

ВЕСТНИК

САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2020

№ 4 (87)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Декабрь 2020

Главный редактор

д.т.н., профессор А.А. Игнатьев

Заместитель главного редактора

д.т.н., профессор Ю.Б. Томашевский

Ответственный секретарь

к.т.н., доцент В.О. Горбачев

Редакционная коллегия:

Д.т.н., проф. А.Н. Васин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н. О.Н. Долинина (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. О.В. Захаров (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А.Е. Зверовщиков (ПГУ)

Д.т.н., проф. А.А. Львов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

К.т.н. А.А. Казинский (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А.В. Королев (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. В.А. Кушников (СНЦ РАН)

Д.т.н., проф. Т.Г. Насад (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. А.Ф. Резчиков (ИПУ РАН)

Д.т.н., проф. И.В. Родионов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.ф.-м.н., проф. М.Д. Старостенков (АлтГТУ)

Чл.-корр. РАО, д.т.н., проф. А.А. Сытник

(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А.А. Фомин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А. Аман (Германия)

Д.т.н., проф. Р. Крехел (Словакия)

Д.т.н., проф. В. Хардт (Германия)

Редактор Л.А. Скворцова

Компьютерная верстка Т.В. Семёновой

Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:

Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77

Телефон: 8 (845-2) 99-89-81

E-mail: vestnik@sstu.ru

Подписано в печать 25.12.2020 Дата выхода в свет 30.12.2020

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 13,0 Уч.-изд. л. 5,5

Тираж 500 экз. Заказ 100

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации *ПИ № ФС77-65155* от 28 марта 2016 г.

Подписной индекс 18378

(каталог Газеты. Журналы на 1-е полугодие 2021 г.)

© Саратовский государственный
ISSN 1999-8341 технический университет, 2020

VESTNIK

**SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

2020

№ 4 (87)

Scientific Journal

Since 2003

Published quarterly

December 2020

Editor-in-chief

Professor A.A. Ignatiev

Editor-in-chief assistant

Professor Yu.B. Tomashevsky

Executive secretary

Associate Professor V.O. Gorbachev

Editorial board:

Dr. Sc., Professor A.N. Vasin (SSTU)

Dr. Sc. O.N. Dolinina (SSTU)

Dr. Sc., Professor O.V. Zakharov (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.E. Zverovschikov (PSU)

Dr. Sc., Professor A.A. Lvov (SSTU)

Ph. D. A.A. Kazinski (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.V. Korolev (SSTU)

Dr. Sc., Professor V.A. Kushnikov (Scientific centre of RAS)

Dr. Sc., Professor T.G. Nasad (SSTU)

Corresponding member of RAS, Dr. Sc., Professor

A.F. Rezhnikov (ISP RAS)

Dr. Sc., Professor I.V. Rodionov (SSTU)

Dr. Sc., Professor M.D. Starostenkov (AltSTU)

Corresponding member of RAE, Dr. Sc., Professor

A.A. Sytnik (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.A. Fomin (SSTU)

Dr. Sc., Professor A. Aman (Germany)

Dr. Sc., Professor R. Krekhel (Slovakia)

Dr. Sc., Professor V. Hardt (Germany)

Editor L.A. Skvortsova

Computer-based page-proof T.V. Semenova

Rendering A.H. Askarova

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054 Russia

Phone: +7 (845-2) 99-89-81

E-mail: vestnik@sstu.ru

Print date: 25.12.2020. Date of publication 30.12.2020

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 13,0

Publication base sheet 5,5

Circulation: 500 printed copies

Order 100

Publisher and Editorial Address:

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

eLIBRARY.ru

Subscription index **18378**

© Yuri Gagarin State Technical
ISSN 1999-8341 University of Saratov, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Бокарев А.Н., Пластун И.Л.**
РАСЧЕТ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ ФУЛЛЕРЕНОВ
МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 5
- Денисов А.С., Сычёв А.М., Кожинская А.В., Биниязов А.М.**
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
ПРИМЕСЕЙ В МОТОРНОМ МАСЛЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ 16
- Игнатъев С.А., Добряков В.А., Федюков С.В., Слесарев С.В., Букин И.А.**
ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В СИМУЛЯЦИОННОМ ОБОРУДОВАНИИ
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ НАВЫКОВ 27
- Мотков А.Г.**
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ
В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ 40
- Мусатов В.Ю., Вавилов В. И., Петров Д.Ю., Степанов М.Ф., Сысоев В.В.**
О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ГАЗА
И МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТАХ 47
- Потемкин С.А., Нааман И.Х.Н., Ивженко С.П., Гулевич Н.А., Пчелинцева Е.Г.**
КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ВЫСОКИМ
РАЗРЕШЕНИЕМ И ВВОДА ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕР 66
- Тортика А.С., Ершов А.С.**
ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ 79

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Павлова В.А., Павлов В.И.**
АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ РЕГУЛЯРНОГО
МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ 83
- Хайралапов Р.Б., Бессонов Д.А., Попов И.А., Прохоров М.А.,
Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л.**
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ФРЕЗЕРОВКИ
МИКРООСТРИЙНЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ 88

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Телегин С.В.**
ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
НА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИК-ДИАПАЗОНА 95

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, ENGINEERING AND MANAGEMENT

Bokarev A.N., Plastun I.L. FULLERENE POLARIZABILITY CALCULATED BY MOLECULAR MODELING TOOLS	5
Denisov A.S., Sychev A.M., Kozhinskaya A.V., Biniyazov A.M. MATHEMATICAL MODELING OF IMPURITIES IN MOTOR OILS FOR AUTOMOBILE DIESELS	16
Ignatiev S.A., Dobryakov V.A., Fedyukov S.V., Slesarev S.V., Bukin I.A. INFORMATION TECHNOLOGIES IN SIMULATION EQUIPMENT USED FOR DEVELOPING PROFESSIONAL SKILLS	27
Motkov A.G. VIBROACOUSTICAL FREE OSCILLATION METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING	40
Musatov V.Yu., Vavilov V.I., Petrov D.Yu., Stepanov M.F., Sysoev V.V. A POSSIBILITY OF USING GAS SENSORS AND MULTISENSOR SYSTEMS WITH GAS SENSITIVE SENSORS FOR INTELLIGENT MOBILE ROBOTS.....	47
Potemkin S.A., Naaman I.H.N., Ivzhenko S.P., Gulevich N.A., Pchelintseva E.G. SOFTWARE PACKAGES SHAPING HIGH RESOLUTION IMAGES AND FEEDING VIDEODATA INTO COMPUTERS	66
Tortika A.S., Ershov A.S. OVERVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN DATABASE MANAGEMENT SYSTEMS	79

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Pavlova V.A., Pavlov V.I. ANALYTICAL REVIEW OF THE METHODS FORMING A REGULAR MICRORELIEF ON A WORKPIECE SURFACE	83
Khayralapov R.B., Prokhorov M.A., Bessonov D.A., Popov I.A., Sokolova T.N., Surmenko E.L. TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LASER MILLING OF MICRO-EDGE STRUCTURES IN ELECTRO-VACUUM DEVICES S	88

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Telegin S.V. LASER FORMATION OF COMPOSITE COATINGS OVER TITANIUM ALLOYS BY LASER RADIATION FOR IR-RANGE.....	95
---	----

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.194; 544.164

А.Н. Бокарев, И.Л. Пластун

РАСЧЕТ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ ФУЛЛЕРЕНОВ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Методами квантово-химического молекулярного моделирования по теории функционала плотности (DFT) с функционалом B3LYP рассчитана структура и поляризуемость фуллеренов различных типов. Исследована зависимость поляризуемости фуллеренов от числа атомов в структуре фуллерена. Предложен новый подход к расчету поляризуемости высокоразмерных фуллеренов на основе аппроксимационной методики.

Ключевые слова: фуллерен, молекулярное моделирование, теория функционала плотности (DFT), поляризуемость, аппроксимация, линейная регрессия

A.N. Bokarev, I.L. Plastun

FULLERENE POLARIZABILITY CALCULATED BY MOLECULAR MODELING TOOLS

Abstract. The structure and polarizability of various types of fullerenes have been calculated by quantum-chemical molecular modeling methods using density functional theory (DFT) with the B3LYP functional. Dependence of the polarizability of fullerenes on the number of atoms in the fullerene structure is the focus of this research. A new approach to calculating polarizability of high-dimensional fullerenes based on the approximation technique is proposed.

Keywords: fullerene, molecular modeling, density functional theory (DFT), polarizability, approximation, linear regression

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время объектами большого количества исследований являются углеродные наночастицы различных типов, что обусловлено уникальностью их оптических, физико-химических и механических свойств, которые предоставляют возможность для повышения эффективности функционирования ранее созданных средств и механизмов, а также для разработки принципиально новых устройств, комплексов и материалов в различных сферах науки.

К настоящему моменту теоретически описаны и синтезированы разнообразные наноформы углерода, каждая из которых отличается собственной атомной структурой, размером и широким спектром свойств и сфер применения.

Существуют различные подходы к классификации углеродных наноструктур. Наиболее удобной и информативной является классификация на основе электронной конфигурации молекул. Атомы углерода способны образовывать химические связи с разной гибридизацией атомных орбиталей (рис. 1) и различной пространственной локализацией электронных облаков, определяющих топологию углеродной наноструктуры [1].

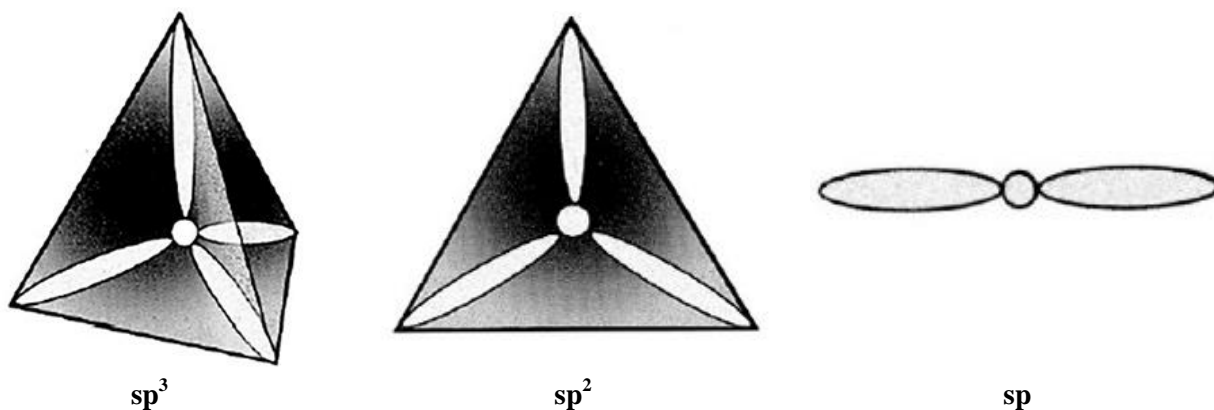


Рис. 1. Схематические изображения тетраэдрической (sp^3), плоской треугольной (sp^2) и линейной (sp) гибридных орбиталей [6]

На основе этого можно выделить три группы углеродных наноформ, прототипами которых являются «классические» аллотропы углерода с различными видами гибридизации: sp^3 (алмаз), sp^2 (графит) и sp (карбин) [1-3]. Все остальные углеродные наноструктуры образуют группу смешанных наноаллотропов углерода с промежуточным типом атомной гибридизации sp^n [1].

Например, для различных видов фуллеренов и нанотрубок с частично изогнутой поверхностью параметр n может принимать значения в диапазоне от 2 до 3 [1]. Так, для наиболее известного фуллерена C_{60} параметр n имеет значение 2,28 [4]. Стоит также отметить, что существуют наноформы, представляющие собой комбинации разных типов наноструктур. В качестве примера можно привести углеродные пиподы (стручки), структура которых состоит из нанотрубок, содержащих внутри себя фуллерены [1].

Фуллерены являются полыми углеродными наноструктурами, в составе которых атомы углерода имеют свойственные графиту координационные числа ($KЧ = 3$) и электронные конфигурации, близкие к sp^2 [2], представляющие собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные углеродными пентагонами и гексагонами [1-3]. Впервые фуллерен был получен в 1985 году Гарольдом Крото и Ричардом Смолли [1, 4] при анализе паров графита, образовавшихся при лазерном облучении графитовых образцов. В результате структурного анализа выяснилось, что обнаруженная частица имеет форму футбольного мяча и состоит из 60 атомов углерода [1, 4]. Впоследствии полученное соединение стали называть фуллереном в честь американского архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера, получившего в 1954 г. патент на строительные конструкции в виде многогранных сфероидов.

Существуют три основных направления исследований практического применения фуллеренов [1].

Первое направление связано с исследованием сферы использования новых химических соединений, полученных в результате перспективных разработок в органической и неорганической химии фуллеренов. Например, были получены фуллериды щелочных металлов с высокотемпературной сверхпроводимостью, а среди производных фуллеренов найдены материалы с нелинейными оптическими свойствами [5].

Второе направление посвящено биомедицинскому применению фуллеренов и их производных. Имеющиеся результаты исследований позволяют рассматривать возможность использования фуллеренов и их производных для доставки лекарственных средств (см. обзор [6]), существенно повышая их терапевтическую эффективность.

Третье направление применения фуллеренов охватывает разработку различных моделей органических солнечных батарей, в которых в качестве акцептора выступает фуллерен C_{60} или его органические производные [5].

МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Одной из наиболее используемых методик характеристики и анализа углеродных наноструктур является инфракрасная спектроскопия, основанная на возбуждении колебательных движений молекул или их отдельных фрагментов при пропускании инфракрасного (ИК) излучения через вещество [7]. При этом наблюдается ослабление интенсивности света, прошедшего через образец, но поглощение происходит не во всем спектре падающего излучения, а при длинах волн, энергия которых соответствует энергиям возбуждения колебаний в изучаемых молекулах [8]. Таким образом, длины волн (или частоты), при которых наблюдается максимальное поглощение ИК-излучения, могут свидетельствовать о наличии в молекулах образца различных функциональных групп [9].

Значительный прогресс в развитии представлений о структуре и свойствах углеродных наночастиц был достигнут с помощью современных квантово-химических методов моделирования. Компьютерное моделирование структуры и свойств веществ не только дополняет экспериментальные методы исследования, но и во многих случаях дает принципиально новую информацию [2, 9]. Множество проведенных исследований с использованием методов квантовой химии было направлено на изучение структуры и параметров углеродных наноструктур, включая оптимизацию геометрических моделей разного размера.

Стоит отметить, что наиболее часто используемым функционалом в рамках теории функционала плотности при оптимизации геометрических структур и расчете параметров различных углеродных наночастиц является гибридный функционал B3LYP [10].

Процедуры молекулярного моделирования, включая расчет колебательных спектров или вычисление оптических параметров углеродных наноструктур, требуют большого количества вычислительных ресурсов и времени в зависимости от сложности молекулярной структуры.

Большие размеры структур приводят к существенному увеличению времени вычислений, что в случае структур большого размера приводит к невозможности расчета необходимых параметров средствами персональных компьютеров. По этой причине встает вопрос о возможности использования аппроксимирующих методик для вычисления параметров уг-

леродных наноструктур больших размеров на основе полученных результатов для структур меньшего размера. К настоящему моменту этому вопросу посвящен ряд работ.

Например, в исследовании [11] авторами по результатам расчетов тензоров поляризуемости методом PBE с базисным набором 3z в программе PRIRODA была установлена линейная корреляционная зависимость между величиной средней поляризуемости фуллерена и числом атомов в его структуре, позволяющая с высокой точностью оценивать среднюю поляризуемость высших фуллеренов, вычисление поляризуемости которых с помощью квантово-химических методов затруднительно. При этом стоит отметить, что погрешность расчета поляризуемости может варьироваться в зависимости от выбранного метода и базиса для расчета. По этой причине конкретный вид корреляционной зависимости отличается не только для разных методов и базисов, но и, возможно, для различных программных комплексов, использовавшихся для расчета.

Рассмотрим возможность аппроксимации параметров углеродных наноструктур больших размеров на основе полученных результатов для структур меньшего размера на примере расчета средней поляризуемости для фуллеренов различного размера.

Одним из важных исследуемых параметров углеродных наночастиц как объектов с новыми электрооптическими свойствами, является тензор поляризуемости, который описывает изменение оптических свойств вещества в зависимости от направления распространения электромагнитного (лазерного) излучения [12]:

$$b_{ij} = \begin{vmatrix} b_{xx} & b_{xy} & b_{xz} \\ b_{yx} & b_{yy} & b_{yz} \\ b_{zx} & b_{zy} & b_{zz} \end{vmatrix} \quad (1)$$

В тензоре (1) каждый элемент b_{ij} является дипольным моментом, индуцируемым в направлении оси i при действии электрического поля вдоль оси j . При этом недиагональные элементы попарно равны за исключением случая вращения плоскости поляризации света [12].

Средняя поляризуемость молекулярной структуры определяется как среднее арифметическое диагональных элементов тензора (2) [12]:

$$b = (b_{xx} + b_{yy} + b_{zz})/3. \quad (2)$$

Численное моделирование, включающее вычисление компонент тензора поляризуемости, проводилось с помощью программного комплекса Gaussian 09 [13] на основе метода теории функционала плотности (ТФП) [14] с использованием функционала B3LYP [10, 15]. В качестве базисных функций использовался гауссовский тип функций в валентно-расщепленном базисном наборе. Такие базисы отличаются повышенной точностью, что достигается представлением валентных орбиталей двумя наборами функций.

Расчет тензора поляризуемости производился с использованием популярного базисного набора 6-31G(d) [10], в котором атомные орбитали электронов внутренней оболочки аппроксимируются шестью гауссовыми функциями, $M = 6$, а орбитали валентной оболочки описываются соответственно тремя ($N = 3$) и одной ($P = 1$) гауссовой функцией с добавлением поляризационных компонент.

В ходе компьютерного моделирования были рассмотрены фуллерены различного размера, для некоторых из которых имеются экспериментальные данные о величине средней поляризуемости.

Как определено в [1, 4], молекула фуллерена имеет форму усеченного икосаэдра симметрии I_h , представляющего собой комбинацию 20 гексагонов и 12 пентагонов из атомов углерода.

Рассчитанная нами с помощью программного комплекса Gaussian 09 структура фуллеренов C_{60} и C_{70} показана на рис. 2а и 2б, соответственно.

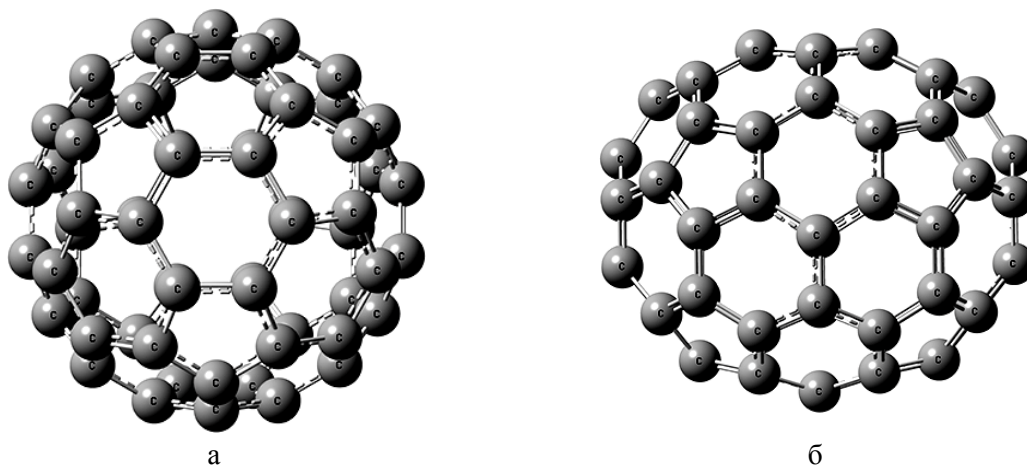


Рис. 2. Структура молекул фуллеренов C_{60} (а) и C_{70} (б)

Все множество фуллеренов принято делить на два семейства (по отношению к наиболее стабильному фуллерену C_{60}) – низших, имеющих менее 60 атомов в своей структуре, и высших с большим числом атомов в структуре фуллеренов [2]. Наименьшим синтезированным фуллереном является C_{20} , структура которого состоит из 20 атомов углерода. Стоит отметить, что некоторые фуллерены могут также иметь эллипсоидальную форму (рис. 2б), при этом для высших фуллеренов возможно наличие изомеров с разной симметрией.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе молекулярного моделирования были рассмотрены 12 видов фуллеренов, содержащих в структуре различное число атомов углерода. Конкретные геометрические модели структур фуллеренов с различной симметрией были взяты из онлайн-базы изомеров фуллеренов [16].

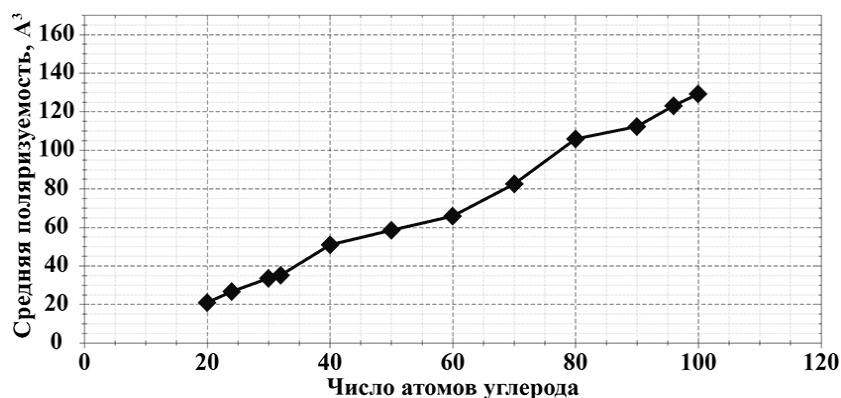
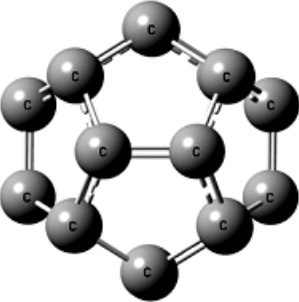
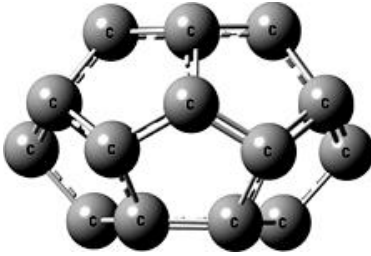
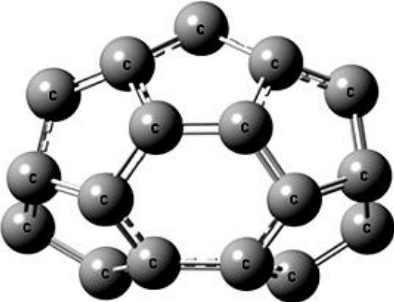
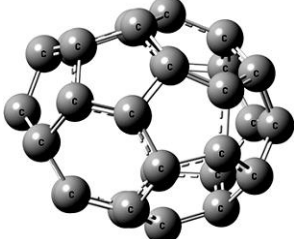
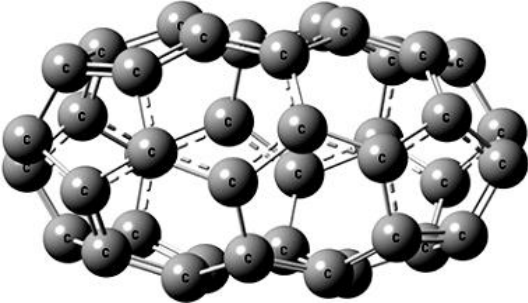
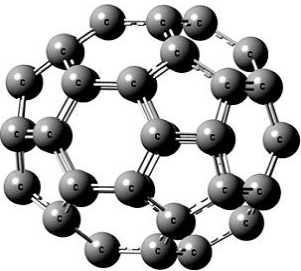
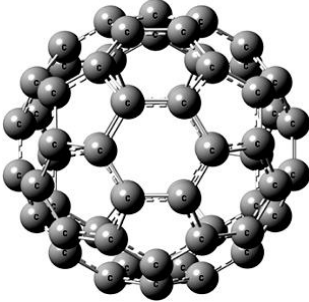
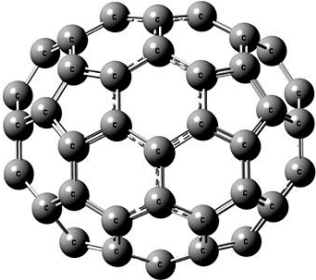
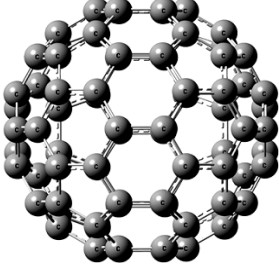
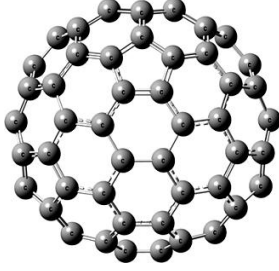
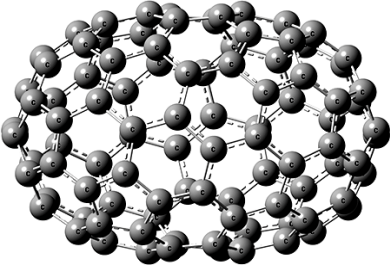
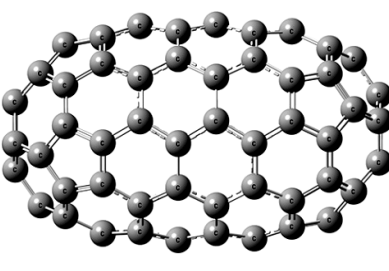


Рис. 3. Рассчитанные значения средней поляризуемости для фуллеренов разного размера

Модели структур и значения средней поляризуемости для фуллеренов разного размера с указанием типа симметрии

<p style="text-align: center;">C₂₀-I_h</p> 	<p style="text-align: center;">C₂₄-D_{6d}</p> 
<p style="text-align: center;">$b = 20,983 \text{ \AA}^3$</p>	<p style="text-align: center;">$b = 26,584 \text{ \AA}^3$</p>
<p style="text-align: center;">C₃₀-C_{2v}</p> 	<p style="text-align: center;">C₃₂-D₃</p> 
<p style="text-align: center;">$b = 33,429 \text{ \AA}^3$</p>	<p style="text-align: center;">$b = 35,102 \text{ \AA}^3$</p>
<p style="text-align: center;">C₄₀-D₂</p> 	<p style="text-align: center;">C₅₀-D_{5h}</p> 
<p style="text-align: center;">$b = 50,815 \text{ \AA}^3$</p>	<p style="text-align: center;">$b = 58,338 \text{ \AA}^3$</p>
<p style="text-align: center;">C₆₀-I_h</p> 	<p style="text-align: center;">C₇₀-D_{5h}</p> 
<p style="text-align: center;">$b = 65,848 \text{ \AA}^3$</p>	<p style="text-align: center;">$b = 82,359 \text{ \AA}^3$</p>

Окончание таблицы 1

C₈₀-D_{5h}	C₉₀-C_{2v}
	
$b = 105,744 \text{ \AA}^3$	$b = 112,234 \text{ \AA}^3$
C₉₆-D₂₋₁	C₁₀₀-D_{5d}
	
$b = 123,013 \text{ \AA}^3$	$b = 129,132 \text{ \AA}^3$

Для каждого варианта были рассчитаны компоненты тензора поляризуемости (1), по которым была вычислена средняя поляризуемость (2).

Структуры и полученные значения средней поляризуемости фуллеренов различного вида представлены на рис. 3 и в табл. 1.

По полученным результатам видно, что с увеличением числа атомов в структуре фуллерена значение средней поляризуемости возрастает линейно. Для аппроксимации значений средней поляризуемости для высших фуллеренов большого размера необходимо использовать функцию линейной регрессии, в которой коэффициенты регрессии рассчитываются с использованием метода наименьших квадратов [17]:

$$y = b_0 + b_1 x, \quad (3)$$

где

$$b_0 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i}, \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i}, \quad (5)$$

x_i – число атомов в i -й рассмотренной структуре фуллерена, y_i – рассчитанное значение средней поляризуемости для i -го фуллерена, n – число рассмотренных структур фуллеренов.

Методами компьютерного моделирования на основе рассчитанных значений средней поляризуемости для 12 фуллеренов различного размера была получена аппроксимирующая функция для оценки значений средней поляризуемости высших фуллеренов большого размера:

$$y = -7,034122 + 1.341025x, \quad (6)$$

где x – число атомов в структуре фуллерена ($x \geq 20$).

С помощью полученной функции (6) были рассчитаны значения средней поляризуемости для высших фуллеренов большого размера. Полученные результаты представлены на рис. 4 и в табл. 2.

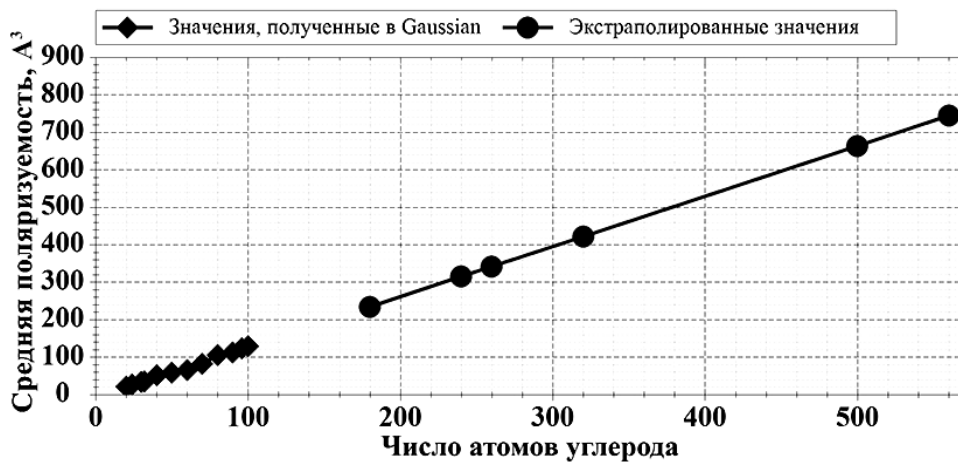
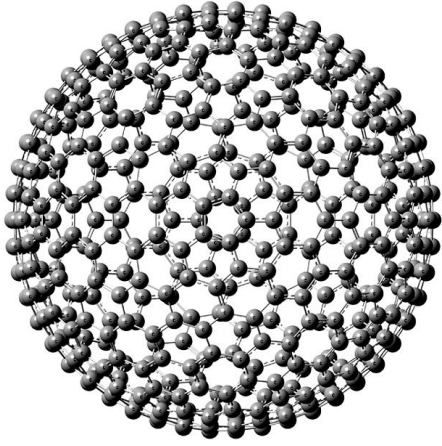
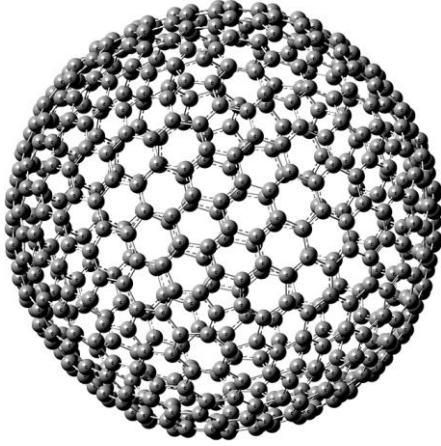


Рис. 4. Рассчитанные и экстраполированные значения средней поляризуемости для фуллеренов различного размера

Таблица 2

Модели структур и экстраполированные значения средней поляризуемости для фуллеренов большого размера

C_{180}	C_{240}
$b = 234,350 \text{ Å}^3$	$b = 314,812 \text{ Å}^3$
C_{260}	C_{320}
$b = 341,632 \text{ Å}^3$	$b = 422,094 \text{ Å}^3$

C_{500}	C_{560}
	
$b = 663,478 \text{ \AA}^3$	$b = 743,940 \text{ \AA}^3$

Оценка погрешности полученной функции аппроксимации проводилась с помощью формулы:

$$b = \left| \frac{y_{\phi} - y_{\vartheta}}{y_{\phi}} \right| \cdot 100\% , \quad (7)$$

где y_{ϕ} – полученные в результате численного моделирования значения средней поляризуемости из табл. 1, y_{ϑ} – рассчитанные по формуле (6) значения средней поляризуемости для соответствующего числа атомов.

Полученные данные по погрешности вычислений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Относительная погрешность полученной функции аппроксимации средней поляризуемости фуллеренов различного размера

Вид фуллерена	Число атомов	$y_{\phi}, \text{ \AA}^3$	$y_{\vartheta}, \text{ \AA}^3$	Относительная погрешность, %
$C_{20}-I_h$	20	20,983	19,786	5,705
$C_{24}-D_{6d}$	24	26,584	25,150	5,394
$C_{30}-C_{2v}$	30	33,429	33,197	0,694
$C_{32}-D_3$	32	35,102	35,879	2,214
$C_{40}-D_2$	40	50,815	46,607	8,281
$C_{50}-D_{5h}$	50	58,338	60,017	2,878
$C_{60}-I_h$	60	65,848	73,427	11,510
$C_{70}-D_{5h}$	70	82,359	86,838	5,438
$C_{80}-D_{5h}$	80	105,744	100,248	5,197
$C_{90}-C_{2v}$	90	112,234	113,658	1,269
$C_{96}-D_{2-1}$	96	123,013	121,704	1,064
$C_{100}-D_{5d}$	100	129,132	127,068	1,598

По данным из табл. 3 видно, что погрешность предложенной функции аппроксимации (6) варьируется от 0,7 до 11 % для фуллеренов разного размера. При этом среднее значение погрешности для всех 12 рассчитанных фуллеренов составляет 4,27 %.

Для оценки точности расчета поляризуемости функционалом B3LYP/6-31G(d) рассмотрим известные экспериментальные данные по исследованию средней поляризуемости фуллеренов. В частности, в работе [18] с помощью метода отклонения молекулярного пучка произведена экспериментальная оценка величины средней поляризуемости фуллерена C_{60} ($76,5 \pm 8,0 \text{ \AA}^3$), а в исследовании [19] с использованием той же техники экспериментальная оценка величины средней поляризуемости фуллерена C_{70} ($102 \pm 14 \text{ \AA}^3$). Таким образом, можно заметить, что полученные с помощью функции (6) значения средней поляризуемости фуллеренов C_{60} (73,427) и C_{70} (86,838) имеют меньшее отклонение от установленных экспериментально интервалов средней поляризуемости для C_{60} и C_{70} , чем рассчитанные функционалом B3LYP/6-31G(d) значения. Полученный результат свидетельствует о более точном расчете средней поляризуемости фуллеренов на основе аппроксимационной методики с использованием функции линейной регрессии по сравнению с расчетами методами теории функционала плотности.

ВЫВОДЫ

На основе результатов молекулярного моделирования структуры и расчета средней поляризуемости фуллеренов различных типов можно сделать вывод, что значения средней поляризуемости фуллеренов растут линейно по мере роста количества атомов в составе фуллерена.

Основываясь на полученных результатах применения аппроксимирующей функции для оценки средней поляризуемости фуллеренов с учетом данных о погрешности аппроксимации и сравнения с экспериментальными данными, можно сделать вывод, что средняя поляризуемость высших фуллеренов большого размера может быть качественно экстраполирована с использованием аппроксимирующей функции линейной регрессии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., and Eklund P.C. Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes. – Academic Press, Inc., New York, 1996. – 965 p.
2. Беленков Е.А., Ивановская В.В., Ивановский А.Л. Наноалмазы и родственные углеродные наноматериалы. Компьютерное материаловедение. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 169 с.
3. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
4. Kroto H.W. C_{60} : Buckminsterfullerene // Nature. 1985. – V. 318. – № 6042. – P. 162.
5. Трошин П.А., Любовская Р.Н. Органическая химия фуллеренов: основные реакции, типы соединений фуллеренов и перспективы их практического использования // Успехи химии. – 2008. – Т. 77. – № 4. – С. 323-369.
6. Panwar N., Soehartono A.M., Chan K.K., Zeng S., Xu G., Qu J., Coquet P., Yong K.-T., Chen X. Nanocarbons for Biology and Medicine: Sensing, Imaging, and Drug Delivery // Chemical Reviews. – 2019. – V. 119. – № 16. – P. 9559-9656.

7. Petit T., Puskar L. FTIR spectroscopy of nanodiamonds: methods and interpretation // *Diamond and Related Materials*. – 2018. – V. 89. – P. 52-66.
8. Бёккер Ю. Спектроскопия. – М.: Техносфера, 2009. – 528 с.
9. Бутырская Е.В. Компьютерная химия: основы теории и работа с программами Gaussian и GaussView. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. – 224 с.
10. Хурсан С.Л. Квантовая механика и квантовая химия: конспект лекций. – Уфа: ЧП Раянов, 2005. – 164 с.
11. Сабиров Д.Ш., Булгаков Р.Г., Хурсан С.Л. Корреляционная зависимость между размером фуллерена и величиной его средней поляризуемости // *Башк. хим. журн.* – 2010. – Т. 17. – № 1. – С. 46-48.
12. Верещагин А.Н. Поляризуемость молекул. – М.: Наука, 1980. – 177 с.
13. Frisch M.J., Trucks G.W., Cheeseman J.R., Scalmani G., Caricato M., et al. Gaussian 09, Revision A.02. Wallingford CT, Gaussian Inc., 2009. 450 p.
14. Кон В. Электронная структура вещества – волновые функции и функционалы плотности // *УФН*. – 2002. – Т. 172. – № 3. – С. 336-348.
15. Sholl D.S., Steckel J.A. *Density Functional Theory. A Practical Introduction*. – Wiley, New Jersey, 2009. – 238 p.
16. Carbon fullerenes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nanotube.msu.edu/fullerene/fullerene-isomers.html>
17. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа: руководство для экономистов. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.
18. Antoine R., Dugourd Ph., Rayane D., Benichou E., and Broyer M. Direct measurement of the electric polarizability of isolated C₆₀ molecules // *The Journal of Chemical Physics*. – 1999. – V. 110. – № 19. – P. 9771.
19. Compagnon I., Antoine R., Broyer M., Dugourd P., Lerme J., Rayane D. Electric polarizability of isolated C₇₀ molecules // *Physical Review A*. – 2001. – V. 64. – № 2. – P. 025201.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бокарев Андрей Николаевич – аспирант кафедры физики Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey N. Bokarev – Postgraduate, Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Пластун Инна Львовна – доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационной безопасности автоматизированных систем Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Inna L. Plastun – Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.10.20, принята к опубликованию 25.11.20

А.С. Денисов, А.М. Сычѳв, А.В. Кожинская, А.М. Биниязов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В МОТОРНОМ МАСЛЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

***Аннотация.** Описано формирование динамических математических моделей процессов, описывающих изменение состояния моторного масла в картере дизеля при наличии неисправностей в элементах его систем.*

***Ключевые слова:** моторное масло, математическая модель, функциональная схема, структурная схема, щелочное число*

A.S. Denisov, A.M. Sychev, A.V. Kozhinskaya, A.M. Biniyazov

MATHEMATICAL MODELING OF IMPURITIES IN MOTOR OILS FOR AUTOMOBILE DIESELS

***Abstract.** The article describes simulation of dynamic mathematical models providing an insight into the changes in the state of the motor oil used for the crankcase of a diesel engine under the problems with components of its systems.*

***Keywords:** engine oil, mathematical model, functional diagram, block diagram, base number*

ВВЕДЕНИЕ

Для определения диагностических нормативов, разработки алгоритма и технологии диагностирования дизелей по параметрам работающего масла (ПРМ) необходима их зависимость от наработки за весь срок использования.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МАСЛА ДИЗЕЛЯ ПРИ НАРУШЕНИЯХ В РАБОТЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЕГО СИСТЕМ

Опишем основные процессы, протекающие в масле через функциональные схемы. Для формирования динамических математических моделей процессов, описывающих изменение состояния моторного масла в картере дизеля, при наличии неисправностей в элементах его систем, разработана функциональная схема процессов (рис. 1).

Схема позволяет выделить наиболее существенные для моделирования процессы, разложить сложную совокупность процессов на более простые части, и для каждой из частей по отдельности разработать математическую модель. Анализ смазочной системы дизеля показал, что вся она может быть разложена на некоторое множество контрольных объемов, каждый из которых может быть описан одним из двух типовых форм контроль-

ных объемов. Главная масляная магистраль дизеля представлена на рис. 1 контрольными объемами 1 и 2.

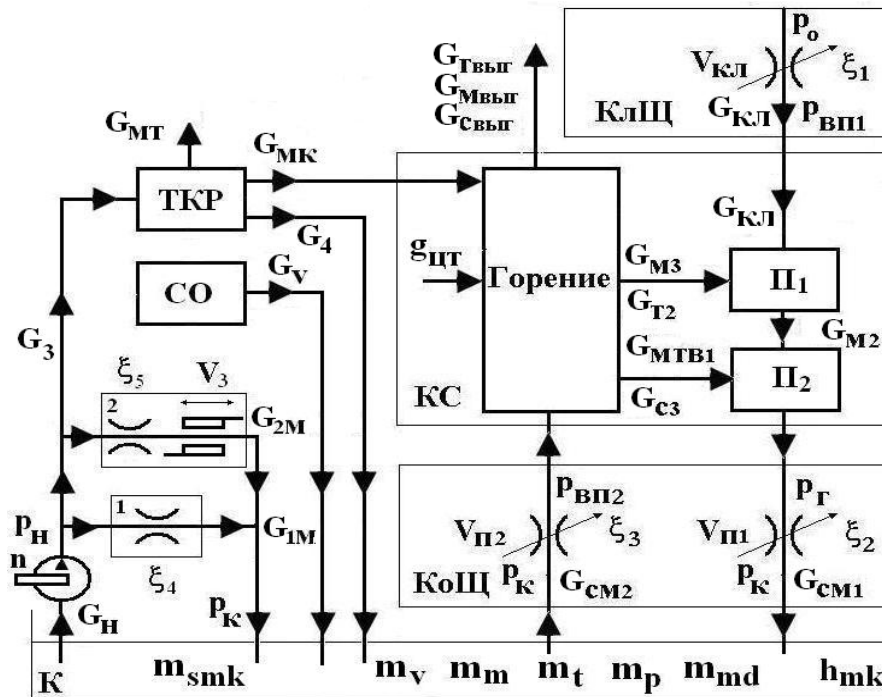


Рис. 1. Функциональная схема процессов изменения состояния моторного масла в картере дизеля, образования в нем примесей, при наличии неисправностей в элементах его систем: КлЩ – щель между стержнем впускного клапана и его направляющей втулкой; КС – камера сгорания; КоЩ – щель между поршневыми кольцами и гильзой цилиндра; К – картер двигателя; СО – жидкостная система охлаждения; ТКР – турбокомпрессор радиальный газовый; П₁, П₂ – процессы перемешивания; 1, 2 – расчетные контрольные объемы смазочной системы

Уравнение массы смеси чистого масла с перечисленными примесями в картере смазочной системы дизеля

$$m_{smk} = m_m + m_t + m_v + m_p + m_{md}. \quad (1)$$

Из картера дизеля смесь чистого масла с перечисленными примесями поступает через шестеренчатый насос смазочной системы с массовым расходом G_H в главную масляную магистраль и к турбокомпрессору (ТКР). В зависимости от величины приведенных гидравлических сопротивлений ξ_4, ξ_5 главной масляной магистрали и турбокомпрессора расход насоса G_H разделяется на массовые расходы G_{1M}, G_{2M} по магистрали и массовый расход G_3 – через турбокомпрессор.

По схеме гидравлической цепи потоков можно составить уравнения баланса массовых расходов моторного масла

$$G_H = G_{1M} + G_{2M} + G_3. \quad (2)$$

При неисправностях подшипника ротора ТКР у газовой турбины масло с массовым расходом G_{MT} , а при неисправностях подшипника ротора ТКР у компрессора моторное масло с расходом G_{MK} поступает с воздухом компрессора в рабочий объем цилиндра на впуске, в процессе сгорания частично выгорает в камере сгорания (КС), и частично оседает на стен-

ках камеры в виде вредных примесей. Оставшаяся часть масла в ТКР стекает в картер с массовым расходом G_3 .

Из функциональной схемы видно, что

$$G_3 = G_4 + G_{MT} + G_{MK}. \quad (3)$$

При наличии неисправности впускной системы, например с ростом величины зазора щели между стержнем впускного клапана и его направляющей втулкой (КлЩ), масло по этой щели поступает на тарелку клапана с массовым расходом $G_{кл}$. Величина этого расхода зависит от местного гидравлического сопротивления щели ξ_1 , давления на впуске перед клапаном $p_{вп1}$ и мгновенной скорости движения клапана $V_{кл}$. Часть этого масла полностью выгорает, другая – образует примеси, которые перемешиваются с несгоревшей частью топлива.

В камере сгорания (КС) процесс образования смеси топлива, масла и примесей осуществляется следующим образом. Дизельное топливо с расходом $g_{дт}$ поступает в объем камеры сгорания (КС). Большая часть поступившего топлива сгорает и удаляется из камеры сгорания с отработавшими газами, другая меньшая их часть конденсируется на стенках $G_{г2}$ камеры сгорания (КС), гильзы цилиндров и перемешивается с маслом, с массовым расходом $G_{см2}$ поступившим из картера по поршневым кольцам на режиме впуска. Величина этого расхода зависит от приведенного гидравлического сопротивления ξ_3 щелей, давления воздуха $p_{вп2}$ над поршнем на режиме впуска, давления в картере p_k и скорости $V_{п2}$ движения поршня.

Часть этой смеси через щели компрессионных колец (КоЩ) и отверстия в поршне, перемещается в картер на режимах сжатия и расширения с массовым расходом $G_{см1}$. Величина этого расхода зависит от приведенного гидравлического сопротивления ξ_2 щелей, давления рабочего тела p_r над поршнем на режимах сжатия и расширения, давления в картере p_k и скорости $V_{п1}$ движения поршня.

Также на функциональной схеме (рис. 1) приведены следующие показатели процессов: атмосферное давление p_0 ; массовый расход $G_{твып}$ части топлива, вышедшего с отработавшими газами; массовый расход $G_{мвып}$ части масла, вышедшего с отработавшими газами.

Уравнение изменения кинематической вязкости смеси, в которой присутствуют вязкие примеси, отличающиеся вязкостно-температурными характеристиками рассматривается с целью определения вида примеси в моторном масле: дизельное топливо, охлаждающая жидкость, вязкая примесь иного рода, из-за наличия которых величина приведенного коэффициента кинематической вязкости смеси изменяется и может быть описана следующим математическим выражением [1]

$$\log v_{sm} = \Sigma(m_i \cdot \log v_i) / \Sigma m_i, \quad (4)$$

где v_{sm} – приведенный коэффициента кинематической вязкости смеси чистого масла с n компонентами вязких примесей; m_i – масса i -й компоненты вязкой примеси; v_i – коэффициент кинематической вязкости i -й компоненты вязкой примеси в картерном масле.

Далее рассматриваются только следующие четыре компонента смеси: чистое моторное масло, дизельное топливо, охлаждающая жидкость и другие примеси в масле (продукты износа и пр.).

Вязкость смеси определяется выражением [1]

$$\log(v_{sm}) = (m_m \cdot \log(v_m) + m_p \cdot \log(v_p) + m_t \cdot \log(v_t) + m_v \cdot \log(v_v)) / (m_m + m_p + m_t + m_v), \quad (5)$$

где ν_{sm} , ν_m , ν_p , ν_t , ν_v – коэффициенты кинематической вязкости соответственно смеси, масла, вязкой примеси, дизельного топлива и охлаждающей жидкости, определяемые при одной заданной фиксированной температуре каждой из компонент смеси; m_m , m_p , m_t , m_v – массы соответственно чистого моторного масла, вязкой примеси, дизельного топлива и охлаждающей жидкости.

При расчетах в уравнение (5) должны вводиться значения кинематических вязкостей каждой из рассматриваемых жидких компонент смеси при одной фиксированной температуре, которые обычно рассчитываются по регрессионным вязкостно-температурным зависимостям, имеют следующий вид [2]:

для моторного масла М-10

$$\nu_m = 66938,5 \cdot T^{-1,90043}, \quad (6)$$

для дизельного топлива

$$\nu_t = 225,63036 \cdot T^{-1,0719413}, \quad (7)$$

для охлаждающей жидкости

$$\nu_v = 10,588981 \cdot T^{-0,77751607}, \quad (8)$$

где T – температура жидкостей, °С.

Оценка точности аппроксимации выполнялась по формуле

$$Rv = (\nu_p - \nu_e) / \nu_e, \quad (9)$$

где ν_p – расчетные значения; ν_e – данные эксперимента.

Результаты расчетов по приведенным регрессионным зависимостям коэффициентов кинематической вязкости моторного масла, дизельного топлива и охлаждающей жидкости от температуры в форме графиков приведены на рис. 2, 3.

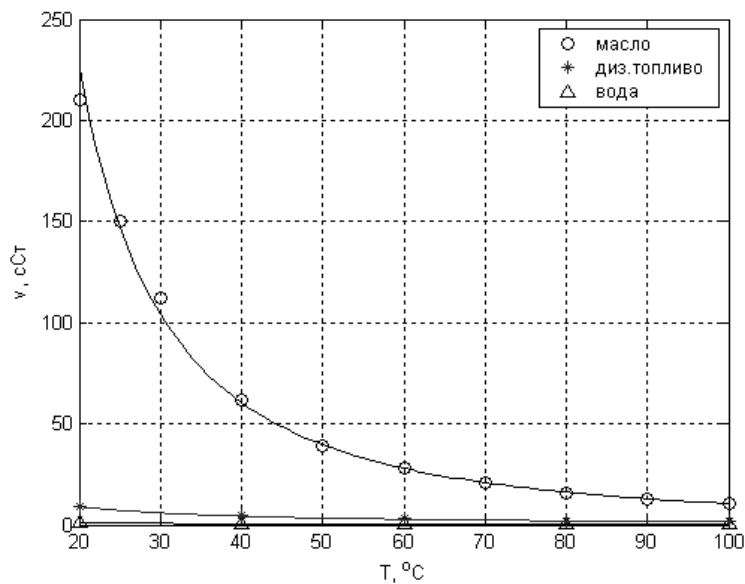


Рис. 2. Регрессионные зависимости коэффициентов кинематической вязкости моторного масла, дизельного топлива и охлаждающей жидкости от температуры T :
 \circ – эксперимент, Δ , $*$ – данные расчетов

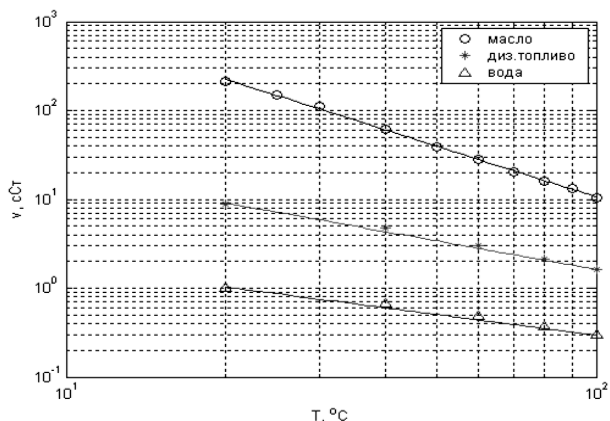


Рис. 3. Регрессионные зависимости коэффициентов кинематической вязкости моторного масла, дизельного топлива и охлаждающей жидкости от температуры T: o – эксперимент, Δ, * – данные расчетов

Структурная схема уравнения кинематической вязкости смеси моторного масла с дизельным топливом, охлаждающей жидкостью и вязкой примесью в картере дизеля приведена на рис. 4. Исходными данными для решения уравнения кинематической вязкости смеси являются результаты решения дифференциального уравнения изменения массы смеси моторного масла в картере и математических моделей неисправностей систем, т. е. изменяющиеся во времени значения масс: чистого моторного масла, дизельного топлива, охлаждающей жидкости и вязкой примеси.

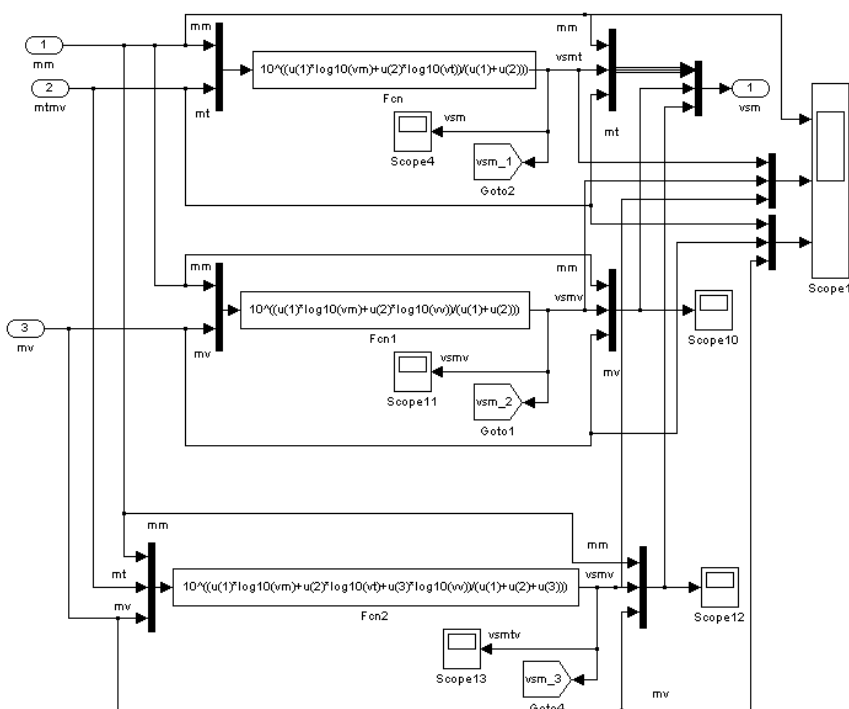


Рис. 4. Структурная схема уравнения кинематической вязкости смеси моторного масла с дизельным топливом, охлаждающей жидкостью и вязкой примесью в картере дизеля

Дифференциальное уравнение изменения во времени количества (массы) вредной примеси m_p (в кг) в моторном масле, накапливающейся со скоростью b (в кг/ч) при скорости расходования смеси a (масла с примесями) (в кг/ч), при условии равномерного мгновенного перемешивания примеси с маслом, имеет следующий вид [1]:

$$dm_p/dt = b - a \cdot m_p/m_{sm}, \quad (8)$$

где b (в кг/ч) – скорость накопления вредной примеси; a (в кг/ч) – скорость расходования смеси масла с примесями; t – время.

Текущее количество смеси масла и примеси m_{sm} в кг, равное разности первоначального количества масла m_{sm1} в системе и расхода смеси за время t , определяется по уравнению [1]

$$m_{sm} = m_{sm1} - (a - b) \cdot t. \quad (9)$$

Подставляя уравнение (9) в уравнение (8), имеем

$$dm_p / dt = b - a \cdot m_p / (m_{sm1} - (a - b) \cdot t), \quad (10)$$

Концентрация вредной примеси (в %) в масле картера:

$$c_p = 100 \cdot m_p / m_{sm}. \quad (11)$$

Аналитическое решение уравнения (10) имеет следующий вид:

$$m_p = b \cdot (a_1 \cdot t - m_o) / (1 - a / a_1) / a_1 - (a_1 \cdot t - m_o)^{a/a_1} \cdot m_o / (-m_o^{a/a_1}), \quad (12)$$

где $a_1 = a - b$.

Используя принцип расширения динамической математической модели в форме дифференциального уравнения с обыкновенными производными, введем математические модели неисправностей:

$$dm_p / dt = \sum b_i \cdot (1 + \text{sign}(t - t_{pi}) / 2 - \sum a_i \cdot m_p / m_{sm}, \quad (13)$$

где b_i – скорость накопления вредной примеси от i -й неисправности; t_{pi} – время наступления i -й неисправности; a_i – скорость расходования смеси масла с примесями при i -й неисправности.

Результаты исследования дифференциального уравнения изменения массы смеси моторного масла с топливом, охлаждающей жидкостью с учетом угара масла в картере во времени при доливках масла и неисправностях систем дизеля отражены в форме графиков на рис. 5.

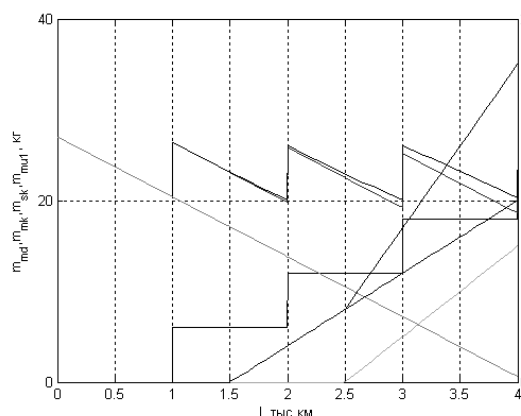


Рис. 5. Изменение количества смеси моторного масла с топливом, охлаждающей жидкостью с учетом угара масла в картере во времени при доливках масла и неисправностях систем дизеля: m_d – масса моторного масла, расходуемая при угаре без доливок масла; m_d – масса моторного масла, поступившего в картер при доливках; m_t , m_v – соответственно масса дизельного топлива и воды, поступившая в картер; m_{smk} – масса смеси моторного масла с примесями в картере

Вторая моделируемая неисправность по притоку охлаждающей жидкости в картер дизеля появляется в момент времени при пробеге 2,5 тыс. км. Она представлена на рис. 6 графиком с нулевым начальным условием и линейной зависимостью, что приводит в конце пробега к росту количества охлаждающей жидкости до 1 кг в картере, а суммарное количество примесей в моторном масле из дизельного топлива и охлаждающей жидкости составило 2 кг в картере к концу пробега 4 тыс. км. Выполнение требований соответствия уровней масла в картере отметкам щупа при доливках привело к уменьшению количества доливаемого масла при второй и третьей доливках.

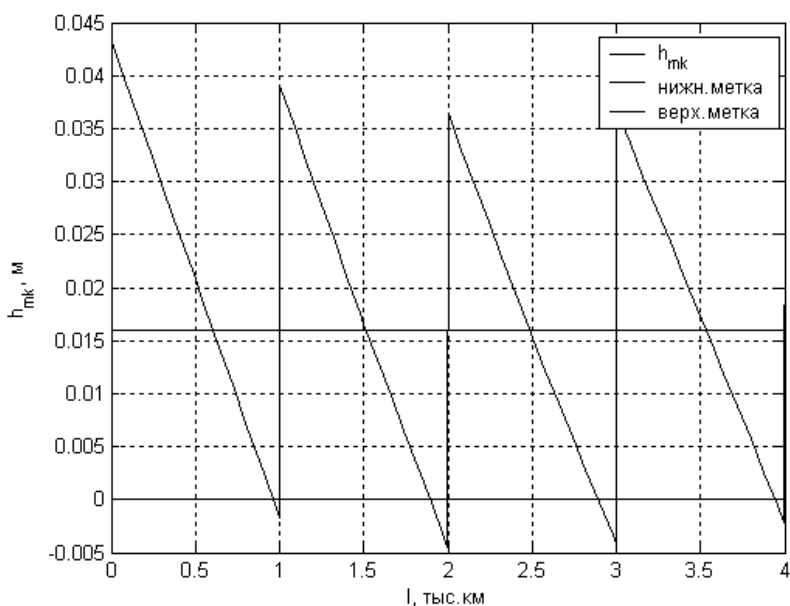


Рис. 6. Изменение уровня смеси моторного масла с топливом, охлаждающей жидкостью с учетом угара масла в картере во времени при доливках масла и неисправностях систем дизеля: 1, 2 – соответственно верхняя и нижняя метки щупа смазочной системы

Дифференциальное уравнение изменения концентрации щелочной присадки в картерном масле дизеля выводится из уравнения химической кинетики [2].

Изменение концентрации c_{ch} щелочной присадки в моторном масле дизеля автомобиля по времени t описывается следующим дифференциальным уравнением

$$dc_{ch} / dt = -k_{ch} \cdot c_{ch}, \tag{14}$$

где k_{ch} – константа скорости химической реакции.

По определению

$$c_{ch} = m_{ch} / m_m, \tag{15}$$

где m_{ch} – масса щелочной присадки; m_m – масса чистого масла.

Аналитическое решение уравнения (14) имеет следующий вид:

$$c_{ch} = c_o \cdot \exp(-k_{ch} \cdot t), \tag{16}$$

где $c_o = m_{cho} / M_{mko}$ – начальное значение концентрации щелочной присадки при $t = 0$.

При периодической i -й доливке моторного масла в картер в момент времени $t = t_{di} > 0$, из-за естественного угара масла концентрация щелочной присадки уменьшается и становится равной

$$c_{ch} = c_{ch1} = m_{ch1} / M_{mk1} < c_o. \quad (17)$$

После доливки масла в картер с массой

$$\Delta M = M_{mko} - M_{mk1}, \quad (18)$$

концентрация щелочной присадки возрастает и становится равной

$$c_{ch2} = c_{ch1} + (c_o - c_{ch1}) \cdot \Delta M / M_{mko}, \quad (19)$$

а для каждой i -й доливки моторного масла

$$c_{ch2i} = c_{ch1i} + (c_o - c_{ch1i}) \cdot \Delta M / M_{mko} \cdot (1 + \text{sign}(t - t_{di})) / 2. \quad (20)$$

Известно, что величина константы скорости химической реакции k_{ch} пропорциональна количеству дизельного топлива m_t в масле и растет с ростом его температуры T_m [3]. При появлении неисправности – попадании дизельного топлива в масло картера – константа скорости химической реакции будет переменной:

$$k_{ch} = k_{cho} + k_{cht} \cdot m_t(t), \quad (21)$$

где $m_t(t)$ – функция изменения массы топлива в моторном масле картера дизеля.

При наличии нескольких неисправностей

$$k_{ch} = k_{cho} + k_{cht} \cdot \sum m_{ti}(t) \cdot (1 + \text{sign}(t - t_{ti})) / 2, \quad (22)$$

где $m_{ti}(t)$ – функция изменения массы топлива в моторном масле картера дизеля от i -й неисправности; t_{ti} – время наступления i -й неисправности.

При росте температуры T_m моторного масла во времени константа скорости химической реакции определяется по уравнению

$$k_{ch} = (k_{cho} + k_{cht} \cdot \sum m_{ti}(t) \cdot (1 + \text{sign}(t - t_{ti})) / 2) \cdot \exp(E / (R \cdot T(t))), \quad (23)$$

где E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная.

Если константа в уравнении (23) пропорциональна времени, т. е.

$$k_{ch} = k_o - k_1 \cdot t, \quad (24)$$

то решение уравнения

$$c_{ch} = c_o \cdot \exp(-k_o \cdot t - k_1 \cdot t^2 / 2). \quad (25)$$

Если константа в уравнении (23) пропорциональна времени для двух воздействий – переменных, т. е.

$$k_{ch} = k_o + k_1 \cdot t + k_2 \cdot t, \quad (26)$$

то решение уравнения

$$c_{ch} = c_o \cdot \exp(-k_o \cdot t - k_1 \cdot t^2 / 2 + k_2 \cdot t^2 / 2). \quad (27)$$

Если константа в уравнении (23) пропорциональна времени и квадрату времени, т. е.

$$k_{ch} = k_o + k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2, \quad (28)$$

то решение уравнения

$$c_{ch} = c_o \cdot \exp(-k_o \cdot t - k_1 \cdot t^2 / 2 - k_2 \cdot t^3 / 3). \quad (29)$$

Результаты исследования уравнений математической модели изменения щелочного числа моторного масла с доливками масла в картер дизеля и при наличии неисправностей его систем топливоподачи отражены на рис. 7.

При периодических доливках масла в картер дизеля и отсутствии неисправностей в моменты доливок масла значения щелочного числа скачкообразно возрастают, что приводит к меньшему снижению значения щелочного числа, которое составляет 14 при пробеге 4 тыс. км, т. е. увеличивается на 1,2 в сравнении со значением без доливок масла.

Результаты исследования математической модели динамики изменения во времени щелочного числа масла картера показывают, что по щелочному числу можно выявить наличие неисправности по топливной системе дизеля.

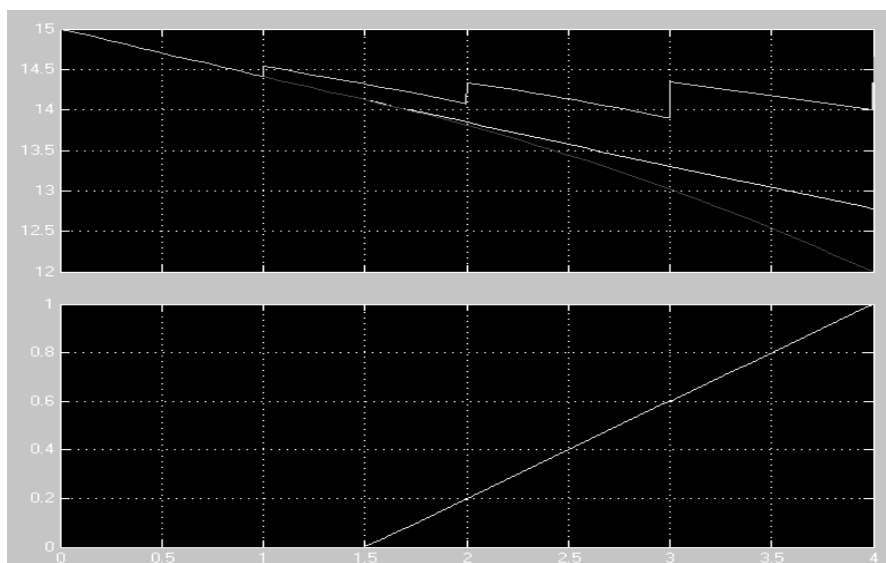


Рис. 7. Моделируемые зависимости изменения щелочного числа моторного масла с доливками масла в картер дизеля при наличии неисправностей его системы топливоподачи: c_{ch} – концентрация щелочной присадки в моторном масле картера дизеля; 1, 2 – соответственно с доливками и без доливок моторного масла; m_t – масса дизельного топлива в картере дизеля

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны динамические математические модели доливок масла в картер и неисправностей систем дизеля по: угару масла, течи охлаждающей жидкости и дизельного топлива в картер.

2. Сформированы и исследованы диагностические динамические математические модели (смазочной системы) дизеля по состоянию моторного масла в его картере с неисправностями элементов его систем во времени по пробегу автомобиля. Целостная диагностическая математическая модель представлена системой нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений шестого порядка.

3. При наличии неисправностей систем дизеля контроль за уровнем или массой моторного масла, доливаемого в картер, позволяет выявить количество масла, расходуемого на угар, величину количества примесей, но различить вид примеси: дизельное топливо или охлаждающая жидкость, не позволяет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобильные двигатели / М.Г. Шатров, К.А. Морозов, И.В. Алексеев и др.; под ред. М.Г. Шатрова. – М.: Изд. центр «Академия», 2010. – 464 с.
2. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
3. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + SIMULNK 4/5 в математике и моделировании: Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 576 с.
4. Сычев А.М., Щитов А.Д. Моделирование динамики электрогидравлического привода клапана газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания в среде SIMULINK // Проблемы управления, обработки и передачи информации: АТМ – 2011: сб. тр. II Междунар. науч. конф. – Саратов: Научная книга, 2011. – С. 348-350.
5. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: алгоритмы прикладных программ / Р.М. Петриченко, С.А. Батурин, Ю.Н. Исаков и др.; под общ. ред. Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 328 с.
6. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
7. Денисов А.С., Асоян А.Р. Теоретические предпосылки изменения моюще-диспергирующих и вязкостных свойств моторного масла в процессе работы форсированных дизелей // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (71). – С. 129-134.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Денисов Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander S. Denisov – Dr. Sc. Tech., Professor Department of Transport Logistic, Traffic Safety and Car Service, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сычев Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander M. Sychev – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Transport Logistic, Traffic Safety and Car Service, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Кожинская Алиса Васильевна – ассистент кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alisa V. Kozhinskaya – Assistant Lecturer, Department of Transport Logistic, Traffic Safety and Car Service, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Информатика, вычислительная техника и управление

Биниязов Абзал Махсотович –
кандидат технических наук, доктор PhD,
доцент кафедры техники и технологии
Западно-Казахстанского технологического
университета

Abzal M. Biniyazov –
PhD (Engineering), Associate Professor,
Department of Engineering and Technology,
West Kazakhstan Technological University

Статья поступила в редакцию 17.11.20, принята к опубликованию 25.11.20

**С.А. Игнатьев, В.А. Добряков,
С.В. Федюков, С.В. Слесарев, И.А. Букин**

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В СИМУЛЯЦИОННОМ ОБОРУДОВАНИИ
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ НАВЫКОВ**

Аннотация. Рассматриваются вопросы применения симуляционного оборудования и влияния обучения на симуляторах на качество подготовки специалистов. Представлены аппаратно-программные средства, применяемые для формирования профессиональных навыков студентов и специалистов технической направленности, и оборудование в симуляционных центрах, позволяющее проводить обучение и квалификационное тестирование в области медицины.

Ключевые слова: симуляционные технологии, тренажер-симулятор, компьютерная симуляция, формирование профессиональных навыков

**S.A. Ignatiev, V.A. Dobryakov,
S.V. Fedyukov, S.V. Slesarev, I.A. Bukin**

**INFORMATION TECHNOLOGIES
IN SIMULATION EQUIPMENT
USED FOR DEVELOPING PROFESSIONAL SKILLS**

Abstract. The article considers the challenges with application of simulation equipment and influence of simulation-based training on the quality of training specialists. The emphasis is made on the hardware and software tools used to develop professional skills of the students and technical experts, as well as equipment applied in simulation centers to conduct training and qualification testing for the medical purposes.

Keywords: simulation technologies, simulator, computer simulation, development of professional skills

ВВЕДЕНИЕ

В своем Послании к Федеральному Собранию в январе 2020 года Президент Российской Федерации В.В. Путин определил одно из приоритетных направлений развития современного образования – это подготовка высококвалифицированных кадров, в том числе научных, технических, медицинских и ряда других. Решение данной проблемы непосредственно связано с улучшением качества высшего образования, повышением квалификации и профессиональной переподготовкой специалистов.

Изучение теоретического материала должно сопровождаться освоением оборудования и приборов, необходимых в профессиональной деятельности. Следует, однако, учитывать, что в силу их высокой сложности и стоимости вузы и центры переподготовки не всегда имеют возможность производить обучение на реальном оборудовании, поэтому в настоящее время актуальным стало применение для обучения компьютерных тренажеров-симуляторов [1, 2]. Этому способствует применение оптимальной программы освоения необходимых профессиональных навыков, основанной на широком внедрении современных обучающих комплексов; создание учебных центров на базе достижений информационных технологий, позволяющих без потери качества дополнить традиционные формы обучения (лекции, семинарские, лабораторные и практические занятия) симуляционными технологиями, базирующимися на широком использовании компьютеров и соответствующего программного обеспечения. Данный подход позволяет моделировать и отрабатывать многократно ситуации, встречающиеся в практике специалистов, и формировать их профессиональные навыки в различных областях науки и техники (космонавтика, авиация, управление сложным техническим и технологическим оборудованием и т. п.) [3-7], в том числе формировать и поддерживать на высоком уровне соответствующие навыки студентов и специалистов медицинского профиля на основе симуляции различных клинических ситуаций реального пациента с улучшенными результатами диагностики и лечения [1, 2]. В связи с изложенным рассмотрим некоторые направления применения симуляционных технологий.

ПРИМЕНЕНИЕ СИМУЛЯЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

История мирового тренажеростроения насчитывает почти 100 лет: упоминание о первом авиационном тренажере, построенном англичанами, относится еще к 1910 году, однако первый достаточно эффективный тренажер был создан в США Э. Линком лишь в 1927 году. Новый толчок строительству авиационных тренажеров дала Вторая мировая война, когда в кратчайшие сроки в США и Великобритании потребовалось подготовить сотни экипажей боевых самолетов [3]. Это объясняется тем, что для борьбы с немецкой авиацией в Европе и японской авиацией в Азии потребовалось резко увеличить выпуск самолетов, с чем промышленность справилась, а традиционные методы подготовки летчиков не удовлетворяли потребностей авиации.

В СССР началом применения тренажеров можно считать 1946 год, когда в связи с интенсивным послевоенным развитием авиации, созданием новых типов самолетов, в том числе реактивных, и увеличением их парка остро стал вопрос о подготовке летного состава и снижении общих расходов на его обучение [3, 4]. В 50-е годы XX века на основе аналоговой техники в мировой практике создаются тренажеры, имитирующие кабину самолета и управление полетом в реальных условиях. В 60-х – 70-х годах для авиационно-космической техники создаются еще более совершенные моделирующие системы на базе гибридных цифро-аналоговых устройств, а в 80-х – 90-х годах прошлого столетия бурное развитие компьютерных технологий позволило впервые создать тренажеры-симуляторы для подготовки летчиков, вертолетчиков и космонавтов, максимально адекватно имитирующие условия реального полета. Достаточно широко применяются симуляционные технологии и в России, причем в настоящее время симуляционные тренажеры создаются на базе последних достижений в области информационных технологий с привлечением такого современного подхода к процессу обучения, как виртуальная реальность. Продуктом разработки явля-

ются виртуальные симуляторы, которые используются не только для подготовки личного состава авиационной и ракетно-космической техники, но и для обучения персонала (операторов) сложных технических систем многих наукоемких отраслей науки и техники, в том числе и в области профессионального технического и медицинского образования [4-8].

На рис. 1 отражены основные формы практико-ориентированного обучения, в том числе обучения с применением симуляционных технологий [1], причем следует отметить, что по данным, приведенным в работе [2], классические методы и технологии обучения обеспечивают усвоение материала до 50 %, в то время как симуляционные технологии – до 75 %.

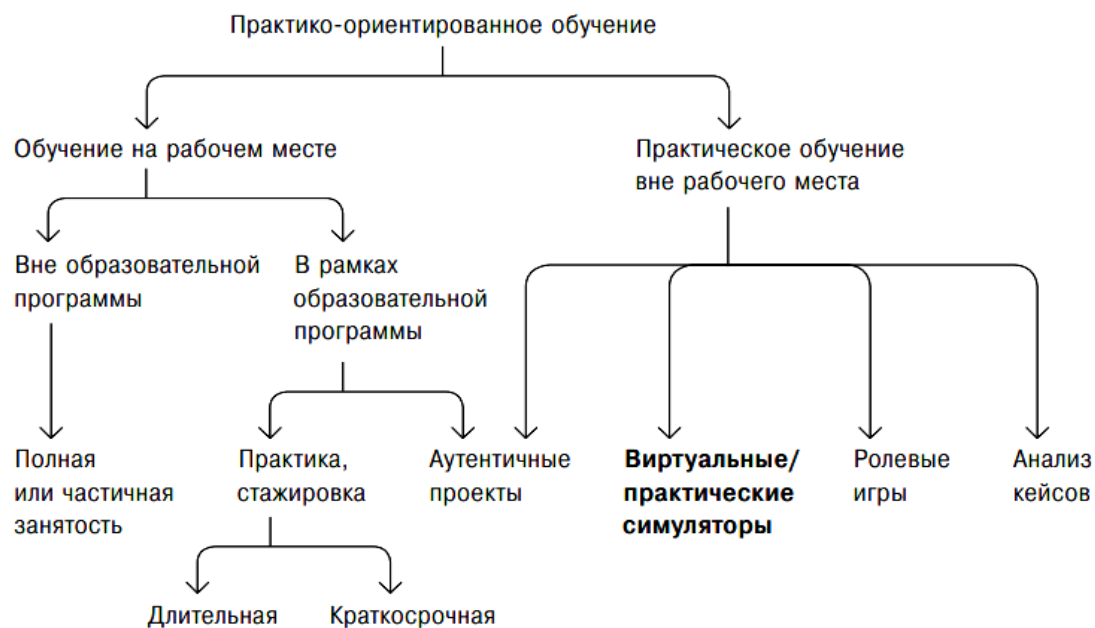


Рис. 1. Формы практико-ориентированного обучения [1]

Тренажер – это техническое средство профессиональной подготовки человека-оператора, предназначенное для формирования и совершенствования у обучаемых профессиональных навыков и умений, необходимых им для управления материальным объектом, путем многократного повторения обучаемыми действий, свойственных управлению реальным объектом [9, 10]. В основе современного тренажера находится учебная информационная модель, представляющая собой компьютерный симулятор – программное средство, имитирующее (воспроизводящее) реальный объект, которое отображает часть реальных явлений и свойств в виртуальной среде. Достоинствами компьютерных (виртуальных) тренажеров также являются: возможность контроля знаний обучаемых, компактность, устойчивость к ошибкам, возможность одновременного охвата большого количества обучаемых, возможность дистанционного обучения [10].

По принципу внутреннего устройства и функционирования современные компьютерные тренажеры можно условно разделить на несколько разновидностей: электронные экзаменаторы, статические и динамические тренажеры [9]. Наиболее интересны динамические тренажеры, в основе которых имеются математические модели физических процессов в объ-

екте, что позволяет обучаемому понимать влияние различных управляющих воздействий на процессы и способствует более качественному обучению.

Общее устройство профессионального тренажера-симулятора представлено на рис. 2, где отражены его основные структурные элементы [1]:

– моделирующий компьютер, связанный с интерфейсом оператора через систему ввода-вывода, а также имитационная модель, описывающая реальные объекты и системы, деятельности, которые имитируются в процессе обучения на тренажере, при этом модель обеспечивает искусственное воспроизведение условий и факторов, аналогичных тем, которые имеют место в процессе работы оператора по управлению реальным объектом [4], а тренажер имитирует не только деятельность технических объектов и систем, но и внешнюю среду их функционирования и, кроме того, воспроизводит все то, что оператор при этом видит и ощущает;

– интерфейс оператора, позволяющий обучающемуся манипулировать органами управления технической системой, так как это происходит в реальном производственном процессе, причем деятельность оператора, включая его действия в нештатных и аварийных ситуациях, детально регламентирована, а качество этой деятельности определяется в терминах работоспособности, надежности, напряженности, ошибочности [10];

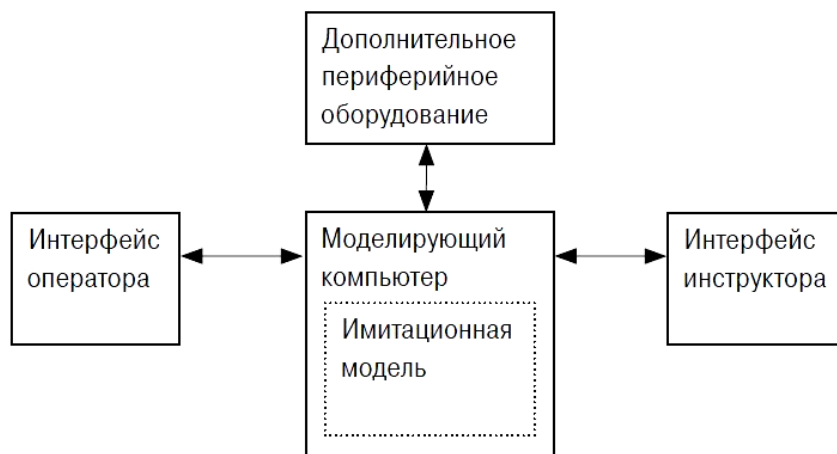


Рис. 2. Структура тренажера-симулятора

– интерфейс инструктора, с помощью которого инструктор выбирает сценарий тренинга и начальное состояние моделируемого процесса, изменяет его параметры либо варьирует условия внешней среды, задает критические и аварийные ситуации и т. д., а далее на основе данных о действиях обучаемых он анализирует результаты прошедшей тренировки, разбирает совершенные обучаемыми ошибки, варьирует темп выполнения заданий и уровень их сложности;

– дополнительное периферийное оборудование, в частности приборные панели и другие устройства, необходимые для повышения реалистичности моделируемого рабочего места.

В качестве примера применения симуляционных технологий для производственного оборудования рассмотрим симулятор работы систем электроприводов в реальном времени,

что является актуальной задачей, так как проведение экспериментальных исследований и пусконаладочных работ в области производственных систем часто связано с определенными сложностями, такими как ограничения технологического порядка и высокий риск повреждения оборудования, а это затрудняет процесс обучения как студентов, так и технического персонала. Симуляторы электрооборудования используются для моделирования в реальном времени динамических характеристик электродвигателя, преобразователя, систем «преобразователь-двигатель» или «преобразователь-двигатель-механизм» [11]. Например, для наладки системы управления электропривода может использоваться симулятор силовой части электропривода, моделирующий работу преобразователя, электродвигателя и нагрузки, который принимает реальные сигналы управления ключами преобразователя и выдает сигналы обратных связей в систему управления.

Аппаратно-программный симулятор может быть выполнен на базе персонального компьютера, работающего под управлением операционной системы реального времени и реализующего сложные алгоритмы обработки входных сигналов [11]. Вариант реализации симуляторов на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) получил широкое распространение благодаря ее высокому быстродействию и наличию удобных средств программирования. На рис. 3 показана структура такого симулятора, созданная на основе компьютерного оборудования National Instruments. Современные средства обработки информации позволяют выполнять решение уравнений математических моделей сложных электроприводов и систем в «реальном времени», что обеспечивает возможность построения программно-аппаратных симуляторов, которые могут эффективно использоваться для проектных и пуско-наладочных работ, а также с целью обучения студентов и производственного персонала предприятий.

Важным направлением применения симуляционных технологий является медицина. В основе медицинского симуляционного обучения лежат технологические решения по имитации как отдельных взятых органов, так и целых систем жизнедеятельности человека, а также разнообразных патологических процессов, протекающих в организме. Элементы симуляции в медицинском образовании используются достаточно давно, например, в реаниматологии существует в течение полувека отработка навыков сердечно-легочной реанимации с использованием манекенов, однако лишь в последние 5-10 лет быстрое развитие информационных технологий в области медицинских наук позволило создавать полноценные симуляционные центры с современной структурой, программами обучения и усовершенствованным контролем как полученных теоретических знаний, так и практических навыков. Основой для развития симуляционных технологий является возможность максимально безопасной отработки практических методов и навыков манипуляций на специализированном оборудовании, повторяющем органы и целые системы человеческого организма (внутримышечных и внутривенных инъекций, сердечно-легочная реанимация, зондирование желудка) [12-15].

Ключевой составляющей симуляционного обучения является реалистичность, приближенная к максимально возможной. В настоящее время в симуляционных центрах предусматривается имитация рабочих мест, ничем не отличающихся от их рабочих мест в медицинских организациях: палаты реанимации, приемного отделения, машины скорой помощи, места техногенной катастрофы или жилого массива. Симуляционное оборудование классов подбирается в соответствии с требованиями, перечисленными выше. Для практических заня-

тий со студентами в рамках подготовки врачей скорой помощи используют интерьеры автомобилей, на месте «чрезвычайного происшествия» слышен звук сирены, присутствует запах дыма, выдерживается соответствующий световой шум. Манекены одеты в соответствующую ситуации и обстановке одежду. Во время процесса отработки оказания медицинской помощи используются те же инструменты и аппаратура, с которыми медицинский персонал работает в реальной клинической практике (ампулы, флаконы с растворами, воздуховоды, жгуты, зонды и т. д.). Оборудование для мониторинга показателей жизненно важных функций соответствует задачам, поставленным для обучения врачей, и используется в больнице при реанимации реальных пациентов [16, 17].

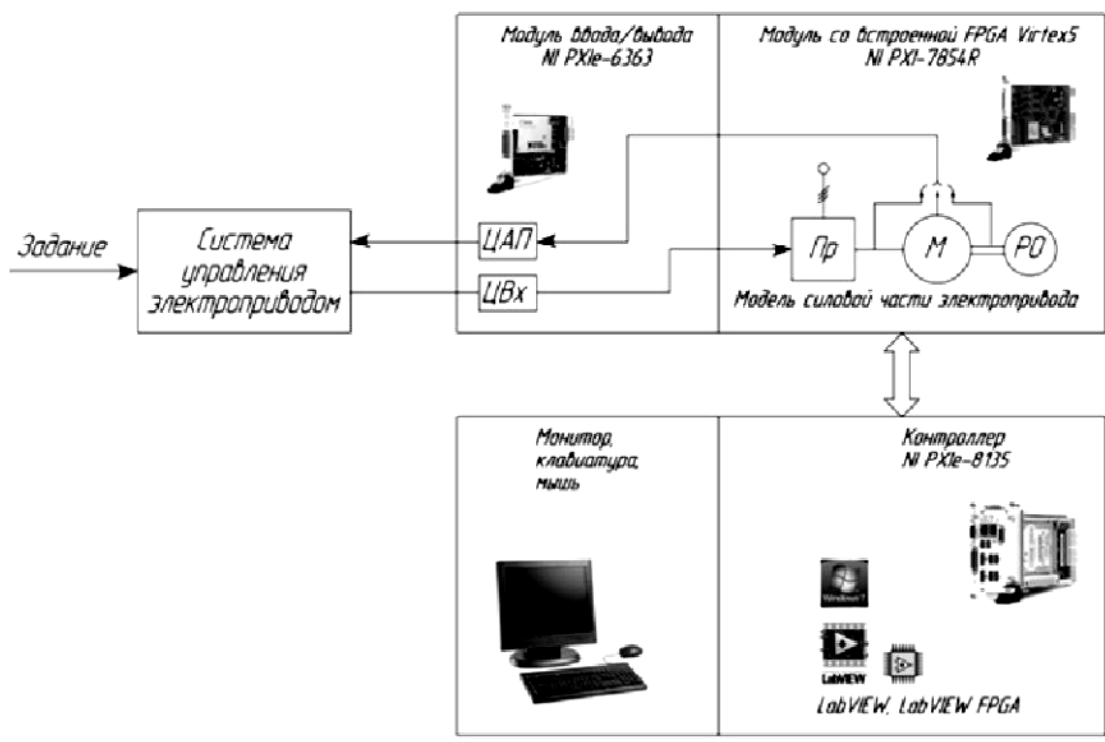


Рис. 3. Структура симулятора на базе ПЛИС:
 ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ЦВх – цифровые входы,
 Пр – преобразователь, М – двигатель, РО – рабочий орган

Именно при помощи симуляционных технологий имеется возможность многократно и точно воссоздавать всевозможные клинические сценарии и возможность адаптировать учебную ситуацию под каждого обучающегося, чтобы специалист максимально полно овладел навыками необходимыми в его каждодневной работе с пациентами. Создаются учебные задачи, в процессе которых допустим и негативный исход медицинской помощи [18, 19].

Для обучения в симуляционных центрах может использоваться такое технологическое оборудование как симулятор эндоскопической хирургии [20], который представляет собой аппаратно-программный комплекс, позволяющий обучать как базовым навыкам, так и узкоспециализированным, лапароскопическим процедурам и выполнению хирургических операций. Фактически это тренажер, на котором хирург «отрабатывает» операцию, прежде чем отправиться к реальному пациенту.

Аппаратно-программный комплекс включает манипуляторы оригинальной разработки, реалистично имитирующие вид и ощущения при работе с лапароскопическими инструментами и камерой. Для построения реалистичных операционных сцен используются анатомически достоверные 3D-модели органов и тканей. Очевидно, чтобы овладеть техникой лапароскопических и эндоскопических операций, необходимо приобрести соответствующие мануальные навыки путем предварительных тренировок. Для этих целей используются различные симуляционные автоматизированные системы различных моделей (виртуальных тренажеров), одними из которых являются модели: LAP Mentor III (рис. 4, а) и LapSim (рис. 4б). Экономичные лапароскопические тренажеры, в которых используются инновационные средства обучения. Каждая платформа полностью совместима со всеми модулями от базовых лапароскопических задач и наложения швов (со сменными шовными ручками) до завершения процедуры обучения [21, 22].



Рис. 4. Виртуальные тренажеры:
а – симулятор LAP Mentor III; б – симулятор LapSim

Данные модели отвечают всем эргономическим потребностям, необходимым для комфортной практики лапароскопических навыков и процедур, включая регулируемую высоту и оптимальное положение монитора, чтобы обеспечить поддержание идеальной позы и положения рук в течение длительных периодов обучения. Тактильный опыт обратной связи по сопротивлению тканей через хирургические инструменты обеспечивает реалистичное ощущение выполнения лапароскопической хирургии. Данные симуляторы достаточно приближены к реальным операциям, что помогает отработать навыки их проведения.

Для обучения нейрохирургов используется множество симуляторов типа «виртуальная реальность», один из самых функциональных и модернизированных из них это НейроVR (рис. 5а). Данный аппарат предназначен для отработки нейрохирургических вмешательств по поводу опухолей головного мозга в виртуальной реальности. Система имитирует объемное 3D-изображение, которое нейрохирург наблюдает в бинокулярный микроскоп, а роботизированное устройство обеспечивает тактильную чувствительность. Реалистичное моделирование биомеханики тканей помогает также и опытным хирургам отработать предстоящие нейрохирургические вмешательства [23].

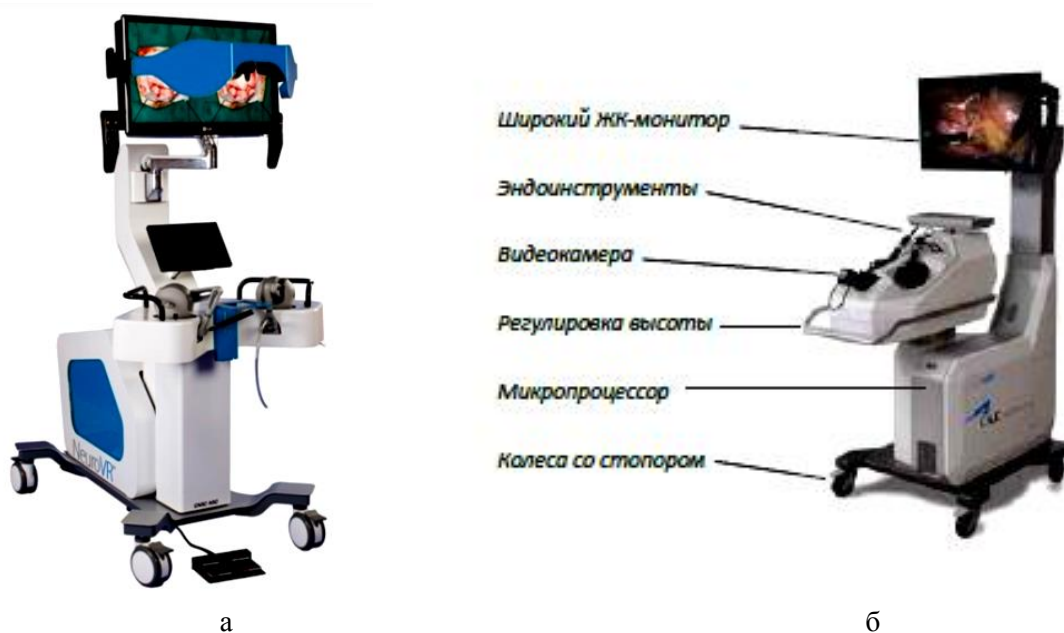


Рис. 5. Виртуальные симуляторы:
а – виртуальный симулятор нейрохирургии; б – симулятор LapVR

Симулятор LapVR (рис. 5б) разработан для отработки владения эндохирургическим инструментарием, приобретения новых практических навыков и приемов выполнения различных эндохирургических вмешательств в различных видах хирургии. В состав симулятора входят следующие учебные модули: набор базовых упражнений, базовые навыки эндоскопического шва, упражнения по клиническим навыкам, клинические навыки эндоскопического шва, абдоминальные вмешательства (холецистэктомия), гинекологические вмешательства [24].

Обучение хирургов на различных симуляторах должно кардинально сократить ошибки, которые допускают как начинающие, так и опытные врачи. Ведь это прекрасная возможность отработать навыки хирургических операций, довести все до автоматизма, прежде чем приступить к настоящим операциям, где малейшая ошибка может стоить человеческой жизни.

С недавнего времени в Саратовском государственном медицинском университете им. В.И. Разумовского в обучении врачей и подготовке к олимпиадам студентов студенческого научного кружка кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии используется виртуальный тренажер LAP Mentor III. Как говорилось выше, он дает возможность довести все навыки до автоматизма, что дает оператору концентрироваться на хирургической операции, а не на управлении манипуляторами. О качестве такой подготовки красноречивее всего говорят результаты студентов, занимающих призовые места на конкурсах по хирургии различного уровня.

Симуляторы предназначены для отработки практических навыков как начинающих, так и уже опытных хирургов с возможностью индивидуальной настройки сложности выполнения учебного курса и последующей сертификацией врачей по его окончанию. Программное обеспечение симулятора представляет возможность обучающемуся выбрать нужный

уровень сложности обучения (от базовых до сложных), ознакомиться с целями работы, просмотреть различные видео реального вмешательства. После того, как упражнение пройдено, можно ознакомиться с итоговыми таблицами с объективной оценкой показателей и получить методические советы по улучшению навыков. Также возможен повторный просмотр выполненного в ходе обучения вмешательства. В программе курса могут быть сконфигурированы различные уровни сложности, количество повторений того или иного навыка, последовательность и проходной балл, который позволяет перейти к следующему заданию. Данные особенности позволяют использовать симулятор не только как учебное пособие, но и как инструмент для сертификации врачей.

Для подтверждения выводов о пользе использования различных симуляторов при подготовке хирургов приведем результаты исследований, выполненных в Швеции под руководством доктора Г. Альберга [25]. В ходе исследования принимали участие 13 хирургов, которые не имели опыта выполнения лапароскопических вмешательств. Группу произвольно разделили на две: основную и контрольную. Основная группа обучалась с помощью виртуального симулятора лапароскопических операций – тренажера LapSim с целью овладеть уровнем практических навыков «ЭКСПЕРТ» (18 упражнений с различной сложностью). Контрольная группа обучалась с использованием традиционной методики (ассистировали на операциях, самостоятельное обучение различным навыкам на стандартных тренажерах и т. п.). После обучения хирурги обеих групп были допущены к выполнению самостоятельных несложных лапароскопических операций. Каждый хирург выполнил по 10 операций, видеозаписи которых были оценены несколькими экспертами, результаты сопоставлялись и суммировались. Оценивалось количество допущенных ошибок в ходе каждой операции.

В ходе проверки были выделены основные ошибки, которые допускали хирурги (неправильная диссекция, повреждение близлежащих тканей, повреждение органов и ряд других), причем наблюдалось достоверное различие в количестве ошибок. Хирурги, которые проходили обучение на симуляторе, допускали от 23 до 33 ошибок за одну операцию. Хирурги контрольной группы, которые обучались по общепринятым методикам, допускали от 58 до 114 ошибок за одну операцию. Также отмечалось, что с приобретением опыта начинающие хирурги стандартного обучения становились менее осторожными и соответственно допускали большее количество ошибок по сравнению с началом исследования. Однако такой тенденции не наблюдалось во второй группе, где обучение происходило с помощью симулятора. Таким образом, установлено, что использование симуляторов в процессе обучения существенно снизило количество ошибок, которые допускаются начинающими хирургами в процессе своих первых операций, поэтому прежде чем допускать хирургов до самостоятельного выполнения лапароскопических операций, они должны достаточно хорошо овладеть практическими навыками на симуляторе и подтвердить свой приобретенный уровень.

По результатам проведенного анализа необходимо отметить, что эндоскопические операции отличаются от традиционной хирургии использованием совершенно иных практических навыков. Даже специалист с обширным хирургическим опытом не сможет применить его на практике, если он не обладает базовыми навыками использования эндоскопической аппаратуры. Именно поэтому столь важно уделять больше внимания обучению на различных симуляторах для отработки навыков. Обучение на виртуальных тренажерах также способствует снижению допущенных ошибок в ходе выполнения операций.

В СГМУ им. В.И. Разумовского симуляционное оборудование помогает готовиться к конкурсам, олимпиадам, универсиадам по хирургии внутривузовского, регионального и всероссийского масштаба, о чем свидетельствуют занятые призовые места как общекомандные, так и в отдельных конкурсах [26-28]. Особенно ценны занятые первые места в конкурсах, где необходимо производить сложные хирургические операции, например такую, как нефрэктомия с использованием виртуального тренажера [27].

Из изложенного выше следует, что информационные технологии, в частности симуляционные, рекомендуется использовать как дополнительный инструментарий в процессе обучения, причем для обучающегося они выполняют функции как преподавателя, так и инструментального средства.

В функции «преподавателя» симуляционные технологии представляют собой источник учебной информации, тренажер – симулятор, средство контроля освоения материала и т. п.

В функции «инструментального средства» симуляционные технологии выступают как средство моделирования процессов в объекте и действий обучаемого.

Из опыта применения симуляционных технологий при обучении следует, что наиболее важным показателем эффективности их использования является достижение методических и дидактических целей. В данном случае при применении симуляционных технологий дидактическими целями являются: индивидуальный подход к обучающемуся, реализация мониторинга на основе обратной связи, реализация условий для самообучения и самоконтроля, сокращение времени обучения за счет применения компьютера, визуализация учебной информации, формирование способности принимать решение в сложной ситуации и ряд других.

Обучение на симуляторах помогает раскрыть потенциал студентов и начинающих врачей в соответствии с современными алгоритмами и методами оказания неотложной помощи, повысить качество проведения медицинских манипуляций, критически оценивать эффективность проведенных действий, овладеть навыком командной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компьютерные тренажеры-симуляторы широко используются там, где использование реальной системы для целей профессионального обучения или переподготовки оказывается неэффективным, дорогостоящим, опасным, неудобным или невозможным. Симуляторы программно-аппаратных средств позволяют решать задачи моделирования процессов в объекте и его реакции на воздействия как со стороны внешней среды, так и обучаемого с высокой степенью достоверности, что способствует существенному повышению эффективности приобретения профессиональных компетенций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудырев Ф.Ф., Максименкова О.В. Симуляторы и тренажеры в профессиональном образовании: педагогические и технологические аспекты // Вопросы образования = Educational Studies Moscow. – 2020. – № 3. – С. 255-276.

2. Много симуляторов хороших и разных: для учебы, работы и жизни [Электронный ресурс]. 2020. – Режим доступа: <https://academy.webinar.ru/journal/mnogo-simulyatorov-horoshih-i-raznih-dlya-uchebi-raboti-i-zhizni>.
3. История авиационного тренажеростроения (ЦНТУ «Динамика»: Авиационные технологии, 2020). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dinamika-avia.ru/mcenter/forum/detail.php?id=1027> –
4. Болелов Э.А., Прохоров А.В., Прокофьев И.О. Авиационные тренажеры: учеб. пособие. – М.: Изд. дом Академии Жуковского. 2018. 48 с.
5. Комплексный тренажер экипажа вертолета Ми-28Н на динамической платформе. 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.dinamika-avia.ru/product/flight/kompleksnyu-trenazher-ekipazha-vertoleta-mi-28n-na-dinamicheskoy-platforme/?clear_cache=Y.
6. Комплекс тренажеров РС МКС (ФГБУ «НИИ Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина»). 2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gctc.ru/main.php?id=2872>
7. Тренажер электропоезда ЭС1 «Ласточка»: история разработки, технологии, результаты (2018) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/408885/>
8. Фролов Д.А. Архитектура и сценарии компьютерного тренажера для подготовки персонала промышленных предприятий // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 4 (73). – С. 197-202.
9. Вагин Р.Н. Разработка компьютерных тренажеров-симуляторов // Молодежь и наука: сб. матер. IX Всерос. конф. [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/section111.html>, свободный.
10. ГОСТ 26387-84. Межгосударственный стандарт. Система «человек-машина». Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.
11. Аппаратно-программные симуляторы электротехнических комплексов / А.М. Зюзев, М.В. Мудров, К.Е. Нестеров, М.В. Поляков // Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015): тр. Междунар. шестнадцатой науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УФУ, 2015. – С. 159-162.
12. История появления и развития медицинских тренажеров и симуляторов (2020) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eksword.ru/medicina/istoriya-poyavleniya-i-razvitiya-medicinskih-trenazhe-rov-i-simulyatorov.shtml>
13. Симуляционное обучение в медицине / под ред. А.А. Свистунова; сост. М.Д. Горошков. – М.: Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, 2013. – 288 с.
14. Евдокимов Е.А., Пасечник И.Н. Оптимизация образования в области неотложной медицины: роль симуляционных технологий // Медицинский алфавит. – 2013. – Т. 3. – № 17. – С. 8-13.
15. Вопросы использования информационных технологий в высших учебных заведениях [Электронный ресурс] / С.А. Игнатъев, С.В. Слесарев, С.В. Федюков, М.А. Терехова // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5171
16. Актуальные вопросы применения информационных технологий в высших учебных заведениях / С.А. Игнатъев, С.В. Слесарев, С.В. Федюков, М.А. Терехова // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. статей XVIII Междунар. конф. – Пенза: ПДЗ, 2018. – С. 137-141.

17. Медицинские симуляторы: история развития, классификация, результаты применения, организация симуляционного образования [Электронный ресурс] / М.Е. Тимофеев, С.Г. Шаповальянц, В.Г. Полушкин и др. // Вестник Новгородского государственного университета. – 2015. – № 2 (85). – С. 53-59. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/meditsinskie-simulyatory-istoriya-razvitiya-klassifikatsiya-rezultaty-primeneniya-organizatsiya-simulyatsionnogo-obrazovaniya>, свободный.
18. Симуляционное обучение в медицине [Электронный ресурс]. – Вузовская педагогика – 2019: сб. тр. Всерос. конф. Красноярск, 2019. – Режим доступа: <http://medical-science.ru/?p=16374>
19. РОСМЕДОБР-2019 / РОСОМЕД-2019. Инновационные обучающие технологии в медицине: сб. тр. X Междунар. конф. [Электронный ресурс]. – СПб., 2019. – Режим доступа: <https://rosomed.ru/conferences/46>.
- 20.– Обучение эндохирургии и эндоскопии. Ошибки начинающих хирургов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.laparoscopy.ru/edu/lapsim-study.html>
21. 3D Systems, Lap Mentor – виртуальный симулятор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simbionix.ru/LapMentor>
22. Симулятор LapSim. Виртуальные тренажеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://virtumed.ru/virtualnye-simulyatory/lapsim.html> –.
23. НейроВР, виртуальный симулятор нейрохирургии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://intermedica.biz/catalog/virtualnaa-medicina/hirurgia/neirohirurgia/neirot-virtualnyi-simulator-neirohirurgii>
24. Интермедика, виртуальный симулятор лапароскопии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://intermedica.biz/catalog/virtualnaa-medicina/hirurgia/otkrytaa-i-endoskopiceskaa-hirurgia-urologia-ginekologia/lapvr>
25. Примеры медицинских виртуальных симуляторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geotar-med.ru/catalog/virtualnye-simulyatoryi/>
26. Успешное выступление команды кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sgmu.ru/news/6325.html>
27. Всероссийская олимпиада по хирургии с международным участием [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sgmu.ru/news/6067.html>
28. Поволжская олимпиада по хирургии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sgmu.ru/news/5895.html>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Игнатъев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры педагогики, образовательных технологий и профессиональной коммуникации Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского

Stanislav A. Ignatiev – Dr. Sc. Tech., Professor Department of Pedagogy, Educational technologies and Professional Communication, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Добряков Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir A. Dobryakov – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Technology and Management Systems in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Федюков Сергей Валерьевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры педагогики, образовательных технологий и профессиональной коммуникации Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского

Sergey V. Fedyukov – PhD (Economics), Professor Department of Pedagogy, Educational Technologies and Professional Communication, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Слесарев Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры педагогики, образовательных технологий и профессиональной коммуникации Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского

Sergey V. Slesarev – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Pedagogy, Educational Technologies and Professional Communication, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Букин Иван Александрович – ординатор кафедры скорой неотложной анестезиолого-реанимационной помощи и симуляционных технологий в медицине Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского

Ivan A. Bukin – Resident Physician, Department of Emergency Anesthesiology and Resuscitation Care and Simulation Technologies in Medicine, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Статья поступила в редакцию 20.10.20, принята к опубликованию 25.11.20

А.Г. Мотков

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

***Аннотация.** Рассматриваются вопросы использования виброакустического метода свободных колебаний для выявления дефектов в объектах различной структуры, проанализирована элементная база для реализации данного метода и методики анализа результатов измерений.*

***Ключевые слова:** виброакустическая диагностика, дефекты, свободные колебания, неразрушающий контроль*

A.G. Motkov

VIBROACOUSTICAL FREE OSCILLATION METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING

***Abstract.** The article considers the issues of vibroacoustic free oscillation method applied to detect the defects in objects with various structures. The provided analysis focuses on the primary basis required for implementation of the given method, and techniques for analyzing the measurement results.*

***Keywords:** vibroacoustic diagnostics, defects, free oscillations, non-destructive testing*

ВВЕДЕНИЕ

Метод неразрушающего контроля, основанный на свободных колебаниях, является одним из самых первых. Еще с древних времен по дребезжащему стуку определяли качество посуды и обнаруживали дефекты, такие как трещины, сколы и другие. Из-за своей простоты и значительной эффективности, этот метод дожил до наших дней и продолжает пользоваться популярностью. Так, например, метод свободных колебаний нашел широкое применение в железнодорожном транспорте, где нередко на станциях можно увидеть человека с молотком, простукивающего буксы колес железнодорожного состава и определяющего дефекты, способные привести к аварии.

Метод свободных колебаний относится к методам неразрушающего контроля, в основе которого лежит измерение частоты собственных колебаний. Метод разделяется на два основных подвида: свободных и вынужденных колебаний, которые, в свою очередь, имеют свои особенности и направления. Такая классификация приведена на рис. 1 [1].

Наиболее широкое применение метод нашел в железнодорожной отрасли, а также для определения физико-механических свойств различных изделий и материалов. Работа метода

объясняется наличием корреляционных зависимостей между характеристиками материала и такими свойствами как плотность, твердость, прочность, а также параметрами их изготовления.

Во время работы метода происходит измерение частоты собственных колебаний изделия в зависимости от конкретного вида колебаний, рассчитывают скорость звука, далее определяют физико-механические свойства.

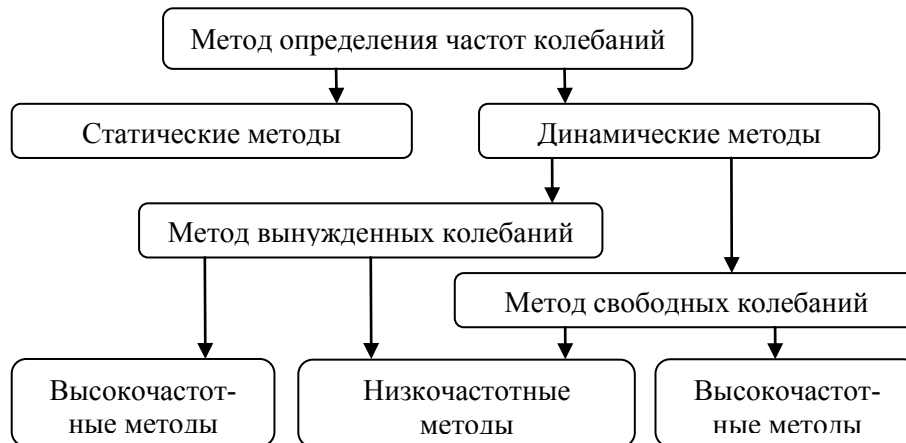


Рис. 1. Классификация методов определения частот колебаний

Метод реализуется за счет отечественной и зарубежной элементной базы. В качестве примера можно привести измерители частоты собственных колебаний типа «Звук-107» и «Звук-203», а также зарубежные приборы «GrindoSonic». Они различаются методикой измерения и расшифровки спектра частот собственных колебаний. Данные приборы применяются для контроля изделий, таких как абразивные круги, режущие пластинки из керамики и твердого сплава, бруски. При этом в данных приборах реализуется метод вынужденных колебаний, и в основной своей массе не могут быть применены для изделий малых габаритов.

Также имеются приборы серии ИСЧК-1, ИСЧК-2 основным назначением которых является определение характеристик абразивных кругов и лопаток турбин по спектральным составляющим [2].

МЕТОДЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В ряде случаев на предприятиях, осуществляющих восстановление узлов и деталей железнодорожного транспорта, возникает задача оперативного оценивания состояния колец буксовых подшипников. Одним из наиболее важных моментов является выявление трещин в кольцах, так как их наличие существенно влияет на надежность подшипников в процессе эксплуатации.

Известен вихретоковый метод контроля поверхностного слоя колец подшипников, однако он позволяет определить дефект на глубине 20-50 мкм [3]. Ультразвуковой метод позволяет определить наличие трещин в структуре колец, однако измерение выполняется достаточно длительное время из-за необходимости сканирования поверхности кольца [4-6].

Метод свободных колебаний активно используется для дефектоскопии клееных изделий и конструкций [7-10], а также абразивных и керамических изделий [7, 11] и изделий из алюминия [12]. Интересна методика, реализованная Гельманом Л.М. [2, 13, 14] по выявлению зависимости между декрементом затухания виброакустического сигнала и размера трещины в титановой лопатке первой ступени компрессора. Установлена связь размера трещины с изменением декремента затухания.

Наряду с Л.М. Гельманом исследования колебаний упругих тел с «дышащей» несплошностью (или трещиной) материала проводил Матвеев В.В. [15-17] и Ройтман А.Б. [18]. Все эти методы используют различные параметры колебательного процесса, начиная от изменения собственных частот объекта исследования [19] и заканчивая такими характеристиками как асимметрия волны цикла колебаний по длительности и максимальному отклонению на полупериодах разного знака.

Виброакустический интегральный метод свободных колебаний активно применяется для выявления трещин, сплошностей и других внутренних дефектов для клееных конструкций, изделий из титана и абразивных материалов [2, 6, 12-17]. Также известно применение данного метода для выявления дефектов в рельсах и осях колесной пары [20, 21]. Исследование полученных сигналов осуществлялось путем анализа гармонических составляющих акустического сигнала.

Информационный поиск по вопросу применения виброакустического (ВА) метода к свободным кольцам подшипника результата не дал, следовательно, необходимо произвести методическое обоснование возможности применения метода. Применение ВА метода подразумевает под собой изучение и анализ виброакустических сигналов, полученных при импульсном воздействии на объект контроля.

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В СВОБОДНЫХ КОЛЬЦАХ ПОДШИПНИКА

Рассмотрим кольцо как динамическую систему (ДС), у которой имеется входное воздействие, осуществляемое бойком, регистрируется вибродатчиком выходное воздействие, а само кольцо размещается на демпфирующей опоре [22].

При ударе шариком, играющим роль бойка, входное воздействие с точки зрения теории автоматического управления [23] можно рассматривать как дельта-импульс, а выходное – как импульсную переходную функцию $w(t)$.

На основании импульсной переходной функции можно получить передаточную функцию динамической системы кольца подшипника, по которой определяется параметр, позволяющий однозначно идентифицировать состояние объекта контроля на наличие дефектов, а именно добротность.

Добротность напрямую связана с частотой собственных колебаний кольца подшипника и коэффициентом затухания колебаний.

Для определения влияния размера трещины в кольцах на добротность колец использовались эталонные кольца с одиночными трещинами, выявленными другими методами, в частности ультразвуковым [4-6]. Минимальный размер трещины – порядка 200 мкм, фиксируемые УЗ методом, определялся техническими возможностями дефектоскопа УД 2-12 [6]. Количество измерений каждого из колец – 25, что обеспечивает достоверность экспериментальных данных.

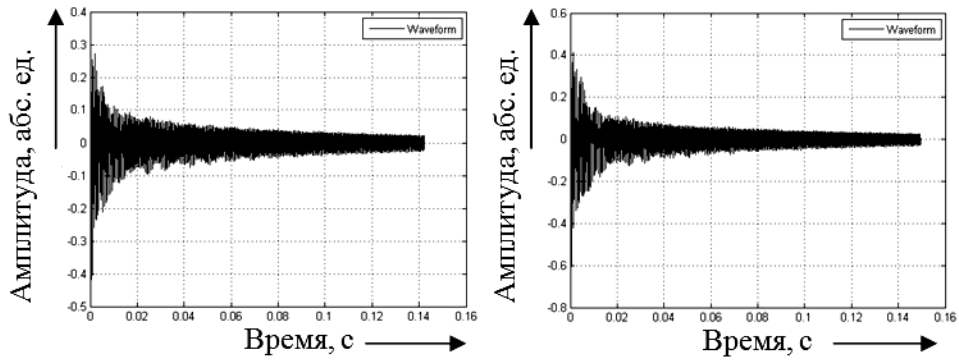


Рис. 2. Импульсные переходные функции кольца с дефектом 396 мкм при повторных измерениях

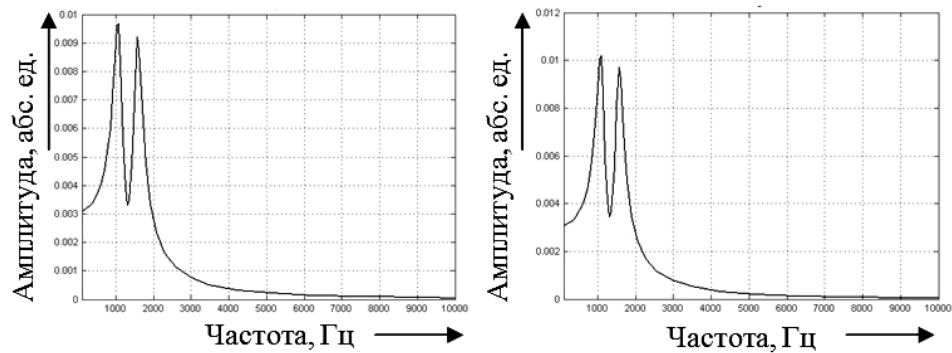


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики кольца с трещиной 396 мкм при повторных измерениях

По проведенным экспериментам можно судить о том, что добротность кольца подшипника с дефектом в 396 мкм варьируется в пределах 2,02-2,24, при этом значения полосы пропускания находятся в пределах от 688 до 763 Гц, а резонансная частота – 1524-1560 Гц. Как видно, значения добротности и резонансной частоты имеют небольшие отклонения, при этом значения полосы пропускания варьируются значительно.

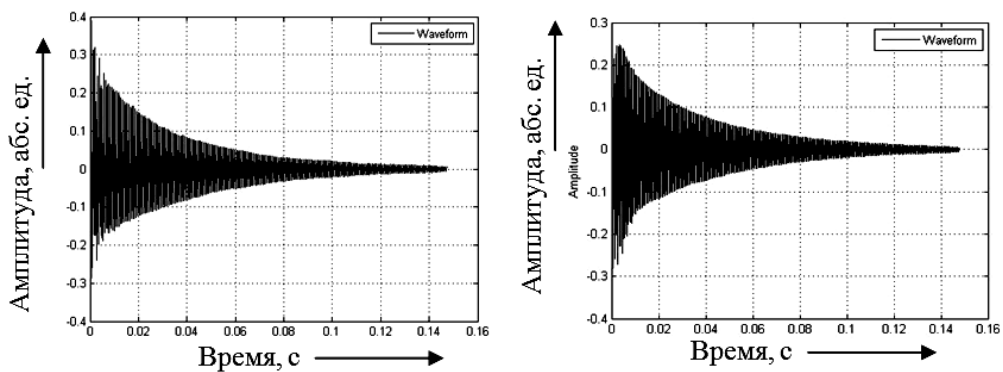


Рис. 4. Импульсные переходные функции кольца без дефекта при повторных измерениях

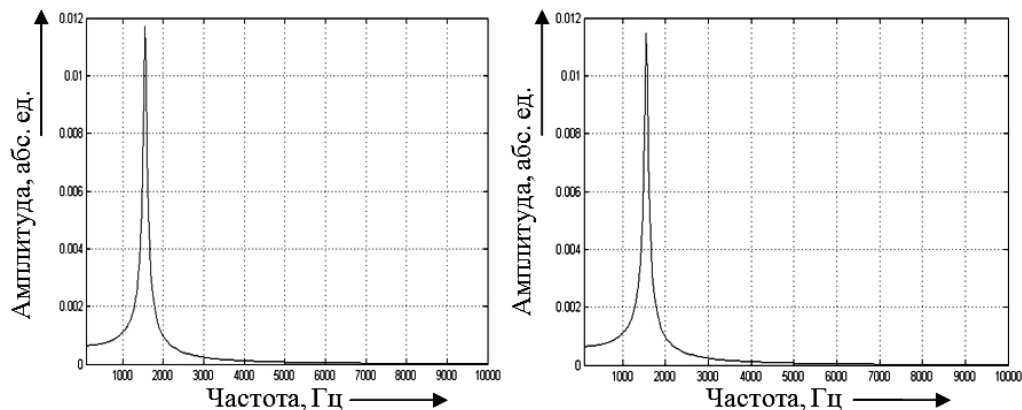


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики кольца без трещины

Из приведенной таблицы видно, что значение добротности кольца на основании экспериментальных данных принимает значения для кольца без дефекта от 15,08 до 16,5.

На основании приведенных значений можно сделать вывод, что при уменьшении величины добротности кольца относительно эталонного следует говорить о наличии в нем дефекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали пригодность использования метода свободных колебаний для поиска дефектов в различных деталях изделий сложной формы, выполненных из различных материалов, в том числе и в свободных кольцах подшипников колесной пары вагонов.

Результаты испытаний при использовании метода свободных колебаний следует сравнивать с заведомо качественным образцом без дефектов, принятым за эталонный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глаговский Б.А., Московенко И.Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Гельман Л.М., Горпинич С.В. Виброакустический метод свободных колебаний для неразрушающего контроля трещин // Акустичний вісник. – 1999. – Т. 2. – № 4 – С. 13-22.
3. Иванова Ю.А. Повышение ресурса буксовых подшипников грузовых вагонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. – Омск, 2009. – 17 с.
4. Мотков А.Г., Щеголев С.С., Игнатьев А.А. Использование ультразвуковых методов для определения дефектов внешних колец подшипников качения колесной пары вагона // Современные вопросы науки и образования – XXI век: сб. науч. тр. Междунар. конф. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-наука-общество», 2012. – С. 160-161.
5. Мотков А.Г., Щеголев С.С. Составление градуировочной шкалы по результатам исследования дефектов различных диаметров // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2013. – С. 242-248.
6. Мотков А.Г., Щеголев С.С., Игнатьев А.А. Составление градуировочной шкалы для дефектоскопа УД 3-103 // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 4 (73). – С. 132-136.

7. Бакунов А.С. Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 6 (168). – С. 72-75.
8. Глаговский Б.А., Московенко И.Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
9. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
10. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим методом свободных колебаний // Клеи. Герметики. Технологии. – 2012. – № 4. – С. 40-45.
11. Московенко И.Б. Неразрушающий акустический контроль качества материалов и изделий методами свободных и вынужденных колебаний: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.11. – СПб., 2002. – 42 с.
12. Игнатович С.Р., Бурау Н.И., Юцкевич С.С. Виброакустическая диагностика усталостной поврежденности образцов из алюминиевого сплава // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9 (45). – С. 124-128.
13. Гельман Л.М., Горпинич С.В., Широков В.Т. Адаптация в виброакустическом методе свободных колебаний // Акустичний вісник – 2000. – Том 3. – № 2 – С. 17-25.
14. Gelman Leonid M., Gorpinich Sergey V. Nonlinear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation // Mechanical System and Signal Processing. – Vol. 14. Iss. 3. – May 2000. – P. 343-351.
15. Матвеев В.В. Приближенное аналитическое определение вибродиагностических параметров нелинейности упругих тел, обусловленной наличием закрывающейся трещины. Сообщение 1. Существующие и предлагаемые методы решения // Проблемы прочности. – 2004. – № 4 – С. 5-20.
16. Матвеев В.В., Босуновский О.А. Приближенное аналитическое определение вибродиагностических параметров упругого тела с трещиной при субгармоническом резонансе. Сообщение 2. Сильный резонанс // Проблемы прочности. – 2008. – № 3. – С. 5-16.
17. Матвеев В.В., Богинич О.Е. Приближенное аналитическое определение вибродиагностических параметров наличия трещины в упругом теле при супергармоническом резонансе // Проблемы прочности. – 2010. – № 4. – С. 5-19.
18. Ройтман А.Б. Вибрационная диагностика «дышащих» трещин в изделиях // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – № 1. – С. 58-66.
19. Генкин М.Д. Акустическая динамика машин и конструкций. – М.: Наука, 1973. – 112 с.
20. Ваньков Ю.В. Методы и устройства контроля технического состояния изделий по параметрам собственных колебаний на основе конечноэлементного моделирования и статистических критериев сравнения спектров: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13. – Казань, 2004. – 32 с.
21. Десятников В.Е. Разработка методики и системы диагностики осей и колес железнодорожных вагонов методом собственных частот с применением тарированного излучателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. – Н. Новгород, 2009. – 23 с.
22. Клюев В.В. Неразрушающий контроль: справочник. – Т. 1. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.

23. Игнатьев А.А., Мотков А.Г., Щеголев С.С. Идентификация кольца подшипника как динамической системы // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 2 (75). – С. 172-178.

24. Мотков А.Г., Игнатьев А.А. Идентификация кольца подшипника как динамической системы при импульсном воздействии // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2014. – С. 63-68.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Мотков Александр Геннадьевич – старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии» Балаковского инженерно-технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Alexander G. Motkov – Senior Lecturer, Department of Information Systems and Technologies, Balakovo Institute of Engineering and Technology, branch of National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute)

Статья поступила в редакцию 02.11.20, принята к опубликованию 25.11.20

**В.Ю. Мусатов, В.И. Вавилов,
Д.Ю. Петров, М.Ф. Степанов, В.В. Сысоев**

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ГАЗА И МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТАХ

***Аннотация.** Проведен анализ возможностей применения искусственного обоняния в системе осязания интеллектуальных мобильных роботов. Показана перспективность использования датчиков газа и систем «электронный нос» в составе мобильных роботов не только для идентификации источников запахов и их распознавания, но и для целей обнаружения и распознавания препятствий, картирования, ориентации и навигации роботов в комплексе с уже применяемыми системами.*

***Ключевые слова:** датчик газа, электронный нос, интеллектуальные роботы, системы ориентации и навигации*

V.Yu. Musatov, V.I. Vavilov, D.Yu. Petrov, M.F. Stepanov, V.V. Sysoev

A POSSIBILITY OF USING GAS SENSORS AND MULTISENSOR SYSTEMS WITH GAS SENSITIVE SENSORS FOR INTELLIGENT MOBILE ROBOTS

***Abstract.** The presented analysis demonstrates the possibilities of bringing artificial olfaction to the sensory system of intelligent mobile robots. The authors point out the prospects of gas sensors and electronic nose systems as components of mobile robots utilized not only to identify and recognize the sources of odour, but also aimed to detect and recognize obstacles, mapping, orientation and navigation of robots within the systems already in use.*

***Keywords:** gas sensor, electronic nose, intelligent robots, orientation and navigation systems*

1. ВВЕДЕНИЕ

В будущем, когда роботы станут частью нашей повседневной жизни в домашней обстановке и на рабочем месте, наблюдение за состоянием окружающей среды можно будет осуществлять с помощью интеллектуальных мобильных роботов, оснащенных искусственным обонянием. Это особенно желательно для различных приложений, например, в области безопасности, контроля, поиска и спасения в шахтах и др. Чтобы оборудовать такие системы «обонянием», в них используют газочувствительные устройства. Предполагается, что датчи-

ки газа должны быть способны обнаруживать множество различных запахов на уровне малых концентраций, быстро и надежно реагировать на присутствие анализируемого газа. Таким образом, мобильный робот с системой искусственного обоняния может выполнять ряд новых задач, которые включают в себя поиск, определение направления и координат источника запаха, создание карт концентраций газов и обеспечение непрерывного контроля газовой среды на большой площади [1].

Ценность интеллектуальных мобильных роботов, имеющих искусственное обоняние, наиболее очевидна в случае газов, которые часто человек не способен распознать. Например, угарный газ является причиной большого количества случайных отравлений и смертей, ежегодно регистрируемых во всем мире [2, 3]. Поскольку окись углерода не имеет запаха и цвета, человек не может обнаружить ее своими органами [4]. Поэтому с целью технического детектирования этого газа и подобных других устанавливают стационарные газовые детекторы или сигнализаторы. Но, к сожалению, сигнализаторы такого рода чувствительны, как правило, и к другим примесям, а также к условиям окружающей среды и местоположению, что сказывается на точности и селективности определения газов. Поэтому с целью устойчивости детектирования и повышения селективности часто используют наборы сенсоров, которые в сочетании с алгоритмами искусственного интеллекта называют системами «электронный нос» [5-8]. При этом, безусловно, мобильная установка имеет преимущество перед стационарной в большем охвате территории. В результате такого рода системы можно использовать более экономично, так как можно использовать датчики по площади, на которой в случае стационарной расстановки их необходимо было бы поставить гораздо больше. Это особенно выгодно, если требуется несколько датчиков для мониторинга других загрязняющих веществ или газов, которые присутствуют совместно с целевым газом. Следует иметь также в виду, что задачи мониторинга загрязнения не обязательно должны выполняться специализированными инспекционными роботами. Вместо этого наблюдение за концентрацией загрязняющих веществ в окружающей среде может осуществляться мобильными роботами, которые в первую очередь предназначены для других задач. В данном обзоре сделана попытка исследования возможности применения газовых детекторов в робототехнике.

1.1. Локализация источников газа

Помимо обнаружения повышенной концентрации газа, очень важна задача локализации источника газа. Мобильные роботы с такой способностью необходимы для таких применений, как «электронный сторож», который способен указывать и обнаруживать опасные утечки газа, утечку растворителей или пожар на его начальной стадии. При наличии подходящих систем распознавания газов можно было бы проводить также автоматическое разминирование или поиск жертв лавин и землетрясений под завалами. Однако локализация источников газа является сложной задачей в естественных условиях из-за турбулентного характера газа, что приводит к его неоднородному, быстро меняющемуся распределению. Соответствующее поле концентрации не указывает путь к его источнику посредством плавного градиента концентрации и не обязательно указывает местоположение источника максимумом мгновенного распределения концентрации [9]. Поэтому задача локализации газового источника может быть разбита на три составляющие [10]:

- обнаружение газа – обнаружение повышенной концентрации целевого газа,
- отслеживание источника газа – следование по сигналам, определяемым по измеряемому распределению газа в направлении источника,
- идентификация источника газа – определение вероятности, что источник газа был найден.

Эта классификация следует предложению Хейса [11] с тем отличием, что существование достаточно сильного и постоянного воздушного потока не предполагается. Такие условия позволяют идентифицировать шлейф от газораспределения, по которому можно проследить его происхождение. Термин «шлейф» относится к воздушному следу газа, который имеет форму, напоминающую форму пера. Однако заметный газовый шлейф не может быть гарантирован, например, в непроветриваемом помещении. Отметим, что полная стратегия локализации газового источника не обязательно включает какой-то вид отслеживания источника, если она подразумевает способ определения местоположения газового источника на расстоянии.

Следует подчеркнуть, что предложения по локализации источников газа могут основываться не только на измерениях датчиков газа. Датчики температуры или влажности могут давать дополнительные сигналы для локализации определенных типов источников газа. В случае достаточно однонаправленного воздушного потока локальное направление восходящего ветра может служить оценкой направления к источнику газа. Измерения воздушного потока могут быть также использованы для более эффективного поиска газа и определения стратегий декларирования источников газа, а система технического зрения может указывать объекты-кандидаты для последующего исследования с использованием стратегии декларирования источников газа.

1.2. Поиск источника газа

В то время как большинство публикаций в области бортового химического зондирования с помощью мобильных роботов посвящены отслеживанию источников газа, до настоящего времени мало внимания уделяется поиску газа и идентификации источников газа. Тем не менее решение этих проблем требуется в дополнение к стратегиям отслеживания источников газов, чтобы обеспечить их локализацию [12]. Однако они так же важны и в других случаях, когда, например, необходимо обнаружить только наличие источника газа (поиск газа) или определить, является данный объект источником газа или нет (объявление источника газа).

Подходящая стратегия поиска газа достаточна для задачи мониторинга, в которой мобильный робот должен только генерировать предупреждение при обнаружении конкретного газа, не предоставляя более подробной информации. Помимо подходящей установки датчиков, задача поиска газа требует главным образом выбора соответствующей стратегии разведки и определения порогового значения, выше которого предполагается наличие целевого газа. Как правило, это пороговое значение должно быть адаптивным, чтобы компенсировать, например, изменяющиеся условия окружающей среды или дрейф датчика. Подходящая стратегия разведки для поиска газа должна учитывать дополнительную сложность, заключающуюся в том, что простой последовательный поиск не гарантирует успеха из-за стохастической природы шлейфа [13].

1.3. Идентификация источника газа

Фундаментальная задача для определения источника газа с использованием только «электронного обоняния» состоит в том, чтобы найти закономерности в турбулентном распределении концентраций, которые позволяют решить, содержит определенная область источник газа или нет. Наиболее простой функцией для поиска является локальный максимум концентрации. Для того чтобы получить среднестатистический показатель для объявления источника газа, необходимо рассмотреть усредненное по времени распределение концентрации. Поиск максимумов в поле мгновенной концентрации мало помогает, так как они часто находятся далеко от источника. Смогут ли обеспечить турбулентное газораспределение дополнительные закономерности, позволяющие надежно определять источники газа, является важным вопросом, на который в настоящее время невозможно дать однозначный ответ. Очень трудно вывести общие характеристики, необходимые для турбулентной тонкой структуры, из уравнений, описывающих турбулентное распространение газа, и вполне возможно, что пропускная способность обычно используемых датчиков газа может быть недостаточной для решения этих задач.

Использование датчиков ветра в дополнение к датчикам газа может быть полезно для поиска источника газа, если поток воздуха может быть надежно измерен. В этом случае корреляция между направлением воздушного потока и измеренной концентрацией целевого газа может быть использована для нахождения его источника, например, путем определения перепада между концентрацией, измеренной в наветренном и подветренном направлениях.

Наличие надежной стратегии декларирования источников газа может быть достаточным для решения проблемы их локализации, даже если полная задача не может быть решена только с помощью датчиков газа и ветра. Объект может быть сначала обнаружен с помощью других сенсоров (например, системой технического зрения), а затем классифицирован с помощью метода идентификации источника газа. Такая процедура предполагает, что потенциальные источники газа могут быть детектированы с помощью дополнительных сенсоров. Предполагая наличие достаточно чувствительных датчиков, возможные области применения включают идентификацию подозрительных предметов, содержащих, например, наркотики или взрывчатые вещества, а также использование спасательных роботов для определения того, жива ли жертва, путем измерения углекислого газа в ее выдохе [1].

1.4. Картирование распределения газа

Другим важным вопросом является картирование распределения газа. В дополнение к временному флуктуационному характеру турбулентного переноса газа необходимо учитывать, что химические датчики газа дают информацию только о малом объеме окружающей среды, с которой взаимодействует их поверхность. Поэтому невозможно измерить мгновенное поле концентрации без использования достаточно большой матрицы датчиков. Однако часто бывает достаточно знать постоянную по времени структуру газораспределения. Это может быть даже более важно, чем, например, знать точное местоположение источников газа, поскольку оно позволяет определить районы, в которых ожидается высокая концентрация вредного газа. Мобильные роботы, способные картировать распределение газа в загрязненной зоне, могут быть использованы в спасательных миссиях персоналом по планированию инцидентов для предотвращения травм или гибели спасателей от взрывов, удушья или ток-

сикации [14]. Другие области применения карт газораспределения включают мониторинг качества воздуха и наблюдение за пешеходными зонами в городах, а также развитие земледелия, когда среднее распределение конкретных газов может быть использовано в качестве неинтрузивного способа оценки состояния почвы или состояния роста растений для обеспечения более эффективного использования удобрений [15].

Создание карты средней концентрации целевого газа также является средством решения проблемы локализации источника газа. Однако такой подход имеет и некоторые недостатки. Во-первых, необходимо, чтобы условия окружающей среды и активность источника газа не претерпевали резких изменений в течение всего периода картографирования. Во-вторых, методы локализации источников газа, основанные на картографировании газораспределения, могут быть медленными из-за времени, необходимого для построения надежного представления средней концентрации, в которой турбулентные флуктуации достаточно «усреднены». С другой стороны, количество затраченного времени уменьшается с количеством используемых роботов к нижней границе, определяемой временем, необходимым для компенсации турбулентных флуктуаций с помощью матрицы датчиков. Еще одним преимуществом является то, что информация о распределении концентраций по всей исследуемой территории может быть использована для повышения точности и достоверности оценки местоположения источника газа.

2. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ОБОНЯНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Бурное развитие машинного обоняния [5] привело к общепринятому определению «электронного носа» [6-8] как прибора, включающего массив гетерогенных электрохимических датчиков газа с частичной специфичностью и систему распознавания образов. В мобильных роботах в основном применяются кондуктометрические датчики, которые работают по принципу измерения относительного изменения сопротивления между двумя электродами. На эти электроды могут быть нанесены различные виды чувствительного материала, свойства которого изменяются при взаимодействии с газом. В частности, широко используются три типа материалов: оксиды металлов, проводящие полимерные композиты и проводящие полимеры. Помимо кондуктометрических датчиков, детектирование газа осуществляется с помощью оптических датчиков, датчиков на поверхностных акустических волнах, газочувствительных полевых транзисторов и кварцевых пьезорезонаторов.

2.1. Анализ зондирования газа в естественной среде

Мультисенсорные системы «электронный нос» широко изучались в лабораторных условиях. Имеются многочисленные публикации, например, в области анализа качества пищевых продуктов [16-19], таких, как мясной фарш [17] или рыба, определение качества спиртных напитков, различение видов кофе [18] и пр. Эти результаты не могут быть воспроизведены при использовании мобильного робота из-за влияния различных условий окружающей среды и из-за ограниченных ресурсов, таких как, например, мощность и доступное пространство на борту. Важным аспектом, который также трудно перенести в мобильную систему, является процесс обработки образцов газа. В большинстве лабораторных приложений (рис. 1) много усилий затрачивается на подготовку проб перед их анализом с помощью

системы датчиков газа. Обычно используются пробоотборники, которые готовят пробу газовой смеси и доставляют ее в камеру, содержащую датчики. Кроме того, хорошие результаты были достигнуты в лабораторных экспериментах с использованием метода измерения, требующего второго газа для сравнения (например, чистый воздух с известной влажностью), который периодически направляется в камеру датчика. Он служит в качестве газа-носителя для образца и эталона для отслеживания базового уровня сигнала датчика. Из-за необходимости работы в режиме реального времени и ограничений по весу, пространству и энергопотреблению обычно невозможно использовать такой же сложный процесс обработки образцов на мобильном роботе.

Вследствие ограниченности ресурсов также трудно достичь достаточно стабильных условий окружающей среды. Например, авторы в работе [20] докладывали о типичной точности температуры $\pm 0,1^\circ\text{C}$, относительной влажности $\pm 1\%$ и скорости потока $\pm 1\%$ в качестве важных условий при использовании технологии «электронного носа». При этом применение таких приборов в составе мобильного робота предполагает, что условия окружающей среды могут существенно меняться. Поэтому исследования в области воздушного химического зондирования с помощью мобильных роботов до сих пор были сосредоточены в основном на использовании датчиков газа для обнаружения известных аналитов и локализации их источников без селективного различения. Иногда полную газочувствительную систему, используемую в мобильном роботе, называют «электронным мобильным носом» [21].

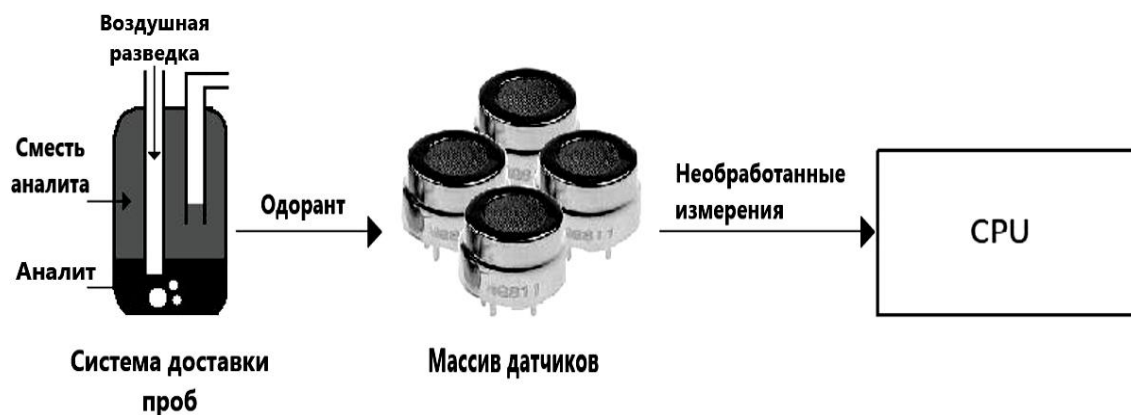


Рис. 1. Блок схема электронного носа в составе мобильного робота (адаптировано из [21])

2.2. Распределение газа в природной среде

Одной из основных проблем локализации источников газа в природной среде является сильное влияние турбулентности на распределение воздушных компонент. Турбулентный транспорт обычно доминирует при рассеянии газа за счет молекулярной диффузии. Например, постоянная диффузии газообразного этанола при 25°C и 1 атм составляет $D = 0,119\text{ см}^2/\text{с}$, что соответствует скорости диффузии $20,7\text{ см/ч}$ [22]. За исключением только некоторых случаев, когда турбулентность неэффективна и диффузия может наблюдаться главным образом вдоль крутых градиентов концентрации, молекулярная диффузия может быть рассмотрена в качестве основного фактора, влияющего на распространение газа. В общем

случае молекулярная диффузия – это движение молекул из области высокой концентрации в область более низкой концентрации, которое описывается законом Фика:

$$V_g = D \times \frac{S}{d} \times \Delta P, \quad (1)$$

где V_g – скорость диффузии (скорость переноса газа), D – константа диффузии, S – площадь барьера, ΔP – разность парциальных давлений газа по обе стороны барьера, d – толщина барьера.

Турбулентное течение имеет несколько общих характеристик [15]. Так, турбулентный поток непредсказуем: мгновенная скорость молекул (и, соответственно, мгновенная концентрация газа) в какой-то момент времени недостаточны для предсказания скорости. Также турбулентный перенос происходит значительно быстрее, чем молекулярная диффузия. Например, на рис. 2 показано цветовое распределение концентрации в моделируемом смешивании газов, обусловленное только эффектом диффузии (снизу, слева) и диффузией и турбулентностью (снизу, справа). В нижней части рисунка показаны моментальные снимки распределения газа, которые образовались из кругового распределения, изображенного в верхней части рисунка. Видно, что турбулентное течение вызывает гораздо более быстрое распространение целевого газа. Этот эффект часто моделируют через эффективный коэффициент турбулентной диффузии или вихревую диффузионность [23, 24].

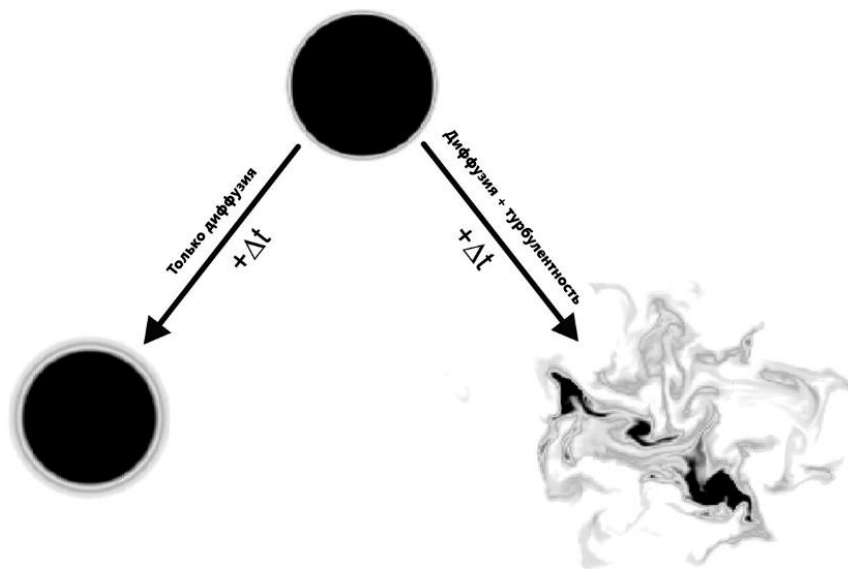


Рис. 2. Сравнение турбулентности и молекулярной диффузии (адаптировано из [23, 24])

Важным аспектом является то, что турбулентная кинетическая энергия передается от больших вихрей к малым, где она рассеивается в тепло вязкими силами. Это часто называют энергетическим каскадом. Величина вязких сил определяет минимальный размер вихря или микроскаль Колмогорова. Также следует отметить, что перенос молекул газов часто определяется самим потоком; такой перенос называют адвективным. Этот механизм обычно эффективен даже в помещении без вентиляции вследствие наличия слабых воздушных потоков, например из-за перепада давления (тяги) и наличия неоднородностей температуры. В последнем случае поток называют конвективным.

Таким образом, поле мгновенной концентрации целевого газа, эмитируемого из статического источника, представляет собой флуктуирующее и, как правило, асимметрично смещенное распределение прерывистых участков высокой концентрации с крутыми градиентами на краях.

2.3. Навигационная тропа запахов

Обонятельные знаки часто используются животными для хранения и передачи пространственной информации. Например, хорошо известно, что муравьи отмечают путь к источнику пищи запаховым следом [25, 26]. Поскольку информация хранится физически в окружающей среде, нет необходимости в сложном представлении окружающей среды в мозгу животного. С помощью изменения интенсивности и частоты разметки следа может передаваться дополнительная информация, например о качестве, к которому ведут пищевые тропы. Химические маркировочные знаки также особенно подходят для кодирования временной информации, поскольку интенсивность запаха со временем падает. Муравьи используют это свойство феромонной коммуникации, когда они указывают на «популярность» соответствующего пути, просто освежая след запаха, по которому они следуют.

Химическая маркировка может быть полезна для целого ряда применений в области мобильной робототехники. Обонятельные следы могут обеспечить со сравнительно низкой стоимостью более гибкую альтернативу металлическим проводам, помещенным под полом, которые часто используются промышленными автоматизированными управляемыми транспортными средствами [27]. Помимо определения пути следования, запаховые следы могут также использоваться для обеспечения временной репеллентной маркировки, указывающей, например, на очищенные участки пола. Кроме того, в таких областях применения как работа автономного мобильного робота в условиях подземных шахт, система искусственного обоняния совместно с расставленными по штреку шахты тарированными источниками запахов (маяками) с известными координатами может использоваться для выработки корректирующих сигналов для автономной инерциальной системы ориентации и навигации робота в отсутствие доступных сигналов спутниковой навигации.

В отличие от задачи локализации удаленного источника газа влияние турбулентности значительно снижается в случае наведения следа из-за малого расстояния от датчика до источника, которое часто составляло порядка 10 мм в экспериментальных работах, опубликованных в этой области. Следы запаха, расположенные на полу, покрыты слоем, в котором воздушный поток является ламинарным. Этот слой настолько тонок, что нынешние роботы не могут измерить концентрации в этой области. Однако по сравнению с экспериментами, в которых необходимо локализовать удаленный источник, близость датчиков к следу вызывает гораздо более сильную дифференциацию среднего градиента концентрации в сигнале датчика. Кроме того, было доказано, что можно увеличить дифференциацию вблизи пола, введя хорошо отрегулированные дополнительные воздушные потоки для блокирования внешних, создавая таким образом «воздушную завесу». Однако следует отметить, что в последнее время возникли противоречия в отчетах о пользе техники воздушной завесы. Так, например, в некоторых работах [28] сообщалось, что граница участка, отмеченного спиртовым чистящим раствором, может быть найдена менее надежно при использовании установки воздушной завесы. Поэтому применение вентиляторов, создающих воздушную завесу, может быть нецелесообразно, и достаточно использовать простой вакуумный датчик газа [27].

2.4. Стратегия нахождения газового следа с использованием двух датчиков

Большинство навигационных стратегий, предлагаемых для следования по маркированному следу, предполагают наличие пары датчиков газа, которые отбирают пробы концентрации анализатора непосредственно над землей. Возможный метод следования по «широкому» следу (т. е. более широкому, чем расстояние между датчиками) был предложен в работе [29]. Он основан на идее разворота робота, если один датчик обнаруживает более низкую концентрацию анализируемого вещества (рис. 3а). В цитируемой работе пара датчиков на основе проводящих полимеров с шагом 0,1 м была установлена на подвижном роботе на высоте 10 мм над землей. Авторы сообщили об одном испытании, когда робот мог успешно следовать вдоль следа, маркированного алкоголем, шириной 0,15 м и длиной 4 м с умеренными поворотами со скоростью 60 мм/с.

Аналогичный алгоритм был предложен в работе [30], в которой робот направляли по следу с помощью датчиков, обеспечивая его повороты в сторону более высокой концентрации с помощью прямой связи между датчиком и двигателем (рис. 3б). Эксперименты проводились на марсианском мобильном роботе со встроенной парой пьезоэлектрических датчиков, установленных на расстоянии примерно 5 мм от поверхности. Робот должен был следовать по узкой «тропе», насыщенной камфарой, которая состояла из двух прямых участков длиной 0,5 м и 30° поворота между ними. Начальная точка робота была выбрана таким образом, чтобы робот обнаружил след между датчиками и первоначально приблизился к нему под углом. Как было показано авторами, при расстояниях между датчиками 50 мм и 30 мм и оптимизированных параметрах управления для соответствующего разделения датчиков, пробеги были проведены в течение около 15 мин.

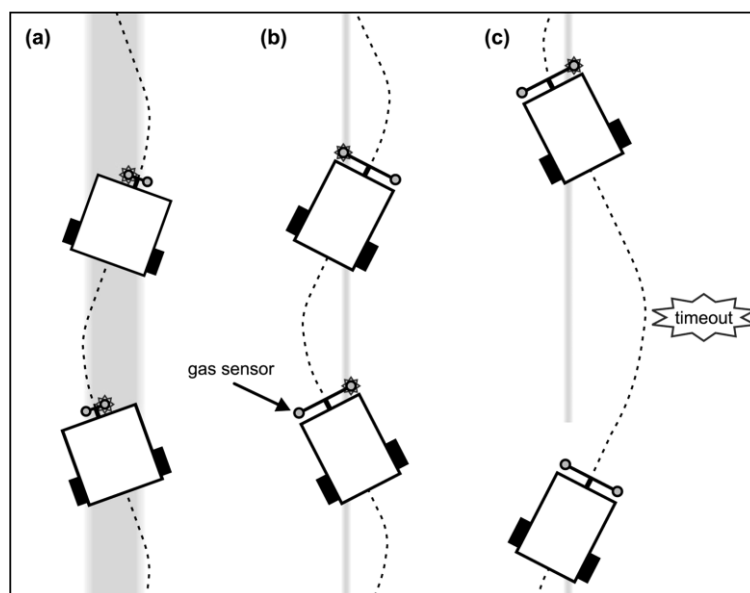


Рис. 3. Движение по газовому следу с использованием двух датчиков [29]

Дальнейшие стратегии отслеживания следа направлены, в частности, на повышение устойчивости к ошибкам датчиков и пробелам или другим несовершенствам следа. Несмотря на то, что более надежной выглядела стратегия следования за следом путем оптимизации обратных разворотов робота, более выраженный эффект был достигнут путем добавления ме-

ханизма тайм-аута, который позволял роботу поворачивать назад к ожидаемому местоположению следа в случаях, когда робот не мог обнаружить след в течение определенного периода времени (рис. 3с). Такой механизм симулировал поведение муравьев, включающее частые пересечения следа по синусоидальной траектории [26]. Благодаря именно этому механизму муравьи способны следовать по феромонному следу с одной удаленной антенной и даже со скрещенными антеннами.

2.5. СТРАТЕГИЯ НАХОЖДЕНИЯ ГАЗОВОГО СЛЕДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОГО ДАТЧИКА

В литературе рассматривают главным образом две основные стратегии наведения на след с помощью использования одного газового датчика (рис. 4). Например, в работе [30] был доложен прототип робота-уборщика, в котором была использована единичная матрица датчиков на основе оксида металла и система воздушной завесы, состоящая из трех малых вентиляторов; центральный вентилятор выталкивает воздух от поверхности вверх, а внешние вентиляторы блокируют внешние воздушные потоки. В ходе предварительных испытаний было продемонстрировано, что робот может обнаружить жидкое химическое вещество, 10 %-ю спиртовую смесь; при этом робот приводился в движение со скоростью примерно 13 мм/с. Это может позволить использовать совместные стратегии очистки, когда роботы-уборщики оставляют пахучий след, указывающий на область, которая уже была очищена (рис. 4а).

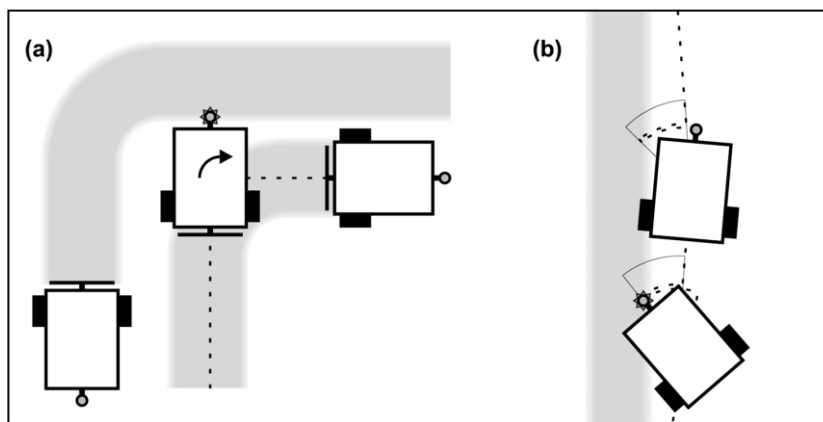


Рис. 4. Поиск газового следа с использованием одного датчика [29]

В более поздних работах в рамках того же проекта авторы докладывали о возможности использования следующего метода определения отмеченной области. Выходные сигналы датчиков газа сначала фильтруются по низким частотам с двумя различными постоянными времени, реализованными в виде взвешенного усреднения по «недавности» с различными константами фильтрации. В то время как быстрый фильтр воспроизводит необработанный сигнал датчика в отчетном эксперименте, он также может быть настроен на фильтрацию высокочастотных помех, что может быть особенно желательно при использовании датчиков с меньшим временем отклика, которые не приспособлены для низкочастотной фильтрации, например, металлооксидные датчики. Начало и окончание химического следа объявляются, когда разность между выходами быстрого и медленного фильтров, который захватывает

среднее значение концентрации, превышает определенный порог. В работе сообщалось об отдельном эксперименте, который показал, что робот может обнаруживать область, ранее отмеченную человеком-уборщиком. Однако еще предстоит провести обширные испытания этой системы.

Решение задачи следования по краю следа с помощью одного датчика [29, 31] схематично показано на рис. 4b. В предположении, что робот изначально расположен так, что датчик может быть повернут над следом, применяется трехступенчатая стратегия отслеживания краев. Сначала робот поворачивается, пока не обнаружит границу следа. Затем он поворачивается на некоторый угол от края следа и перемещается на заданное расстояние вперед. Эта последовательность повторяется для того, чтобы следовать по следу. В обоих случаях для генерации газочувствительного сигнала использовался пьезоэлектрический датчик. В отмеченных экспериментах на круглом роботе, диаметром 10 см, скорость слежения достигала 1,7 см/с, причем авторам удалось показать пример испытаний по очистке пола с помощью прототипа робота-уборщика на участке поверхности размером 32×32 см². Однако тщательный анализ достигнутых показателей отслеживания краев авторами не был проведен.

Другие возможные стратегии для установления контакта детектора, установленного на мобильном роботе с целевым газом, обсуждались авторами в работе [32]. В частности, было предложено решение, минимизирующее потребление энергии, через пассивный мониторинг, при котором робот остается неподвижным до тех пор, пока не обнаружит повышенную концентрацию газа. Благодаря турбулентному рассеянию пятна газов могут быть обнаружены таким образом относительно быстро после того, как источник начинает эмиссию, даже если робот находится далеко от источника. Однако в целом для ускорения процесса поиска газа необходимо активно исследовать обозначенный район. Моделируя химические «шлейфы» в виде прямой линии с ограниченной длиной, можно показать, что разведку целесообразно проводить по прямым траекториям, ортогональным направлению ветра. Если информация о направлении ветрового потока отсутствует, то поиск газа можно считать основной поисковой задачей. В зависимости от сенсорного оборудования мобильного робота поиск может осуществляться с помощью простого случайного блуждания или применения более сложной стратегии разведки. Примечательно, что поиск «пятен» газа не гарантирует успеха даже в том случае, если путь поиска охватывает всю исследуемую область из-за временного изменения турбулентного газораспределения.

2.6. Отслеживание источника газа с усилением воздушного потока

Химические следы, отмеченные на поверхности, образуют относительно стабильный профиль концентрации в непосредственной близости от «тропы». Частью обработки сигналов задачи наведения следа является обнаружение перехода между химически маркированной областью и ее немаркированной окрестностью по показаниям датчиков, полученным на малом расстоянии от поверхности. В реальном сценарии отслеживания источников газа задача состоит в том, чтобы извлечь информацию о местоположении удаленного источника газа из локальных измерений концентрации, отобранных из турбулентного газораспределения. Поскольку химические стимулы по своей природе не являются направленными, эта информация должна быть получена по крайней мере из двух пространственно или временно распределенных образцов. Если имеется достоверная информация о воздушном потоке, то в качестве указания направления на источник дополнительно может быть использовано

местное направление восходящего ветра. По этой причине многие предлагаемые решения проблемы отслеживания газовых источников предполагают сильный однонаправленный поток воздуха, который позволяет использовать две пошаговые стратегии, сочетающие следование градиенту (тропотаксис) и периоды движения вверх по ветру (анемотаксис). В работе [27] кратко рассмотрены методы отслеживания газовых источников, которые были испытаны в условиях сильного однонаправленного воздушного потока, т. е. в сценарии с заметным газовым шлейфом. Как и все эксперименты в области воздушного химического зондирования с мобильными роботами, опубликованные до сих пор, все эти эксперименты проводились в помещении.

Ишида и др. [33] выполнили пионерную работу по интеграции возможности обнаружения газа и ветра на мобильном роботе. Они предложили дистанционно управляемую мобильную платформу, оснащенную сенсорным зондом, состоящим из четырех термисторных анемометрических датчиков и четырех полупроводниковых датчиков (TGS 822), показанных на рис. 5. Датчики ветра были установлены вокруг квадратного столба с шагом 90° , что позволило получить информацию о направлении воздушного потока. В идеале направление датчика с наименьшей выходной мощностью должно соответствовать направлению нисходящего ветра, так как ветер блокируется столбом. Датчики газа были установлены на вершине колонны, каждый из которых располагался непосредственно над одним анемометрическим датчиком. С помощью этой экспериментальной платформы были испытаны два различных метода трассировки шлейфа в небольшой аэродинамической трубе ($0,7 \times 0,8 \times 0,35 \text{ м}^3$). Источником газа служила форсунка, из которой со скоростью 150 мл/с выбрасывался этанол, а вентилятор создавал среднюю скорость ветра около 20 см/с.

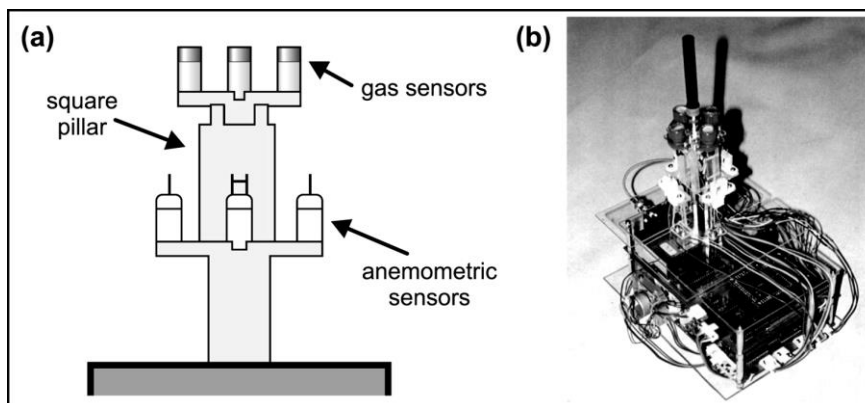


Рис. 5. Сенсорный зонд, состоящий из четырех термисторных анемометрических и четырех датчиков газа на основе оксидов металлов [33]

Известна также конструкция «компыа запахов» [34], идея которой заимствована у бабочки тутового шелкопряда, который определяет направление своего движения в потоке воздуха к самке по запаху выделяемого ею феромона с помощью чувствительных к запаху клеток, интенсивно обдуваемых за счет вибрации крыльев. Такая вибрация усиливает поток воздуха, уменьшает его турбулентность и позволяет определить направление движения молекул феромона. В литературе описаны конструкции двухосевого компаса с двумя расположенными друг за другом датчиками и вентилятором и трехмерного компаса, в который добавлены два вертикальных датчика [35]. Эти устройства могут быть использованы в качестве

навигационной установки для определения источников запаха. Постоянно указывать на источник запаха позволяют четыре полупроводниковых датчика и небольшой вентилятор для обдувания воздухом. Источник обнаруживается путем вращения компаса, при котором вертикальные и горизонтальные показания датчиков выравниваются. Результаты работ [34, 35] показывают эффективность компаса при практическом применении с учетом ветра и/или изменении направления распространения запаха препятствиями.

3. ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Существует множество типов систем мобильных роботов, обеспечивающих обнаружение и обход препятствий, распознавание и картирование окружающей местности, ориентацию и навигацию на ней [36-42]. Основные их типы приведены в таблице.

Системы, основанные на перемещении по реперным точкам-маякам [36], являются самыми надежными, но содержат ряд очевидных недостатков, существенно ограничивающих их применение:

- их использование ограничено условиями замкнутых помещений;
- могут быть ошибки в работе при появлении в области действия робота ранее не учтенных препятствий;
- имеется необходимость обслуживания реперных точек – маяков.

Системы обнаружения и распознавания препятствий, ориентации и навигации

Системы обнаружения препятствий			Системы распознавания и картирования		Системы ориентации и навигации					
Контактные	Фотоэлементы	Ультразвуковые	Системы технического зрения	Лазерные оптические системы (лидары)	Спутниковые GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Бэйдоу.	Системы на основе маяков	Инерциальные			
							Платформенные	Автономные	Бесплатформенные	
									Комплексированные	

Следует отметить, что для считывания данных с маяков могут использоваться, в том числе, видеокамеры, но ничего общего с системами бинокулярного зрения такие системы не имеют, поскольку они считывают данные не о пространственных характеристиках объектов, а о положении маяков.

Спутниковые системы (СНС) в настоящее время широко распространены [37], однако их точность не всегда бывает достаточной для определения координат мобильного робота при его перемещении по сложному маршруту. Наиболее известная СНС называется NAVSTAR GPS (англ. NAVigation Satellites providing Time And Range; Global Positioning System), или GPS. Она позволяет в любом месте Земли, включая приполярные области, а также в космическом пространстве вблизи планеты определить местоположение и скорость объектов. Основным принципом использования СНС – определение местоположения путем измерения расстояний до объекта от точек с известными координатами – спутников. Расстояние вычисляется по времени задержки распространения сигнала от посылки его спутником до приема антенной GPS-приемника. То есть для определения трехмерных координат GPS-приемнику нужно знать расстояние до трех спутников и время GPS системы. Таким образом, для определения координат и высоты приемника используются сигналы как минимум с четырех спутников. Сегодня GPS-приемники все чаще используются в гражданских целях, в основном для определения местонахождения и скорости. Среди факторов, влияющих на снижение точности определения координат с помощью спутниковых систем, выделяют влияние орбит спутников, атмосферы и отражение радиоволн, которые могут быть учтены и скомпенсированы математически, а также наличие объектов-помех, закрывающих необходимые области неба, которые нарушают работу СНС.

Основой инерциальной навигационной системы (ИНС) платформенного типа служат механические гироскопы или акселерометры, измеряющие положение, скорость и ускорение тела относительно начальной позиции по усилию, прикладываемому к телу [37]. Главным недостатком ИНС является накопление ошибок за время активной работы. Кроме того, ИНС малоэффективны в случаях, когда скорость объекта резко и часто меняется. Стоимость этих систем высокая. Поэтому получили широкое распространение бесплатформенные системы ориентации и навигации (БИНС, БИСО, БИСОН) на основе дешевых датчиков [38] угловых скоростей и акселерометров, которые устанавливаются на подвижные основания, имеющие бортовой вычислитель. Последний реализует алгоритмы ориентации и навигации, причем для увеличения точности его дополняют дополнительными каналами коррекции, например от сигналов спутниковой системы. Такие системы называют комплексированными.

Контактные системы, работающие «наощупь», как правило, используются при создании простых роботов, а также для обнаружения столкновений с препятствием в случае, если основная система его пропустила. Для осуществления контроля контакта применяют механические датчики, например микровыключатели. Датчики этого типа устанавливаются по периметру робота так, чтобы знать точно, с какой стороны был удар. Другой вид датчика – резистор, у которого сопротивление изменяется при механическом изгибе. Для обнаружения и обхода препятствий также используют ультразвуковые и фотоэлектрические датчики (фотодиоды и фототранзисторы).

Достаточно широкое распространение получили оптические дальнометры (лидары) [39, 40]. LIDAR (англ. Light Detection and Ranging) – технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеивания в прозрачных и полупрозрачных средах. Лидар – это, как правило, активный дальномер оптического диапазона. Сканирующие лидары в системах машинного зрения формируют двумерную или трехмерную кар-

тину окружающего пространства. «Атмосферные» лидары способны не только определять расстояния до непрозрачных отражающих целей, но и анализировать свойства прозрачной среды, рассеивающей свет. Разновидностью атмосферных лидаров являются доплеровские лидары, определяющие направление и скорость перемещения воздушных потоков в различных слоях атмосферы. Принцип действия лидара не имеет больших отличий от радара: направленный луч источника излучения отражается от целей, возвращается к источнику и улавливается высокочувствительным приемником (в случае лидара – светочувствительным полупроводниковым прибором); время отклика обратно пропорционально расстоянию до цели.

В отличие от радиоволн, эффективно отражающихся только от достаточно крупных металлических целей, световые волны подвержены рассеиванию в любых средах, в том числе в воздухе, поэтому возможно не только определять расстояние до непрозрачных (отражающих свет) дискретных целей, но и фиксировать интенсивность рассеивания света в прозрачных средах. Возвращенный отраженный сигнал проходит через ту же рассеивающую среду, что и луч от источника, подвергается вторичному рассеиванию, поэтому восстановление действительных параметров распределенной оптической среды – достаточно сложная задача, решаемая как аналитическими, так и эвристическими методами. В абсолютном большинстве конструкций излучателем служит лазер, формирующий короткие импульсы света высокой мгновенной мощности. Периодичность следования импульсов или модулирующая частота выбираются так, чтобы пауза между двумя последовательными импульсами была не меньше, чем время отклика от обнаруженных целей, которые часто могут физически находиться дальше, чем расчетный радиус действия прибора. Выбор длины волны зависит от функции лазера и требований к безопасности и скрытности прибора.

Системы навигации, использующие видеокамеры для получения пространственных характеристик окружающей среды, являются самыми универсальными [41, 42]. Теоретически, такие системы могут использоваться одинаково эффективно при перемещении робота как в замкнутом пространстве, так и на открытом воздухе. Однако они обладают низкой степенью надежности вследствие подверженности видеоинформации различным помехам (тряска, атмосферные помехи), большому объему передаваемой и обрабатываемой информации, а также сложности при анализе полученной информации – это связано, прежде всего, с проблемой распознавания образов объектов, полученных с видеокамеры. Устройство подобных систем, как правило, аналогично зрению человека. Всю информацию об объеме и удалении препятствий робот получает, сопоставляя изображения, полученные от двух точек пространства, поэтому их называют бинокулярными системами. При этом системы, работающие с одной видеокамерой (монокулярные системы), обычно являются вспомогательными и, как правило, не получают информацию об объеме и удалении препятствий. Однако возможность получения подобной информации при помощи монокулярных систем существует. Эти системы в настоящее время еще недостаточно исследованы и их потенциал не раскрыт в полной мере. В то же время их стоимость существенно ниже, и они могут выступать в качестве дублирующего устройства, например, при выходе из строя одной из камер в бинокулярной системе. Поэтому их применение является достаточно перспективным и требует дальнейших исследований.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает перспективность использования датчиков газа и систем «электронный нос» на мобильных роботах не только для идентификации источников запаха и распознавания запахов, но и для целей обнаружения и распознавания препятствий, картирования, ориентации и навигации роботов в комплексе с уже применяемыми системами, разной степени сложности – контактными, ультразвуковыми, оптическими, системами технического зрения, инерциальными системами ориентации и навигации в комплексе со спутниковыми. Система идентификации запахов может служить аналогом маяковой системы навигации и ориентации мобильных роботов, запаховые маяки которой не требуют затрат энергии для своего функционирования и могут работать в замкнутых запыленных помещениях. Перспективные конструкции компасов запахов могут помочь роботу передвигаться по навигационной тропе, находить источник запаха и позволят функционировать в сложных условиях, например в подземных шахтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matteo Reggente (2014): Statistical Gas Distribution Modelling for Mobile Robot Applications. Örebro University, Repro 08/14.
2. Raub J.A.; Mathieu-Nolf M.; Hampson N.B.; Thom S.R. Carbon Monoxide Poisoning – A Public Health Perspective. *Toxicology* 2000, 145, 1-14.
3. Organisation, W.H. Environmental Health Criteria, № 213: Carbon Monoxide. World Health Organisation (WHO), 2nd edition, 1999.
4. Blumenthal I. Carbon Monoxide Poisoning. *J.R. Soc. Med.* 2001, 94, 270-272.
5. Gardner J.W.; Bartlett P.N. A Brief History of Electronic Noses // *Sensors and Actuators B* 1994, 18-19, 211-220.
6. Persaud K.; Dodd G. Analysis of Discrimination Mechanisms of the Mammalian Olfactory System Using a Model Nose // *Nature*. 1982. 299, 352-355.
7. Сысоев В.В., Мусатов В.Ю. Газоаналитические приборы «электронный нос». – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2011. – 100 с.
8. Варезников А.С., Мусатов В.Ю., Сысоев В.В. Газоаналитическое устройство на основе нановолоконных мультисенсорных чипов и нейросетевых алгоритмов // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2011. – № 4 (62). – С. 75-79.
9. Russell R.A., Kleeman L., Kennedy S. Using Volatile Chemicals to Help Locate Targets in Complex Environments // *Proc. ACRA*. P. 87-91, Melbourne, 2000.
10. Lilienthal A.J.; Reiman D.; Zell A. Gas Source Tracing With a Mobile Robot Using an Adapted Moth Strategy // *Autonome Mobile Systeme (AMS)*, 18. Fachgespräch. P. 150-160. GDI, Informatik aktuell, 2003.
11. Hayes A.T.; Martinoli A.; Goodman R.M. Swarm Robotic Odor Localization // *Proc. IEEE IROS*. P. 1073-1078, (October 2001).
12. Rajasekharan S.; Kambhampati C. The Current Opinion on the Use of Robots for Landmine Detection // *Proc. IEEE ICRA*. 2003. P. 4252-4257.
13. Hayes A.T.; Martinoli A.; Goodman R.M. Distributed Odor Source Localization // *IEEE Sensors* 2002, 2(3), 260-273.

14. Murphy R.; Casper J.; Hyams J.; Micire M.; Minten B. Mobility and Sensing Demands in USAR // Proc. IECON 2000, 2000.
15. Blackmore B.S.; Griepentrog H.W. A Future View of Precision Farming. In Proceedings of PreAgro Precision Agriculture Conference. P. 131–145, Müncheberg, Germany, Center for Agricultural Landscape and Land Use Research (ZALF), 2002.
16. Arshak K.; Moore E.; Lyons G.M.; Harris J.; Clifford S.A Review of Gas Sensors Employed in Electronic Nose Applications. *Sensor Review* 2004, 24(2), 181-198.
17. Musatov V.Yu., Sysoev V.V., Sommer M., Kiselev I. Assessment of meat freshness with metal oxide sensor microarray electronic nose: A practical approach // *Sensors and Actuators B: Chemical* Vol. 44, Iss. 1 (29 January 2010). P. 99-103.
18. Hermle T.; Weimar U.; Rosenstiel W.; Göpel, W. Performance of Selected Evaluation Methods for a Hybrid Sensor System // *ISOEN Conference Proceedings*. P. 183-186, 1999.
19. Nakamoto T.; Ishida H.; Moriizumi T.A. Sensing System for Odor Plumes // *Analytical Chem. News & Features* (August 1999), 1, 531-537.
20. Arshak K.; Moore E.; Lyons G.M.; Harris J.; Clifford S.A. Review of Gas Sensors Employed in Electronic Nose Applications // *Sensor Review* 2004, 24(2), 181-198.
21. Wandel M.R.; Lilienthal A.J.; Duckett T.; Weimar U.; Zell A. Gas Distribution in Unventilated Indoor Environments Inspected by a Mobile Robot // *Proc. IEEE ICAR*. 2003. P. 507-512.
22. Albert K.J.; Lewis N.S. Cross Reactive Chemical Sensor Arrays // *Chem. Rev.* 2000, 100, 2595-2626.
23. Hinze J.O. *Turbulence*. McGraw-Hill, New York, 1975.
24. Roberts P.J.W.; Webster D.R. *Turbulent Diffusion* / Shen H.; Cheng A.; Wang K.-H.; Teng M.; Liu C., editors, *Environmental Fluid Mechanics – Theories and Application*. ASCE Press, Reston, Virginia, 2002.
25. Sudd J.H. *An Introduction to the Behaviour of Ants*. Arnold Pub. Ltd, London, 1967.
26. Russell R.A. Ant Trails – an Example for Robots to Follow? // *Proc. ICRA*. 1999. P. 2698-2703.
27. Larionova S.; Almeida N.; Marques L.; de Almeida A.T. Olfactory Coordinated Area Coverage // *Auton Robot*. 2006, 20, 251-260.
28. Moriizumi T. Biomimetic Sensing Systems With Arrayed Nonspecific Sensors // *Proceedings of the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 1995)*. P. 39-42.
29. Stella E.; Musio F.; Vasanelli L.; Distanti A. Goal-oriented Mobile Robot Navigation Using an Odour Sensor // *Proc. of the Intelligent Vehicles Symposium*. 1995. P. 147-15.,
30. Deveza R.; Thiel D.; Russell R.A.; Mackay-Sim A. Odor Sensing for Robot Guidance // *Robotics Research* (June 1994), 3(13), 232-239.
31. Mann G.A.; Katz G. Chemical Trail Guidance for Floor Cleaning Machines // *Proc. FSR*. August 1999. P. 195-204.
32. Hangartner W. Spezifität und Inaktivierung des Spurpheromons von *Lasius fuliginiosus* Latr. und Orientierung der Arbeiterinnen im Duftfeld // *Z. Vergl. Physiol*. 1967, 57(2), 103-136.
33. Ishida H.; Suetsugu K.; Nakamoto T.; Moriizumi T. Study of Autonomous Mobile Sensing System for Localization of Odor Source Using Gas Sensors and Anemometric Sensors // *Sensors and Actuators A* 1994, 45, 153-157.
34. Nakamoto T, Ishida H, and Moriizumi T. An odor compass for localizing an odor

source [J] // Sensors and Actuators B: Chemical, 1996, vol. 35, 32-36. DOI: 10.1016/s0925-4005(96)02009-6.

35. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 15, № 2, APRIL 1999 251 Three-Dimensional Odor Compass Hiroshi Ishida, Akito Kobayashi, Takamichi Nakamoto, and Toyosaka Moriizumi.

36. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов / С.М. Власов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев. – СПб: Университет ИТМО, 2017.

37. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С., Управление роботами. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.

38. Kreutz C.; Lörger J.; Graewe B.; Bargon J.; Yoshida M.; Fresco Z.M.; Fre`chet J.M.J. High Frequency Quartz Micro Balances: A Promising Path to Enhanced Sensitivity of Gravimetric Sensors // Sensors 2006, 6, 335-340.

39. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество изображения. – СПб.: Университет ИТМО, 2019.

40. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Система управления движением колесных роботов – СПб.: Наука, 2001. – 227 с. (Серия «Анализ и синтез нелинейных систем»).

41. Маслов О.А. Мобильные роботы для обнаружения и уничтожения взрывных устройств. – БНТИ, 2006.

42. Карякин Л. Современные наземные мобильные робототехнические комплексы // Арсенал Отечества. – 2015. – № 6.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мусатов Вячеслав Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav Yu. Musatov – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Вавилов Виталий Иванович – магистрант кафедры «Системотехника управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vitaly I. Vavilov – Master student, Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Петров Дмитрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry Yu. Petrov – PhD (Engineering), Associate Professor, Head: Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Степанов Михаил Федорович –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Системотехника и управление
в технических системах» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail F. Stepanov –
Dr. Sci. Tech., Professor, Department
of Systems Engineering and Control
in Technical Systems, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov

Сысоев Виктор Владимирович –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Физика» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Victor V. Sysoev –
Dr. Sci. Tech., Professor, Department
of Physics, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 30.10.20, принята к опубликованию 25.11.20

**С.А. Потемкин, И.Х.Н. Нааман,
С.П. Ивженко, Н.А. Гулевич, Е.Г. Пчелинцева**

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ И ВВОДА ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕР

Аннотация. Рассматривается метод формирования изображения высокого разрешения на основе восстановления из нескольких изображений более низкого разрешения. Метод является оптимизированным для работы с видеоинформацией в реальном времени. Кроме того, описан комплекс программ, предназначенных для ввода видеоинформации в персональный компьютер с возможностью ее сохранения и последующей обработки. В работе описаны основные технологии и методы, использованные при разработке программ, изложена методология использования данных технологий при проектировании программы. Программы реализованы в виде COM-объектов, подключаемых к действующему комплексу программ, предназначенных для взвешивания и контроля железнодорожных вагонов и составов.

Ключевые слова: изображение, высокое и низкое разрешение, оператор сдвига, восстановленное изображение, язык UML, технология DirectX, технология COM, ввод информации в компьютер

**S.A. Potemkin, I.H.N. Naaman, S.P. Ivzhenko,
N.A. Gulevich, E.G. Pchelintseva**

SOFTWARE PACKAGES SHAPING HIGH RESOLUTION IMAGES AND FEEDING VIDEODATA INTO COMPUTERS

Abstract. A technique for high-resolution image formation based on reconstruction from several lower resolution images is considered. The method is optimized for operating with video information in real time. In addition, a software package is described for feeding video information into a personal computer with the possibility of its saving and further processing. Moreover, the paper describes the main technologies and techniques used in the development of programs, outlines the methodology for using these technologies in the design of the program. The software package is implemented in the form of COM-objects connected to the existing set of programs designed for weighing and monitoring railway cars and trains.

Keywords: image, high and low resolution, shift operator, recovered image, UML language, DirectX technology, COM technology, data input into PC memory

1. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение разрешения изображений является фундаментальной задачей обработки видеoinформации. Разработчики предъявляют крайне высокие требования к аппаратному обеспечению, но во многих случаях можно воспользоваться альтернативным методом. Значительно экономнее получить несколько изображений невысокого разрешения, и затем восстановить (реконструировать) из них изображение высокого разрешения [1-4, 8-10].

Под восстановлением будем понимать построение из нескольких изображений низкого разрешения (ИНР) одного изображения с бóльшим разрешением (с меньшими пикселями). Если разрешения ИНР и изображения высокого разрешения (ИВР) совпадают, то речь идет о повышении четкости изображения, уменьшении размытия (*deblurring*).

Два изображения тогда будут одинакового разрешения, когда одно изображение может быть получено интерполированием другого или в том случае, когда характерные элементы в обоих изображениях идентичны.

В таком понимании «разрешение» изображение не может быть просто соотнесено с размерами пикселей или максимальной частотой в изображении (например, добавление высокочастотного шума не повышает разрешения картинки).

2. АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Алгоритмы восстановления основаны на нахождении соответствия между несколькими изображениями низкого разрешения (ИНР) и изображением высокого разрешения (ИВР). Основное уравнение циклического формирования изображения [5]

$$L(y) = \int B(x, y)H(x)dx + E(y), \quad (1)$$

где $L(y)$ – непрерывная функция цветности изображения низкого разрешения, $B(x,y)$ – ядро размытия (*blur*) ($B(x,y)$ интегрируется по времени), $H(x)$ – непрерывная функция цветности изображения высокого разрешения, $E(y)$ – шумовая компонента.

Как правило, предполагается, что ядро размытия инвариантно к оператору сдвига. Это верно для малых перемещений камеры. В таком случае оно представляет собой функцию размытия точки (ФРТ). ФРТ может быть разложена на два множителя:

$$B = \Phi PT_c \times \Phi PT_n,$$

где ΦPT_c – ФРТ чувствительного элемента камеры (сенсора); ΦPT_n – ФРТ линзы. Тогда

$$L(x) = \Phi PT_c \times U(x), \quad (2)$$

где $U(x) = \Phi PT_n \times H(x)$. ΦPT_c для *CCD*-матриц матричная функция. ΦPT_n при наличии размытия интегрируема.

3. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ СИСТЕМА

Дискретная форма уравнения (1) – это линейная система, где частота дискретизации $L(y)$ ниже, чем у $H(x)$:

$$L = P \cdot H + E, \quad (3)$$

где L – вектор-столбец цветности пикселей низкого разрешения, H – векторизованная цветность изображения высокого разрешения, P – весовая матрица, E – шум. Для изображений в оттенках серого цветность заменяется уровнем серого, т. е. яркостью.

Непосредственно до решения системы (3) проводится операция по устранению шума. Для этого вводится понятия «эквивалентного шума».

Для найденного решения H_0 эквивалентный шум определяется следующим образом [6]: $E_0 = L - P \cdot H_0$.

Эффективность метода восстановления зависит от нескольких факторов: уровень шума, который присутствует в изображениях низкого разрешения, точность приближения ядра размытия, качество камеры и ее геометрические искажения. Решение уравнения (3) базируется на минимизации функционала:

$$\Phi(H) = (L - PH)^T (L - PH) + \lambda H^T \Lambda^{-1} H,$$

где Λ^{-1} – оператор Лапласа, который накладывает условие неразрывности: $\Lambda^{-1} = \sum_{m=1}^{N_h^2} d_m d_m^T$, и d_m – вектор коэффициентов, относящийся к вычислению Лапласиана для m -го пикселя высокого разрешения (для пикселей на границе вводится незначительная поправка):

$$d_m(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } n = m \\ -0,25 & \text{пиксел } n \text{ один из 4-х соседей } m \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Решение H_m удовлетворяет условию: $(\lambda \Lambda^{-1} + P^T P) H_m = P^T L$.

При решении задачи принимаются несколько допущений [7]:

1. Повышение разрешения производится локально на сравнительно небольших участках. Если необходимо обработать большую площадь, она разбивается на маленькие участки, каждая из которых обрабатывается отдельно. Это не только значительно повышает скорость вычислений и снижает количество требуемой памяти, но и упрощает задачу, поскольку на малых участках ФРТ и геометрические искажения имеют одинаковую природу.

2. Число изображений низкого разрешения бесконечно, но среди них нет повторяющихся. Как следствие, шум не может быть исключен простым усреднением. Проблема выбора оптимального числа изображений низкого разрешения будет рассмотрена ниже.

3. Перемещения камеры малы.

4. Функция размытия точки – матричная функция:

$$\Phi_{PT}(x) = \begin{cases} S^{-2}, & |x| \leq S/2, |y| \leq S/2; \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

где $x = (x, y)$ и S – размер пикселя низкого разрешения. Такая функция ФРТ показывает вес пикселя высокого разрешения в зависимости от его положения внутри пикселя низкого разрешения. Для большинства задач вычисление $U(x) = \Phi_{PT} \times H(x)$ является проблемным, поскольку приближение Φ_{TP} – это непростая задача. Можно вычислить $U(x)$, после чего обратным преобразованием получить $H(x)$. Но, как правило, Φ_{TP} при большом разрешении есть просто интерполяция от изображения малого разрешения. Соответственно решение $H(x)$ будет близко к интерполированному значению. В связи с этим Φ_{TP} может быть исключена из рассмотрения.

4. ДОСТАТОЧНОЕ ЧИСЛО ИЗОБРАЖЕНИЙ НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Интуитивно понятно, что увеличение числа изображений высокого разрешения повышает качество выходного изображения. Однако достаточно быстро количество исходных изображений перестает сколько-нибудь влиять на конечный результат. Следовательно, нет необходимости делать слишком большое количество снимков.

Рассмотрим пять пикселей с уровнями серого цвета $L_i (i = \overline{1,5})$ $L_i = P_i^T H + E_i$, где P_i^T соответствующие векторы-строки из P , E_i – соответствующие строки E . Поскольку эти области влияют на один и тот же пиксель (рис. 1а), то векторы $P_i (i = \overline{1,5})$ являются линейно зависимыми.

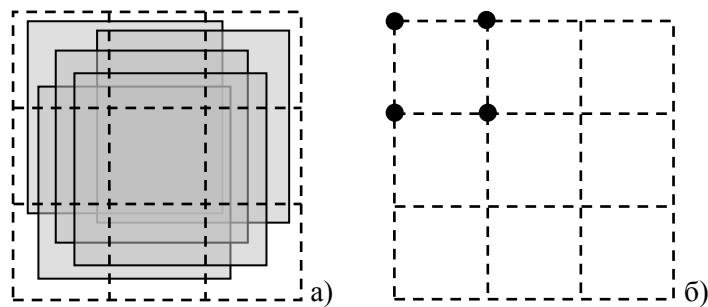


Рис. 1. Линейная зависимость пикселей:
а) пример линейной зависимости, б) простейшее множество при $M = 2$

Это означает, что пять пикселей низкого разрешения также являются линейно зависимыми. Предположим, что пятый пиксель является линейной комбинацией остальных четырех:

$$P_5 = \sum_{i=1}^4 a_i P_i, \text{ тогда линейная комбинация } L_5 = \sum_{i=1}^4 b_i L_i, \text{ как правило, более точная, чем } L_5 \text{ для исходного пикселя, поскольку операция линейного комбинирования обладает свойством низкочастотного фильтра, и случайный шум подавляется в результате данной процедуры.}$$

С другой стороны, известно, что стандартная девиация среднего из N независимых нормально распределенных переменных уменьшается в $1/\sqrt{N}$ раз. Однако данный коэффициент не меняет своего значения при $N > 4$. Таким образом, улучшение, вносимое пятым пикселем, незаметно. С этой точки зрения, если получено множество пикселей V низкого разрешения, такое, что каждый пиксель является линейной комбинацией остальных пикселей из V , то дополнительного улучшения качества за счет дополнительных пикселей получить практически невозможно. Выигрыш возможен только за счет фильтрации шума методом усреднения.

Легко видеть, что если коэффициент M увеличения разрешения не является целым числом, то пиксели с относительным смещением $(0,0)$, $(0,1-\varepsilon)$, $(1-\varepsilon,0)$ и $(1-\varepsilon,1-\varepsilon)$ составляют независимое множество (рис. 1б). Таким образом, достаточное число пикселей низкого разрешения составляет: $[2\text{ceil}(N_n - M)]^2$. Функция ceil обозначает округление до ближайшего целого в большую сторону. В реальности мы не можем делать снимки пиксель за пикселем. Вместо этого множество пикселей низкого разрешения получается одновременно, и относительное смещение этих пикселей, как правило, отличается. Таким образом, для произвольного M невозможно получать массивы пикселей низкого разрешения максимально экономично исходя из теоретических предпосылок, однако выбором M можно оптимизировать задачу. Это происходит, ко-

гда дробная часть коэффициента M равна 0,5. Для получения оптимального множества камера должна быть перемещена $(2M)^2$ раз с шагом, равным половине размера пикселя высокого разрешения. Таким образом, достаточное число изображений низкого разрешения $4M^2$. Для целого M пиксель низкого разрешения со смещением $(0,0)$ образует эффективное множество. В таком случае необходимо сдвигать камеру M^2 раз с шагом, равным размеру пикселя высокого разрешения. Достаточное число изображений низкого разрешения, таким образом, равняется M^2 .

5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВВОДА ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕР

Задача ввода видеоинформации в компьютер возникла при разработке приложения «Взвешивание и контроль железнодорожных вагонов и составов». Видеоизображение необходимо для визуального контроля целостности дверей вагонов, пломб, запоров, окон, люков и т. д. Кроме этого, отображение вагона в реальном времени на экране пользователя необходимо для точного его позиционирования на платформе весов.

Поскольку расстояние, на которое камера может быть удалена от вагона, ограничено расстоянием между соседними путями, используются четыре камеры, снимающие боковую поверхность вагона по частям с перекрытием зон, не превышающим 10 %. Еще одна камера устанавливается над вагоном для контроля верхней поверхности вагона, цистерны или платформы. Для ввода видеоинформации в компьютер используется плата видеозахвата. Плата видеозахвата имеет один видеовход, поэтому для одновременного считывания информации со всех камер используется мультиплексор.

В терминах языка UML [11] данная аппаратная конфигурация может быть выражена при помощи диаграммы топологии (ДТ, *deployment diagram*) (рис. 2). ДТ предназначена для анализа аппаратной части системы. При помощи данной диаграммы проектировщик может произвести анализ необходимой аппаратной конфигурации, на которой будут работать отдельные процессы системы, и описать их взаимодействие между собой и другими аппаратными средствами. Физическое расположение камер и вагона показано на рис. 3.

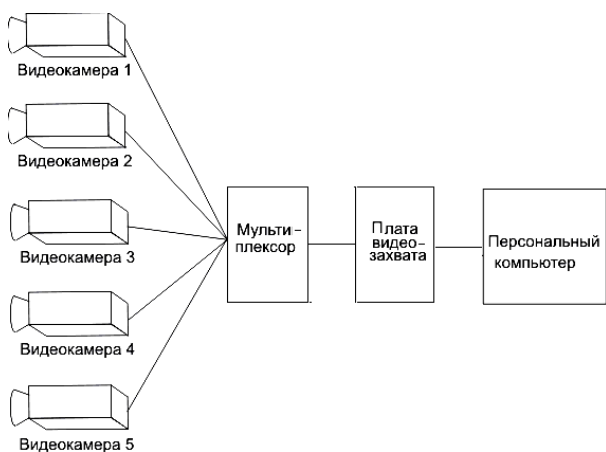


Рис. 2. Аппаратная схема системы

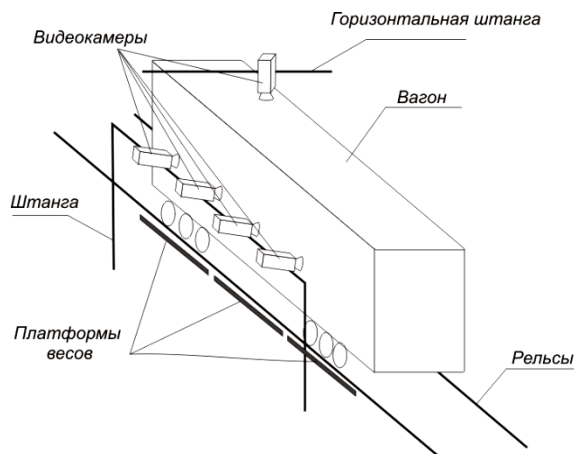


Рис. 3. Общий вид аппаратной части системы

Мультиплексор выстраивает изображение со своих входов в девяти квадратах, на которые делится область изображения. Это проиллюстрировано на рис. 4. Цифры обозначают номер входа, с которого изображение вписывается в свою область.

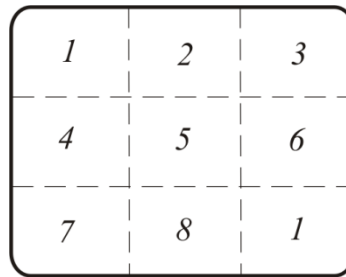


Рис. 4. Формирование изображение мультиплексором

Компонент СОМ [12, 13] должен обеспечивать следующую функциональность:

- принимать изображение с платы видеозахвата;
- выделять из изображения пять областей, соответственно камерам;
- иметь инструмент для выбора выделяемых областей;
- формировать из изображений четырех камер панорамное изображение вагона;
- иметь инструмент для настройки панорамного изображения вагона (в связи с тем, что область видимости камер перекрывается, необходимо предусмотреть алгоритм подбора границ и смещения центра отдельно взятой камеры);
- принимать от приложения-клиента описатели двух окон, соответственно для изображения верхней камеры и панорамного изображения вагона;
- выводить сформированные изображения в режиме реального времени в два окна с принятыми описателями (в одно окно выводится отдельно взятое изображение верхней камеры, в другое – панорамное изображение вагона);
- управлять мультиплексором через СОМ-порт по известным протоколам.

Внешнему приложению СОМ-компонент должен предоставлять следующие сервисы:

- старт/стоп вывода видеоизображения;
- показать/спрятать окна просмотра;
- вызвать внутренний диалог настроек.

Таким образом, по отношению к оператору и внешнему приложению компонент должен обеспечивать функциональность, которая в терминах языка UML иллюстрируется диаграммой сценариев (use case view) [14] на рис. 5. На данной диаграмме представлены участники взаимодействия и те сценарии действий и развития событий, которые заложены в системе на функциональном уровне.

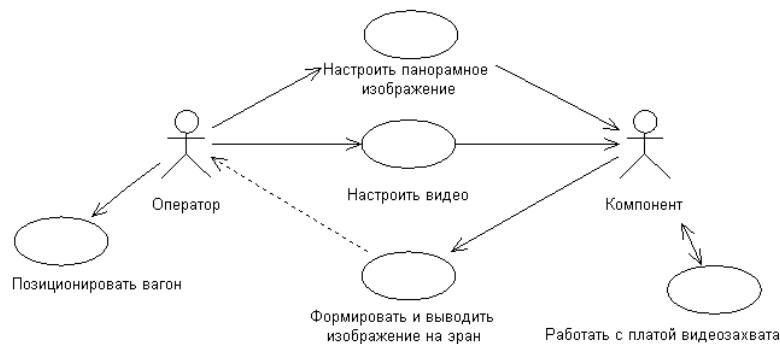


Рис. 5. Диаграмма сценариев

6. РАЗРАБОТКА ДИАГРАММ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И АКТИВНОСТИ

Диаграмма взаимодействия (collaboration diagram), показанная на рис. 6, отражает наличие взаимосвязей между классами в программе, наличие сообщений от клиентов к серверам. Временная шкала не участвует в данном типе диаграммы, она позволяет получить представление о взаимодействии объектов вообще. Из-за отсутствия временной шкалы данный тип диаграммы не учитывает время жизни объектов и демонстрирует лишь взаимодействие между классами, но не объектами системы.

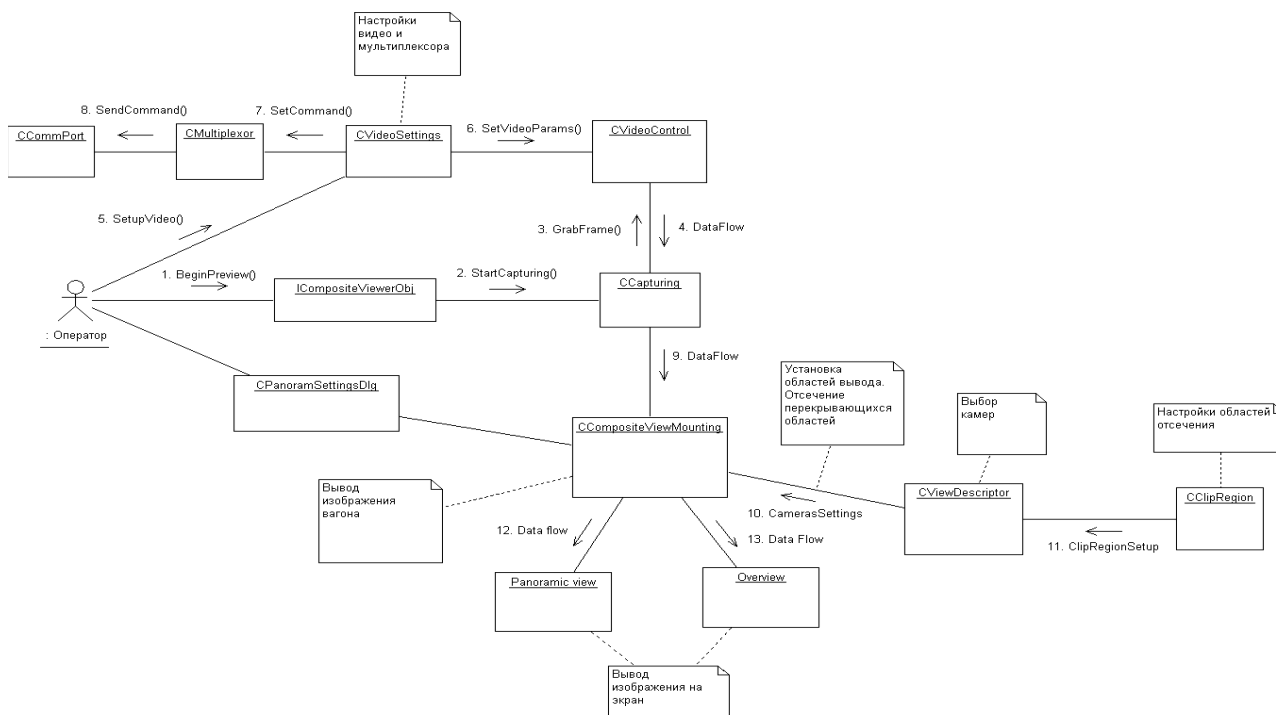


Рис. 6. Диаграмма взаимодействия

Пользователь (оператор) инициирует процесс. Пользователь работает с приложением-клиентом. Через внешний интерфейс COM-объекта вызывается функция BeginPreview(). Далее работа компонента начинается независимо от внешнего приложения. Основные классы компонента CVideoControl и CCompositeViewMounting. Класс CVideoControl реализует прием и ввод видеoinформации. В этом классе полностью инкапсулирована работа с библиотекой DirectShow. Это наиболее сложный и объемный класс во всем проекте. Класс CCapturing, в свою очередь, инкапсулирует всю функциональность класса CVideoControl, упрощая работу с ним. Вся обработка видеопотока реализована в классе CCompositeViewMounting.

Когда оператор инициирует работу программы, вызывается функция StartCapturing() класса CCapturing (номер 2 на диаграмме). При этом запускается работа класса CVideoControl, который принимает данные с платы видеозахвата [15].

Настройки видео производятся при помощи класса CVideoSettings, который инкапсулирует диалог настройки. Управление мультиплексором производится из класса CMultiplexor, который, в свою очередь, работает с последовательным портом при помощи класса CCommPort. Настройки в CVideoSettings производятся пользователем, что на диаграмме показано стрелкой с цифрой 5.

Видеоданные, получаемые в классе `CVideoControl`, по таймеру запрашиваются из класса `CCapturing`, откуда затем поступают в объект класса `CCompositeViewMounting`, где производится их обработка. Из исходных кадров формируются два видеопотока: изображение верхней камеры `Overview` и панорамное изображение вагона `Panoramic view`.

Изображения заносятся в два окна, описатели (`handle`) которых предоставляются внешним приложением. Настройки разделения и формирования изображения, поступающего с мультиплексора, производятся при помощи диалога настройки `CPanoramSettingsDlg`, вызываемого пользователем. Для удобства работы при настройке изображения в диалоге созданы два окна предпросмотра. На время работы диалога описатели внешних окон приложения заменяются описателями окон в диалоге, поэтому пользователь в режиме реального времени видит на диалоге полученное изображение.

7. ВВОД ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕР. РАЗРАБОТКА КЛАССА `CVIDEOCONTROL`

Строительными «кирпичиками» в `DirectShow` [16], единицей взаимодействия являются компоненты программного обеспечения, называемые фильтрами. Каждый фильтр работает с видеопотоком и, как правило, выполняет над ним одну операцию. К примеру, существуют фильтры, которые:

- читают файлы;
- получают видео с устройств видеозахвата;
- передают данные на звуковую или видеоплату.

Фильтр получает входные данные и формирует выходные данные. К примеру, если фильтр декодирует MPEG-4 поток, то он принимает на входе видеоданные в формате MPEG-4, а на выходе выдает данные в несжатом RGB формате.

Для выполнения конкретных задач приложение объединяет несколько фильтров так, что выход одного становится входом другого. Набор соединенных фильтров называется графом фильтров. В качестве иллюстрации данной концепции рассмотрим типичный граф, формируемый при просмотре AVI-файлов (рис. 7).

Типовое приложение `DirectShow` выполняет три базовых шага при работе с мультимедиа [16, 17]:

1. Создание экземпляра менеджера графа фильтров при помощи функции `CoCreateInstance`.
2. Использование менеджера графа для построения графа фильтров.
3. Управление графом и реагирование на генерируемые им события.

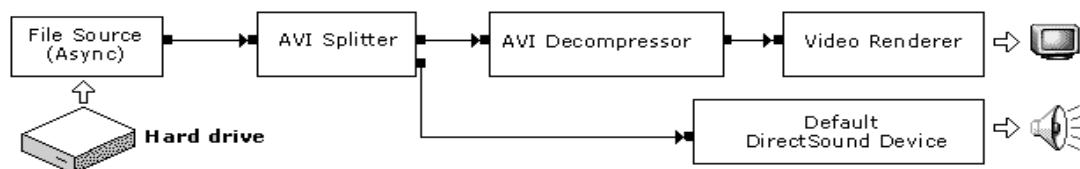


Рис. 7. Типовой граф фильтров, формируемый при проигрывании файлов формата AVI: `File Source` обеспечивает считывание файла с диска; `AVI Splitter` разделяет мультимедийный поток на отдельные потоки видео и аудио; `AVI decompressor` декодирует сжатые видеоданные; `Video Renderer` обеспечивает вывод видео на экран; `Default Direct Sound Device` отвечает за вывод звуковых данных

При работе программы в объекте класса `CVideoControl` для захвата видео строится специальный граф. Для увеличения производительности и ускорения работы устройств захвата видео применяется чересстрочная развертка видео. При этом кадр разбивается на два полукадра, в одном идут нечетные строки кадра, в другом – четные. В `DirectShow` чересстрочная развертка применяется при работе с видеопотоками, разрешение которых превышает 352×288 . Фильтр «Deinterlacer» совмещает полукадры, убирая гребенку. К сожалению, в любых алгоритмах деинтерлейсинга применяется интерполяция, поэтому восстановление информации только вероятностно точное, потеря информации – «плата» за быстроедействие.

По заданию необходимо обработанное видео выводить в два независимых окна. Однако, `DirectShow` не позволяет создавать два фильтра вывода на экран (фильтры рендеринга – `Video Renderer`). Поэтому было решено обработку видео, а также вывод на экран осуществлять вне графа фильтров. Видео есть последовательная смена статических изображений на экране с определенной частотой. Стандартная частота видеопотока – 25 кадров в секунду. Поэтому в программе кадры в несжатом формате копируются из видеопотока, обрабатываются вне графа фильтров и выводятся на экран по сообщениям от таймера средствами графической библиотеки. Для этого в граф фильтров введен фильтр `Grabber`, который осуществляет копирование отдельных кадров во внешний буфер.

Фильтр `Null Renderer` ставится в конце цепочки фильтров, если не требуется вывод видео на экран или в файл.

Основная функциональность класса заключена в следующих функциях:

`BOOL CVideoControl::BuildGrabberGraph(int VideoWidth, int VideoHeight)` Эта функция строит граф с фильтром `Grabber`. Размеры видеопотока указываются в параметрах функции.

`void CVideoControl::Play();`

`void CVideoControl::Pause();`

`void CVideoControl::Stop();`

Три указанные функции обеспечивают управление потоком данных, проходящих по графу фильтров.

`bool CVideoControl::SetSignalType();`

`void CVideoControl::SetVideoStandard();`

Две данные функции позволяют устанавливать видеовход, с которого считываются видеоданные, а также формат видеосигнала (`PAL/SECAM/NTSC`).

8. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ

На основе теоретических положений, изложенных в статье, была создана программа, которая использует рассмотренный метод повышения качества изображения.

Программа представляет собой систему контроля подвижного состава и может быть использована для упрощения и автоматизации следующих задач, возникающих на железнодорожных контрольных пунктах.

1. Позиционирование вагона на платформе весов.
2. Проверка целостности дверей, замков и люков вагонов подвижного состава.
3. Считывание и распознавание номерных знаков вагонов быстродвижущегося подвижного состава.

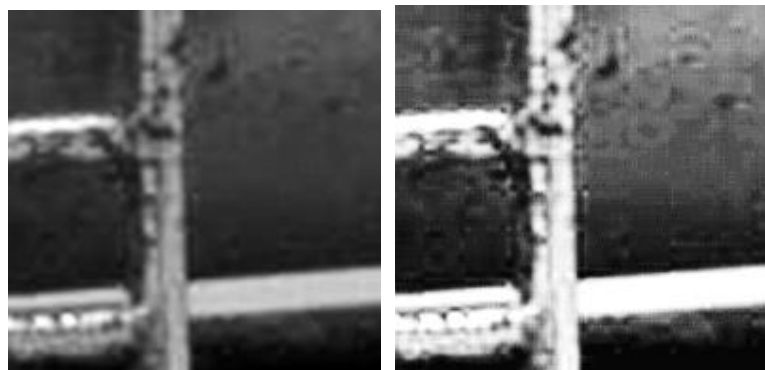
Система строится по следующему принципу: вдоль железнодорожных путей установлена штанга, на которой подвижными креплениями крепятся в ряд 4 видеокамеры (рис. 3). Пятая видеокамера закреплена над путями так, чтобы снимать вагон сверху. Каждая из четырех боковых камер захватывает только часть вагона, поскольку камеры уставлены достаточно близко к вагону.

Сигнал с видеокамер подается на видеомультимплексор, рассчитанный на восемь камер. Из всех входов мультимплексора используются пять по числу камер. Очевидно, что изображения с камер расположатся, соответственно, в областях 1-5 экрана. Однако при использовании альтернативных входов мультимплексора возможно и другое расположение изображений с камер.

Сигнал, полученный на выходе мультимплексора, подается на вход платы видео захвата, установленной на персональном компьютере. Изображение и в реальном времени разбивается на области, из которых затем выделяется отдельно изображение камеры, установленной над вагоном, а также выстраивается панорамное изображение вагона. Аппаратная схема системы показана на рис. 2.

Мультимплексор формирует изображение, располагая камеры в виде девяти прямоугольников, как показано на рис. 4. Поскольку в системе необходимо применять распознавание, а качество камер в совокупности с мультимплексором не отвечает поставленным требованиям, один из путей решения данной задачи – повышение разрешения изображения.

Программа написана с использованием технологии Microsoft® DirectShow®. Алгоритмы обработки видеопотока в реальном времени реализованы в виде фильтров DirectShow®. При этом повышение разрешения реализовано в два этапа. Сначала производится операция шумоподавления путем усреднения пяти последовательных кадров с формулой $2h + 2v$, затем на накопленном массиве последовательных кадров реализуется операция повышения разрешения. Для упрощения вычислений и ускорения процесса выбран коэффициент повышения $M = 2$. Результат работы программы представлен на рис. 8.



а

б

Рис. 8. Результат работы программы: а) изображение, интерполированное до размеров большого; б) восстановленное изображение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается метод формирования изображения высокого разрешения, основанный на его восстановлении из нескольких изображений более низкого разрешения.

Метод отличается от известных по производительности и является оптимизированным для работы в реальном времени с видеоинформацией. Решена задача выбора числа изображений низкого разрешения для максимально эффективного соотношения качество/производительность метода.

Технология DirectX и, в частности, DirectShow в полной мере предоставляет разработчику стандартный набор средств для разработки мультимедиа приложений. При этом разработчик должен уметь работать с COM-объектами на клиентской стороне. Этого вполне достаточно для создания несложных мультимедиа приложений. Операционная система берет на себя управление всеми необходимыми устройствами на уровне драйверов.

При разработке компонента для работы с видео для приложения «Взвешивание и контроль железнодорожных вагонов и составов» был выбран тот же принцип построения системы. Компоненты максимально изолированы друг от друга, скрывая свою реализацию. Это позволяет упростить отладку и повысить надежность приложения. Такая концепция разработки программного обеспечения получила распространение с появлением технологии COM.

Идеология современного подхода к разработке программного обеспечения базируется на максимальной стандартизации. В первую очередь это относится к средствам и методам моделирования систем и разработки документации. Появление языка UML и CASE-средств позволило сделать прорыв в этой области, дав разработчикам мощнейший инструмент для разностороннего описания разрабатываемой системы. Преимущества использования CASE-средств проявляются в большей степени при разработке сложных, многоаспектных, комплексных программных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mann S., Picard R.W. Virtual Bellows: Constructing High Quality Still form Video // Proc. IEEE Conf. Image Processing. – Austin, USA: IEEE, 1994. – P. 363-367.
2. Алгоритмы выделения граней в динамических системах искусственного зрения подвижных объектов / Абакумов А.В., Ермаков Р.В., Лившиц Д.Ю., Львов А.А., Скрипаль Е.Н. // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки, 2018. – Вып. № 5. – С. 161-174.
3. Применение функций с ограниченным изменением к анализу сигналов и изображений в системах искусственного зрения / Абакумов А.В., Ермаков Р.В., Кузьменко И.К., Львов А.А., Скрипаль Е.Н. // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки, 2018. – Вып. № 5. – С. 175-191.
4. Модели изменения яркости в современном программном обеспечении / Львов А.А., Буров П.А., Безрядин С.Н., Ильиных Д.Ю. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2007. – № 4 (28). – С. 106-110.
5. Irani M., Peleg S. Improving Resolution by Image Restoration // Computer Vision and Image Processing, 1991. – Vol. 1. – P. 231-239.
6. Kim J., Lee J.K., Lee K.M. Deeply-Recursive Convolutional Network for Image Super-Resolution // Proc. 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. – Las Vegas, USA: IEEE, 2016. – P. 1637-1645.
7. Tirer T., Giryas R. Image restoration by iterative denoising and backward projections // IEEE Trans. on Image Processing, 2019. – Vol. 28. – № 3. – P. 1220-1234.

8. L'vov A.A., Kartashov P.P. Parametric Approach for Brain Tissues Volume Measurements from 2D MRI // Proc. IEEE Int. Instrumentation and Measurement Tech. Conf. Singapore, IEEE, 2009. – P. 1505-1509.
9. L'vov, A.A., Toropova O.A., Litovka Yu.V. Brain tissues volume measurements from 2D MRI using parametric approach // Proc. SPIE 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV, 107171U (26 April 2018); doi: 10.1117/12.2315104.
10. Assessment method for tumorous objects volume from brain MR images / Toropova O.A., L'vov A.A., Litovka Yu.V., Askarova A.Kh. // Proc. SPIE 11067, Saratov Fall Meeting 2018: Computations and Data Analysis: from Nanoscale Tools to Brain Functions, 110670C (3 June 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2523461>.
11. Torre D., Labiche Y., Genero M. UML diagram synthesis techniques: a systematic mapping study. Carleton University, Tec. Report SCE-15-04, 2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/313394575_UML_diagram_synthesis_techniques_a_systematic_mapping_study (дата обращения 05.05.2020).
12. Трельсен Э. Модель «СОМ и применение ATL 3.0». – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 928 с.
13. Video Capture Technologies, Microsoft Corporation, 2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.microsoft.com/hwdev/tech/stream/vidcap/default.asp> (дата обращения 01.03.2020).
14. Трофимов С.А. Case-технологии. Практическая работа в Rational Rose. – М.: Бинном, 2001.
15. Video Capture Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/stream/video-capture-devices> (дата обращения 11.04.2020).
16. Using GraphEdit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/directshow/using-graphedit> (дата обращения 11.04.2020).
17. Direct Show Tutorial. The Imaging Source Europe [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.theimagingsource.com/prod/soft/fpics/fpics_tutdirectshow.htm (дата обращения 11.02.2020).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Потемкин Сергей Александрович – аспирант кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey A. Potemkin – Postgraduate, Department of Applied Information Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Нааман Идрис Хажар Нааман – аспирант кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Naaman I.H. Naaman – Postgraduate, Department of Applied Information Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ивженко Сергей Петрович –

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Информационно-
коммуникационные системы
и программная инженерия» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey P. Ivzhenko –

PhD (Engineering), Associate Professor
the Department of «Information
and Communication Systems and Software
Engineering» of Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Гулевич Наталья Анатольевна –

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Информационно-
коммуникационные системы и программная
инженерия» Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Natalia A. Gulevich –

PhD (Engineering), Associate Professor,
Department of Information and Communica-
tion Systems and Software Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Пчелинцева Елена Германовна –

кандидат социологических наук, доцент
кафедры «Информационно-
коммуникационные системы и программная
инженерия» Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Elena G. Pchelintseva –

PhD (Sociology), Associate Professor,
Department of Information and Communica-
tion Systems and Software Engineering,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 30.09.20, принята к опубликованию 25.11.20

А.С. Тортика, А.С. Ершов

ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ

***Аннотация.** В статье приведен обзор и проанализированы существующие решения систем управления базами данных. Рассмотрена общая информация о наиболее популярных решениях, проведено сравнение характеристик, выведены достоинства и недостатки каждой из них.*

***Ключевые слова:** база данных, СУБД, sql, nosql, безопасность*

A.S. Tortika, A.S. Ershov

OVERVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN DATABASE MANAGEMENT SYSTEMS

***Abstract.** The article provides an overview and analysis of the existing solutions to the database management systems. General information relating the most popular solutions is considered, their characteristics are compared, and their advantages and disadvantages are demonstrated.*

***Keywords:** database, DBMS, sql, nosql, security*

ВВЕДЕНИЕ

Информацией, которая хранится в базе данных (далее БД), может являться все что угодно, например данные приложений, каталог продукции, персональные данные клиентов, хэш-сумма паролей. Для доступа к информации, хранящейся в базе данных, а также для манипулирования этими данными применяется система управления базами данных (далее СУБД). СУБД – это совокупность программных, языковых и прочих средств, которые предназначены для создания, управления, контролирования, администрирования и совместного использования БД разными пользователями. В основном такие системы классифицируют по используемой модели данных. Так, СУБД, основанные на использовании реляционной модели данных, называют реляционными СУБД. Системы управления базами данных помогают сортировать хранящуюся информацию, связывать базы данных между собой при помощи внешних ключей, а также могут предоставить отчет об изменениях и зарегистрированных событиях.

Известно, что все системы управления базами данных занимаются одними и теми же задачами, но сам процесс выполнения которых варьируется в широких пределах [1]. Кроме того, функции и возможности каждой отдельно взятой системы могут существенно различаться.

Если сравнивать различия популярных баз данных, то следует учитывать, насколько удобна она для конечного пользователя и ее способность к масштабируемости, а также необходимо убедиться, что она будет без проблем интегрирована в информационную систему с используемыми продуктами [2]. Также во время выбора следует обратить внимание на стоимость системы и ее поддержки, которая будет выполняться разработчиком.

СРАВНЕНИЕ СУБД

Первой системой будет СУБД от Oracle. Самая первая версия Oracle была выпущена около начала 80-х, и имеет на данный момент отличную репутацию. Более того, сейчас на рынке существует несколько версий этого продукта, которые могут удовлетворить потребности отдельно взятой организации. Данная СУБД предназначена для применения в облачных средах и может быть раздельно размещена на нескольких серверах. Это позволяет управлять базами данных с многомиллионными записями в них. Функции – в новой версии Oracle, в числе которых grid framework и использование как физических и логических структур.

Это означает, что физическое управление данными не влияет на доступ к логическим структурам. Безопасность обеспечивается тем, что каждая транзакция будет выполнена изолированно от других.

Плюсы:

- новейшие технологии;
- надежность системы.

Минусы:

- конечная стоимость продукта;
- минимальные системные требования.

Далее приступим к Microsoft SQL серверу. Данная система управления базами данных, движок которой может работать как на облачных серверах, так и на локальных машинах. Можно также одновременно комбинировать типы применяемых серверов.

Одна из самых уникальных особенностей – это временная поддержка данных. Она помогает произвести отслеживание изменения данных во времени. Актуальная версия продукта от Microsoft имеет поддержку динамической маскировки данных, которая гарантирует, что только неавторизованные пользователи не будут иметь доступ к информации.

Достоинства:

- юзабилити;
- надежность работы;
- эко-система Microsoft.

Недостатки:

- стоимость продукта;
- минимальные системные требования.

Если говорить про данную СУБД, то она подойдет больше для крупных организаций, в составе которых уже используются другие продукты от данной корпорации.

В конце следует рассмотреть PostgreSQL, что является одним из нескольких бесплатных решений. Чаще всего применяется для ведения баз данных веб-приложений. Это была одна из первых СУБД. Это положительно повлияло на развитие. Также она позволяет пользователям управлять структурированными и неструктурированными данными [3].

БД может быть размещена в различных средах, таких как виртуальные, физические и облачные. Поддержка управления сессиями позволила улучшить безопасность.

Плюсы:

- легкая масштабируемость;
- поддержка текстового формата обмена данными;
- пользовательский интерфейс.

Минусы:

- сложность и нехватка документации;
- первоначальная конфигурация;
- скорость выполнения операций.

Напоследок рассмотрим MongoDB. Данная база данных предназначена для приложений, которые используют и структурированные, и неструктурированные данные. Работа СУБД происходит полностью через драйверы MongoDB.

Так как данная система разрабатывалась не для работы с реляционной моделью данных, могут возникнуть серьезные проблемы с производительностью, если пытаться манипулировать данными ее таким образом [4]. Однако в большой мере данная БД предназначена для обработки данных, которые не относят к реляционным, поэтому очень хорошо справляется в тех средах, где другие БД вообще не работают.

Ключевая особенность – это рост производительности за счет частичного индексирования, при помощи уменьшения индексов [5].

Достоинства:

- скорость исполнения;
- юзабилити;
- поддержка текстового формата обмена данными.

Недостатки:

- сложность проецирования модели реляционных данных.

Подходит для организаций, работающих с разнородными данными, которые тяжело поддаются классификации [6].

ВЫВОДЫ

Существует большое количество СУБД, выбирая из которых, можно точно найти что-то, что будет соответствовать критериям, заявленным заказчиком. Благодаря этому разнообразию решений есть множество отличных бесплатных вариантов для маленьких организаций или для личного применения, что усложняется для крупных организаций, которые хотят хранить и манипулировать большим объемом данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов Д.А. Архитектура и сценарии компьютерного тренажера для подготовки персонала промышленных предприятий // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 4 (73). – С. 198-200.

2. Драч В.Е., Родионов А.В., Чухраева А.И. Выбор системы управления базами данных для информационной системы промышленного предприятия // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 71-80.
3. Панченко И. PostgreSQL: вчера, сегодня, завтра // Открытые системы. СУБД. – 2015. – № 3. – С. 34-37.
4. Бурмистров А.В., Белов Ю.С. Недостатки реляционных баз данных // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2015. – № 3 (3). – С. 25-34.
5. Петухов И.С. Алгоритм определения необходимых индексов для оптимизации запросов с соединением двух таблиц в СУБД MYSQL (INNODB) // Научный вестник ГосНИИГА. – 2017. – № 16. – С. 98-107.
6. Карвин Б. Программирование баз данных SQL. Типичные ошибки и их устранение. – Москва: Рид Групп, 2012. – 336 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Тортика Алексей Сергеевич –
магистрант Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Aleksey S. Tortika –
Master student,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Ершов Алексей Сергеевич –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Информационная безопасность»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey S. Ershov –
PhD (Engineering), Associate Professor,
Department of Information Security,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Статья поступила в редакцию 27.10.20, принята к опубликованию 25.11.20

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.77.04

В.А. Павлова, В.И. Павлов

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ

Аннотация. Статья содержит описание методов нанесения непрерывного и частично регулярного микрорельефа на поверхности деталей машиностроительного назначения. Рассмотрены принципиальные различия, включающие экономическую целесообразность применения, вид оборудования и обрабатываемого инструмента, результирующие характеристики микронеровностей, а также тип обрабатываемых поверхностей. Наряду с описанием приводится анализ главных отличительных характеристик и возможности применения каждого способа.

Ключевые слова: микрорельеф, регулярный микрорельеф, виброобкатывание, рельефообразование, ультразвуковая обработка, алмазное выглаживание, лазерная обработка

V.A. Pavlova, V.I. Pavlov

ANALYTICAL REVIEW OF THE METHODS FORMING A REGULAR MICRORELIEF ON A WORKPIECE SURFACE

Abstract. The article describes the methods for applying continuous and partially regular micro-relief on the surfaces of workpieces used in mechanical engineering industry. The authors consider the fundamental differences, including economic feasibility of their application, the type of equipment and processing tools, the resulting characteristics of roughness in the micro-relief, as well as the type of surfaces to be machined. Additionally, an analysis of the main distinctive characteristics and possibilities for application of each method is provided.

Keywords: micro-relief, regular micro-relief, vibration rolling, relief formation, ultrasonic processing, diamond smoothing, laser processing

ВВЕДЕНИЕ

Нанесение микрорельефа на поверхности подвижных соединений ввиду своей практичности и экономической целесообразности получает все большее распространение. Регулярный микрорельеф – это неровности поверхности детали в виде гребней и впадин,

обладающие периодическими характеристиками. Такие неровности имеют одинаковую форму, размер и закономерность во взаимном расположении. На поверхности сопрягаемых деталей машин в зависимости от назначения наносят полностью или частично регулярный микрорельеф.

Как правило, микрорельеф наносят на поверхности деталей, имеющих подвижные соединения, с целью повышения износостойкости, сокращения трения и увеличения площади контакта сопряженных деталей [1]. Любой микрорельеф характеризуется наличием впадин различной формы, которые играют роль смазочных карманов. Впадины могут быть изолированы друг от друга гребнями, что позволяет лучше удерживать смазку на всей контактирующей поверхности. С другой стороны, пересекающиеся впадины, образующие нечто вроде желобов для транспортировки масляных растворов, позволяют жидкости самостоятельно распространяться, не скапливаясь в одном месте и не оставляя не смазанных участков поверхности. От формы, размеров, количества и взаимного расположения впадин и выступов в большей степени и зависят эксплуатационные свойства поверхности, на которую нанесен микрорельеф. Значительное влияние на износостойкость оказывают упрочнение поверхностного слоя и создание положительно влияющих остаточных напряжений, которые попутно реализуется рядом методов. В связи с этим различные методы рельефообразования позволяют в той или иной степени реализовать требования к рельефным характеристикам поверхностей, делая акцент на наиболее важных в каждом отдельном случае параметрах.

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА

В настоящее время существует большое количество способов нанесения микрорельефа. Методы могут иметь как незначительные, так и принципиальные различия.

Одним из методов нанесения микрорельефа является виброобкатка. Метод применяется для обработки наружных цилиндрических поверхностей. Суть метода заключается во вдавливании шариков в поверхность детали. При этом шарики установлены в приспособление, которому сообщаются возвратно-поступательные и дополнительные осциллирующие движения. В совокупности эти действия обеспечивают накатывание синусоидальных канавок (рис. 1). Регулируя параметры движений, можно обеспечить различную степень пересечения канавок. Это повышает универсальность установки и позволяет применять ее для деталей различного назначения. Так, с помощью данной установки можно наносить как частичный, так и полностью регулярный микрорельеф. Дополнительным положительным моментом является некоторое упрочнение поверхностного слоя, возникающее при вдавливании металла.

На практике это устройство применяется в изготовлении и при ремонте коленчатых валов. Упрочнение поверхностного слоя повышает долговечность и износостойкость, а рельефная поверхность с менее упрочненными гребнями ускоряет приработку трущихся поверхностей и обеспечивает длительное и равномерное смазывание всех участков поверхностей [3].

Метод виброобкатки может быть реализован на универсальном токарном станке, что делает его применение вполне доступным для любого производства. Однако надстройка в виде обрабатывающего модуля с возможностью регулируемого осциллирующего движения требует не только дополнительных затрат, но и технологических возможностей оборудования.

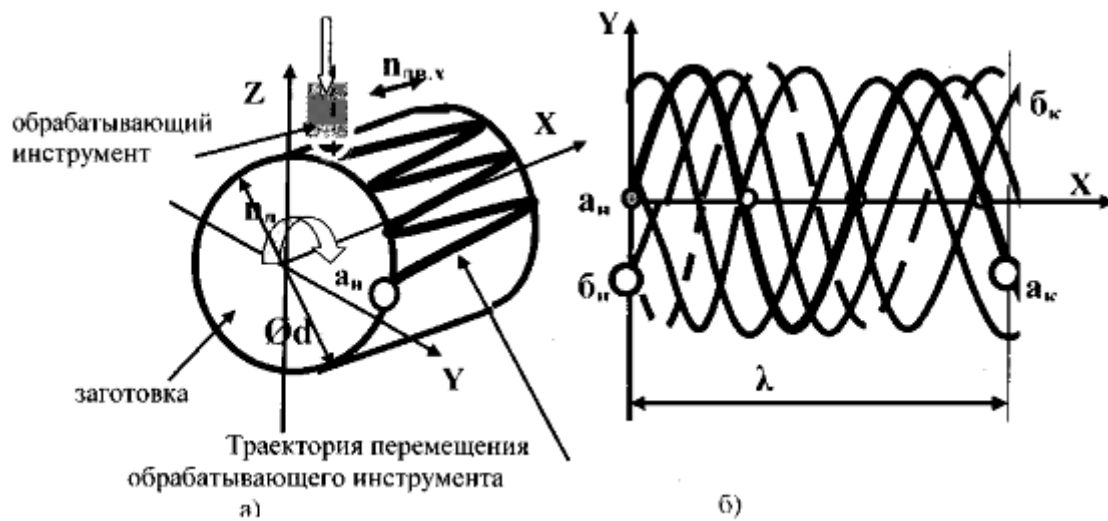


Рис. 1. Формирование микрорельефа поверхностного слоя:

а – схема рабочих движений при виброобработке;

б – последовательность формирования микрорельефа поверхностного слоя

Обойтись без дополнительных устройств можно, используя для образования микрорельефа широкоуниверсальные станки с ЧПУ. В настоящее время этот тип оборудования успешно применяется для нанесения микрорельефа любой формы и размеров на плоские поверхности [4]. Процесс регулируется программой, что позволяет обеспечивать выбранные параметры, а точность ограничивается лишь возможностями станка. Преимуществом этого способа является сокращение времени на переустановку, так как переход нанесения микрорельефа включается в операцию, содержащую предшествующие этапы обработки поверхности. Отсутствие дополнительных переустановок не приводит к снижению точности.

Еще один способ нанесения микрорельефа на предварительно обработанную поверхность – алмазное выглаживание. Нанесение углублений обеспечивается усложнением кинематики движения инструмента. В остальном обработка аналогична точению, но вместо резца в качестве режущего инструмента применяется алмазный выглаживатель (рис. 2).

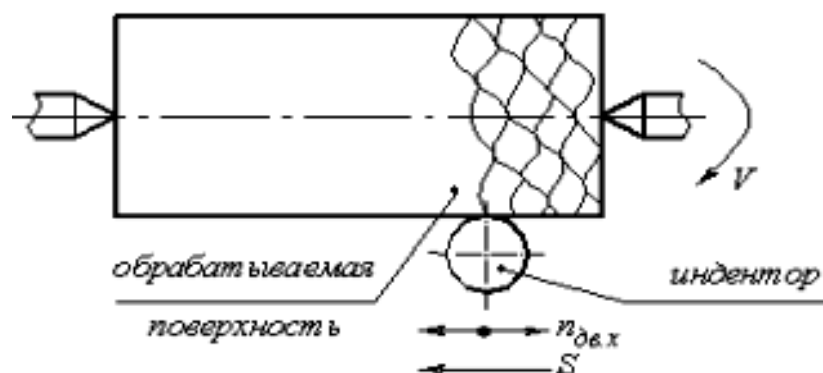


Рис. 2. Схема нанесения микрорельефа алмазным выглаживанием

Преимущество перед резанием, в том числе и рассмотренным ранее фрезерованием, заключается в образовании упрочненной поверхности волнистой формы. Выглаживатель изменяет поверхностный слой пластическим деформированием, что исключает возникновение острых кромок, создает благоприятные остаточные напряжения сжатия и повышает опорную поверхность [5]. Все параметры впадин и канавок реализуются механически.

Более усовершенствованный метод предполагает использование модулированных по амплитуде и частоте ультразвуковых колебаний [2]. Помимо сокращения времени на обработку, применение ультразвукового модуля позволяет наносить микрорельеф с высокой степенью точности, что исключает повторную обработку уже упрочненной поверхности, не приводя, таким образом, к снижению качества. Ультразвуковые колебания способствуют снижению сопротивления материала пластическому деформированию, что приводит к более ожидаемому результату при меньших затратах.

Несмотря на то, что алмазное ультразвуковое выглаживание может быть реализовано на универсальном токарно-винторезном станке, для этой операции требуется несколько дополнительных устройств, что усложняет подготовку производства.

Одним из наиболее современных способов рельефообразования можно считать лазерное воздействие. Впадины получаются за счет массопереноса под воздействием направленного концентрированного луча энергии. В месте воздействия луча металл плавится и образуется впадина. Глубина впадины регулируется силой и длительностью излучения. Управление всеми параметрами приспособления полностью автоматизировано и производится посредством ЭВМ. В качестве рабочего луча, помимо лазерного излучения, может быть использован сфокусированный поток электронов. Еще более высокую производительность при упрощенном варианте конструкции дает усовершенствование в виде применения в качестве источника энергетического луча энергии катодных пятен вакуумно-дугового разряда, перемещающихся с высокой скоростью вдоль обрабатываемой поверхности [6]. Дополнительным преимуществом является возможность обработки поверхностей сложной геометрической формы, а также внутренних сложнодоступных поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение и анализ уже существующих методов служат выбору наиболее рационального из них для применения в определенных производственных условиях, а также определению основы для совершенствования процесса обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерохин В.В. Инженерия поверхностей деталей станочных приспособлений // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2016. – Вып. № 1(82). – С. 63-68.
2. Киселев Е.С., Степчева З.В. Формирование регулярного микрорельефа при алмазном выглаживании модулированными ультразвуковыми колебаниями // Вестник двигателестроения. – 2007. Вып. № 2. – С. 120-124.
3. Кочин А.Н. Влияние регулярного микрорельефа на эксплуатационные показатели деталей машин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – Вып. № 3 (110). – С. 104-109.

4. Кузьмин Ю.П., Помпеев К.П., Целищев А.А. Использование фрезерного станка с ЧПУ для нанесения регулярного микрорельефа на поверхности заготовки // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 4. – С. 273-277.

5. Мельников П.А., Пахоменко А.Н., Лукьянов А.А. Математическая модель формирования микрорельефа шейки вала при обработке алмазным выглаживанием // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 2 (32-2). – С. 104-111.

6. Пат. 2642243, Российская Федерация, МПК В 23 Н 9/00, С 23 F 4/00. Способ формирования микрорельефа на поверхности металлических изделий / В.Г. Кузнецов, Т.А. Курбанов; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук. – № 2015143244; заявл. 09.10.2015; опубл. 24.01.2018, Бюл. № г. РИД, № 0002642243.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлова Виктория Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Viktoriya A. Pavlova – Ph.D., Associate Professor, Department of Control System Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Павлов Виталий Иванович – аспирант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vitaliy I. Pavlov – Postgraduate, Department of Control System Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 24.09.20, принята к опубликованию 25.11.20

**Р.Б. Хайралапов, Д.А. Бессонов, И.А. Попов,
М.А. Прохоров, Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко**

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ФРЕЗЕРОВКИ МИКРООСТРИЙНЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

Аннотация. Описана разработка высокопроизводительной технологии формирования автоэлектронных эмиттеров произвольной формы с высоким аспектным отношением на подложках из стеклоглассера марки СУ-2000, на основе комплекса технологических процессов с применением короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения.

Ключевые слова: лазер, длительность импульса, резка, фрезеровка

**R.B. Khayralapov, M.A. Prokhorov, D.A. Bessonov,
I.A. Popov, T.N. Sokolova, E.L. Surmenko**

TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LASER MILLING OF MICRO-EDGE STRUCTURES IN ELECTRO-VACUUM DEVICES

Abstract. The development of a high-performance technology for the formation of autoelectronic emitters of arbitrary shape with a high aspect ratio on substrates made of glass carbon of the SU-2000 brand, based on a complex of technological processes using short and ultrashort pulsed laser radiation, is described.

Keywords: laser, pulse duration, cutting, milling

ВВЕДЕНИЕ

Процесс воздействия на материал лазерным излучением, результатом которого является удаление (массовынос) вещества с поверхности или из объема твердого тела, в технической и физической литературе принято называть термином абляция. В зависимости от характера температурного состояния обрабатываемой среды различают два режима лазерной абляции: тепловой – термическое испарение (жесткая абляция) и нетепловой – холодная абляция (мягкая абляция).

Лазерная абляция носит пороговый по дозе облучения Φ характер, то есть заметное удаление вещества осуществляется лишь при условии $\Phi > \Phi_{п}$. Типичная плотность энергии

порога абляции находится в промежутке между 0,1 и 10 Дж/см², в зависимости от материала для неорганических диэлектриков он составляет от 0,5 до 2 Дж/см², для органических материалов от 0,1 до 1 Дж/см² [1].

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ФРЕЗЕРОВКИ

Для исследования процесса формирования структур на пластинках стеклоуглерода СУ-2000 применялась установка на базе лазера на АИГ с диодной накачкой с длительностью импульса 70 нс, частотой следования до 50 кГц и установка на базе лазера на АИГ с диодной накачкой и синхронизацией мод с длительностью импульса 7 пс, работающего в пакетном режиме с частотой следования в пакете 50 МГц и частотой следования пакетов до 100 кГц. Фокусировка излучения осуществлялась сканатором фирмы Raylase.

Основной мотивацией для использования коротких наносекундных и ультракоротких пикосекундных лазерных импульсов при формировании микроразмерных эмитирующих игольчатых и лезвийных структур является снижение негативного теплового воздействия на материал.

При воздействии наносекундного лазерного импульса с плотностью энергии выше порога абляции взаимодействие происходит относительно длительное время, достаточное для передачи тепла кристаллической решетке, ее нагрева, быстрого плавления и испарения. При этом часть материала превращается в плазменный факел, расширяющийся в течение нескольких пикосекунд. Часть энергии, поглощенной плазменным факелом, передается на твердую или расплавленную поверхность формирующегося отверстия, продолжая способствовать удалению материала из отверстия. Расплавленный материал в виде капель выносится из зоны «тепловой» абляции под действием градиента давления вызванного расширением плазменного факела [2].

Глубина распространения тепла внутрь материала не превышает величины $\sqrt{4k\tau}$, где τ – длительность импульса, а k – температуропроводность материала. Анализ результатов исследований поведения лазерного факела [3], возникающего при воздействии наносекундного импульса на поверхность образца из стеклоуглерода СУ-2000, выявил одновременное присутствие двух физических процессов удаления материала. А именно: нагрев вещества за счет лазерного воздействия до температуры его разрушения, сопровождающийся появлением парогазового облачка, содержащего твердые частицы и частицы каплевидной формы, и прямой переход вещества в парогазовое состояние без раздробления на более мелкие части. При этом вынос вещества из зоны воздействия продолжается и после окончания импульса лазерного излучения. Промежуток времени, в течение которого происходит вынос вещества из зоны обработки, при наносекундном воздействии лазерного излучения находился экспериментально путем регистрации времени свечения плазменного факела [3].

В качестве примера на рис. 1 приведена фотография формы лазерного факела при воздействии на поверхность образца из стеклоуглерода СУ-2000 импульса лазерного излучения наносекундной длительности, полученная с помощью видеокамеры VAA-135 производства фирмы EVS.

На ней наблюдается трехслойность факела. Видны разветвляющиеся следы движения светящихся частиц удаляемого материала с увеличением угла наклона треков их разлета от

30° до 45° относительно первоначального направления, причем скорость разлета вторичных частиц меньше начальной скорости истечения материала примерно в 1,5-2 раза. Одновременно с этим явлением наблюдается процесс прямого перехода вещества в парогазовое состояние без раздробления на более мелкие части, при этом заметного изменения скорости истечения вещества не наблюдается.



Рис. 1. Форма лазерного факела при наносекундной длительности импульса

Для импульса излучения с длиной волны 1064 нм, энергией 120 мДж и длительностью 10 нс, действующего на поверхность пластины из монолитного стеклоглерода марки СУ-2000, измеренное время выноса вещества из зоны воздействия излучения радиусом $r_0 = 10$ мкм превысило длительность импульса в 500 раз и составило 5 мкс (рис. 2). Это определило предельную частоту следования наносекундных импульсов – 200 кГц.

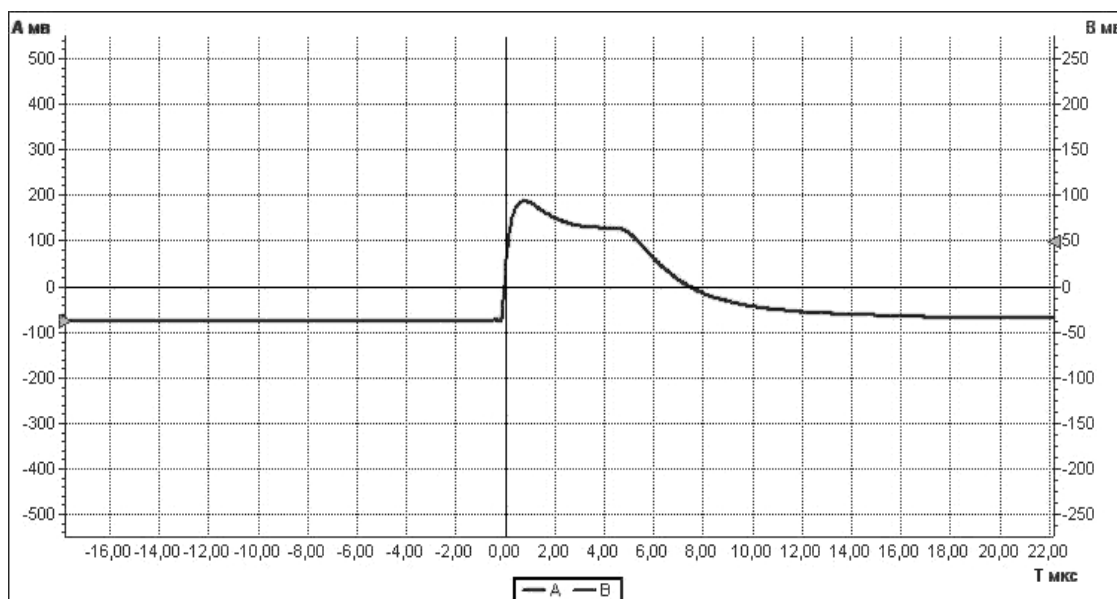


Рис. 2. Типичная осциллограмма длительности свечения плазменного факела при воздействии лазерного импульса длительностью 70 нс

Средняя скорость истечения материала определялась расчетным путем исходя из размера удаляемого объема, для приведенного выше примера она равна 1000 м/с. Таким образом, при использовании наносекундных лазеров в технологиях микрообработки в режимах «абляции выпариванием» полностью избежать появления побочных тепловых эффектов не удастся, однако позволяет значительно снизить их негативное влияние.

При использовании импульсного лазерного воздействия пикосекундной длительности с интенсивностью излучения, превышающей порог холодной абляции, негативные термические последствия практически удается исключить. Вследствие этого микрообработка с применением импульсного пикосекундного лазерного излучения фактически не сопровождается никакими температурными побочными эффектами, обусловленными непосредственным переходом энергии излучения в тепловую энергию. При этом высокое качество лазерного луча с $M^2 > 1,5$, где M – соотношение теоретического диаметра сфокусированного одномодового (чистого) гауссова пучка и фактического диаметра, дает возможность сфокусировать излучение в пятно радиусом от 5 до 50 мкм. Это позволяет вести прецизионную микрообработку конструктивных элементов вакуумной электроники соответствующих размеров.

При наиболее распространенном на практике диаметре фокусировки рабочей области в 25 мкм для превышения порога абляции в 1 Дж/см^2 требуется энергия импульса приблизительно в 10 мДж. За один импульс в области фокуса снимается от 20 до 100 нанометров материала.

Наибольшая эффективность достигается при обработке твердых материалов с размерами зоны лазерного воздействия до 50 мкм. Существенным недостатком, ограничивающим применение пикосекундных лазеров в промышленном производстве, является вторичный нагрев детали за счет теплопередачи от факела. Это требует комбинирования фокусировки излучения сканатором и перемещения детали в поле фокусировки с помощью координатного стола.

Импульсное лазерное воздействие наносекундной и пикосекундной длительностей с успехом может быть использовано в технологических целях при создании конструктивной базы различных изделий электронной техники, в том числе для формирования микроразмерных игольчатых и лезвийных эмитирующих структур автоэмиссионных катодов [4]. Вместе с тем при разработке технологических процессов микрообработки с применением короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения наряду с отмеченными выше позитивными факторами нельзя не учитывать и возможные негативные последствия, которые могут иметь место при таких воздействиях на хрупкие материалы.

Удаление вещества с поверхности материала под действием ультракороткого или короткого импульса в процессе холодной лазерной абляции или абляции выпариванием в столь короткие промежутки времени со столь высокой скоростью его истечения порождает импульсную реактивную силу, создающую в зоне воздействия излучения область высокого импульсного давления. Под ее влиянием в обрабатываемом материале возникает сложный термодинамический процесс, сопровождаемый появлением в его объеме нестационарных полей напряжений и деформаций, способных в некоторых случаях вызвать микро-, а при некоторых режимах – и макроразрушение хрупких материалов за пределами зоны обработки [4].

Для описания воздействия короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения с высокой плотностью энергии на обрабатываемые материалы с точки зрения выбора технологических режимов, обеспечивающих их целостность в процессе обработки, использована математическая модель [5]. В результате расчетов в среде Mathcad 15.0, была выявлена зависимость напряжений, возникающих внутри пластины монолитного стеклоуглерода СУ-2000, от частотного режима обработки. При подстановке ряда значений частот с шагом 50 Гц в интервале от 5 кГц до 10,5 кГц был подобран наиболее оптимальный режим обработки игольчатых структур, применение которого в производстве позволило создать эмиттеры с высоким аспектным отношением – отношение высоты острий к радиусу кривизны вершины составляло 460.

В ходе экспериментов по обработке стеклоуглерода марки СУ-2000 были выявлены границы режимов обработки по частотным характеристикам излучения, в которых процент брака получаемых эмиттеров с высоким аспектным отношением был ниже, чем в других пределах диапазона. Интервал значений составил 5 кГц-10,5 кГц и соответствовал расчетному. Технология и методы, применявшиеся и отработанные в ходе изготовления опытного образца автоэмиссионного катода, послужили прототипом при разработке технологического процесса изготовления катодных матриц с групповым размещением острий с высоким аспектным соотношением, а эта технология, в свою очередь, позволила приступить к созданию автоэмиттеров кольцевого лезвийного и кольцевого гребенчатого типов.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Лазерные и оптические технологии» (Поволжский филиал), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», мероприятие 5.2. Развитие сети центров коллективного пользования научным оборудованием, ГК № 02.552.11.7021.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен процесс взаимодействия лазерного излучения наносекундного и пикосекундного диапазона со стеклоуглеродом марки СУ 2000. Определена предельная частота следования наносекундных импульсов – 200 кГц. Определена предельная частота следования пакетов импульсов пикосекундного излучения – 10,5 кГц, при частоте внутри пакета 50 мГц. Определено, что при лазерной фрезеровке пикосекундным лазерным излучением происходит нагрев зоны фокусировки плазменным факелом. Для минимизации влияния факела предложено комбинировать фокусировку сканатором и перемещение детали с помощью координатного стола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН. – 2002. – Т. 172. – № 3. – С. 301-333.
2. Чеботаревский Ю.В. Построение расчетной модели для исследования напряженного состояния хрупких неметаллических материалов при локальном нагреве с учетом появления пластических деформаций // Механика деформируемых сред: межвуз. науч. сб. – Саратов: Изд-во СГУ, 1985. – Вып. № 9. – С. 49-54.

3. Ultrafast Laser Processing of Glass – Carbon for its Application in Field – Emission Cathodes / Sokolova T.N., Popov I.A., Chebotarevsky Y.V., Surmenko E.L. and at. All // Fundamentals of Laser Assisted Micro – and Nanotechnologies: International Symposium. – St. Petersburg, 2013. – P. 64.

4. Способ изготовления автоэмиссионного катода: пат. 2526240 РФ: МПК H01J 1/30, H01J 9/02 / Бессонов Д.А., Попов И.А., Соколова Т.Н.; № 2013101115/07; заявл. 09.01.2013; опубл. 20.08.2014 Бюл. № 23.

5. Бессонов Д.А., Соколова Т.Н., Чеботаревский Ю.В. Исследование особенностей применения короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения для прецизионной микрообработки материалов. Обзор и анализ // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 69-76.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Хайралапов Рустам Бисенбаевич – магистрант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А

Rustam B. Khayralapov – Master student, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бессонов Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, инженер 1 категории УИЛЛТТ Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitriy A. Bessonov – PhD (Engineering), Engineer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Попов Иван Андреевич – кандидат технических наук, электроник УИЛЛТТ Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan A. Popov – PhD (Engineering), Electronics Engineer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Прохоров Михаил Викторович – магистрант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail V. Prokhorov – Master student, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Соколова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatyana N. Sokolova – PhD, (Engineering), Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Машиностроение и машиноведение

=====

Сурменко Елена Львовна –

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Сварка и металлургия»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Elena L. Surmenko –

PhD (Engineering), Associate Professor
Department of Welding and Metallurgy,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.10.20, принята к опубликованию 25.11.20

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.785.545

С.В. Телегин

ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИК-ДИАПАЗОНА

Аннотация. Исследование посвящено изучению морфологии и физико-механических характеристик поверхности титановых сплавов после модификации импульсным лазерным излучением. Показано, что морфология и физико-механические свойства металлокерамических покрытий зависят от энергетических параметров процесса лазерной модификации, изменение которых позволяют формировать покрытия с заданными свойствами.

Ключевые слова: лазерная обработка, титановые сплавы, металлокерамика, композиционные покрытия

S.V. Telegin

LASER FORMATION OF COMPOSITE COATINGS OVER TITANIUM ALLOYS BY LASER RADIATION FOR IR-RANGE

Abstract. The research is devoted to the study of morphology and physical-mechanical characteristics of the surface of titanium alloys after their modification by pulsed laser radiation. It is shown that the morphology and physical-mechanical properties of metal-ceramic coatings depend on the energy parameters of laser modification processes, where the changes provide possibilities to form coatings with desired properties.

Keywords: laser processing, titanium alloys, metal-ceramic, composite coatings

В настоящее время достижение требуемого уровня морфологии и физико-механических характеристик изделий осуществляется за счет нанесения или формирования различных по природе покрытий. В системе «покрытие – основа» одними из главных характеристик выступают микротвердость слоя и адгезионная прочность сцепления покрытия и материала основы [1].

С целью снижения веса готовых изделий и без потери функциональных характеристик широкое распространение получили титан и сплавы на его основе [1-3]. В качестве материала основы для последующего формирования покрытий предпочтения отдаются техническому титану ВТ1-00 и ВТ1-0. В дальнейшем на их поверхности путем различных воздействий наносятся металлокерамические композиционные покрытия, в том числе электроплазменное напыление, различные виды электрохимического и химического оксидирования [3-6].

Нами предлагается достичь требуемой морфологии и физико-механических характеристик покрытий титановых изделий посредством термической лазерно-упрочняющей обработки с одновременным формированием металлокерамических композиционных оксидных покрытий на основе титана. Цель исследования заключается в установлении закономерностей формирования металлокерамических композиционных оксидных покрытий импульсной лазерной обработкой (ИЛО) за счет установления влияния параметров технологического процесса на морфологию и физико-механические характеристики покрытий, а также их коррозионную стойкость.

Исследование осуществлялось на плоских титановых образцах из технического чистого титана марки ВТ1-00 и сплава ВТ6 размером $20 \times 20 \times 2,5$ мм. Очистка и обезжиривание производилось с использованием ультразвуковой ванны УЗУМИ-2 при частоте 22 кГц. Концентрированное энергетическое воздействие лазерным лучом на поверхность титана осуществлялось на лазерном технологическом комплексе LRS-50.

Управляющими факторами технологического процесса являлись: напряжение лампы накачки лазера, длительность импульса, частота следования импульсов, а также число импульсов в одну зону воздействия. При варьировании данных параметров происходило изменение энергетических параметров: плотности мощности и плотности энергии лазерного излучения с использованием измерителя мощности Laserstar Orphi. Режимы лазерной обработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варьирование технологических параметров ИЛО

№ п/п	Технологические параметры	Диапазон варьирования
1	Напряжение лампы накачки U, В	от 250 до 450
2	Длительность импульса τ , мс	от 2,5 до 10,0
3	Частота следования импульсов f, Гц	от 1 до 2
4	Число импульсов в пятне облучения, шт.	от 2 до 5

Лазерная модификация поверхности титана осуществлялась с оплавлением и без оплавления поверхности. Было выявлено, что при обработке с оплавлением при плотности энергии свыше 1×10^7 Дж/м² формируется более развитая морфология поверхностного слоя. При обработке без оплавления (до 1×10^7 Дж/м²) на топографию покрытия оказывает влияние качество предварительной обработки поверхности, т. е. ее шероховатость, полученная пленка покрывает тонким металлокерамическим слоем исходную поверхность. Использование плотности энергии более 4×10^7 Дж/м² приводит к образованию трещин в металлокерамическом покрытии, вызванных высокими внутренними напряжениями.

Количество импульсов в одну зону воздействия приводит к увеличению зоны температурного влияния как на поверхности обрабатываемого материала, так и в его объеме. При использовании более 5 импульсов происходит увеличение температурных полей в объеме твердого тела, а при наличии низкой интенсивности теплоотвода определенное количество приводит к разрушению поверхностного слоя.

Анализ изображений оптической микроскопии установил, что на конечную морфологию металлокерамических покрытий оказывают влияние все вышеописанные технологические параметры процесса ИЛО (рис. 1).

На рис. 1 по оси абсцисс отложен размер частиц покрытия, а по оси ординат – их процентное содержание. При обработке с плотностью энергии $3,03 \times 10^7$ Дж/м² металлокерамическое покрытие состоит из частиц размером порядка 0,62 мкм, а при плотности энергии $1,62 \times 10^7$ Дж/м² – порядка 0,79 мкм.

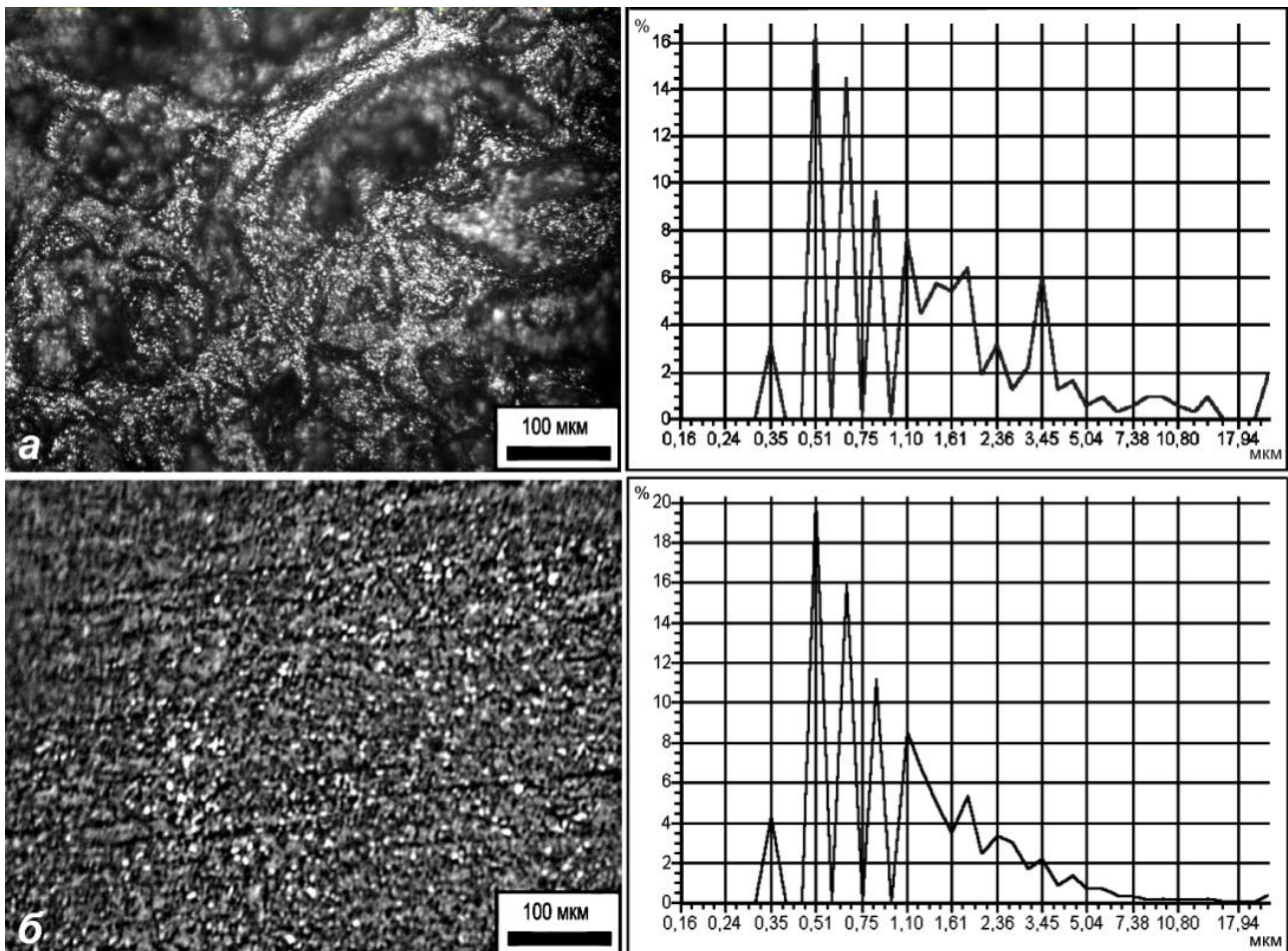


Рис. 1. Гранулометрический анализ металлокерамических покрытий:

- а) $U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 1$ Гц, $N = 5$, $Q = 3,0 \times 10^7$ Дж/м²;
 б) $U = 400$ В, $\tau = 3$ мс, $f = 1$ Гц, $N = 5$, $Q = 1,6 \times 10^7$ Дж/м²

На микротвердость металлокерамических покрытий оказывают влияние энергетические параметры процесса (рис. 2).

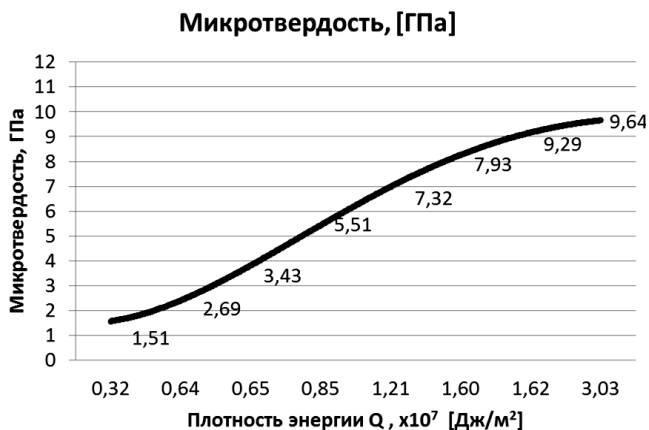


Рис. 2. Влияние плотности энергии лазерного воздействия на микротвердости металлокерамических покрытий

Микротвердость исходного титана, не подвергнутого обработке, составляла $1,8 \pm 0,2$ ГПа и изменялась по поверхности, что объясняется технологией изготовления титановых пластин на металлургическом предприятии. Лазерная модификация от $0,32 \times 10^7$ до $0,85 \times 10^7$ Дж/м² способствует выравниванию распределения значения микротвердости в поверхностном слое, при этом выявлено увеличение микротвердости на 30 % по сравнению с исходной. Это объясняется термической обработкой титана, которая не приводит к фазово-структурным превращениям в поверхностном слое. При высокоэнергетической обработке, начиная с $1,00 \times 10^7$ Дж/м², происходит плавление поверхностного слоя, активная диффузия жидкой фазой кислорода и азота из окружающей атмосферы, что приводит к фазово-структурным преобразованиям. При этом происходит значительное увеличение величины микротвердости до 10 ГПа, что в 6 раз больше, чем у титана в необработанном состоянии.

Значение предела прочности σ_b металлокерамических покрытий характеризует величину допустимых максимальных нагрузок, прикладываемых к покрытию до начала его разрушения.

Предел текучести σ_m металлокерамических покрытий характеризует напряжение, при котором начинает развиваться пластическая деформация материала.

По результатам исследования прочностных характеристик были построены графики зависимости (рис. 3).

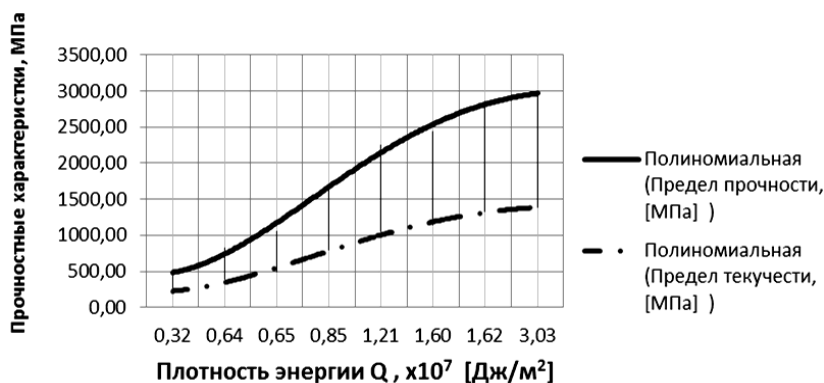


Рис. 3. Влияние плотности энергии ИЛО на прочностные характеристики металлокерамических покрытий

В ходе анализа полученных данных видно, что предел прочности и предел текучести металлокерамических покрытий зависят от теплофизического воздействия лазерного излучения, которое складывается исходя из энергетических параметров излучения. С увеличением энергетического воздействия на поверхность титановой основы происходит увеличение прочностных характеристик покрытия.

Установлено, что адгезия металлокерамических покрытий, сформированных с помощью лазерного излучения на поверхности титана, составляет 25-32 МПа, что достигается при плотностях энергии от $1,25 \times 10^7$ Дж/м² до $3,00 \times 10^7$ Дж/м², что соответствует требованиям, предъявляемым к металлокерамическим покрытиям.

Основным электрохимическим методом изучения коррозионной стойкости металлов и сплавов является метод поляризационных кривых, снятых потенциостатическим или потенциодинамическим (при медленно и линейно меняющемся потенциале) способами. При последнем способе очень широко применяется скорость изменения потенциала от 0,1 до 10,0 мВ/с.

Кривые зависимости плотности тока от потенциала (i , E) при заданной линейной скорости развертки потенциала 8 мВ/с снимали от бестокового потенциала в анодную и катодную сторону до резкого подъема тока. Так как в данных условиях процесс коррозии контролируется катодной реакцией, построение коррозионных диаграмм позволило определить потенциал и ток коррозии, протекающей с кислородной и водородной деполаризацией.

На рис. 4, 5 и в табл. 2 приведены данные коррозионных испытаний полученных методом снятия потенциодинамических кривых. Из результатов изменений следует, что наиболее положительный потенциал соответствует образцу металлокерамических покрытий, сформированных по режиму 1 ($U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$) и составляет $E_{ct} = -0,079$ В (отн. в. х.с.э.). Он же обладает и наиболее широкой областью термодинамической стабильности (крайние точки начала кислородной и водородной коррозии) $\Delta E = 2,62$ В, в то время как на чистом титане $\Delta E = 2,5$ В. Плотности тока имеют достаточно высокие значения, близкие к току обмена, что указывает на высокое электросопротивление полученных покрытий.

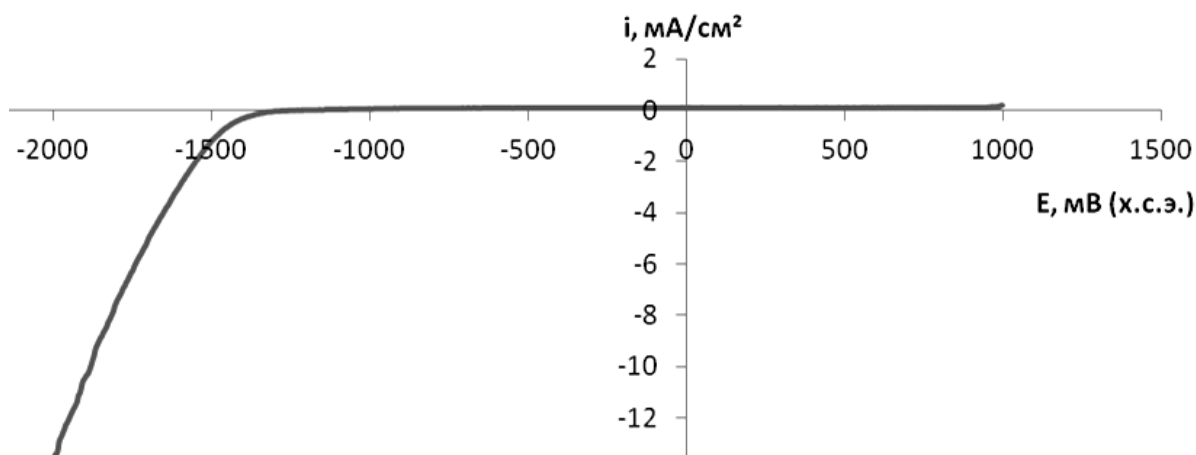


Рис. 4. Потенциодинамические кривые на чистом титановом образце без покрытия, снятые в 3 %-м растворе NaCl при скорости линейной развертки потенциала $v = 8$ мВ/с при температуре 25° С

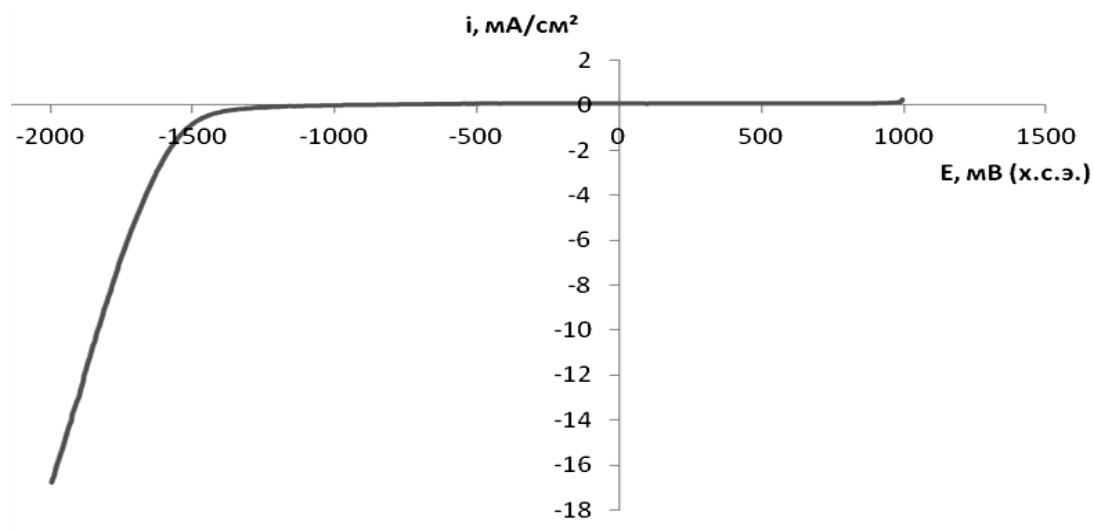


Рис. 5. Потенциодинамические кривые на металлокерамических покрытиях, сформированных по режиму 1 ($U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$) образце без покрытия, снятые в 3 %-м растворе NaCl при скорости линейной развертки потенциала $v = 8$ мВ/с при температуре 25° С

Таблица 2

Влияние технологических операций
на электрохимическое поведение титанового электрода

Наименование образца	ΔE , В	$i^a_{к}$, мА/см ²	$i^к_{к}$, мА/см ²	$E_{ст}$, (В)
Режим 16: $U = 310$ В, $\tau = 3,3$ мс, $f = 1$ Гц, $N = 2$	1,15	-4,107	1,786	-2,384
Режим 1: $U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$	2,62	-0,178	0,357	-0,179
Чистый Ti (без лазерной обработки)	2,5	-0,178	0,263	-0,085

Как видно из результатов исследований, эти данные имеют неоднозначный характер. Согласно этому методу наибольшей коррозионной стойкостью обладают образцы с чистым титаном и металлокерамическими покрытиями, сформированными по режиму 1 с образованием TiO и TiN, а образцы по режиму 16, состоящие из TiO, им проигрывают. Это несоответствие связано предположительно с различием типов покрытий, и делать однозначные выводы сложно.

Обобщая вышеописанное, можно сделать вывод, что, управляя энергетическим воздействием в ходе импульсной лазерной обработки, существует возможность формировать металлокерамические композиционные покрытия с заданными характеристиками, исходя из области применения покрытия: медицина, машино- и приборостроение.

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов СП-5291.2018.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лясников В.Н., Протасова Н.В., Толмачёв К.С. Плазмонапыленные материалы и покрытия. Свойства, технология, оборудование и применение, учеб. пособие. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. – 489 с.
2. Хаскин В.Ю. Процессы упрочнения и нанесения покрытий с использованием лазерного излучения: (обзор) // Автоматическая сварка. – 2008. – № 12. – С. 24-32.

3. Митрофанов А.А., Чащин Е.А., Балашова С.А. Обработка газотермических покрытий с использованием лазерного излучения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2011. – № 1. – С. 103-105.

4. Лясников В.Н., Гавкина М.С., Протасова Н.В. Электроплазменное напыление функциональных наноструктурированных покрытий в электронике и медицине // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – Т. 4. № 1 (77). – С. 92-96.

5. Шишковский И.В. Селективное лазерное спекание и синтез функциональных структур: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Самара, 2005. – 38 с.

6. Телегин С.В., Лясников В.Н., Гоц И.Ю. Морфология поверхности титана, модифицированной импульсной лазерной обработкой // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 3. – № 1(80). – С. 104-109.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Телегин Сергей Владимирович – ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Telegin – Assistant Lecturer, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.11.20, принята к опубликованию 25.11.20

Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Вестник СГТУ», должна быть тщательно отредактирована и представлена в электронном виде в формате текстового редактора «MS Word 2007» (параметры страницы – А 4; поля – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12; межстрочный интервал – 1,0). Текст статьи представляют в редакцию по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна содержать краткий обзор проблемы, из которого следует постановка задачи, обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы, свидетельствующие о новизне полученных результатов.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов,
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные),
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив),
- ключевые слова.

Далее авторы, название статьи, аннотация и ключевые слова повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и список литературы.

Статья завершается сведениями об авторах: Ф.И.О. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны. Сведения об авторах также повторяются на английском языке.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунка.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров Excel, Quattro Pro, MS Graph. Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0**. Каждая формула должна иметь номер.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.0.5-2008 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

8. К статье прилагается экспертное заключение.

9. Рукопись статьи рецензируется ведущим ученым в данной области, как правило, доктором наук.

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

11. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

12. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

13. Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую отдельным файлом. Высылается вместе с рукописью.

14. Плата с аспирантов за публикацию статьи не взимается.

Вестник Саратовского государственного технического университета

– рецензируемое научное периодическое издание по 2 отраслям науки: технические науки, физико-математические науки и следующим специальностям и направлениям:

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки, физико-математические науки), 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки, физико-математические науки); **05.02.00 – Машиностроение и машиноведение:** 05.02.08 – Технология машиностроения; **05.16.00 – Металлургия и материаловедение:** 05.16.09 – Материаловедение (технические науки).

Журнал имеет следующие соответствующие указанным группам специальностей разделы содержания:

- Информатика, вычислительная техника и управление
- Машиностроение и машиноведение
- Металлургия и материаловедение

Журнал публикует статьи только по данным группам специальностей!

<u>Регистрационная карта публикующегося в журнале «Вестник СГТУ»</u>		
Фамилия	Имя	Отчество
Полное название статьи		
Ученая степень	Ученое звание	Должность с указанием кафедры, отдела, лаборатории
Электронная почта	Служебный телефон/факс	Домашний адрес и телефон
Наименование направляющей статью организации		
Группа специальностей, к которой относится статья		

