпорации за основной признак принимается осуществление ими трансграничных экономических операций.

Советский экономист А.Ю. Юданов под транснациональной корпорацией понимает фирму, имеющую зарубежные подразделения, причем все элементы международного комплекса ТНК рассматриваются как составные части единого механизма, функционирующего в глобальном масштабе в рамках единой стратегии. Целью формирования ТНК является достижение повышенной устойчивости корпорации в целом к кризисным явлениям в мировой и национальной экономиках [8].

И.В. Зубарев, И.К. Ключников определяют транснациональные корпорации как корпорации, осуществляющие деятельность глобального характера и оказывающие позитивное влияние на международные экономические отношения, активизирующие процессы транснационализации и интеграции экономик отдельных стран. ТНК действуют на основе диверсификации деятельности и расширения сферы деятельности в мировой экономике (по сравнению с национальной) [9].

Российский ученый Э.А. Грязнов определяет ТНК как «фирмы, владеющие или контролируемые производственные активы в двух и более странах» [10].

В.Д. Щетинин особое внимание уделяет системе принятия внутрифирменных решений, которая позволяет успешно осуществлять согласованные действия в различных подразделениях ТНК, работать в соответствии с выработанной единой стратегией, эффективно распределяя между филиалами ресурсы, технологии, ответственность. Согласно Щетинину, «ТНК – это крупные фирмы, построенные на таких финансово-экономических связях между входящими в их состав в различных странах предприятиями, при которых обеспечивается контроль головной компании над всеми сторонами деятельности предприятий ТНК в целях обеспечения наибольшей прибыли» [11].

Из вышеприведенных определений ТНК видно, что каждое из них имеет как различные, так и схожие критерии. В связи с этим единой точки зрения пока не сформировано, и исследователи продолжают предлагать новые формулировки.

Таким образом, основываясь на приведенных выше подходах, в нашем исследовании предложена следующая формулировка понятия транснациональной корпорации. Транснациональные корпорации – это международные фирмы, которые осуществляют деятельность не только в своей стране, но и имеют зарубежные филиалы в нескольких странах и управляют этими филиалами на основе единого механизма принятия решений для достижения конечного результата – получения прибыли и максимизации рынка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щетинин В.Д. Международные экономические отношения: курс лекций / В.Д. Щетинин. М.: Научная книга, 1996. С. 77-78.
2. Гэлбрейт Дж. Экономические теории и цели общества / Дж. Гэлбрейт. М.: Прогресс, 1979. С. 285.
3. Dunning J.H. Economic Analysis and the Multinational Enterprise / J.H. Dunning. London: Allen and Unwin, 1974. P. 13.
4. McDonald J.C., Parker H. Creating a Strategy for International Growth / J.C. McDonald, H. Parker // International enterprise. N.Y., 1962. P. 17-19.
5. Perlmutter H.V. The Tortuous Evolution of the Multinational Corporation / H.V. Perlmutter // Columbia Journal of World Business. Jan. 1969. P. 17-19.
6. Vernon R. Economic Sovereignty in Bay / R. Vernon. Foreign Affairs. Oct. 1968. P. 114.

7. Robinson R.D. International Management / R.D. Robinson. N. Y., 1966. P. 153-154
8. Юданов А.Ю. Секреты финансовой устойчивости международных монополий / А.Ю. Юданов. М.: Финансы и статистика, 1991. С. 7-8.
9. Зубарев И.В. Механизм экономического роста транснациональных корпораций / И.В. Зубарев, И.К. Ключников. М.: Высш. шк., 1990. С. 15.
10. Грязнов Э.А. ТНК в России. Позиции крупнейших в мире транснациональных корпораций в российской экономике / Э.А. Грязнов. М.: Инограф, 2000. 168 с.
11. Щетинин В.Д. Опыт транснациональных корпораций на пути к мировому рынку / В.Д. Щетинин. М.: МГИМО, 1988. С. 28.

Евсеева Юлия Владимировна –
аспирант кафедры
«Общая экономическая теория» Саратовского
социально-экономического института
Российского экономического университета
имени Г.В. Плеханова

Yuliya V. Evseeva –
Postgraduate
Department of General Economic Theory,
Saratov Social and Economic Institute,
Part of the Russian University of Economics

Статья поступила в редакцию 18.02.13. принята к опубликованию 10.04.13

УДК 338.439.62

И.В. Злобина, В.П. Ангелюк

АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МУКИ НУТА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБЩЕСТВЕННОГО ПИТАНИЯ

Определена экономическая эффективность от внедрения нового продукта питания – мясных рубленых биточков с нутовой мукой, изготовленных в соответствии с предложенной технологией и рецептурой – на производстве предприятия общественного питания. Актуальность данного исследования обусловлена низкой степенью внедрения подобных разработок в сферу общественного питания.

Нутовая мука, экономическая эффективность, внедрение разработок

I.V. Zlobina, V.P. Angelyuk

ASSESSMENT OF ECONOMIC EFFICIENCY FOR UTILISATION OF CHICK PEA FLOUR AT PUBLIC FOOD SERVICE ESTABLISHMENTS

The article considers economic efficiency of a new food product at public food service establishments. The new product is chopped meatballs with the chick-pea flour, made according to the offered technology and formula. The relevance of the given research is connected with low extent of introducing similar developments into food service industry.

Chick pea flour, economic efficiency, introduction of the development

Постоянно проявляющаяся нестабильность экономической ситуации не только в России, но и в мире диктует условия экономии существующих и поиска новых ресурсов в различных сферах реального сектора [1]. Одной из определяющих среди них по праву считается пищевая отрасль, формирующая структуру питания населения и являющаяся своего рода индикатором благосостояния жителей государства [2].

В этой связи особое значение приобретает поиск дополнительных источников питания, позволяющих снизить стоимость готовых изделий, но при этом сохранить привычные органолептические характеристики и свойства при внесении изменений в рецептуры традиционных продуктов питания, а также получить возможность варьирования пищевой ценности в зависимости от того, для какой из категорий населения с учетом уровня дохода, особенностей организма и состояния здоровья относится тот или иной потребитель [3, 4].

С учетом особенностей выращивания культур, их требовательности к климатическим условиям, питательности почв, а также физико-химических свойств, рассматриваемых в качестве добавок к

традиционным продуктам, значение приобретают культуры регионального распространения [5 - 8]. В Саратовской области к таковым относятся нут [9, 10].

В связи с этим интерес представляют вопросы экономической целесообразности введения добавки в заменяемый ею компонент. Особенно интересны такие исследования при варьировании рецептур мясных кулинарных изделий, имеющих широкое распространение в качестве продукции различных типов предприятий общественного питания и полуфабрикатов, реализуемых в замороженном виде как крупными, сетевыми, так и мелкими предприятиями оптовой и розничной торговли [11].

Показатели экономической эффективности были изучены на базе кулинарии «Жульен» («Дом кулинарии «Жульен» имеет в своем составе несколько аналогичных предприятий, в которых производятся операции дготовки и реализация продукции, использовались сведения одного из таких предприятий по выработке одного наименования мясных рубленых полуфабрикатов «Биточки из говядины»). Реализация данной группы изделий составляет 10 кг/дн.).

В ходе проведения оценки экономической эффективности производства разработанного продукта [4] были учтены следующие параметры: стоимость сырья, основных и вспомогательных материалов, транспортно-заготовительные расходы, расходы на оплату труда сотрудников производства, налоговые выплаты, топливно-энергетические производственные затраты, прочие расходы. Отметим, что основными статьями расходов, оказывающими влияние на формирования стоимости готовой продукции, являются затраты на сырье и материалы. Расчеты были произведены с учетом возможности ее реализации – предполагаемого спроса и спроса на продукцию данной группы, – на основании действующих цен, тарифов и существующих норм расхода. Величина транспортно-заготовительных расходов была принята на уровне 5 % стоимости основных материалов и сырья. Затраты на вспомогательные материалы вычислялись с учетом расходов на материалы, не являющиеся составляющей готовой продукции, но выполняющие функцию необходимых компонентов изготовления последней, обеспечивающих нормальный технологический процесс.

Результаты расчета энергозатрат на производство 100 кг продукции, произведенной по предлагаемой рецептуре [4], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет стоимости энергозатрат и воды

| Вид энергозатрат | Ед. изм. | Норма расхода | Тариф за единицу, руб. | Сумма энергозатрат |
|------------------|----------|---------------|------------------------|--------------------|
| Холод | Ккал | 5 | 1,31 | 6,55 |
| Электроэнергия | кВт*ч | 4 | 2,41 | 9,64 |
| Вода | м3 | 1 | 15,72 | 15,72 |
| Итого | | | | 31,91 |

Также был проведен расчет затрат на оплату труда работников производства, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Расчет заработной платы производственных рабочих

| Численность работающих, чел. | Укрупненная расценка на 100 кг, руб. | Затраты на оплату труда, руб. |
|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 5 | 450 | 2250 |

Одним из наиболее важных финансовых процессов для производителя продукции является формирование ее оптовой цены. Она складывается в рамках начального этапа ценообразования и включает производственные расходы, расходы на реализацию продукции и прибыль планируемого уровня – при внедрении продукции новых видов ее размер, как правило, составляет 10 % себестоимости.

В табл. 3 представлен расчет отпускной цены контрольного и исследуемых образцов.

Приведенные результаты подтверждают финансовые ожидания от внедрения нового вида продукции и свидетельствуют об эффективности экономического профиля разработки.

Продукция, изготовленная с заменой 20 % хлеба и 5 % мяса аналогичным количеством муки нута, позволяет получить прибыль 1834,96 и 1607,57 руб. соответственно, а также снизить себестоимость на 91998,25 и 921986,35 руб./год соответственно.

Введение муки нута вместо 20 % хлеба позволяет получить продукт с обогащенным аминокислотным составом при одинаковом уровне прибыли и отпускной цене по сравнению с продукцией,

изготовленной по стандартной рецептуре. Замена 5 % массы мяса на нутовую муку дает возможность варьирования отпускной цены за счет определения желаемого уровня прибыли.

Таблица 3

Расчет отпускной стоимости контрольного и опытных образцов (калькуляционная единица – 100 кг)

| | Контроль | Образец с заменой 20% хлеба | Образец с заменой 5% мяса |
|---|----------|-----------------------------|---------------------------|
| Сырье и основные материалы | 14778,63 | 14476,58 | 12202,64 |
| Транспортно-заготовительные расходы | 250 | 300 | 300 |
| Вспомогательные материалы | 400 | 400 | 400 |
| Топливо и энергия на технологические цели | 43,52 | 43,52 | 43,52 |
| Расходы на оплату труда | 2250 | 2250 | 2250 |
| Страховые взносы (ФБ, ПФР, ТФОМС, ФФОМС, ФСС) | 679,5 | 679,5 | 679,5 |
| Прочие расходы | 200 | 200 | 200 |
| Полная себестоимость | 18601,65 | 18349,6 | 16075,66 |
| Прибыль | 1860,17 | 1834,96 | 1607,57 |
| Оптовая цена | 20461,82 | 20184,56 | 17683,23 |
| НДС | 3683,13 | 3633,22 | 3182,98 |
| Отпускная цена | 24144,94 | 23817,78 | 20866,21 |
| Отпускная цена, руб. за 1 кг | 241,45 | 238,18 | 208,66 |

Таким образом, благодаря приведенным расчетам, можно сделать заключение об эффективности предлагаемых изменений в традиционной рецептуре и рекомендовать разрабатываемый продукт к применению как целесообразный.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мау В. Драма 2008 года: от экономического чуда к экономическому кризису / В. Мау // Вопросы экономики. 2009. № 2. С. 4-23.
2. Россия и мировое сообщество перед вызовами нестабильности экономических и правовых систем : материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 6 ч. Ч. 3 / Междунар. ин-т экономики и права; под общ. ред. Ф.Л. Шарова. Москва, 16-18 апреля 2012 г. М.: МИЭП, 2012. 278 с.
3. Новые растительные источники для производства комбинированных продуктов питания / С.С. Забурунов, В.Н. Выгузова, А.Е. Федоренко, И.А. Глотова // Научный электронный архив. URL: <http://www.rae.ru/forum2011/143/1279> (дата обращения: 30.04.2013)
4. 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)
5. Тихонович И.А. Специфичность микробиологических препаратов для бобовых культур и особенности их производства / И.А. Тихонович // Зернобобовые и крупяные культуры. 2012. № 3. С. 11-17.
6. Пахомов С.Д. Перспективы выращивания нута в Нижнем Поволжье / С.Д. Пахомов // Научный электронный архив. URL: <http://econf.rae.ru/article/6060> (дата обращения: 30.04.2013)
7. Германцева Н.И. Нут – культура засушливого земледелия / Н.И. Германцева; Минсельхоз РФ. Саратов, 2011. 200 с.
8. Балашов В.В. Нут – зерно здоровья: учеб.-практ. пособие / В.В. Балашов, А.В. Балашов, И.Т. Патрин. Волгоград, 2002. 87 с.
9. Германцева Н.И. Биологические особенности селекции и семеноводства нута в засушливом Поволжье: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук / Н.И. Германцева. Пенза, 2001. 54 с.

10. 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.

11. Вайтанис М.А. Обогащение котлетного фарша растительным сырьем / М.А. Вайтанис // Ползуновский Вестник. 2012. № 2/2. С. 216-220.

12. Парфенова С. Н. Разработка технологии и рецептур кулинарных изделий с использованием комбинированного мясного фарша: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.15 / Парфенова Светлана Николаевна. Благовещенск, 2006. 151 с.

13. Рогов И. А. Производство мясных полуфабрикатов и быстрозамороженных блюд / И.А. Рогов, А. Г. Забашта. М.: Колос, 1997. 336 с.

14. Кузьмичева М. Б. Российский рынок мясных полуфабрикатов в условиях кризиса / М.Б. Кузьмичева // Мясная индустрия. 2009. № 5. С. 8-9.

Злобина Ирина Владимировна – ассистент кафедры «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – Assistant
Department of Physical Materials and New Materials Technology
Yury Gagarin State Technical University of Saratov

Ангелюк Валентин Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты пищевых производств» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова

Valentin P. Angelyuk – Dr. Sc., Professor
Department of Processes and Equipment for Food Production
Vavilov Saratov State Agrarian University

Статья поступила в редакцию 18.02.13. принята к опубликованию 10.04.13