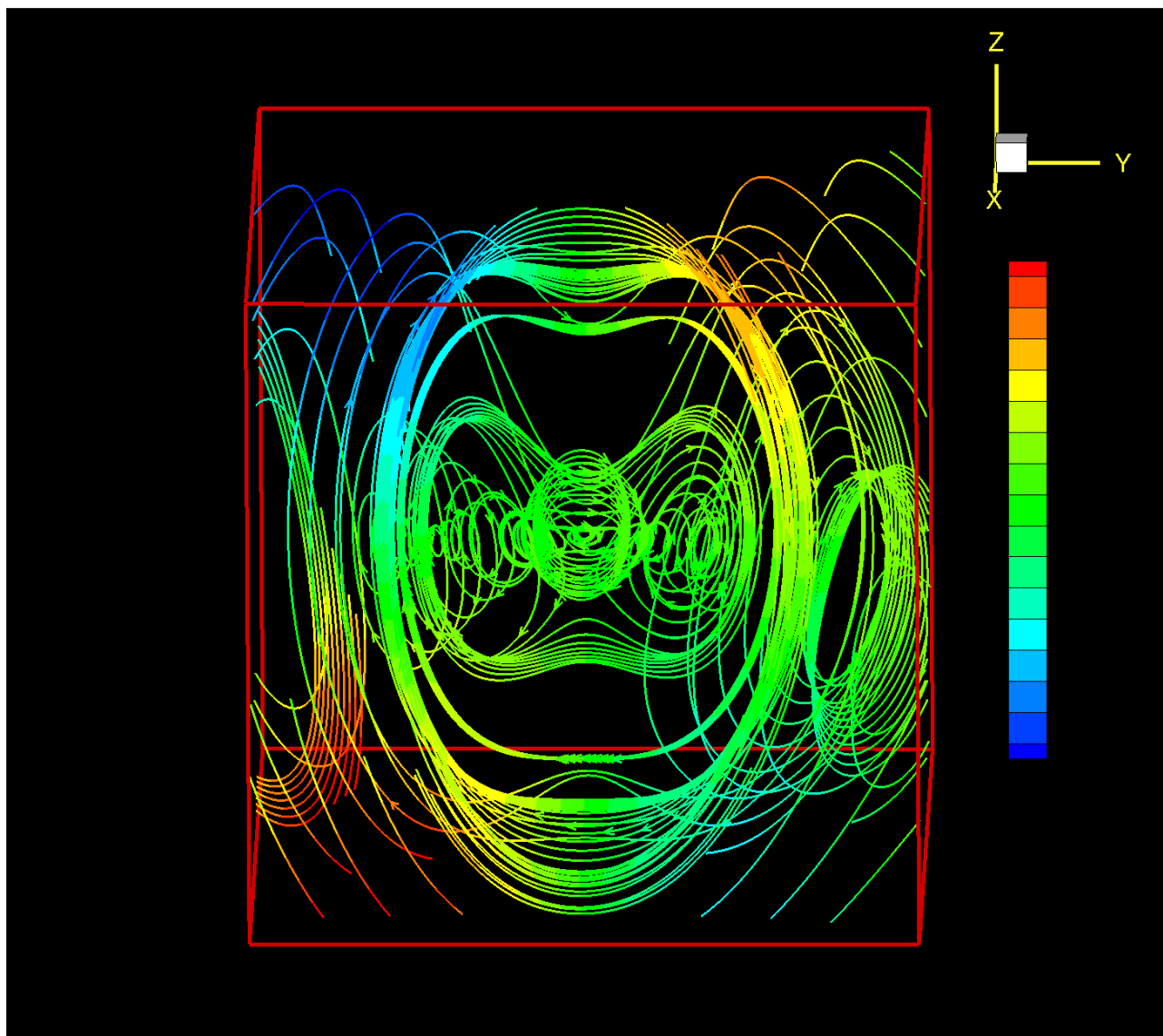




Вестник кибернетики

Международный журнал

Proceedings in Cybernetics

International Journal

№ 1 (33)

12+

2019

**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Вестник кибернетики

Международный журнал

Proceedings in Cybernetics

International Journal

№ 1 (33)

Сургут
2019

Учредитель и издатель

бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор

Бетелин Владимир Борисович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва

Заместитель главного редактора

Галкин Валерий Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, Сургут

Ответственный секретарь

Гавриленко Тарас Владимирович, к. т. н., Сургут

Члены редакционной коллегии:

Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Семёнов Алексей Львович, академик РАН и РАО, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Сойфер Виктор Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, Самара
Чаплыгин Юрий Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, Москва
Чубариков Владимир Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Смирнов Николай Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Губайдуллин Амир Анварович, д. ф.-м. н., профессор, Тюмень
Тишкин Владимир Федорович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Якобовский Михаил Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Цибульский Владимир Романович, д. т. н., профессор, Тюмень
Шагалиев Рашит Мирзагалиевич, д. ф.-м. н., Саров
Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор, Сургут
Пападопулос Атанас, профессор, Страсбург, Франция
Де Роза Феличе, профессор, Болонья, Италия

Выпускающий редактор

Аширова Анна Владимировна

Редактор

Егоров Александр Алексеевич, к. т. н.

Верстка

Мельниковой Екатерины Алексеевны

Переводчик

Бенская Марина Олеговна

Рисунок на обложке:

Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© В. А. Галкин, А. В. Гореликов

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим группам научных специальностей: 01.01.00 – математика, 01.02.00 – механика, 05.01.00 – инженерная геометрия и компьютерная графика, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.27.00 – электроника.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ЭЛ № ФС 77–63407 от 16.10.2015.

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

БУ ВО ХМАО–Югры «Сургутский государственный университет»,
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1.
Тел.: (3462) 76-29-88, факс: (3462) 76-29-29, e-mail: jc@surgu.ru. Сайт: surgu.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladimir B. Betelin, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow

Vice Chief Editor

Prof. Valerii A. Galkin, Doctor of Science (Phys&Math), Surgut

Executive Editor

Taras V. Gavrilenko, PhD (Engineering), Surgut

Editorial Board:

- Prof. Vladislav Ya. Panchenko, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow
- Prof. Alexey L. Semyonov, member of the Russian Academy of Sciences (RAS) and the Russian Academy of Education,
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow
- Prof. Gennady I. Savin, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow
- Prof. Viktor A. Soifer, Doctor of Science (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Samara
- Prof. Yuri A. Chaplygin, Doctor of Science (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow
- Prof. Vladimir N. Chubarikov, Doctor of Science (Phys&Math), Moscow
- Prof. Nikolay N. Smirnov, Doctor of Science (Phys&Math), Moscow
- Prof. Amir A. Gubaidullin, Doctor of Science (Phys&Math), Tyumen
- Prof. Vladimir F. Tishkin, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow
- Prof. Mikhail V. Iakobovskii, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow
- Prof. Vladimir R. Tsibulsky, Doctor of Science (Engineering), Tyumen
- Prof. Rashit M. Shagaliyev, Doctor of Science (Phys&Math), Sarov
- Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Science (Engineering), Surgut
- Prof. Athanase Papadopoulos, Strasbourg, France
- Prof. Felice De Rosa, Bologna, Italy

Publishing Editor

Anna V. Ashirova

Editor

Alexander A. Egorov, PhD (Engineering)

Layout

Ekaterina A. Melnikova

Translator

Marina O. Benskaya

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere
© V. A. Galkin, A. B. Gorelikov

Since 29.05.2017 the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals
Published in the RF by the Higher Attestation Commission,
which publishes main scientific results of doctor's and candidate's theses, on the following subject groups: 01.01.00 – Mathematics;
01.02.00 – Mechanics; 05.01.00 – Engineering Geometry and Computer Graphics; 05.13.00 – Computer Science, Computing, and
Control; 05.27.00 – Electronics.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.
Mass media registration certificate EL No. FS 77–63407 dated on 16.10.2015.
Published since 2002. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, Surgut, Lenin pr., 1
Tel.: +7(3462) 76-2988, fax: +7 (3462) 76-2929, e-mail: jc@surgu.ru. Web: surgu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Семенов О. Ю.	
Исследование гидродинамики пламени в плоском канале с неподвижным поршнем	7
Быковских Д. А., Галкин В. А.	
О вычислительном тесте для модели адиабатического сжатия идеального бесстолкновительного газа	15
Лебедев С. Л.	
Физика как вычислительный код	24
Воронова О. С., Конопацкий Е. В.	
Геометрическое моделирование параметров физического состояния воды и водяного пара	29

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ахпашев Р. В., Завьялова Д. В.	
Анализ и оптимизация абонентского устройства при использовании в сетях 5G на основе модели слайсинга	40
Стулов П. А., Егоров А. А., Гавриленко Т. В.	
Современные технологии создания модели порового пространства горных пород	47
Бородина Е. А., Семенова Л. Л.	
Зависимость температуры от сопротивления различных материалов и определение их температурного коэффициента	55
Бурдыко Т. Г., Бушмелева К. И.	
Показатели качества программных средств	60
Григоренко В. В., Горбунов С. В., Хвостов Д. Ю., Касаткин В. В.	
Нестабильные системы: проблема однородности групп	67
Иванов Ф. Ф., Семенов К. Г.	
Модель реверсивного движения документов в системе управления документами DIRECTUM	76
Шадрин Г. А., Кочеров С. А.	
Программно-аппаратный комплекс фотонной корреляционной спектроскопии на основе анализа цифрового видео	83
Иванов Ф. Ф., Никифоров А. В.	
Производительность программных интерфейсов взаимодействия виртуальных машин Java и .NET	88
Бушмелева К. И., Зарипова Л. Р.	
Моделирование жизненного цикла программного обеспечения от сбора требований до внедрения на основе применения UML-диаграммы	94
Дубанов А. А.	
Задача преследования объектов, передвигающихся по разным поверхностям	100
Занин А. С., Бушмелева К. И.	
Классификация ошибок параметров телеметрии на примере диспетчерского центра электроэнергетики для задачи по автоматизации процесса достоверизации	106

CONTENTS

PHYSICS AND MATHEMATICS

Semenov O. Yu.	
Study of Flame Hydrodynamics in a Flat Channel with a Fixed Piston	7
Bykovskih D. A., Galkin V. A.	
On Computing Test for Adiabatic Compression Model of Ideal Collisionless Gas	15
Lebedev S. L.	
Physics as a Computational Code	24
Voronova O. S., Konopatskiy E. V.	
Geometric Modeling Parameters of Water and Water Vapour Physical State	29

ENGINEERING

Akhpashev R. V., Zavyalova D. V.	
Analysis and Optimization of User Equipment Working in 5G Networks Based on Slicing Model	40
Stulov P. A., Egorov A. A., Gavrilenko T. V.	
Modern Technologies for Modelling Pore Space of Rocks	47
Borodina E. A., Semenova L. L.	
Dependence of Temperature on Resistance of Various Materials and Determination of Their Temperature Coefficient	55
Burdyko T. G., Bushmeleva K. I.	
Indicators of Software Quality	60
Grigorenko V. V., Gorbunov S. V., Khvostov D. Yu., Kasatkin V. V.	
Unstable Systems: The Homogeneity Problem of Groups	67
Ivanov F. F., Semenov K. G.	
Model of Reverse Movement of Documents in the Document Management System DIRECTUM	76
Shadrin G. A., Kocherov S. A.	
Hardware-Software Complex of Photon Correlation Spectroscopy Based on Analysis of Digital Video	83
Ivanov F. F., Nikiforov A. V.	
Performance of Interaction Program Interfaces of Java and .NET Virtual Machines	88
Bushmeleva K. I., Zaripova L. R.	
Software Life Cycle Modeling from Requirements Gathering to Implementation Based on the Use of UML-Diagrams	94
Dubnov A. A.	
Pursuit Problem of Objects Moving Along Different Surfaces	100
Zanin A. S., Bushmeleva K. I.	
Classification of Telemetry Parameters Errors on the Example of Electric Power Industry Dispatching Center for Automation Task of Verification Process	106

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПЛАМЕНИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С НЕПОДВИЖНЫМ ПОРШНЕМ

О. Ю. Семенов

Сургутский государственный университет, ous.tutor.phinma@mail.ru

В статье обсуждаются условия наблюдения эффектов, проявляющихся при распространении фронта пламени в каналах, представляющих собой систему геометрических и теплофизических параметров, влияющих на горение газовой смеси в стационарных и динамических режимах. Проведено экспериментальное исследование распространения фронта газозвушного пламени в плоском канале с неподвижным поршнем. Обнаружено формирование во фронте пламени вихревых течений. Исследованы гидродинамика и структура пламени, зависящие от параметров эксперимента.

Ключевые слова: гидродинамическая неустойчивость, вращение пламени, циркуляция, камера сгорания, плоский поршень, ДВС, структура пламени, турбулентность.

STUDY OF FLAME HYDRODYNAMICS IN A FLAT CHANNEL WITH A FIXED PISTON

O. Yu. Semenov

Surgut State University, ous.tutor.phinma@mail.ru

The article discusses the conditions for observing effects that manifest themselves when the flame front propagates in the channels and represents a system of geometric and thermophysical parameters affecting the combustion of a gas mixture in stationary and dynamic modes. An experimental study of the propagation of the front of an air-gas flame in a flat channel with a fixed piston is carried out. The formation of eddy currents in the flame front is detected. The hydrodynamics and flame structure depending on the parameters of the experiment are investigated.

Keywords: hydrodynamic instability, flame rotation, circulation, combustion chamber, flat piston, internal combustion engine, flame structure, turbulence.

Процессу горения в энергетических установках посвящено значительное количество экспериментальных и теоретических работ [1–14]. На горение газозвушных смесей в камерах сгорания влияют физико-химические параметры, при которых система возвращается к начальным условиям для продолжения процесса сгорания газовой смеси, нарушаемым при распространении фронта пламени. Полученные новые гидродинамические и теплофизические эффекты обнаруживаются в экспериментах с изученными ранее объектами. Первая причина связана с новыми возможностями современных цифровых технических средств диагностики, регистрации и обработки результатов экспериментов; вторая проявляется в совпадении и несовпадении результатов с ранее известными, полученными на одних и тех же установках с применением одинаковых инструментов и приборов. Это позволяет применить новые экспериментальные методики к изучению процессов распространения фронта пламени в камерах сгорания с поршнем [1–2].

Коэффициент полезного действия современных двигателей внутреннего сгорания не превышает 50 %. Одной из причин низкого КПД является неполное сгорание топлива, связанное с закономерностями распространения фронта пламени в камере сгорания, одна из стенок которой образована поршнем. В настоящее время в научной литературе недостаточно сведений о гидродинамике течений газов и пламени около стенок поршня и поведения фронта пламени в пространстве канала-камеры сгорания, и неустойчивость процессов горения связана с процессами вихреобразования и ускорением фронта пламени.

Целью работы является исследование распространения фронта пламени в плоском прямоугольном канале с неподвижным поршнем. Объектом исследований являлся фронт пламени, распространяющийся по газовой горючей смеси в прямоугольном канале.

Фронт пламени представляет собой волну химической реакции, образующую поверхность раздела определенной ширины между начальной горючей смесью и продуктами ее сгорания. Авторами работ [3, 4] показано, что рост возмущений на поверхности фронта зависит от амплитуды, связанной с длиной волны, и степени расширения компоненты горючей смеси. Несоответствия между определенными экспериментальными фактами и эффектом Ландау, теоретически предсказывающим гидродинамическую неустойчивость фронта пламени, полностью не определены. Гидродинамическая неустойчивость Ландау – Дарье представляет собой увеличение возмущений фронта из-за возникновения областей повышенных давлений, вызванных изменениями плотностей вдоль поверхности фронта пламени; а неустойчивость Релея – Тейлора представляет собой ускорение, направленное по нормали к неоднородности пламени. Фронт пламени, имеющий волновую природу, активно воздействует на гидродинамику течения и представляет собой поверхность гидродинамического разрыва, так как он обладает тепловой и химической структурой. Учитывая указанные выше обстоятельства, можно моделировать неожиданные физические эффекты, сопровождающие взаимодействие фронта пламени со стенками канала и преградой в канале – неподвижным поршнем. Волновая природа фронта пламени может быть выявлена и изучена при определенных размерах и формах камеры сгорания, физико-химических свойствах горючей газовой смеси [5–7]. Изучению распространения фронта пламени в камерах сгорания с перегородками посвящено значительное количество работ, в которых исследуется влияние преград на развитие вихревых и турбулентных течений, определяются условия проникновения пламени в зазоры между препятствием и стенками каналов, сопровождаемые возникновением турбулентности [8–14]. В данной работе было учтено влияние на результат эксперимента одновременного сочетания разных физических параметров, определяющих многообразие воздействий на исследуемый процесс.

Схема установки для проведения экспериментов показана на рис. 1. Камера сгорания – плоский канал (рис.1. 1) – представляет собой две параллельные пластины, выполненные из прозрачного плексигласа, находящиеся на расстоянии $3 \cdot 10^{-3}$ м друг от друга. В канале устанавливали поршень (рис.1. 4) в виде плоского прямоугольника с вырезами в форме буквы «Н». Данная форма поршня с вырезами была выбрана для уменьшения его массы, что способствовало увеличению присоединенной массы продуктов горения и дало возможность получить детальную информацию о структуре течения продуктов горения в «газовом кармане», образованном прямоугольными вырезами в поршне. Размеры поршня равнялись $1,5 \cdot 10^{-1} \times 1,5 \cdot 10^{-1}$ м. Вырезы в поршнях имели квадратную форму со стороной $5 \cdot 10^{-2}$ м. Расстояние между стенками канала-камеры сгорания и поршнем в разных экспериментах составляло $3 \cdot 10^{-3}$ м ÷ $4 \cdot 10^{-3}$ м. Поршень в канале устанавливали на различных расстояниях от точки зажигания: $5 \cdot 10^{-2}$ м, $7,5 \cdot 10^{-2}$ м и 0,1 м – и закрепляли в неподвижном состоянии.

В экспериментах применялись пропано-воздушные смеси, приготавливаемые в газометре вытеснения с погрешностью меньше 0,2 %, содержание пропана изменяли от 3,5 до 7,5 % в зависимости от начальных условий. Пропано-воздушная смесь из газометра поступала через газовый шланг с пламегасителем (рис.1. 6), краном (рис.1. 7) и расходомер (рис.1. 9) в камеру сгорания – канал (рис.1. 1). Газовоздушную смесь зажигали искровым разрядом от катушки между двумя электрическими электродами (рис.1. 5), встроенными в торцевой стенке канала (рис.1. 1). Фронт пламени (рис.1. 3) распространялся от закрытого края прямоугольного канала к открытому. Скорость распространения пламени измеряли, учитывая объемную концентрацию пропана в смеси с воздухом. Съемку распространения фронта пламени в плоском канале с поршнем производили методом прямого фотографирования через прозрачные стенки канала с помощью цифровой видеокамеры Canon Digital IXUS 950 IS. Скорость видеосъемки составляла 60 кадров в секунду.

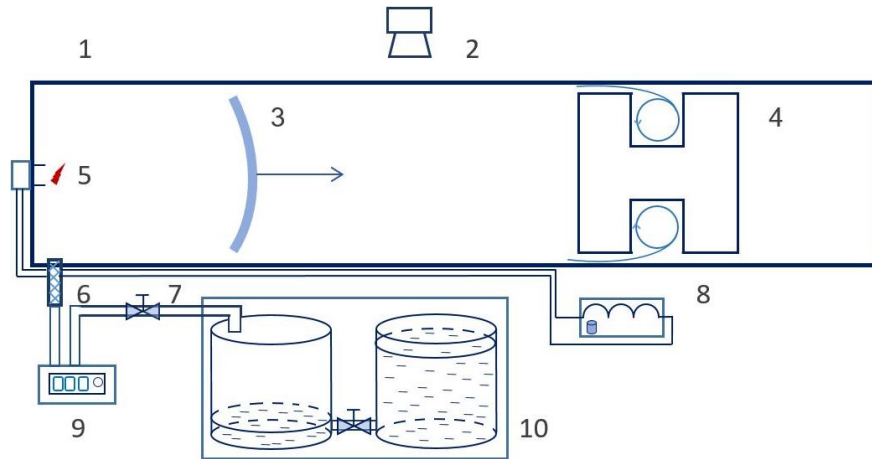


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – плоский канал – камера сгорания;
 2 – цифровая видеокамера (вид сбоку); 3 – фронт пламени;
 4 – плоский прямоугольный поршень; 5 – система электродов; 6 – пламегаситель;
 7 – газовый шланг с краном; 8 – катушка зажигания с электрическими проводами;
 9 – расходомер газа; 10 – газометр вытеснения

Опыты проводили при различных начальных объемах камеры сгорания. Фронт пламени (рис.1. 3), распространяясь в канале от точки зажигания до передней стенки поршня, проходил через зазоры между поршнем (рис.1. 4) и стенками канала (рис. 2). Из результатов многочисленных экспериментов определено, что при увеличении объема свободного рабочего пространства канала до критической величины происходило увеличение скорости распространения фронта пламени в канале.

Проникновение фронта пламени и продуктов сгорания газовой смеси в вырезы поршня создавало гидродинамическое «компрессионное» газовое кольцо (рис. 2). Из-за процессов, связанных с диффузионно-тепловой неустойчивостью на фронте пламени, формируются возмущения, и скорость распространения пламени, как и длина волны λ , прямо пропорциональны промежутку δ между стенками прямоугольного канала при $\delta \leq 10^{-2}$ м.

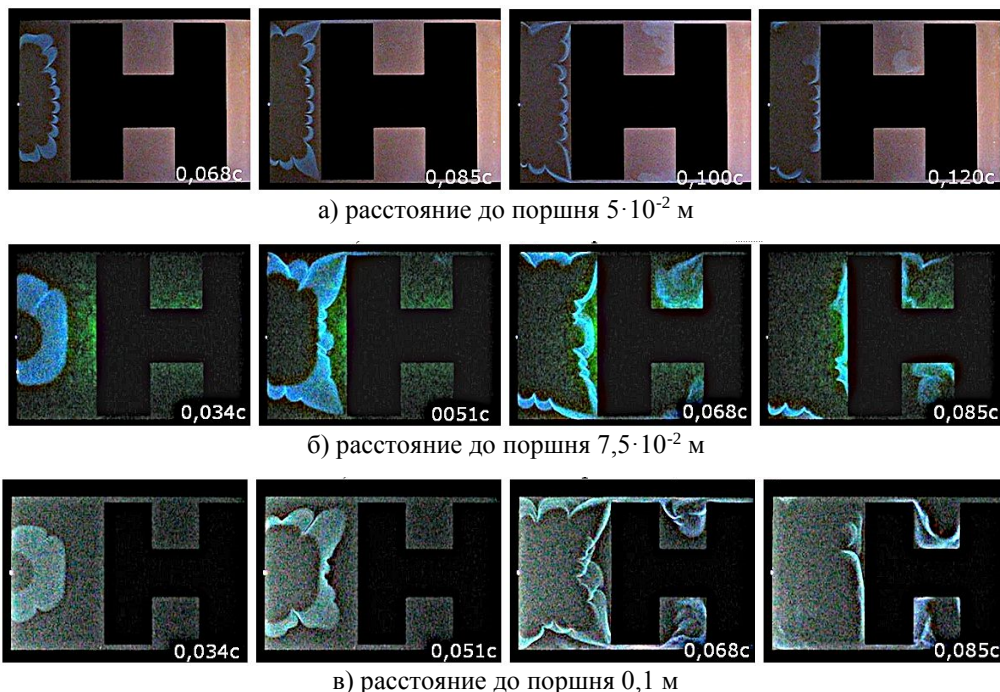


Рис. 2. Состав смеси: 6,0% C₃H₈ + воздух, съемка 60 к/с

Из кадров видеофильма, полученных в результате экспериментов, определено, что на поверхности фронта пламени еще до встречи с передней стенкой плоского поршня развиваются возмущения с длиной волны, сопоставимые с поперечными размерами камеры сгорания-канала. Также результатом прохождения фронта пламени между зазором, образованным стенками канала и поршнем, является возникновение турбулентной струи пламени. Далее скорость распространения фронта пламени увеличивается в несколько раз и возникающие деформации на поверхности фронта пламени равны расстоянию между боковыми стенками поршня и стенками канала.

Взаимосвязь скорости фронта за поршнем и длины волны пламени возмущения позволяет выявить физический механизм, влияющий на форму фронта и скорость его распространения в прямоугольном канале. Она представлена в виде зависимости отношения чисел Рейнольдса $\frac{Re}{Re_0}$. При расчете чисел Рейнольдса Re и Re_0 использовали значения

скорости распространения фронта до и после прохождения поршня в камере сгорания, а в качестве расстояния между стенками канала применяли наименьшее.

Волновые свойства фронта пламени характеризует интервал длин волн $\frac{\lambda}{\delta} \leq 10 \div 15$. Изменение скорости распространения пламени в сторону уменьшения после прохождения пространства между поршнем и стенками канала объясняется перестройкой тепловой структуры пламени при понижении температуры, связанном с потерями тепла в стенки канала. Для области, соответствующей отношению $\frac{\lambda}{\delta} \geq 20 \div 25$, происходит распад фронта пламени и увеличение его поверхности при уменьшении потерь тепла в стенки камеры, что является причиной возрастания скорости его распространения. На рис. 3 представлен график зависимости скорости распространения фронта пламени после прохождения через зазор между поршнем и боковой стенкой канала от длины волны возмущения, где длина волны возмущения на поверхности фронта пламени по порядку величины равна ширине зазора.

Горение газа описывается формулой Аррениуса и в предположениях, что газ динамически несжимаем, его параметры будут описываться системой уравнений (1–4) в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times (\rho \times V) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + (V \times \nabla) \times \rho V = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta V, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (V \times \nabla) \times T = \frac{1}{Re \times Pr \times \rho} \Delta T - \frac{Re \times Pr \times Ze^2 (\varepsilon - 1) \times \varepsilon}{2} \times a \times \exp\left(\frac{E}{\varepsilon} - \frac{E}{T}\right), \quad (3)$$

$$P = P_0 + M^2 \times p \text{ и } P_0 = \rho \times T = \text{const}, \quad (4)$$

где T и ρ – температура и плотность газа;

t – время процесса;

V – вектор скорости газа;

P_0 – термодинамическое постоянное давление в канале равное $T \cdot \rho_0$;

p – динамическая компонента давления;

E – энергия активации;

ε – степень теплового расширения.

Расчетные величины связаны критериями подобия: $Re = u_n \times d\rho/\nu$; $Pr = \nu \times c_p/\chi = 1$; $Le = \chi/c_p \times \rho_0 \times D = 1$, $Ze = (\varepsilon - 1) \times (E/\varepsilon^2)$, где ν , χ , D – коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии; ρ_0 – плотность; c_p – теплоемкость при постоянном давлении и число Маха $M < 1$.

Рассмотренная система уравнений позволяет описать процессы образования вихрей за поршнем в канале. Интенсивность вихря зависит от условий поджигания смеси и различного во времени количества сгораемого перед препятствием газа. Циркуляция, вычисленная вдоль замкнутых линий тока в вихре, имеет квадратичную зависимость от линий тока, а вихрь – другую структуру, чем при простом обтекании поршня фронтом пламени [9–12].

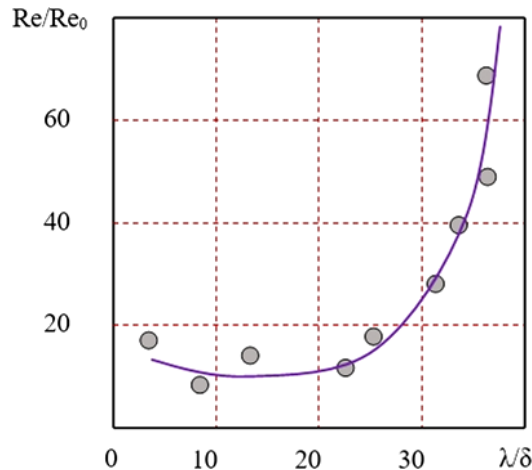


Рис. 3. Зависимость скорости распространения фронта пламени после прохождения его через зазор между поршнем и боковой стенкой канала от длины волны возмущения

Вихревое течение, возникающее при движении фронта пламени, происходит только в плоскости параллельной поверхности боковых стенок канала. Явление заметно, если имеется компонента скорости течения, касательная ко фронту пламени. Фиксация и объяснение данного эффекта позволяют получить дополнительные данные возникновения вихревых эффектов пламени и эволюции возмущений на поверхности фронта пламени. Становится понятен механизм возникновения возмущений на поверхности фронта пламени, который связан с появлением вращательного движения газа на фронте пламени. Длина волны пропорциональна скорости пламени и периоду его вращения, и амплитуда изменений на фронте поверхности пламени пропорциональна размерам вихря пламени [3, 4].

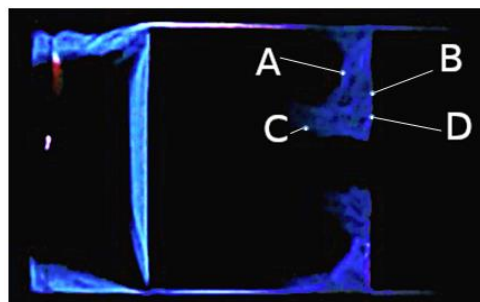


Рис. 4. Формирование вихревых колец пламени в вырезах плоского поршня

Вихри, появляющиеся за краями поршня вследствие неустойчивости течения пламени и смеси газов в слое смешения, при срывах с обтекаемого поршня, существенно влияют на процессы горения; пламя деформирует гидродинамическим полем сам вихрь, перераспределяя тепловые и диффузионные потоки, и расширяющиеся продукты горения создают течение за фронтом. Вихри искажают гидродинамический поток таким образом, что выпуклые в сторону свежей смеси участки пламени ускоряются, а вогнутые замедляются; и в результате этого амплитуда малых искривлений фронта нарастает. На рис. 4 представлен видео-

кадр экспериментов по фиксации образования вихря пламени в поршне. Точкой т. А показана левая часть формирующегося вихря пламени, т. С указывает на крайнюю ведущую точку пламени, т. В – правая часть вихревого пламени и т. Д – место догорания остатков смеси возле стенки канала. Заметно изменение структуры пламени и вследствие стретч-эффекта вытягивание пламени в угловую турбулентную струю, после чего происходит дробление части фронта пламени на отдельные фрагменты ограниченных размеров. Отток тепла начинается в районе ведущей точки фронта пламени т. С, здесь скорость горения меньше, чем в соседних участках выреза поршня.

Определяющими параметрами процессов в камере сгорания-канале служит число Рейнольдса, подсчитанное с учетом ширины канала, нормальной скорости распространения пламени в нем, вязкости газа, степени теплового расширения, размеров поршня и расстояния от точки воспламенения до передней стенки поршня. Из-за теплового расширения при сгорании в вихре линии тока приобретают спиралевидную форму. С увеличением степени теплового расширения растет поток газа через препятствие-поршень, а с ним – и интенсивность нарастания вихря. Затягивание вихря проявляется тем сильнее, чем выше значение числа Рейнольдса и степень теплового расширения. Когда пламя достигает стороны препятствия, обращенной к открытому концу канала, продукты сгорания между препятствием и вихрем деформируют и выталкивают его к открытому концу канала [8–11]. Возможен процесс обратного движения пламени в вырезы плоского поршня и пространства между поршнем и стенками камеры сгорания, вызванный релаксационными колебаниями в полуоткрытом канале (рис. 5). В вырезы поршня фронт пламени проникает уже со стороны открытой стороны канала, образуя вихрь, закручивающийся против часовой стрелки. В объеме канала за поршнем заметно догорание оставшейся смеси, святящееся на фотофрагменте эксперимента ярко-оранжевым цветом, также происходит проникновение пламени в пространство между точкой зажигания и передней стенкой поршня.

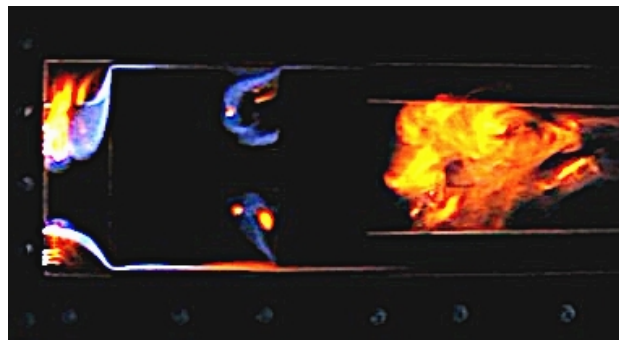


Рис. 5. Обратное проникновение пламени в вырезы плоского поршня и пространства между поршнем и стенками камеры сгорания

В плоском прямоугольном канале распространяющийся фронт пламени может деформироваться в двух направлениях, перпендикулярных друг другу. Радиусы фронтов искривляющегося пламени равны меньшему и большему промежуткам между стенками канала и вырезами поршня. Вихрь пламени, вызванный при его распространении в канале, имеет одну компоненту и определяется уравнением [3, 4]:

$$\Omega = -\frac{\alpha - 1}{\partial \alpha} \times \left(\frac{u_1}{Rc} + \frac{\partial u_2}{\partial \mu} \right). \quad (5)$$

Составляющая вектора плоского вихря в вырезе поршня и канале, направленная вдоль движения фронта пламени, равна $\Omega = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}$. Индексы 1 и 2 в уравнении (5) соответ-

ствуют: 1 – холодному газу перед фронтом и 2 – продуктам сгорания газозвоздушной смеси; w – величина скорости газа, перпендикулярная стенкам камеры; R_c – радиус кривизны линий течения; $\alpha = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ – коэффициент расширения газа пламени; ρ_1 – плотность холодного газа и

ρ_2 – плотность продуктов сгорания; μ – координата, направленная вдоль линий тока. Кривизна линий тока связана с гидродинамикой течения и пропорциональна кривизне фронта пламени. Эффект образования вихревого фронта пламени указывает на связь тепловых, диффузионных и гидродинамических процессов, которые взаимосвязаны с потерями устойчивости и формированием ячеистой структуры пламени.

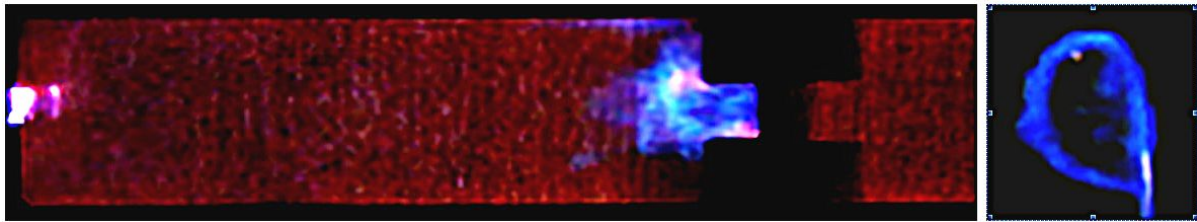


Рис. 6. Процесс образования вихревого кольца пламени в вырезе поршня, расположенного под углом 90° в канале

В прямоугольном канале, в котором один из размеров поперечного сечения меньше $2,5 \times 10^{-3} \text{ м} \div 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, возмущения на фронте пламени формируют его ячеистую структуру и вихревое кольцо пламени в вырезе поршня, расположенного под углом 90° (рис. 6). Между стенками канала и фронтом пламени образуется область, содержащая несгоревшую смесь. Догорание пропано-воздушной смеси газов в этой области происходит спустя $3 \cdot 10^{-2} \text{ с} \div 9 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ после прохождения основной части фронта пламени. На рис. 7 представлена зависимость координаты ведущей точки фронта пламени в канале от времени распространения пламени. Скорость фронта пламени, резко возрастающая после зажигания газовой смеси, уменьшается около передней стенки поршня.

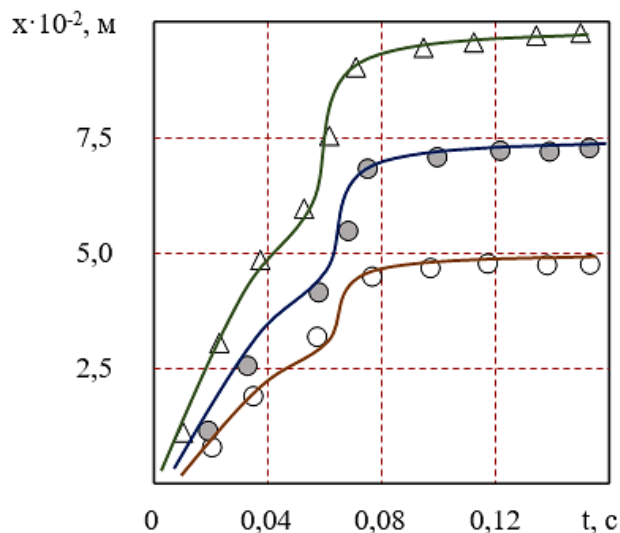


Рис. 7. Зависимость координаты фронта пламени от времени при различном положении неподвижного поршня в канале от точки зажигания:
○ – $5 \times 10^{-2} \text{ м}$; ● – $7,5 \times 10^{-2} \text{ м}$; Δ – $0,1 \text{ м}$

В результате экспериментов выявлено, что при определенных условиях в зазоре между поршнем и стенками канала происходит проскок пламени – фронт пламени проникает за пор-

шень. Обнаружено образование вихря в вырезе поршня и вихревое вращение пламени возле стенок канала. Определены зависимости формы фронта пламени от параметров эксперимента: длины и ширины канала, степени заполнения канала горючей смесью, связанной с объемом камеры сгорания и скорости распространения фронта пламени. Экспериментальные результаты, полученные в данной работе, расширяют сведения об особенностях распространения пропано-воздушного пламени в прямоугольных каналах с поршнем. При горении в канале с препятствием-поршнем возможно выталкивание вихря пламенем из канала и существование объемов несгоревшей смеси в сгоревшем газе с последующим догоранием. Фронт пламени может проходить через зазоры, размер которых меньше критического размера затухания; погасание пламени возможно в каналах более широких, чем критический размер препятствия.

В работе дано описание нескольких физических эффектов, связанных с изменением формы и скорости распространения фронта пламени, а также характера его взаимодействия с преградой-поршнем, находящимся в канале. Представлено объяснение физических механизмов, управляющих наблюдаемыми явлениями и связанных с неустойчивостью горения, вихреобразованием и тепломассопереносом вблизи фронта пламени. Показана практическая ценность обнаруженных физических эффектов для техники и промышленности, связанная с возможностью разработки более совершенного оборудования и безопасных технологий при конструировании двигателей внутреннего сгорания и горелочных устройств нового типа.

Литература

1. Semenov O. Y. Simulation Of Hydrodynamic Phenomena Attendant On The Flame Front Propagation In A Tube Behind A Piston // *Technical Physics*. 2014. Vol. 59, No. 1. P. 52–59.
2. Semenov O. Y. Relaxation Combustion Of Gas Mixture In A Tube: Paradox piston motion // *Technical Physics Letters*. 2013. Vol. 39, No. 5. P. 435–437.
3. Зельдович Я. Б., Истратов А. Г., Кидин Н. И., Либрович В. Б. Гидродинамика течения и устойчивость искривленного фронта при распространении пламени в каналах : препринт № 143 ИПМ АН СССР. М., 1980. 72 с.
4. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М. : Наука. 1980. 478 с.
5. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. М. : Физматгиз, 1961. 500 с.
6. Markstein G. H. Non-steady flame Propagation // Pergamon, New York. 1964. P. 22.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М. : Наука, 1988. 736 с.
8. Yakush S. E. Experimental Study On Cellular Premixed Propane Flames In A Narrow Gap Between Parallel Plates // *Combustion Science and Technology*. 2019. Vol. 191, No. 5. DOI 10.1080/00102202.2018.1521394.
9. Renard P.H., Thevenin D., Rolon J.C., Candel S. Dynamics of flame/vortex interactions // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2000. Vol. 26. P. 225–282.
10. Laverdant A., Candel S. Computation of diffusion and premixed flames rolled up in vortex structures // *J Propu Power*. 1989. Vol. 5(2). P. 134–143.
11. Fedorov A. V., Istratov A. G., Kidin N. I. The Study of Tulip-Configuration // *Second International Mediterranean Combustion Symposium*. Egypt, Sharm El-Sheikh. 2002. № 100/1.
12. Bernard T. L. Guenther Von Elbe Combustion, flames, and explosions of gases. Orlando : Academic Press, 1987. 739 p.
13. Самсонов В. П. Влияние состава горючей смеси на вихревую структуру в пламени // *Физика горения и взрыва*. 2003. Т. 39. № 3. С. 1–6.
14. Schlichting H. Boundary-layer theory. New York : McGraw-Hill, 1955. 535 p.

УДК 531.3:519.6

О ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ ТЕСТЕ ДЛЯ МОДЕЛИ АДИАБАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ИДЕАЛЬНОГО БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОГО ГАЗА

Д. А. Быковских¹, В. А. Галкин²

¹*Сургутский государственный университет, dmitriy.bykovskih@gmail.com*

²*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт
системных исследований Российской академии наук, val-gal@yandex.ru*

Работа посвящена исследованию тестовой задачи об адиабатическом сжатии идеального бесстолкновительного газа в одномерном пространстве. Аналитическое решение включает описание изменения во времени плотности распределения частиц, сгруппированных по скоростям. Представлено описание разработанного комплекса программ, позволяющих моделировать динамику идеального бесстолкновительного газа с подвижными границами в трехмерном пространстве методом прямого моделирования Монте-Карло. Проведены серии вычислительных экспериментов с различным числом частиц и скоростями движения границ, включая сравнение численных результатов с аналитическими решениями и оценку производительности разработанного комплекса программ.

Ключевые слова: идеальный бесстолкновительный газ, динамические системы, метод Монте-Карло.

ON COMPUTING TEST FOR ADIABATIC COMPRESSION MODEL OF IDEAL COLLISIONLESS GAS

D. A. Bykovskih¹, V. A. Galkin²

¹*Surgut State University, dmitriy.bykovskih@gmail.com,*

²*System Research Institute, Russian Academy of Sciences, val-gal@yandex.ru*

The article is devoted to computing test for adiabatic compression of an ideal collisionless gas in one-dimensional space. There is a description of particle density changes grouped by particle velocity over time for analytical solutions. The created software description is presented. The software allows simulating ideal collisionless gas dynamics with moving boundaries in the three-dimensional space by Monte Carlo method. Computing test series with different particle numbers and boundary velocities are run. The comparison between numerical results and analytical solutions is also made. The article contains software performance testing.

Keywords: ideal collisionless gas, dynamic system, Monte Carlo method.

Введение. Исследование динамических систем в изменяющейся во времени области (например, область, имеющая подвижные границы) является актуальной задачей в современных разделах естествознания. Решение такого сорта задач, как правило, связано с разработкой комплексов программ, позволяющих моделировать динамику поведения среды в изменяющейся во времени области. Промежуточным этапом может служить разработка тестовых задач, которые имеют аналитические решения и позволяют проверить корректность работы комплекса программ.

В работе рассматривается тестовая задача об адиабатическом сжатии идеального бесстолкновительного газа в одномерном пространстве. Такая задача относится к явлению параметрической неустойчивости, при котором нарастание энергии возмущения сопровождается непрерывным его сжатием с течением времени в пространстве. Это явление было подробно изучено и представлено А. И. Весницким в исследовании [1], связанной с колебанием струны и распространением волн в средах с подвижными границами, и А. Ф. Сидоровым в работе [2] о сжатии идеального газа поршнем.

1. Постановка тестовой задачи

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ на отрезке $[a, b]$ равномерно распределены частицы. Их плотность $\rho_0 = 1$. Скорость каждой частицы $|v_0| = 1$, а направление (т. е. знак скорости) определяется случайным образом с равномерным распределением.

Пусть на концах отрезка $[a, b]$ расположены границы. Одна из границ неподвижна и положение определяется уравнением $b = x$. Другая граница движется со скоростью $u \in (0, v_0]$, уменьшая первоначальную длину отрезка $L = |b - a|$. Ее местоположение определяется уравнением $a + ut = x$.

Частицы не взаимодействуют между собой, но взаимодействуют с границами по закону зеркального отражения.

2. Аналитическое решение задачи

В начальный момент времени $t = 0$ существуют 2 группы частиц. Первая группа частиц имеет скорость $v_1 = v_0$ и функцию плотности распределения частиц f_1 , а вторая – скорость $v_2 = -v_0$ и плотность f_2 :

$$f_1(x, 0) = f_2(x, 0) = \frac{\rho_0}{2} \chi(x, a, b), \quad (1)$$

где $\chi(x, a, b) = \theta(x - a) \theta(b - x) = \begin{cases} 1, & x \in [a, b] \\ 0, & x \notin [a, b] \end{cases}$ – ступенчатая функция.

При взаимодействии частиц с границами изменяется их скорость, т. е. одновременно с исчезновением частицы из i -ой группы будет появляться частица из $(i + 1)$ -ой группы. Формула вычисления v_i скорости для i -ой группы частиц с учетом описанных ранее условий запишется в следующем виде:

$$v_i = (-1)^{i-1} \left(v_0 + 2u \left\lfloor \frac{i-1}{2} \right\rfloor \right), \quad (2)$$

где $i = \overline{1, n}$.

Поскольку частицы одной группы движутся в одном направлении, то для каждой группы можно определить момент времени возникновения первой и последней частицы по следующей формуле:

$$t_i = \frac{L - u \sum_{k=0}^{i-1} t_k}{v_0 + (i-1)u}. \quad (3)$$

Траектория движения таких частиц с течением времени представлена на рис. 1.

Функция $\psi_i(x, t)$ определяет принадлежность частиц i -ой группы в точке x в момент времени t :

$$\begin{aligned} \psi_i(x, t) = & \chi(t, t_i, \tilde{t}_{i-1}) \chi(x, a + ut, b) + \\ & + \chi(t, t_{i-1}, t_i) [\chi(x, a + ut, a + ut_{i-1} + v_i(t - t_{i-1})) (i \bmod 2) + \\ & + \chi(x, b + v_i(t - t_{i-1}), b) ((i + 1) \bmod 2)] + \end{aligned} \quad (4)$$

$$+ \chi(t, \tilde{t}_{i-1}, \tilde{t}_i) [\chi(x, a + u\tilde{t}_{i-1} + v_i(t - \tilde{t}_{i-1}), b)(i \bmod 2) + \\ + \chi(x, a + ut, b + v_i(t - \tilde{t}_{i-1}))((i+1) \bmod 2)].$$

Плотность распределения для i -ой группы частиц с течением времени определяется

$$f_i(x, t) = [(t - t_{i-1}) \chi(t, t_{i-1}, \tilde{t}_{i-1}) + (\tilde{t}_{i-1} - t_{i-1}) \chi(t, \tilde{t}_{i-1}, \tilde{t}_i) - \\ - (t - t_i) \chi(t, t_i, \tilde{t}_i)] ((i-1)u + v_0) f_0(t) \psi_i(x, t). \quad (5)$$

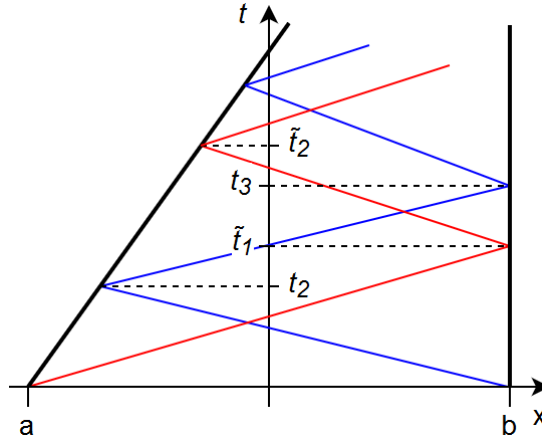


Рис. 1. Схема траекторий движения границ и первых и последних частиц в каждой группе с течением времени:
синие линии — траектории первых частиц,
красные — траектории последних частиц

На рис. 2 представлен график изменения плотности распределения $f_i(x, t)$ для частиц одной группы с течением времени на отрезке $[a + ut, b]$. Изменение плотности распределения $f_i(x, t)$ i -ой группы частиц с течением времени на отрезке $[a + ut, b]$ представлено на рис. 2. На интервале $[t_{i-1}, \tilde{t}_{i-1}]$ количество частиц увеличивается, а на $[t_i, \tilde{t}_i]$ их число уменьшается. На временном интервале $[t_i, \tilde{t}_{i-1}]$ их величина будет постоянной и равняться начальной плотности $\rho_0/2$.

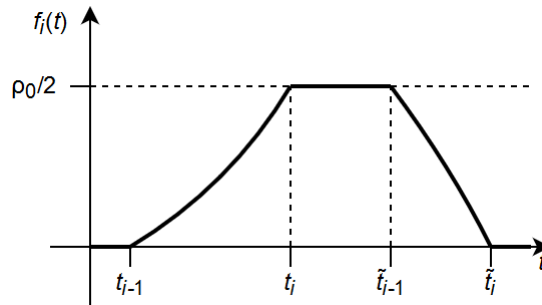


Рис. 2. Схема изменения плотности распределения i -й группы частиц в зависимости от времени

С помощью плотности распределения частиц и их скоростей вычисляются остальные статистические оценки макроскопических параметров системы по следующим формулам [3, 4]:

$$\rho(x, t) = \sum_{i=1}^n f_i(x, t), \quad (6)$$

$$\bar{v}(x, t) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i f_i(x, t)}{\rho(x, t)}, \quad (7)$$

$$e(x, t) = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v}(x, t))^2 f_i(x, t)}{\rho(x, t)}, \quad (8)$$

$$T(x, t) = \frac{2}{3R} e(x, t), \quad (9)$$

$$p(x, t) = \frac{2}{3} \rho(x, t) e(x, t). \quad (10)$$

3. Описание комплекса программ

Траектория движения частицы в пространстве с учетом возможного взаимодействия с подвижными границами описывается следующими формулами:

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} + \sum_{k=0}^K v_k^{(i+1)} (t_{k+1} - t_k), \quad (11)$$

$$v_k^{(i+1)} = \begin{cases} v^{(i)}, & k = 0 \\ \varphi(v_{k-1}^{(i+1)}, n_{j(k)}, u_{j(k)}), & k = \overline{1, K} \end{cases}, \quad (12)$$

где x – пространственные координаты частицы;

v_k – скорость частицы после k -го взаимодействия с границей;

$\sum_{k=0}^K (t_{k+1} - t_k) = \sum_{k=0}^K \Delta t_k = \Delta t$ – временной интервал;

K – число столкновений частицы с границами;

φ – функция взаимодействия частицы с границей;

$u_{j(k)}$ – скорость j -й границы в момент времени t_k на i -м шаге;

$n_{j(k)}$ – нормаль к поверхности j -й границы в точке столкновения в момент времени t_k на i -м шаге.

Пусть границы представляют собой плоскости или поверхности 1-го порядка

$$(n, x - q^{(i)}) = 0, \quad (13)$$

$$q^{(i+1)} = q^{(i)} + u \Delta t, \quad (14)$$

где n – нормаль к поверхности; q – координаты смещения границы.

Тогда момент времени, когда пересекается траектория движения частицы с движущейся плоскостью с учетом перехода в систему отсчета, где граница неподвижна, будет определяться как

$$t_k = - \frac{(n, x^{(i)} - q^{(i)} - u t_{k-1})}{(n, v^{(i)} - u)}. \quad (15)$$

Пусть найдена по указанным выше формулам точка пересечения траектории движения частицы и границы [5, 6]. В результате расчетов может оказаться так, что эта точка нахо-

дится по другую сторону полупространства, ограниченного поверхностью, из-за вычислительной погрешности. Это приведет к повторному отражению и неверной траектории движения частицы (рис. 3). Решение заключается в добавлении поправочного коэффициента $\delta_m x$, который будет сдвигать частицу по ее траектории назад на эту величину.

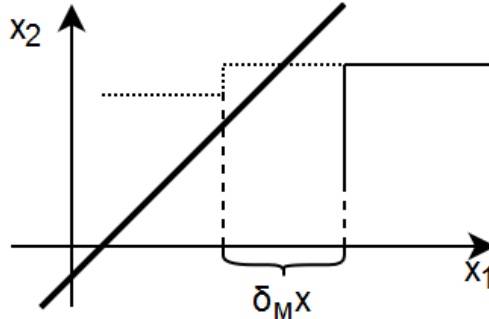


Рис. 3. Иллюстрация, поясняющая корректировку с помощью поправочного коэффициента $\delta_m x$:
жирная линия – граница; линия – траектория движения частицы с учетом взаимодействия с границей и поправочным коэффициентом $\delta_m x$; точечный пунктир – траектория движения частицы с учетом взаимодействия с границей без дополнительного поправочного коэффициента

Чтобы найти скорость частицы после k -го столкновения с j -й движущейся границей, необходимо перейти в систему отсчета, где граница становится неподвижной, произвести нужные преобразования, а затем вернуться в первоначальную систему отсчета:

$$v_{k+1}^{(i)} = \varphi(v_{k-1}^{(i+1)}, n_{j(k)}, u_{j(k)}) = v_k^{(i)} - 2n_{j(k)}(v_k^{(i)} - u_{j(k)}, n_{j(k)}). \quad (16)$$

На рис. 4 представлена схема расчета траектории движения частиц с учетом их возможного взаимодействия с подвижными границами. Такая схема позволяет ускорить расчеты за счет векторизации вычислений [7]. Хотя саму сортировку векторизовать невозможно, но за счет перестановки данных можно уменьшить число расчетов, переставляя в конец те частицы в группе, которые в дальнейшем на интервале Δt не взаимодействуют с границами.



Рис. 4. Схема расчета траектории движения частиц с учетом их возможного взаимодействия с подвижными границами

На рис. 5 представлена общая схема работы комплекса программ [8].

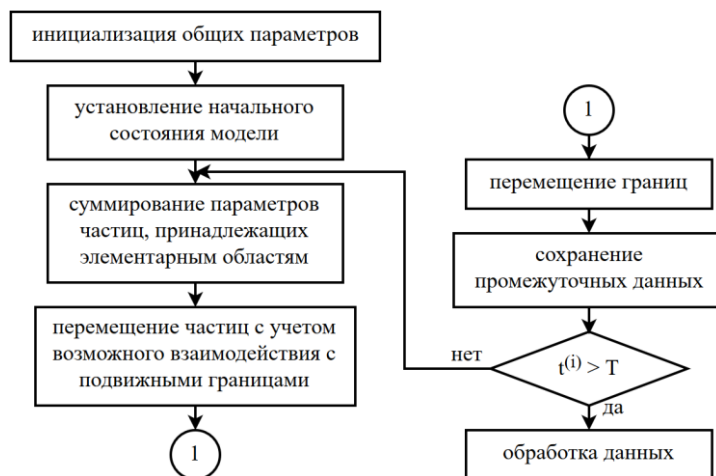


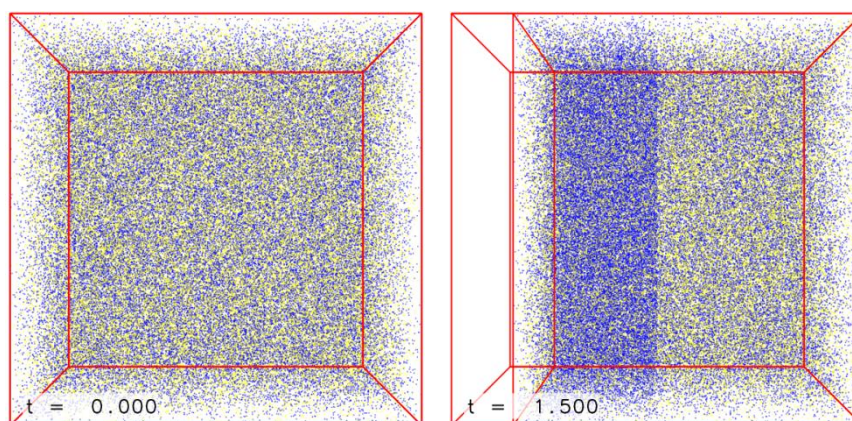
Рис. 5. Общая схема работы комплекса программ

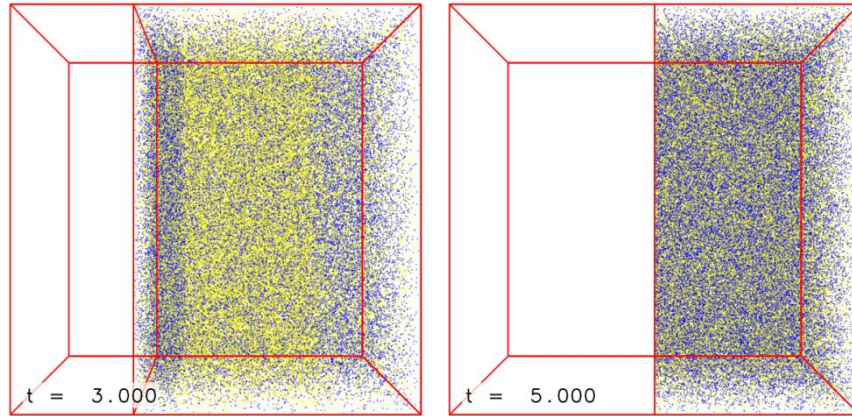
Под установлением начального состояния модели подразумевается инициализация параметров частиц с помощью генератора псевдослучайных чисел, границ и элементарных областей. Каждая элементарная область накапливает суммы параметров частиц (общую массу, суммы компонентов скоростей и квадратов скоростей), принадлежащих определенной области в момент времени t_i . С помощью этих сумм вычисляются статистические оценки макроскопических параметров по формулам, представленным в [9]. Сохранение промежуточных данных включает сохранение фазового пространства и сумм параметров частиц, которые используются на этапе обработки данных для визуализации процессов и вычисления статистических оценок макроскопических параметров соответственно. Также последний этап (обработка данных) может включать построение графиков изменения статистических оценок макроскопических параметров с течением времени и вычисление максимальных и относительных погрешностей, полученных в результате сравнения с точным решением.

Другая идея ускорения расчетов заключается в том, что исходный массив частиц разбивается на большие блоки. Каждая программа работает со своим блоком независимо, накапливая суммы параметров частиц. Расчет статистических оценок макроскопических параметров происходит отдельной программой после вычисления сумм параметров частиц для всех блоков.

4. Моделирование и анализ результатов

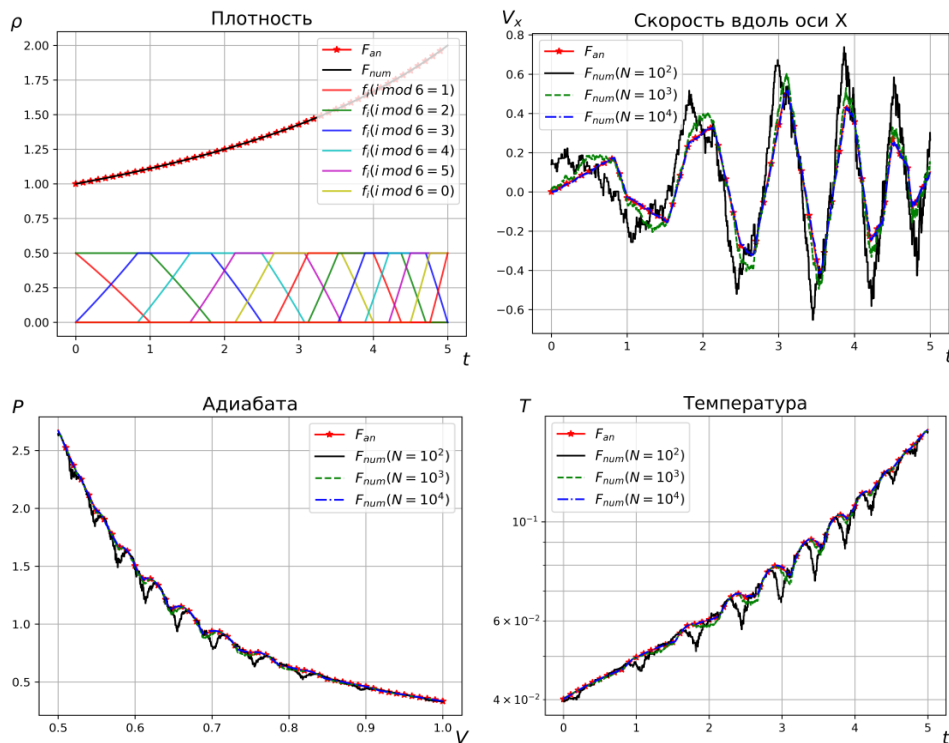
Были проведены серии вычислительных экспериментов при различном числе частиц и различных скоростях границ. На рис. 6 представлена визуализация процесса.





**Рис. 6. Распределение частиц ($N = 2^{17}$) в различные моменты времени при $u = 0,1$:
синим цветом выделены частицы, которые движутся справа налево,
желтым – в противоположном направлении. Красным цветом выделены границы**

На рис. 7 представлены графики изменений статистических оценок макроскопических величин при $u = 0,1$. Графики плотностей содержат плотности распределения i -й группы частиц в зависимости от времени. Из остальных графиков видно, что с увеличением числа частиц численное решение приближается к аналитическому. Следует отметить тот факт, что точное решение содержит осцилляции.



**Рис. 7. Графики изменения статистических оценок макроскопических параметров
в зависимости от времени при $u = 0,1$**

В табл. 1 представлены результаты максимальных абсолютных и относительных погрешностей на временном интервале $[0, 5]$, рассчитанные по формулам:

$$\Delta F = \max_t |F_{an} - F_{num}|, \quad (17)$$

$$\delta F = \frac{\Delta F}{|F_{an}|} \times 100\%, \quad (18)$$

где F_{an} – аналитическое решение;

F_{num} – численное решение;

$t \in [0; T]$ – временной интервал.

Таблица 1

**Максимальные абсолютные и относительные погрешности
при $u = 0,1$ и различном числе частиц**

N	Δv_x	ΔT	Δp	δv_x	δT	δp
10^2	$4,23 \times 10^{-1}$	$1,68 \times 10^{-2}$	$2,13 \times 10^{-1}$	$5,10 \times 10^5$	$1,85 \times 10^1$	$1,85 \times 10^1$
10^3	$1,18 \times 10^{-1}$	$3,96 \times 10^{-3}$	$4,77 \times 10^{-2}$	$2,44 \times 10^4$	5,18	5,18
10^4	$3,16 \times 10^{-2}$	$7,01 \times 10^{-4}$	$9,06 \times 10^{-3}$	$3,29 \times 10^4$	$7,82 \times 10^{-1}$	$7,82 \times 10^{-1}$

Большая относительная погрешность гидродинамической скорости объясняется тем, что точное решение расположено близко к нулю (значения равные нулю отбрасывались). Также в таблице не представлены значения погрешностей плотности, так как точность зависит лишь от вычислительной погрешности.

Оценка производительности разработанного комплекса программ производилась на процессоре Intel Xeon E5-2690 V2 (240 GFlops DP для 10 ядер). Результаты показали 39 % от пиковой производительности на одно ядро (табл. 2) для основного расчетного блока (без вычисления статистических оценок макроскопических параметров) с учетом сохранения данных при следующих параметрах: шаг по времени $\Delta t = 0.001$, число итераций 5 000, число частиц $N = 2^{17}$. Ускорение оптимизированной версии по сравнению с неоптимизированной составило более чем 12 раз.

Таблица 2

**Сравнение производительности оптимизированной и неоптимизированной
версии на Intel Xeon E5-2690 V2**

	t, с.	R _{task} , GFlops	R _{task} /R _{peak} , %
Без оптимизаций	198,51	0,8	0,33
С оптимизациями	15,48	9,42	3,93

Заключение. Представлено описание тестовой задачи с подвижной границей для идеального бесстолкновительного газа. Был разработан комплекс программ, предназначенный для моделирования динамики идеального бесстолкновительного газа с подвижными границами. Проведены серии вычислительных экспериментов. Выполнено сравнение с точными решениями. На тестовых задачах об адиабатическом сжатии с применением декомпозиции и векторизации данных была достигнута производительность равная 39 % от пиковой для Intel Xeon E5-2690 V2.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-47-860004.

Литература

1. Весницкий А. И. Волны в системах с движущимися границами и нагрузками. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. 320 с.
2. Сидоров А. Ф. Избранные труды: Математика. Механика. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. 576 с.

3. Галкин В. А. Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 408 с.
4. Черчиньяни К. Математические методы в кинетической теории газов. М. : Мир, 1973. 246 с.
5. Цисарж В. В., Марусик Р. И. Математические методы компьютерной графики. Киев : ФАКТ, 2004. 464 с.
6. Гальперин Г. А., Чернов Н. И. Биллиарды и хаос. М. : Знание, 1991. 48 с.
7. Bik A. J. The Software Vectorization Handbook: Applying Intel Multimedia Extensions for Maximum Performance. Intel Press, 2004. 300 p.
8. Берд Г. Молекулярная газовая динамика / под ред. О. М. Белоцерковского, М. Н. Когана. М. : Мир, 1981. 319 с.
9. Быковских Д. А., Галкин В. А. О вычислительном тесте для одной модели бесстолкновительного идеального газа // Вестник кибернетики. 2017. № 3 (27). С. 119–127.

ФИЗИКА КАК ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОД

С. Л. Лебедев

Сургутский государственный университет, lebedev_sl@surgu.ru

Существуют частные физические принципы, устанавливающие взаимосвязи между экспериментально различными ситуациями. Может оказаться, что в сравниваемых процессах соответствующие наблюдаемые величины представлены разными математическими выражениями. Тем самым обнаруживаются численные соответствия между разными математическими функциями. Использование современных пакетов по компьютерной алгебре в значительной степени стирает различия между элементарными и трансцендентными функциями. Тем не менее программные реализации алгоритмов вычисления этих функций все еще сохраняют некоторые различия, которые могут проявиться при многократных рекурсиях. В любом случае численная близость между разными аналитическими выражениями может представлять интерес для приложений. Здесь мы приводим несколько примеров интерполяций, основанных на физических соображениях.

Ключевые слова: функции Бесселя, функции Эйри, универсальность скрещенного поля, масса фотона, дисперсионные соотношения, сдвиг массы.

PHYSICS AS A COMPUTATIONAL CODE

S. L. Lebedev

Surgut State University, lebedev_sl@surgu.ru

Between experimentally different situations, exist special physical interrelations. The corresponding observables of the compared processes may occur to be expressed by dissimilar mathematical expressions. Hence, numerical correspondences appear between different mathematical functions. To a large measure, the use of the present-day computer algebra packages removes the distinction between elementary and transcendental functions. Nevertheless, the software implementation of algorithms for computation of these functions retain some differences that may manifest themselves, e.g., in multiple recursions. In any case, the numerical likelihood of the different analytical expressions could be of interest for applications. Here we point at several examples of physically based interpolations.

Keywords: Bessel functions, Airy functions, crossed-field universality, photon mass, dispersion relations, mass shift.

Существуют частные физические принципы, устанавливающие связи между физическими процессами, протекающими в разных экспериментальных условиях. Может оказаться, что соответствующие наблюдаемые величины, характеризующие эти процессы, выражаются посредством разных аналитических функций. Между этими функциями таким образом устанавливается (приближенное) численное равенство. Ниже будут приведены два примера соответствий, основу которых составляют физические аналогии. Особенностью «физической интерполяции» является сохранение равенства математических выражений в широком диапазоне значений скейлинговых параметров (см. ниже). Важно также и то, что в новом представлении сохраняются аналитические свойства физической величины. Таким образом, не обладая универсальностью обычных интерполяционных процедур, физическая интерполяция может сохранять те свойства интерполируемых функций, которые связаны с качественными особенностями физической задачи.

1. В работах [1, 2] авторы отмечают близкое численное соответствие между характеристиками синхротронного излучения (далее – СИ) и излучения, возникающего при рассея-

нии электронов на сгустках встречных частиц (тоже электронов). Этот эксперимент получил название *beamstrahlung*. Указанное совпадение позволило авторам работы [2] предположить, что эффекты квантовой электродинамики интенсивных полей с напряженностью поля, приближающейся к критическому («Швингеровскому») значению $F_c = m^2 c^3 / e \hbar \simeq 4,3 \cdot 10^{13} \text{Gs}$, в скором времени можно будет наблюдать на встречных пучках электронов с энергией $E_e \geq 500 \text{GeV}$. Мы обращаем внимание на то, что в основе упомянутого соответствия лежит универсальный характер взаимодействия релятивистских частиц с внешним электромагнитным полем. Универсальность имеет место благодаря тому, что почти для всех направлений движения релятивистская частица в собственной системе отсчета «видит» любое внешнее поле как скрещенное ($|\vec{E}| = |\vec{H}|$, $\vec{E} \cdot \vec{H} = 0$) [3]. Это свойство выразилось в совпадении асимптотических выражений для мощности излучения релятивистского электрона во внешних полях различных конфигураций [4].

Мощность СИ, выраженная в единицах своего классического ($\hbar \rightarrow 0$) предела, имеет вид [5]:

$$\frac{W}{W_{cl}} = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \int_0^\infty \frac{y dy}{(1 + \xi y)^3} \left[\int_y^\infty K_{5/3}(x) dx + \frac{\xi^2 y^2}{1 + \xi y} K_{2/3}(y) \right]. \quad (1)$$

Здесь динамический параметр $\xi = \frac{3}{2} \chi$,

$$\chi = \gamma \frac{H}{F_c}, \quad (2)$$

γ – Лоренц-фактор, а H – величина лабораторного магнитного поля. Аналогичная величина (δ) в теории *beamstrahlung* [1] определяет радиационные потери энергии электроном в результате рассеяния на bunch'e (т. е. на сгустке; в формуле (4) R, L – поперечный и продольный размеры банча в собственной системе):

$$\frac{\delta}{\delta_{cl}} = \frac{9}{4} \int_0^\infty \frac{w dw}{(1 + w^{3/2}/C)^2} \left(1 + \frac{1}{(1 + w^{3/2}/C)^2} \right) \int_w^\infty dx \left(\frac{3}{2} x - w - \frac{w^4}{2x^3} \right) Ai(x). \quad (3)$$

$K_\nu(x)$ и $Ai(x)$ в уравнениях (1) и (3) – это функции Макдональда и Эйри. Скейлинговые параметры χ и C находятся в соответствии:

$$\chi \leftrightarrow C^{-1} = \frac{4Ne^2 \gamma^2 \hbar}{m^2 c^3 RL}, \quad (4)$$

а N – число частиц в банче (обычно $N \sim 10^{10}$). Численное совпадение между интегралами (1) и (3) становится практически идеальным, если в качестве параметра соответствия в левой части (4) взять $(\chi/1,3)$ [1, 2]. Поразительно, что это совпадение выдерживается в диапазоне значений параметров (4), охватывающем восемь порядков. Разумеется, вычислительного преимущества нет ни у одной из формул (1) или (3), так как функция Эйри $Ai(x)$ выражается

через ту же функцию Макдональда: $Ai(x) = \frac{1}{\pi} \sqrt{x/3} K_{1/3} \left(\frac{2}{3} x^{3/2} \right)$. Заметим, что интеграл (3)

можно представить в другой форме, если воспользоваться приведенной выше связью между функциями Макдональда и Эйри, а также рекуррентными соотношениями для функций Макдональда с разными индексами [6]:

$$\frac{\delta}{\delta_{cl}} = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \int_0^\infty \frac{y dy}{(1 + \xi y)^2} \left(1 + \frac{1}{(1 + \xi y)^2} \right) \left[-\frac{2}{3} \int_y^\infty \left(1 + \frac{y}{2x^2} \right) K_{1/3}(x) dx + K_{2/3}(y) \right], \quad (5)$$

(здесь $\xi \equiv 3/2C$). Несмотря на внешнее сходство и численное соответствие этого выражения с (1), интеграл (5) представляет другую аналитическую функцию ξ .

II. Второй пример соответствия использует аналогию между массивным фотоном и волноводными модами электромагнитного поля. Законы дисперсии для поля Прока [7],

$$\omega = \sqrt{k^2 + \mu_{ph}^2 c^2 / \hbar^2}, \quad (6)$$

и для n -й моды плоского резонатора,

$$\omega = \sqrt{k^2 + (n\pi/b)^2}, \quad (7)$$

очевидно, совпадают. Здесь: μ_{ph} – масса фотона, а b – расстояние между идеально проводящими плоскими границами. Рассмотрим самодействие равноускоренного (далее – РУ) заряда в условиях, когда: а) собственное поле заряда обладает массой (μ_{ph}); б) заряд совершает движение вблизи одной проводящей границы, тогда как вторая удалена ($R/2$ – расстояние от заряда до границы; w_0 – ускорение заряда в собственной системе отсчета, и $b \gg R$). Определяемый самодействием сдвиг массы электрического заряда Δm_{el} для двух указанных случаев имеет вид [8, 9]:

$$\Delta m_{el} = \frac{\alpha w_0}{2\pi} S_{el}(\Lambda), \quad \Lambda \equiv \frac{\mu_{ph} c}{\hbar w_0}, \quad (8a)$$

$$\Delta m_{el} = \frac{\alpha w_0}{2\pi} V_{el}(\bar{\Lambda}), \quad \bar{\Lambda} \equiv \frac{2c^2}{R w_0 \gamma_E}. \quad (8b)$$

Здесь $\gamma_E = 0,577 \dots$ – постоянная Эйлера. Подобно (4), мы имеем скейлинговое соответствие:

$$\Lambda \leftrightarrow \bar{\Lambda}. \quad (9)$$

Вещественные части комплексных функций $S_{el}(\Lambda)$ и $V_{el}(\bar{\Lambda})$ демонстрируют реактивные свойства собственного поля ускоряемой частицы и могут быть представлены следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \text{Re } S_{el}(\Lambda) = -\pi\Lambda \left[I_1(\sqrt{\Lambda})K_1(\sqrt{\Lambda}) + \frac{1}{2}I_0(\sqrt{\Lambda})K_2(\sqrt{\Lambda}) + \frac{1}{2}I_2(\sqrt{\Lambda})K_0(\sqrt{\Lambda}) \right] + \\ + \pi\sqrt{\Lambda}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\operatorname{Re} V_{el}(\bar{\Lambda}) = \pi \left(-\coth \mathcal{G} + \frac{1}{2 \sinh(\mathcal{G} / 2)} \right), \quad (11)$$

где параметр $\mathcal{G}$ связан с $\bar{\Lambda}$ соотношением:

$$\cosh \mathcal{G} = 1 + \frac{2}{(\bar{\Lambda} \gamma_E)^2}. \quad (12)$$

Мнимые части функций $S_{el}(\Lambda)$ и $V_{el}(\bar{\Lambda})$ равны:

$$\operatorname{Im} S_{el}(\Lambda) = \Lambda \left[K_1^2(\sqrt{\Lambda}) - K_0(\sqrt{\Lambda}) K_2(\sqrt{\Lambda}) \right], \quad (13)$$

$$\operatorname{Im} V_{el}(\bar{\Lambda}) = 1 - \mathcal{G} \coth \mathcal{G}, \quad (14)$$

и определяют скорость излучения РУ заряда.

Удивительно, что соответствие (9) между массой фотона и расстоянием имеет место и для гипотетического случая скалярного РУ заряда (источника скалярного поля). Полагая, что на границе собственное поле скалярного заряда подчиняется условию Дирихле, можно получить аналог формулы (8б). Функции $S_{el}(\Lambda)$ и $V_{el}(\bar{\Lambda})$ должны быть теперь заменены на $S_{sc}(\Lambda)$ и $V_{sc}(\bar{\Lambda})$ соответственно [8, 9]:

$$\operatorname{Re} S_{sc}(\Lambda) = \pi \Lambda \left[I_0(\sqrt{\Lambda}) K_0(\sqrt{\Lambda}) + I_1(\sqrt{\Lambda}) K_1(\sqrt{\Lambda}) \right] - \pi \sqrt{\Lambda}, \quad (15)$$

$$\operatorname{Im} S_{sc}(\Lambda) = \Lambda \left[K_0^2(\sqrt{\Lambda}) - K_1^2(\sqrt{\Lambda}) \right], \quad (16)$$

$$V_{sc}(\bar{\Lambda}) = \pi \left(\frac{1}{\sinh \mathcal{G}} - \frac{1}{2 \sinh(\mathcal{G} / 2)} \right) + i \left(-1 + \frac{\mathcal{G}}{\sinh \mathcal{G}} \right). \quad (17)$$

Здесь, как и в (10), (13), $I_\nu(\sqrt{\Lambda})$ и $K_\nu(\sqrt{\Lambda})$ обозначают модифицированные функции Бесселя [6].

В качестве иллюстрации приведем графики (рис. 1), демонстрирующие численное соответствие функций $S_{sc}(\Lambda)$ и $V_{sc}(\bar{\Lambda})$ при $0 \leq \Lambda, \bar{\Lambda} \leq 8$. Графики функций $S_{el}(\Lambda)$ и $V_{el}(\bar{\Lambda})$ в том же диапазоне значений параметров см. в [10].

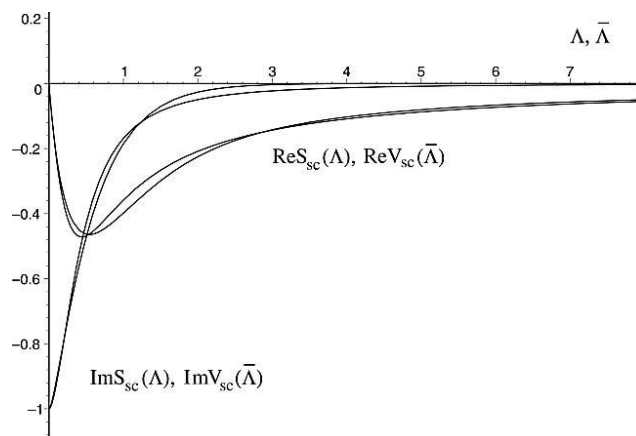


Рис. 1. Вещественная и мнимая части сдвига массы скалярного заряда как функции параметров (8а) и (8б)

Функции $S_{el}(\Lambda)$, $V_{el}(\bar{\Lambda})$ и $S_{sc}(\Lambda)$, $V_{sc}(\bar{\Lambda})$ допускают аналитическое продолжение в комплексную плоскость значений аргумента. Это следует из существования для каждой из них дисперсионных соотношений следующего вида [8, 9]:

$$f(\Lambda) = -\frac{2\Lambda}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Im } f(\lambda) d\lambda}{\lambda^2 - \Lambda^2 + i0}. \quad (18)$$

Дисперсионные соотношения выражают причинную связь между реактивными и радиационными процессами при движении РУ заряда. Тем самым физическая интерполяция, основанная на соотношении (9), позволила не только установить численное соответствие между трансцендентными и элементарными функциями, но и сохранить важные в качественном отношении аналитические свойства сдвига массы. Нетрудно заметить, например, что при мнимых значениях аргумента $\Lambda \rightarrow i|\Lambda|$ интеграл (18) – чисто мнимый, т. е. вещественные части всех четырех функций обращаются в нуль.

Литература

1. Blankenbecler R., Drell S. Quantum Treatment of Beamstrahlung // Phys. Rev. 1987. V. 36, № 1. P. 277–288.
2. Esberg J., Uggerhoj U. I. Does Experiment Show that Beamstrahlung Theory – Strong Field QED – can be trusted? // J. Phys: Conference Series. 2009. V. 198. P. 1–15.
3. Никишов А. И., Ритус В. И. Квантовые процессы в поле плоской электромагнитной волны и в постоянном поле // ЖЭТФ. 1964. Т. 46. Вып. 2. С. 776–796.
4. Ритус В. И. Квантовые эффекты взаимодействия элементарных частиц с интенсивным внешним полем // Труды ФИАН. 1979. Т. 111. С. 5–151.
5. Соколов А. А., Тернов И. М. Релятивистский электрон. М.: Наука, 1983. 304 с.
6. Бейтмен Г., Эрдейи Д. Высшие трансцендентные функции. М.: Наука, 1974. Т. II. 295 с.
7. Ициксон К., Зюбер Ж.-Б. Квантовая теория поля. М.: Мир, 1984. Т. 1. 448 с.
8. Ритус В. И. Изменение массы ускоренного заряда как динамическое проявление парадокса часов // ЖЭТФ. 1982. Т. 82, № 5. С. 1375–1387.
9. Лебедев С. Л. Сдвиг массы классического заряда при наличии границ // ЖЭТФ. 1989. Т. 96. Вып. 1. С. 44–52.
10. Lebedev S. L. The Mass-Shift method and the Self-Action of Classical Charge // 3rd Intern Sakharov Conference on Physics. Proceedings. Vol. I. Scientific World. Moscow, 2002. P. 748–756.

УДК 697.9:53:519.6

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

О. С. Воронова, Е. В. Конопацкий

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР
kornilova.oly@mail.ru, e.v.konopatskiy@mail.ru*

В статье предложены геометрические модели физического состояния воды и водяного пара с дальнейшим аналитическим описанием при помощи математического аппарата геометрического моделирования процессов и явлений (БН-исчисление). Для моделирования данного процесса исходные значения физического состояния воды и водяного пара были взяты с *i-d* диаграммы влажного воздуха. Геометрическое моделирование представлено в виде двух отдельных составных поверхностей отклика для влагосодержания и энтальпии влажного воздуха и является двухпараметрическим множеством, которое принадлежит трехмерному пространству. В свою очередь каждая поверхность отклика была разбита на три отсека с определенными границами и аналитически описана с помощью точечных уравнений дуг кривых, проходящих через наперед заданные точки, что позволило максимально точно рассчитать искомые значения параметров в программном комплексе Maple. Приведен анализ эффективности геометрического моделирования значений влагосодержания и энтальпии влажного воздуха, которые представлены графически на основе *i-d* диаграммы, и расчетных значений, полученных на основе разработанных геометрических моделей. Предложенные геометрические модели позволяют не только определить все необходимые значения параметров физического состояния воды и водяного пара, что позволяет автоматизировать процесс проектирования, но и оптимизировать их с помощью методов математического анализа.

Ключевые слова: геометрическая модель, отсек поверхности, опорные контуры, образующая поверхность, БН-исчисление, *i-d* диаграмма, параметры влажного воздуха.

GEOMETRIC MODELING PARAMETERS OF WATER AND WATER VAPOUR PHYSICAL STATE

O. S. Voronova, E. V. Konopatskiy

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR
kornilova.oly@mail.ru, e.v.konopatskiy@mail.ru*

The article proposes the geometric models of water and water vapor physical state with a further analytical description using the mathematical apparatus of geometric modeling of processes and phenomena (BN-calculation). The initial values of water and water vapor physical state are taken from the *i-d* diagram of humid air to simulate this process. Geometric modeling is presented as two different response surfaces for moisture content and enthalpy of humid air. Geometric models are a two-parameter set that belongs to three-dimensional space. Each response surface was divided into three compartments with defined boundaries and analytically described using point equations for arcs of curves passing through preassigned points. This allowed accurately calculating the desired values of the parameters in the software package Maple. The analysis of the effectiveness of geometric modeling of moisture content and enthalpy of humid air is given. The effectiveness is presented graphically based on *i-d* diagrams, and calculated values obtained based on the developed geometric models. The proposed geometric models allow determining all the necessary values of parameters of water and water vapor physical state. This allows automating the design process, as well as optimizing the simulation using mathematical analysis methods.

Keywords: geometrical model, surface compartment, support contours, surface generator, BN-calculation, i - d diagram, parameters of humid air.

Введение. При проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха возникает необходимость определения параметров физического состояния воды и водяного пара [1, 2]. На практике существуют различные способы определения теплофизических свойств влажного воздуха. Одним из наиболее предпочтительных является графический метод – определение параметров влажного воздуха по i - d диаграмме [3, 4]. Графическое определение искомых значений значительно сокращает время и объем расчетной работы проектировщика, однако не лишено погрешностей. Взаимосвязь параметров носит сложный характер, который графически описывается в косоугольных координатах. Кроме того, для создания систем автоматизированного проектирования необходимо не графическое, а аналитическое представление взаимозависимостей необходимых параметров состояния воды и водяного пара [2, 5]. Аналитическое описание основывается на численном решении системы уравнений, что в свою очередь является трудоемким и продолжительным процессом, который требует больших вычислительных ресурсов [5, 6]. Поэтому использование методов геометрического моделирования, основанных на многомерной интерполяции и аппроксимации [7], является перспективным направлением решения задачи создания автоматизированных систем для проектирования вентиляции и кондиционирования воздуха. Данная работа является продолжением исследований авторов в этом направлении [8].

Для эффективного решения задач моделирования физического состояния воды и водяного пара в работе используется математический аппарат геометрического моделирования процессов и явлений – БН-исчисление [9–11]. В БН-исчислении основным элементом является точка, которая характеризуется несколькими параметрами. В процессе моделирования каждой координатной оси ставится в соответствие либо функция отклика, либо фактор, влияющий на функцию отклика. При этом каждый из факторов определяется своим параметром, и количество таких параметров зависит от размерности пространства. Таким образом, геометрическая модель, представленная в БН-исчислении, является организованным множеством точек, которые зависят от нескольких связанных между собой параметров. В таком случае количество факторов ограничивается исключительно размерностью пространства, в котором располагается геометрический объект. При этом результат моделирования представляет собой систему однотипных параметрических уравнений, количество которых зависит от размерности пространства.

Математическая постановка задачи и исходные данные

Дано: i - d диаграмма физического состояния воды и водяного пара, которая представляет собой графическую зависимость между основными параметрами:

t – температурой воздуха, °C;

φ – относительной влажностью воздуха, %;

d – влагосодержанием, г/кг сухого воздуха;

i – энтальпией, кДж/кг.

Задача: получить аналитическое описание геометрической модели взаимозависимости параметров физического состояния воды и водяного пара.

Проанализировав i - d диаграмму, можно сделать вывод, что два любых физических параметра однозначно определяют точку на диаграмме, а вместе с ней и оставшиеся физические параметры воды и водяного пара. Тогда искомую геометрическую модель можно представить в виде двухпараметрического множества точек. Исходя из этого, аналитическое описание параметров физического состояния воды и водяного пара представим в виде двух геометрических моделей:

1. Модель зависимости влагосодержания воздуха d от его температуры t и относительной влажности φ .

2. Модель зависимости энтальпии влажного воздуха i от его температуры t и относительной влажности φ .

Чтобы задать границы искомых отсеков поверхностей определимся с областью исследования, зафиксировав значения параметров воды и водяного пара, полученные с $i-d$ диаграммы при постоянном барометрическом давлении $P = 101,08$ кПа, и представим их в табл. 1. Параметры состояния воды и водяного пара в качестве примера ограничим в следующих пределах: $t = 0-55$ °C; $\varphi = 0-100$ %.

Таблица 1

Параметры физического состояния воды и водяного пара

№	t , °C	φ , %	d , г/кг	i , кДж/кг	№	t , °C	φ , %	d , г/кг	i , кДж/кг
1	0	0	0	0	27	25	25	4,87	37,42
2	5	0	0	4,95	28	25	50	9,83	50,14
3	10	0	0	10,0	29	25	75	14,88	62,79
4	15	0	0	15,04	30	25	100	20	75,79
5	20	0	0	20,08	31	30	0	0	30,14
6	0	25	0,95	2,37	32	30	25	6,55	46,93
7	5	25	1,34	8,31	33	30	50	13,26	63,88
8	10	25	1,9	14,79	34	30	75	20,12	81,41
9	15	25	2,65	21,82	35	30	100	27,09	99,35
10	20	25	3,62	29,3	36	35	0	0	35,13
11	0	50	1,89	4,69	37	35	25	8,71	57,49
12	5	50	2,7	11,73	38	35	50	17,69	80,34
13	10	50	3,79	19,65	39	35	75	26,93	104,16
14	15	50	5,28	28,46	40	40	0	0	40,16
15	20	50	7,26	38,5	41	40	25	11,51	69,72
16	0	75	2,83	7,06	42	40	50	23,44	100,44
17	5	75	4,04	15,08	43	45	0	0	45,15
18	10	75	5,68	24,43	44	45	5	2,9	52,85
19	15	75	7,94	35,13	45	45	15	8,93	68,19
20	20	75	10,94	47,82	46	45	25	14,97	83,78
21	0	100	3,78	9,46	47	45	40	24,36	108,13
22	5	100	5,39	18,54	48	50	0	0	50,2
23	10	100	7,62	29,27	49	50	5	3,8	60,02
24	15	100	10,62	41,86	50	50	15	11,49	79,92
25	20	100	14,68	57,25	51	55	0	0	55,36
26	25	0	0	25,0	52	55	5	4,8	67,94

Следует также отметить, что все значения параметров (табл. 1), полученные из $i-d$ диаграммы, были определены с помощью системы автоматизированного проектирования *AutoCAD* при значительном увеличении. Предпочтительней было бы использовать таблицы с данными, что в значительной мере могло облегчить работу и повысить итоговую точность модели, но авторам не удалось найти их в доступной литературе. Вместе с тем предложенные геометрические модели являются инвариантными относительно исходных данных и могут быть не менее эффективно использованы с учетом изменения исходной информации.

**Геометрические модели зависимости параметров физического состояния
воды и водяного пара**

Аналитическое описание искомой модели носит достаточно сложный характер и подразумевает использование полиномиальных зависимостей высокого порядка. Поэтому для удобства разобьем моделируемую поверхность отклика на три отсека. Первый отсек ограничим в пределах $t = 0-20$ °C; $\varphi = 0-100$ %, второй – $t = 20-40$ °C; $\varphi = 0-100$ %, а третий – $t = 40-55$ °C; $\varphi = 0-50$ %.

Рассмотрим геометрическую схему построения первого отсека поверхности отклика (рис. 1). Поскольку графическая визуализация геометрической модели в дальнейшем будет выполнена в программном пакете Maple, определим геометрическую схему в декартовой системе координат. Установим соответствие между осями декартовой системы координат (рис. 1) и параметрами физического состояния воды и водяного пара (табл. 1). Так, оси Ox соответствует температура воздуха t ; оси Oy – относительная влажность воздуха φ ; оси Oz – влагосодержание d . Следует отметить, что для наглядного изображения геометрической схемы на рис. 1 был выбран различный масштаб для всех осей декартовой системы координат.

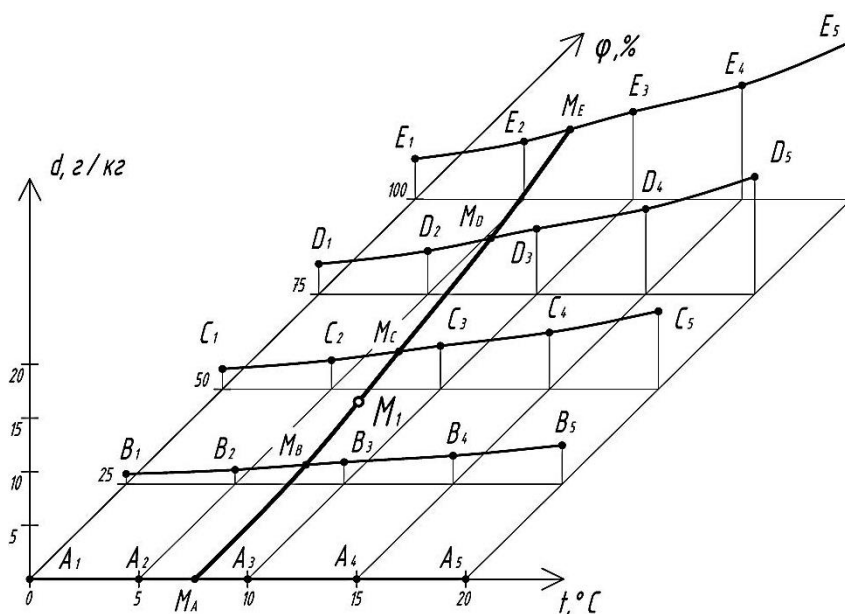


Рис. 1. Геометрическая схема моделирования зависимости влагосодержания от температуры и относительной влажности воздуха в пределах $t = 0-20^\circ\text{C}$, $\varphi = 0-100\%$

Предложенная схема с геометрической точки зрения является отсеком поверхности, который определяется пятью опорными контурами: M_A , M_B , M_C , M_D , M_E . Точки A_i , B_i , C_i , D_i , E_i – исходные точки для моделирования, которым соответствуют графически измеренные значения параметров физического состояния воды и водяного пара (табл. 1). Текущая точка M_1 является образующей отсека поверхности и при помощи криволинейной интерполяции объединяет все фиксированные состояния исследуемого процесса.

Опорные контуры M_A , M_B , M_C , M_D , M_E определим с помощью точечного уравнения дуги кривой, проходящей через 5 наперед заданных точек [7]:

$$\begin{aligned}
 M_A = & A_1 \left(\bar{u}^4 - \frac{13}{3} \bar{u}^3 u + \frac{13}{3} \bar{u}^2 u^2 - \bar{u} u^3 \right) + A_2 \left(16 \bar{u}^3 u - \frac{64}{3} \bar{u}^2 u^2 + \frac{16}{3} \bar{u} u^3 \right) + \\
 & + A_3 \left(-12 \bar{u}^3 u + 40 \bar{u}^2 u^2 - 12 \bar{u} u^3 \right) + A_4 \left(\frac{16}{3} \bar{u}^3 u - \frac{64}{3} \bar{u}^2 u^2 + 16 \bar{u} u^3 \right) + \\
 & + A_5 \left(-\bar{u}^3 u + \frac{13}{3} \bar{u}^2 u^2 - \frac{13}{3} \bar{u} u^3 + u^4 \right),
 \end{aligned} \quad (1)$$

где u – текущий параметр, который определяет положение текущей точки на соответствующем опорном контуре и изменяется от 0 до 1;

$\bar{u} = 1 - u$ – дополнение параметра до единицы.

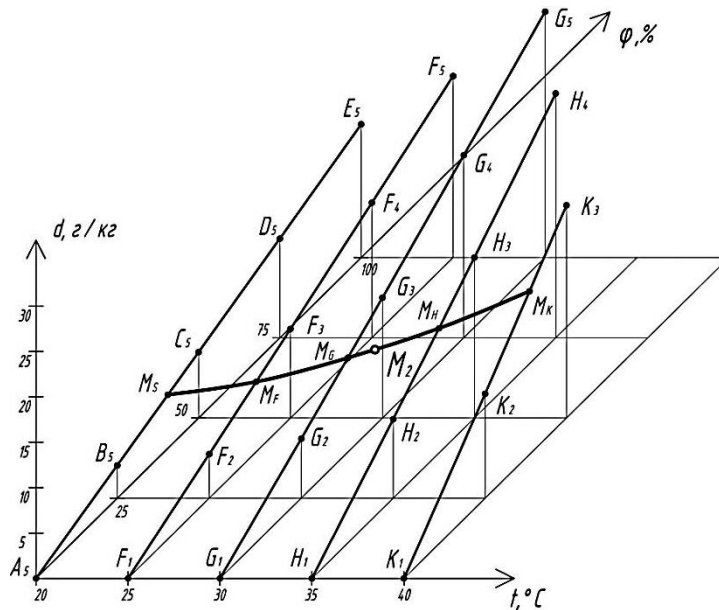
Аналогичным образом определим и другие опорные контуры M_B , M_C , M_D , M_E , согласованные между собой с помощью параметра u . Образующую искомого отсека

поверхности определим аналогичным уравнением только с текущим параметром $v \in [0; 1]$. Таким образом получим двухпараметрическое множество точек. Выполнив покоординатный расчет, геометрический смысл которого заключается в проецировании геометрического объекта на оси декартовой системы координат, получим систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} t = 20u; \\ \varphi = 100v; \\ d = 3,83v + 22,76u^4v^4 - 28,44u^4v^3 + 7,11u^4v^2 + 0,07u^4v - 30,72u^3v^4 + 25,03u^3v^3 + 7,89u^3v^2 - \\ - 2,84u^3v + 4,55u^2v^4 + 15u^2v^3 - 25,14u^2v^2 + 10,37u^2v + 3,41uv^4 - 11,48uv^3 + 10,29uv^2 + 3,04uv - \\ - 0,16v^2 + 0,11v^3. \end{cases}$$

Таким образом, полученная система параметрических уравнений определяет первый из отсеков поверхности отклика, проходящий через 25 наперед заданных точек. Следует отметить, что изменение параметра u соответствует изменению температуры воздуха от 0 до 20 °С, а изменение параметра v – изменению относительной влажности от 0 до 100 %.

Рассмотрим второй отсек поверхности отклика в виде геометрической схемы моделирования зависимости влагосодержания от температуры и относительной влажности воздуха в пределах $t = 20\text{--}40$ °С; $\varphi = 0\text{--}100$ % (рис. 2). В результате отсутствия на i - d диаграмме влажного воздуха некоторых значений параметра влагосодержания, количество значений параметра d , которые были найдены графически, равно 22.



Опорный контур M_K аналитически представим в виде точечного уравнения дуги параболы 2-го порядка, проходящей через 3 наперед заданные точки [7]:

$$M_K = K_1\bar{u}(1-2u) + 4\bar{u}uK_2 + K_3u(2u-1). \quad (2)$$

В результате второй отсек искомой поверхности отклика, проходящей через 22 наперед заданные точки, будет определяться следующей системой параметрических уравнений:

$$\begin{cases} t = 20 + 20v; \\ \varphi = (100 - 83,33v + 566,67v^2 - 1066,67v^3 + 533,33v^4)u; \\ d = -7,65uv + 171,89uv^2 - 287,38uv^3 + 131,27uv^4 + 1,37u^2v + 6,01u^2v^2 - 10,24u^2v^3 + 3,7u^2v^4 - \\ - 1,38u^3v + 12,84u^3v^2 - 26,12u^3v^3 + 14,44u^3v^4 + 0,43u^4v - 9,53u^4v^2 + 20,48u^4v^3 - 11,38u^4v^4 + \\ + 14,47u + 0,21u^3. \end{cases}$$

Аналогично представим третий отсек поверхности отклика в виде геометрической схемы (рис. 3). На i - d диаграмме зафиксируем 13 доступных значений параметра влагосодержания в пределах $t = 40$ – 55 °C; $\varphi = 0$ – 50 % (табл. 1).

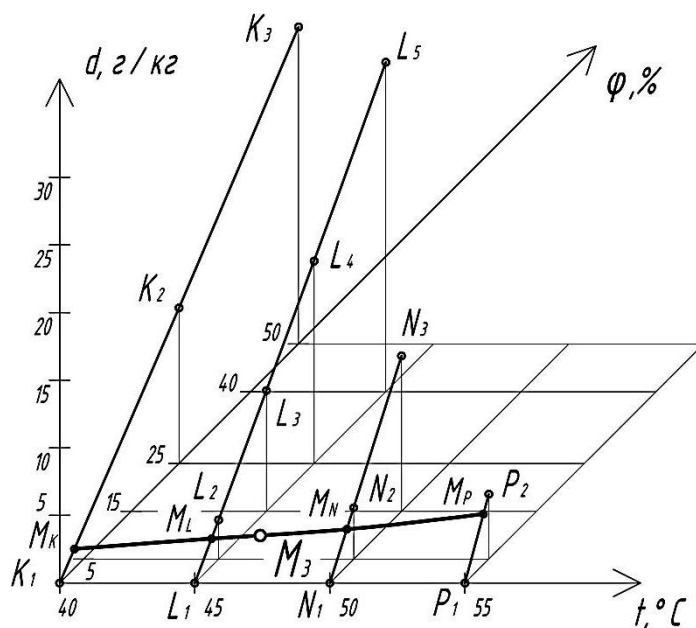


Рис. 3. Геометрическая схема моделирования зависимости влагосодержания от температуры и относительной влажности воздуха в пределах $t = 40$ – 55 °C, $\varphi = 0$ – 50 %

С геометрической точки зрения данная схема представляет собой отсек поверхности, определяемый четырьмя опорными контурами: M_K , M_L , M_N , M_P . Так, первый опорный контур M_K является смежным для второго и третьего отсеков поверхности отклика и определяется точечным уравнением (2). Вторым опорным контуром M_L , проходящим через пять точек, описывается уравнением аналогичным (1). Также с помощью уравнения (2) определим опорный контур M_N , только с другими значениями координат исходных точек N_1 , N_2 и N_3 . Последний опорный контур M_P определим с помощью точечного уравнения прямой: $M_P = P_1\bar{u} + P_2u$.

Поскольку для данной геометрической схемы количество опорных контуров равно четырём, в качестве образующей отсека поверхности воспользуемся точечным уравнением ду-

ги кривой 3-го порядка, проходящей через 4 наперед заданные точки [7]. Выполнив по координатный расчет, получим систему параметрических уравнений, определяющую третий отсек поверхности отклика, проходящий через 13 наперед заданных точек:

$$\begin{cases} t = 40 + 15v; \\ \varphi = 50u - 352,5uv + 667,5uv^2 - 360uv^3 + 1335u^2v - 3270u^2v^2 + 1935u^2v^3 - 1920u^3v + 4800u^3v^2 - \\ - 2880u^3v^3 + 960u^4v - 2400u^4v^2 + 1440u^4v^3; \\ d = 22,6u + 0,84u^2 - 183,72uv + 367,38uv^2 - 201,47uv^3 + 836,73u^2v - 2043,3u^2v^2 + 1205,73u^2v^3 - \\ - 1229,76u^3v + 3074,4u^3v^2 - 1844,64u^3v^3 + 620,16u^4v - 1550,4u^4v^2 + 930,24u^4v^3. \end{cases}$$

Как показано на рис. 4, составим геометрические модели зависимости влагосодержания от температуры и относительной влажности воздуха в общую модель.

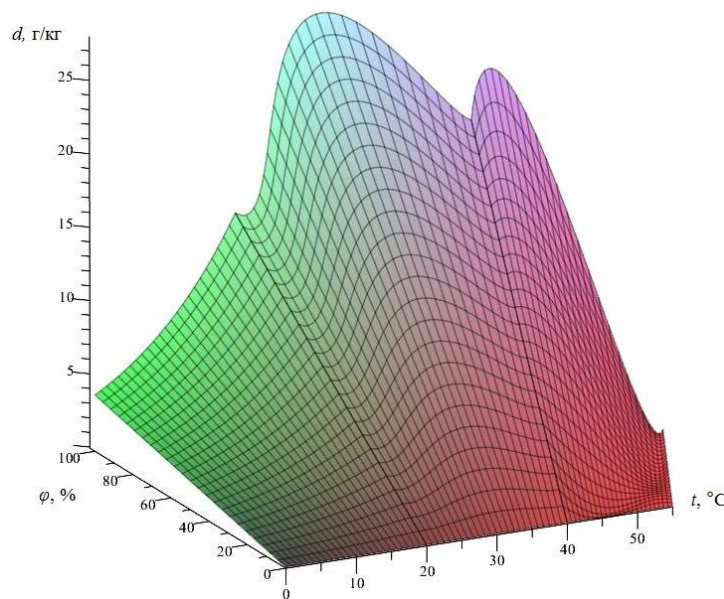


Рис. 4. Визуализация общей геометрической модели зависимости влагосодержания от температуры и относительной влажности воздуха в пределах $t = 0-55^\circ\text{C}$, $\varphi = 0-100\%$

Разработанная геометрическая модель является универсальной для определения других параметров физического состояния воды и водяного пара, меняются только исходные данные, которые приведены в табл. 1.

По аналогии с моделированием параметров влагосодержания рассмотрим моделирование параметров энтальпии влажного воздуха. Так же как и для предыдущей модели, представим геометрическую модель зависимости энтальпии влажного воздуха от его температуры и относительной влажности как поверхность отклика, которая разделена на три отсека. Для первого отсека поверхности отклика выполним по координатный расчет и представим систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} t = 20u; \\ \varphi = 100v; \\ i = 19,33u - 3,09u^3 + 1,28u^4 + 9,83v + 2,99v^3 - 1,28v^4 + 2,56u^2 - 2,08v^2 + 15,06uv^2 - 33,83uv^3 + \\ + 20,09uv^4 + 11,91uv - 15,69u^2v + 97,31u^2v^2 - 87,29u^2v^3 + 19,98u^2v^4 + 75,4u^3v - 301,62u^3v^2 + \\ + 350,15u^3v^3 - 130,28u^3v^4 - 44,2u^4v + 188,9u^4v^2 - 228,12u^4v^3 + 89,88u^4v^4. \end{cases}$$

Для второго отсека, проходящего через 22 наперед заданные точки, запишем следующую систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} t = 20 + 20v; \\ \varphi = (100 - 83,33v + 566,67v^2 - 1066,67v^3 + 533,33v^4)u; \\ i = 37,26u + 3,89u^3 - 1,6u^4 + 18,19v - 2,38u^2 - 12,91v^3 + 5,97v^4 + 8,83v^2 + 652,9uv^2 - \\ - 1045,5uv^3 + 476,48uv^4 - 63,17uv + 273,09u^2v - 1300,4u^2v^2 + 1920,48u^2v^3 - 888,46u^2v^4 - \\ - 453,35u^3v + 2218,13u^3v^2 - 3316,62u^3v^3 + 1547,95u^3v^4 + 223,68u^4v - 1099,88u^4v^2 + \\ + 1657,17u^4v^3 - 779,38u^4v^4 + 20,08. \end{cases}$$

Получим систему параметрических уравнений, определяющую третий отсек поверхности отклика, проходящий через 13 наперед заданных точек:

$$\begin{cases} t = 40 + 15v; \\ \varphi = 50u - 352,5uv + 667,5uv^2 - 360uv^3 + 1335u^2v - 3270u^2v^2 + 1935u^2v^3 - 1920u^3v + 4800u^3v^2 - \\ - 2880u^3v^3 + 960u^4v - 2400u^4v^2 + 1440u^4v^3; \\ i = 57,96u + 14,93v + 0,45v^2 + 0,23v^3 + 2,32u^2 - 441,32uv + 867,36uv^2 - 471,42uv^3 + \\ + 2028,08u^2v - 4945,14u^2v^2 + 2914,74u^2v^3 - 2999,04u^3v + 7497,6u^3v^2 - 4498,56u^3v^3 + \\ + 1526,4u^4v - 3815u^4v^2 + 2289,6u^4v^3 + 40,16. \end{cases}$$

На рис. 5 наглядно представлена визуализация общей геометрической модели зависимости энтальпии влажного воздуха от его температуры и относительной влажности.

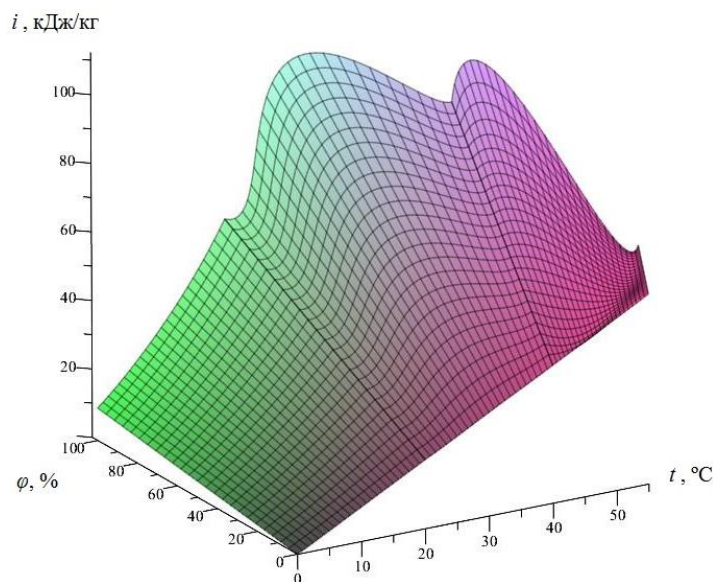


Рис. 5. Визуализация общей геометрической модели зависимости энтальпии от температуры и относительной влажности воздуха в пределах $t = 0-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 0-100\text{ }\%$

Анализ эффективности геометрического моделирования параметров физического состояния воды и водяного пара

К сожалению, авторам не удалось найти работы, связанные с оценкой достоверности геометрических моделей. Поэтому для оценки достоверности предложенных моделей было

решено воспользоваться близким по смыслу коэффициентом детерминации из регрессионного анализа, который производит сравнение между расчетными значениями и исходными данными.

Особенность полученных моделей заключается в том, что соответствие их исходным данным уже было заложено на стадии моделирования, и потому коэффициент детерминации таких моделей будет равен 1, так как была получена функциональная зависимость между исходными данными и 3-мя отсеками составной поверхности отклика. Поэтому для проверки адекватности предложенных моделей воспользуемся дополнительными промежуточными данными в количестве 79 точек, зафиксировав их значения на *i-d* диаграмме. Коэффициент детерминации R^2 вычислим в программе Excel с помощью функции КВПИРСОН. Результаты проверки достоверности для обеих геометрических моделей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка достоверности геометрических моделей

Геометрическая модель	Коэффициент детерминации
Зависимость влагосодержания от температуры и относительной влажности воздуха	$R^2 = 0,9996$
Зависимость энтальпии от температуры и относительной влажности воздуха	$R^2 = 0,9999$

Исходя из значений коэффициента детерминации, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод о получении качественных геометрических моделей, соответствующих не только исходным, но и промежуточным данным.

Заключение. В данной работе на примере влагосодержания и энтальпии влажного воздуха представлены геометрические модели физического состояния воды и водяного пара, а также получены их аналитические зависимости. Разработанные геометрические модели представляют собой две отдельные составные поверхности отклика для влагосодержания и энтальпии влажного воздуха, которые принадлежат трехмерному пространству. Предложенный подход к моделированию является универсальным, так как позволяет определить другие искомые параметры физического состояния воды и водяного пара в зависимости от поставленной задачи и исходных данных.

Выполнен анализ эффективности геометрического моделирования значений влагосодержания и энтальпии влажного воздуха, которые получены из *i-d* диаграммы, с расчетными значениями, полученными на основе геометрического моделирования в БН-исчислении. В результате чего была достигнута практически полная сходимость между геометрическими моделями и реальными значениями (для моделирования влагосодержания коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,9996$, а для моделирования энтальпии влажного воздуха – $R^2 = 0,9999$). На основании полученных результатов исследований сделан вывод о том, что предложенные геометрические модели обеспечивают высокую точность инженерных расчетов и могут применяться для эффективного проектирования систем вентиляции и кондиционирования, процессов нагрева, охлаждения и осушки воздуха. Кроме того, расчетные алгоритмы полученных геометрических моделей, которые аналитически описаны точечными уравнениями, легко программируются на ЭВМ. Это позволяет быстро и максимально точно рассчитать все необходимые значения параметров физического состояния воды и водяного пара, а также установить другие взаимозависимости между ними.

Литература

1. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. 5-е изд. М. : Изд-во МЭИ, 2008. 496 с.
2. Александров А. А., Григорьев Б. Г. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М. : Изд-во МЭИ, 1999. 168 с.

3. Никитин А. А., Рябова Т. В., Поддубный Р. А. Процессы обработки воздуха в системах кондиционирования воздуха // Науч. журнал НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование. 2015. № 2. С. 38–44.
4. Соколов А. В. Моделирование процессов $i-d$ диаграммы влажного воздуха // Решетневские чтения. 2017. Т. 1, № 21. С. 245–246.
5. Никитин А. А., Рябова Т. В., Поддубный Р. А., Василенок А. В. Сравнительный анализ графического и программно-ориентированного метода определения параметров влажного воздуха // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке : материалы VII Междунар. науч.-тех. конф., Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015. № 1. СПб., 2015. С. 361–363.
6. Кирсанов В. В., Игнаткин И. Ю. Математическая модель водоиспарительного охлаждения в системах вентиляции // Вестник МГАУ им. В. П. Горячкина. 2017. № 1 (77). С. 14–20.
7. Конопацкий Е. В. Геометрическое моделирование и оптимизация многофакторных процессов и явлений методом многомерной интерполяции // Труды Междунар. науч. конф. по физико-технической информатике СРТ2018, 28–31 мая 2018 г. Москва – Протвино, 2018. С. 299–306.
8. Воронова О. С., Конопацкий Е. В. Геометрическое моделирование физических параметров влажного воздуха // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы VIII Междунар. науч.-практич. конф., 13–15 марта 2018 г. : в 2 ч. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2018. Ч. 1. С. 318–322.
9. Балюба И. Г., Найдыш В. М. Точечное исчисление : учеб. пособие / под ред. В. М. Верещаги. Мелитополь : МГПУ им. Б. Хмельницкого, 2015. 236 с.
10. Бумага А. И., Конопацкий Е. В., Крысько А. А., Чернышева О. А. Введение в математические аппарат БН-исчисления // Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации. 2017. Т. 1. С. 76–82.
11. Найдыш В. М., Балюба И. Г., Верещага В. М. Алгебра БН-исчисления. Прикладна геометрія та інженерна графіка // Міжвідомчий науково-технічний збірник. К. : КНУБА, 2012. Вип. 90. С. 210–215.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 004.728.3: 621.396.2

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ АБОНЕНТСКОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В СЕТЯХ 5G НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СЛАЙСИНГА

Р. В. Ахпашев, Д. В. Завьялова

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, ruslan.akhpashev@gmail.com, da2215@mail.ru*

Для оценки качества радиопокрытия изначально использовалось громоздкое оборудование, которое позволяло довольно точно определить «дыры» в радиопокрытии. В настоящее время появились смартфоны, которые обладают производительностью компьютеров прошлого десятилетия и способны проводить автоматизированный сбор данных о сетях мобильной связи, в том числе о сетях следующего поколения и сетях 5G с разделением ресурсов сети путем слайсирования. В рамках исследования авторы разработали мобильное приложение на базе ОС Android, которое позволяет получать данные о качестве и уровне принятого сигнала с базовой станции. Данные привязаны к координатам GPS, что позволяет более точно определить слабые места в радиопокрытии мобильной сети. Авторы также провели анализ и оптимизацию энергоэффективности приложения, которая основана на балансе между частотой сбора и отправки данных на сервер и количеством активных абонентов в сети.

Ключевые слова: драйв-тест, LTE, 5G, оптимизация, слайсинг.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF USER EQUIPMENT WORKING IN 5G NETWORKS BASED ON SLICING MODEL

R. V. Akhpashev, D. V. Zavyalova

*Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk
ruslan.akhpashev@gmail.com, da2215@mail.ru*

Initially, heavy equipment was used, which allowed highly accurate determination of “holes” inside a network, to assess the quality of radio coverage. Nowadays a smartphone has a computer performance and could be used for the purposes of checking the quality and power of a received signal from the mobile network, especially for the future 5G network based on slicing technique. The authors of the article developed an application for Android smartphones that could get the measurement data from the base station. The connection to the GPS allows determining more accurately the weak points in the coverage of the mobile network. Authors analyze and optimize the energy performance of the application based on a balance between the frequency of collecting and sending data to the server and the number of active users.

Keywords: drive-test, LTE, 5G, optimization, slicing.

Введение. 5G (официальное название IMT-2020) – это технология мобильной связи 5-го поколения. В данный момент активно разрабатываются стандарты сети 5-го поколения. Запуск первой коммерческой сети 5-го поколения планируется на 2020 год [1]. Предоставление услуг (сервисов) будет производиться путем слайсирования ресурсов, т. е. сервисы будут разделяться с помощью виртуализации на различные слайсы. Данная технология базируется на трех услугах, предоставляемых операторами: сверхширокополосной мобильной связи, массовых межмашинной связи и сверхнадежной межмашинной связи. Большую роль в бесперывной работе сети играют анализ и оценка качества радиопокрытия уже работающей сети. Операторы мобильной связи вынуждены проводить драйв-тесты, показывающие реальную ситуацию на уровне радиодоступа. Изначально драйв-тесты проводились с использованием громоздкого оборудования, которое могло помещаться только в автомобиль. В связи с этим операторы имели возможность получать данные о качестве радиопокрытия только по определенным маршрутам. В настоящее время, с приходом эры смартфонов, способных

на выполнение миллиардов операций в секунду, операторы могут получать данные о радиопокрытии непосредственно в тех местах, где находятся пользователи. Мобильное приложение, установленное на смартфон, позволяет собирать данные о качестве и мощности принятого радиосигнала, при этом сопоставляя данные с координатами местоположения абонента. Авторы данной статьи разработали мобильное приложение на базе ОС Android, позволяющее производить сбор статистической информации о сетях мобильной связи (2G, 3G, 4G и в будущем 5G) и отправлять данные на сервер для дальнейшей обработки. В результате оператор получит возможность отслеживания качества радиопокрытия сети в реальном времени. Основными типами данных являются: идентификатор сети, базовой станции; качество и мощность принимаемого радиосигнала; GPS-координаты абонентского устройства и др. Одной из основных проблем по сбору данных является ограниченная емкость батареи абонентского устройства. Важной задачей является снижение энергозатрат на данное приложение, так как явной пользы для абонента оно не несет.

Изучению вопросов минимизации драйв-тестов и анализу радиопокрытия сети посвящено множество публикаций [2–3]. В статье [2] авторы разработали методологию симуляции виртуальных драйв-тестов (Virtual Drive Test) для машино-инфраструктурного взаимодействия в сети LTE-Advanced. Авторы работы [3] показывают сравнительный анализ использования TESM (Test Mobile System) для сетей LTE и 3G. Они проводят драйв-тест с использованием мобильных устройств в виде драйв-тест оборудования. Драйв-тесты выполнены для сетей 3-го поколения и сетей LTE внутри помещения и снаружи, путем анализа влияния мобильности на среднюю пропускную способность абонента и мощность принятого радиосигнала (RSSI).

Перечисленные работы представляют собой далеко не полный список публикаций, посвященных обозначенной тематике, что, безусловно, свидетельствует о ее актуальности. Однако по-прежнему отсутствуют результаты имитационного моделирования по эффективному сбору данных о радиопокрытии мобильных сетей с абонентских устройств, которое позволяет получать результаты драйв-тестов в реальном времени и в дальнейшем принимать решения по оптимизации сети. Данный подход применим к мобильным сетям, начиная с 2G заканчивая последним поколением технологии, в данном случае 5G с моделью разделения ресурса путем слайсирования. В рамках данной статьи авторами была предпринята попытка оптимизации энергоэффективности мобильного устройства в виде драйв-тест оборудования, которая позволяет сократить расход батареи в зависимости от текущего количества активных абонентов в сети. Имитационная модель была разработана с помощью языка высокого уровня Python 3.6

Принципы разделения ресурсов в 5G

На рис. 1 показана классификация основных типов услуг, предоставляемых сетью 5G. В рамках исследования данные услуги будут рассматриваться как одна, так как в данный момент организацией 3GPP еще не утверждены детали оценки качества и мощности принятого радиосигнала для различных сервисов.



Рис. 1. Классификация услуг сетей 5-го поколения

Сверхширокополосная мобильная связь (Extreme Mobile Broadband, eMBB) – реализация ультраширокополосной связи с целью передачи данных со скоростью около 20-ти ГБ/с. Данные требования могут быть выполнены при условии использования миллиметрового частотного диапазона (20 ГГц – 52 ГГц). Массовая межмашинная связь (Massive Machine Type Communication, mMTC) – поддержка Интернета вещей (Internet of Things, IoT). Требованиями к реализации данной услуги являются: поддержка около 1 млн устройств на км², поддержка одной сотой до 50-ти тыс. устройств, обеспечение работы устройства на одном заряде батареи до 10-ти лет, цена одного устройства около 2 \$. Сверхнадежная межмашинная связь (Ultra-reliable MTC, uMTC) – обеспечение особого класса услуг с низкими задержками. Данный сервис предоставит возможность сокращения задержек на радиоуровне до 1 мс. На рис. 2 показана принципиальная схема разделение ресурсов для различных услуг путем слайсирования ресурсов (предоставление доступа путем виртуализации ресурсов).

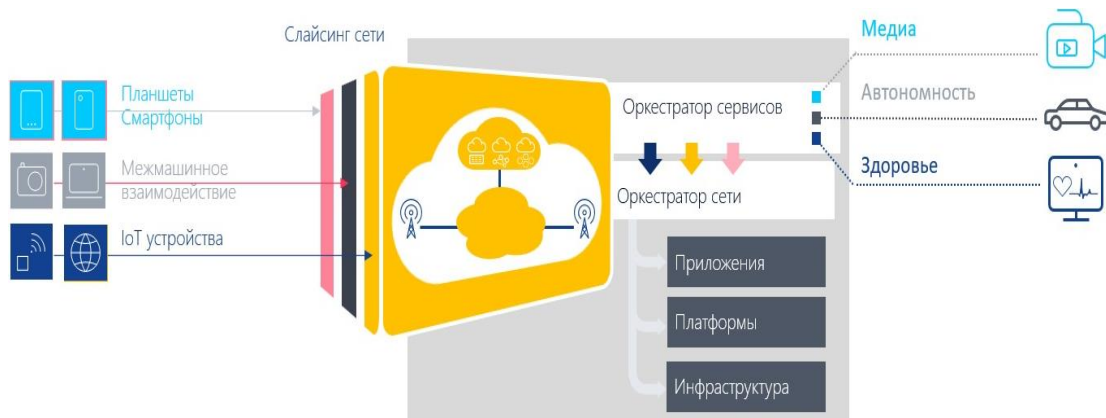


Рис. 2. Слайсинг сети 5G

Согласно спецификации 3GPP [4], измерения на физическом уровне для каждого типа сервиса (слайса) будут производиться по аналогии с сетью LTE. Спецификации 5-го поколения первой фазы определяют технологию множественного доступа на физическом уровне с помощью ортогонального разделения частот (OFDMA) [1]. На данный момент разница между физическим уровнем LTE и 5G будет отличаться только варьирующимся значением частотного разнесения поднесущих (subcarrier). Данное значение для сетей LTE в большинстве равно 15 кГц между двумя соседними поднесущими, в сетях 5G определено несколько разновидностей данного параметра: 15, 30, 60, 120 и 240 кГц. Соответственно, принцип распределения ресурсов на физическом уровне останется прежним. Из этого следует, что принцип оценки качества и мощности принятых радиосигналов будет схожим с технологией LTE. На рис. 3 показано распределение пилотных сигналов для оценки качества и мощности радиосигнала.

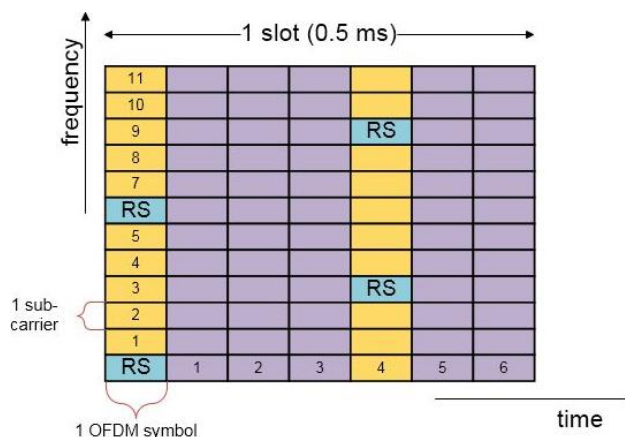


Рис. 3. Распределение пилотных сигналов для оценки качества и мощности радиосигнала сети LTE

На данном рис. ячейка RS – это пилотный сигнал, который всегда фиксирован и передается с фиксированной мощностью [5]. Благодаря данному подходу, мобильное устройство способно измерять уровень интерференции, мощность полезного сигнала на всех частотах и практически в любой момент времени.

Функциональная схема разработанного приложения показана на рис. 4. Комплекс состоит из мобильного приложения, которое дает возможность получать статистику непосредственно с абонентских устройств. Идея состоит в том, чтобы в дальнейшем анализировать данные, полученные со смартфонов, делать выводы по оптимизации радиопокрытия и визуализировать данные для более удобного анализа.

Первая часть представляет собой мобильное приложение на базе Android, которое способно собирать и отправлять информацию на сервер без вмешательства в пользовательский интерфейс, таким образом не мешая работе абонента со смартфоном. Приложение может быть установлено на множестве устройств, предоставляя возможность оптимизировать ключевые показатели эффективности, относящиеся к пользователям. Данные, которые подвержены сбору, представлены ниже:

- RSRP (Reference Signal Received Power) мощность, измеряемая в пилотном сигнале. Данная переменная необходима для выполнения всех типов мобильности устройства и для расчета потерь в радио тракте (для управления мощностью в направлении вверх) [6–8];
- RSRQ (Reference Signal Received Quality) – показывает качество принятого пилотного сигнала в сравнении со всеми остальными полученными сигналами (такими как шум, интерференция от соседних сот) [6–8];
- PCI (Physical Cell ID) – физический идентификатор соты, используется для разделения пилотных сигналов и проблем отправки отчетов об измерениях;
- GPS-координаты – показывают значения широты и долготы, также предоставляют возможность измерять время, высоту над уровнем моря и качество принятого радиосигнала.

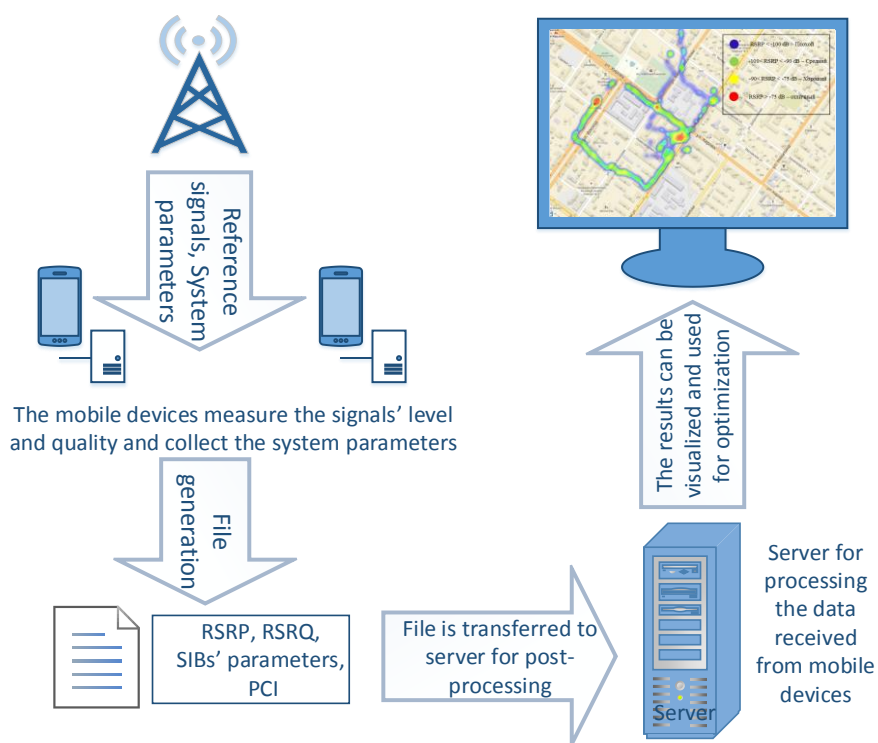


Рис. 4. Схема работы приложения по сбору статистики о качестве радиопокрытия

Важным аспектом данной работы являются анализ и оптимизация энергоэффективности данного приложения. Авторы исследования спроектировали имитационную модель и

определили зависимость частоты сбора и отправки данных с одного мобильного устройства на сервер от количества активных абонентов в сети. Существует функция, которая нуждается в оптимизации (минимизации): энергозатраты абонентского устройства на сбор и отправку данных на сервер $f_1(x, y)$, где значение параметра x – частота сбора данных; y – количество активных абонентов в сети:

$$\min(f_1[x, y]; f_2[x, y]), x \in S, y \in S, \quad (1)$$

где S – ряд ограничений.

Имитационное моделирование и численные результаты

В рамках данного исследования была разработана и реализована с помощью языка высокого уровня Python 3.6 имитационная модель работы в сетях 5G. Основными параметрами для реализации модели являются: распределение абонентов в сети, максимальное число активных абонентов в сети, энергозатраты мобильного приложения.

Абонент считается активным, когда абонентское устройство находится в режиме RRC_Connected, т. е. базовая станция знает о существовании данного абонента и имеет данные в буфере для передачи.

В ходе имитационного моделирования были сформированы следующие события:

1. Сделано упрощение в виде фиксированного значения мощности принятого радиосигнала в радиусе 5 метров от GSP-координат.
2. Поставлена задача – покрыть 95 % территории охвата базовой станции.
3. Минимальная частота сбора данных равна 1 мс.

В таблице приведены значения входных параметров, принятых для имитационного моделирования. Имитационное моделирование движения абонентов выполнялось в 21 соте – 7 трехсекторных базовых станциях, абоненты между которыми были распределены равномерно и двигались в случайных направлениях со скоростью, задаваемой в параметрах. Число абонентов в сети было принято равным 100.

Таблица

Входные параметры

Название параметра	Значение параметра
Мощность передатчика базовой станции	43 дБм
Несущая частота LTE	2100 МГц
Ширина полосы частот в режиме FDD	15 МГц
Чувствительность приемника мобильной станции UE	-110 дБм
Чувствительность приемника базовой станции eNodeB	-120 дБм
Скорость движения абонента (UE_speed)	5 км/ч
Модель распространения сигнала	COST 231 Hata
Количество сот	21
Тип БС	трехсекторная
Число абонентов	100

С помощью разработанной имитационной модели были получены графики зависимостей энергозатрат мобильного приложения для сбора и отправки данных на сервер от количества активных абонентов в сети для покрытия 95 % территории.

На рис. 5 показана зависимость энергозатрат мобильного приложения от количества активных абонентов в сети. Различные графики построены для разной частоты сбора и отправки информации на сервер.

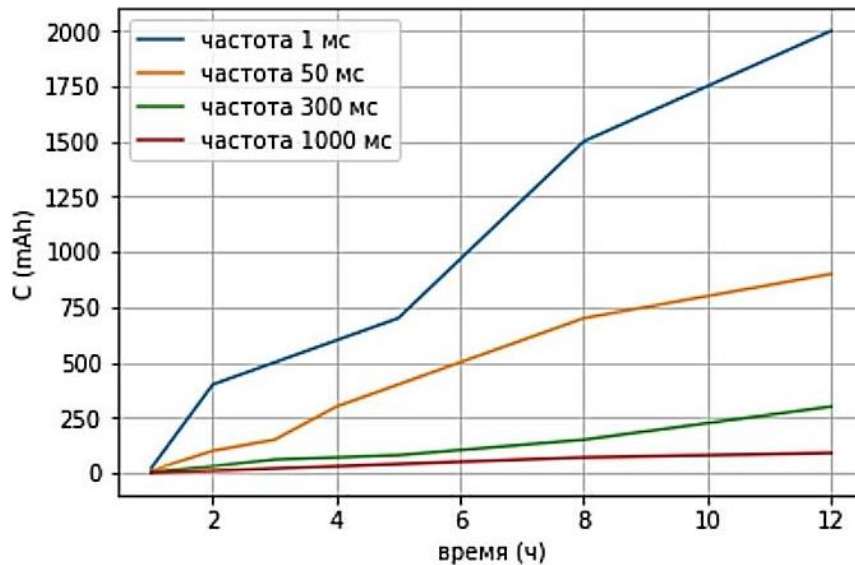


Рис. 5. Зависимость энергозатрат от времени непрерывного сбора данных

Очевидно насколько сильно влияние величины частоты сбора и отправки данных на энергопотребление. В данной работе тестировалось устройство на базе ОС Android Nexus 5, все данные по энергозатратам получены эмпирическим путем. Важно отметить, что энергопотребление зависит от написанного мобильного приложения и может отличаться в зависимости от кода программы.

На рис. 6 показана зависимость процента покрытия территории базовых станций абонентами от количества активных абонентов на соте. Данные были собраны за период времени в 1 ч.

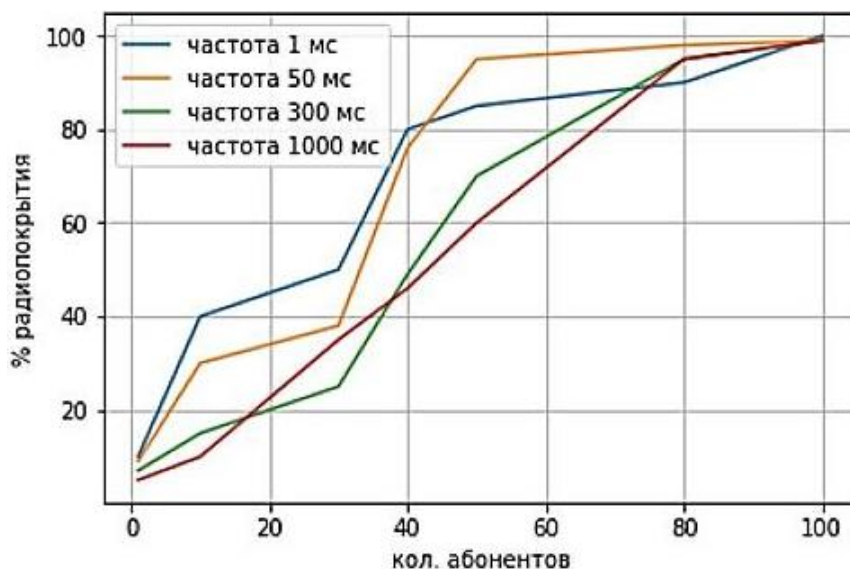


Рис. 6. Зависимость процента зависимости абонентами территории зоны обслуживания базовыми станциями от количества активных абонентов в сети

Из рисунка видно, что за 1 ч сбора данных разница между частотой сбора и отправки данных на сервер в 1 мс практически не имеет преимуществ от частоты сбора данных в 1 000 мс, но энергозатраты существенно уменьшаются. Таким образом, отпадает необходимость слишком частого сбора данных об уровне и качестве принятого радиосигнала. В результате минимум энергозатрат соответствует значению частоты сбора данных в 1 000 мс.

Заключение. В рамках исследования была разработана имитационная модель, позволяющая анализировать и находить оптимум энергоэффективности мобильного приложения на базе ОС Android, способного производить сбор и отправку данных на сервер с определенной периодичностью. Результаты данной работы могут быть полезны операторам и вендорам мобильной связи для минимизации энергозатрат при драйв-тестах, в которых используются абонентские устройства.

Литература

1. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. 2nd ed. A John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 2011. 794 p.
2. Cao J., Kong D., Charitos M., Berkovsky D., Goulanos A. A. et al. Design and Verification of a Virtual Drive Test Methodology for Vehicular LTE-A Applications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. May 2018. Vol. 67, № 5. P. 3791–3799.
3. Ahmad S., Musleh S., Nordin R. The Gap between Expectation and Reality: Long-Term Evolution (LTE) and Third Generation (3G) Network Performance in Campus with Test Mobile System (TEMS) // Conference: 2015 9th Asia Modelling Symposium (AMS). 2015. P. 164–168.
4. 3GPP TS38.215 v. 15.3.0, New Radio; Physical Layer Measurements, Release 15. ETSI. France, 2018. 18 p.
5. RAN WG1 TS 25.225 v.3.0.0 (1999-10) Physical Layer – Measurements (TDD), source: RAN #5. URL: <http://www.3gpp.org/dynareport/25225.htm> (дата обращения: 20.11.2018).
6. Hamalainen S., Sanneck H., Sartori C. LTE Self-Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency. Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2011. 428 p.
7. Specification 37.320. Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio measurement collection for Minimization of Drive Tests (MDT); Overall description. Release 10. URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/37320.htm> (дата обращения: 15.11.2018).
8. Lee V. LTE and Evolution to 4G Wireless, design and measurement challenges, 2nd edition. Chichester, John Wiley & Sons, April 2013. 648 p.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

П. А. Стулов¹, А. А. Егоров², Т. В. Гавриленко²

¹Научно-аналитический центр рационального
недропользования им. В. И. Шпилмана, г. Ханты-Мансийск

²Сургутский государственный университет
Stulovpa@gmail.com, eaafit@gmail.com, taras.gavrilenko@gmail.com

В представленной работе дается анализ современных технологий визуализации порового пространства горных пород в масштабе нескольких нанометров и выше. Описываются сравнительная характеристика и эффективность применения различных методов определения пористости горных пород: стандартного физического – с помощью пермеаметра и с помощью рентгеновского микротомографа. На реальных образцах с применением высокоточного аналитического оборудования выполнено исследование порового пространства конкретных литотипов горных пород. Выделены элементы порового пространства различных физических характеристик – поры и микроканалы, связывающие их или закрытые, и элементы матрицы – непосредственно минералы и высокоплотные включения. Создана трехмерная цифровая модель ядра на основе исходных данных. Разработаны алгоритмы визуализации пористой структуры цифровой модели ядра, а также его проницаемости и трещиноватости порового пространства горных пород.

Ключевые слова: ядро, магнитно-резонансная томография, алгоритм, пористая среда.

MODERN TECHNOLOGIES FOR MODELLING PORE SPACE OF ROCKS

P. A. Stulov¹, A. A. Egorov², T. V. Gavrilenko²

¹V. I. Shpilman Research and Analytical
Centre for the Rational Use of the Subsoil, Khanty-Mansiysk,

²Surgut State University
Stulovpa@gmail.com, eaafit@gmail.com, taras.gavrilenko@gmail.com

The paper provides an analysis of modern technologies for visualizing the pore space of rocks on a scale of several nanometers and above. A comparative characteristic and effectiveness of the use of various methods for porosity determination of rocks are considered. These methods include using a permeameter and an x-ray microtomography. The pore space of specific rock lithotypes is studied using high-precision analytical equipment on real samples. Elements of the pore space of various physical characteristics such as pores and microchannels connecting them or closing, and the matrix elements (minerals and high-density inclusions) are identified. A 3D digital core model based on initial data is created. Algorithms are developed to visualize the porous structure of a digital core model, as well as its permeability and fracturing of the mountain pore space.

Keywords: core sample, magnetic resonance imaging, algorithm, porous medium.

Основной задачей для Ханты-Мансийского автономного округа – Югры – главной базы углеводородного сырья и нефтедобычи России – является предотвращение снижения, стабилизация добычи нефти. Улучшения ситуации можно достичь за счет активного вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов нефти (далее – ТРИЗ). Создание реальных моделей коллекторов затруднено без глубокого и детального изучения фильтрационно-емкостных свойств (далее – ФЕС) ядерного материала, включая его основной параметр – поровое пространство как важный фактор, определяющий практически все физические свойства породы. В последние годы существенно возрос интерес исследователей к различным методам и подходам получения цифровой модели порового пространства и ядра [1–3]. Предлагаются различные механизмы и подходы к получению эффективных цифровых моделей.

Визуализация и моделирование порового пространства становится обычным сервисом цифрового анализа керна в нефтяной и газовой промышленности. В статье кратко описывается основная технология, называемая визуализацией порового пространства горных пород в масштабе нескольких нанометров и выше, сравниваются результаты определения пористости двумя методами – стандартным физическим методом с помощью пермеаметра и с помощью рентгеновского микротомографа [4].

Основным источником геологической информации о глубоко залегающих горных породах является керновый материал, поднятый на поверхность в соответствии с определенными требованиями. Именно от того, каким образом был поднят на поверхность керновый материал, зависит точность определения его фильтрационно-емкостных свойств, особенно для коллекторов с ТриЗ. Для активного вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов нефти необходимо создание реальных моделей порового пространства кернового материала [5]. В первую очередь это нужно для рационального размещения эксплуатационных скважин, определения технологии бурения и направления работ, подбора интервала спуска колонны, испытаний и т. д.

Благодаря исследованиям керна мы узнаем о минералогическом и петрографическом составе слоев, залегающих на глубине несколько тысяч метров, о содержащихся в них фаунистических и растительных остатках, пористости, проницаемости, нефтегазонасыщенности и др. [6].

Создание цифровой модели керна

Определением пористости как одной из основных характеристик осадочных пород с помощью методов рентгеновской микротомографии с высоким разрешением исследователи занимаются более двух десятков лет. Применение рентгеновского микротомографа с высоким разрешением открывает перед геологами широкие возможности для исследований емкостных свойств горных пород, выявления важных характеристик для построения цифровой модели керна [4]. Цифровая модель керна должна быть описана не только статическими параметрами, но и иметь динамическое отражение в виде гидродинамики флюидов. Проблема управления флюидом в пористой среде имеет особое значение в связи с необходимостью создания технологии «Цифровое месторождение». Моделирование таких процессов может быть использовано для оптимизации различных видов динамических воздействий на резервуар с целью увеличения добычи нефти. Оперативное решение такого класса задач с учетом пространственно-временных масштабов требует использования суперкомпьютерных технологий класса терафлоп. Это требование определяется точностью прямого моделирования потока текучей среды в пористой структуре, в которой для разрежения поровых каналов должно использоваться большое количество ячеек [7–11]. Используя эту модель, можно решить класс проблем, связанных с построением модели фильтрации коллектора на основе использования статистических оценок.



Рис. 1. Общий вид образцов 1 (слева) и 2 (справа)

Главной задачей эксперимента является создание цифровой модели песчаника неокомского НГК (рис. 1). Для этого необходимо разделить полученную информацию на

элементы порового пространства – поры и микроканалы, связывающие их или закрытые, и элементы матрицы – непосредственно минералы и высокоплотные включения. При обработке полученных данных исследований горной породы использовано новейшее программное обеспечение *PerGeos* с алгоритмом реконструкции *Filtered Back Projection* и с последующей разработкой математических моделей «матрикс включения – емкостное пространство (поры и микроканалы)».

Далее в лаборатории исследования керна Окружного кернохранилища АУ «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В. И. Шпильмана» после экстракции бензольной смесью, просушки образцов стандартным газоволюметрическим методом по гелию на пермеаметре *ULTRAPOROPERM-500* были измерены пористость и проницаемость по азоту (табл. 1).

После стандартных измерений ФЕС образцы вернули в лабораторию томографии и отсканировали на рентгеновском микротомографе после экстракции [3]. Полученные данные с вышеуказанных этапов эксперимента по определению пористости различными методами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение значений пористости образцов, полученных при использовании томографии до и после экстракции и лабораторным методом после экстракции

Параметр	Ед. изм.	Sample 1 Результаты томографии		Физический эксперимент	Sample 2 Результаты томографии		Физический эксперимент
		до	после		до	после	
Относительный объем пустотного пространства	%	12,5	20,0	23,5	12,6	25,2	24,2
Наличие связанного пустотного пространства	да/нет	да	да		да	да	

Разница в полученных методом рентгеновской микротомографии данных по пористости для образца *Sample 1* (до 12,5 и 20 % после экстракции) и образца *Sample 2* (до 12,6 и 25,2 % после экстракции) составила 7,5–12,6 %. Получается, что рентгеновский микротомограф определил 7,5 % пространства в образце 1 и 12,6 % – в образце 2 не пустотным пространством, а как элементы матрицы. И лишь после экстракции значения пористости, полученные с помощью метода томографии, близки с данными физического эксперимента. По результатам исследований поставлена задача, которую необходимо решить в дальнейшем, – разработать комплексную программу определения с помощью методов микрокомпьютерной томографии компонентного состава веществ (солей, органического вещества, нефтепродуктов, пластовых флюидов и др. включений), заполняющих от 7,5 до 12,6 % порового пространства горной породы, которые были вымыты в результате экстракции [4].

Разделить пустотное пространство на компоненты малой плотности и матрицу с высокоплотными включениями возможно минимум двумя методами: методом контрастирования (различным подкрашиванием солей, органики и т. д.) и методом двухэнергетической съемки (разделение на высокие и низкие энергетические потоки). Но это тема уже следующего исследования с использованием более высоких технологических возможностей микротомографии.

Еще одним результатом при проведении эксперимента по определению пористости различными методами стало **получение визуализации неравномерного промывания порового пространства во время экстракции**.

На рис. 2 и 3 приведена бинаризация локальных участков образцов *Simple 1* и *Simple 2*, характеризующая пустотное пространство образцов и основную составляющую – матрицу. Сравнение заключается в измерении средней разности между изображениями в каждом вокселе (объемном пикселе). Результатом сравнения является объемная модель в динамическом диапазоне 16 бит, где интенсивность каждого вокселя зависит от разницы

значений уровня серого цвета сравниваемых моделей (чем больше разность, тем выше интенсивность на получаемом изображении – модели сравнения) [1].

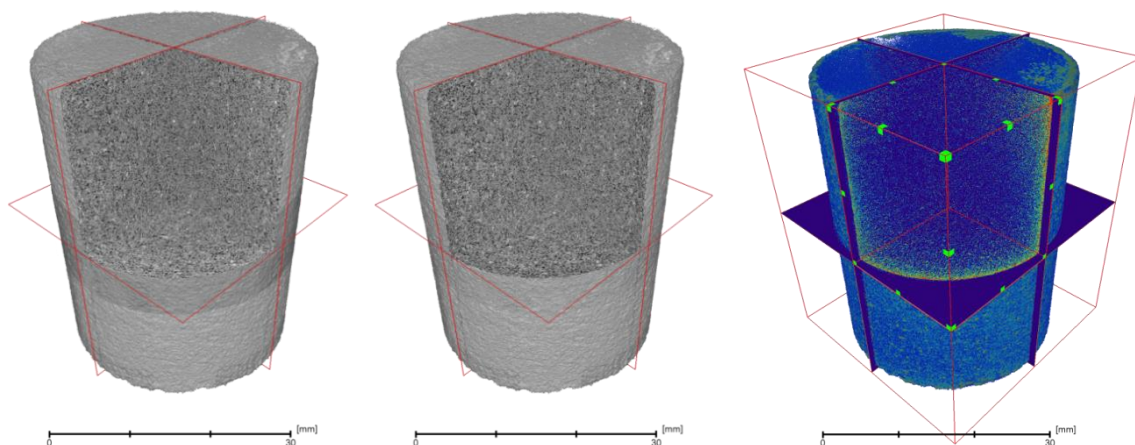


Рис. 2. Трехмерная реконструкция данных микротомографии образца 1, представленная в виде объемной модели. Слева – модель образца в исходном состоянии, в центре – модель образца после проведения физического эксперимента, справа – модель сравнения

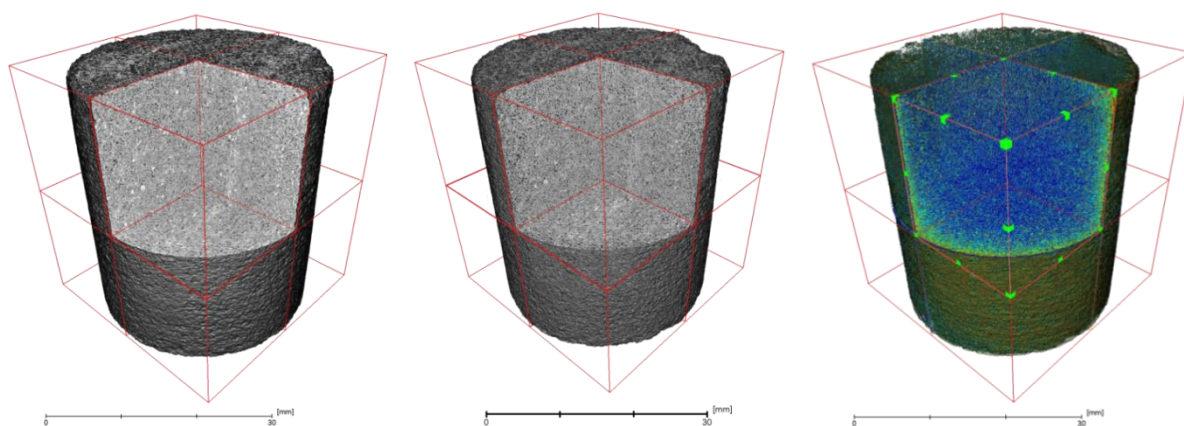


Рис. 3. Трехмерная реконструкция данных микротомографии образца 2, представленная в виде объемной модели. Слева – модель образца в исходном состоянии, в центре – модель образца после проведения физического эксперимента, справа – модель сравнения

Данная модель отображена с помощью стандартной цветовой схемы (рис. 4) [9], где фиолетовый цвет соответствует отсутствию разности изображений; синий – незначительные отличия (на уровне шума); зеленый – отличие есть (например, частично отмытое органическое вещество); желтый – существенные отличия (например, практически полностью отмытое органическое вещество); красный – отсутствие структурного элемента на образце после отмывки (например, отколотые зерна, полная отмывка поры от ОВ).

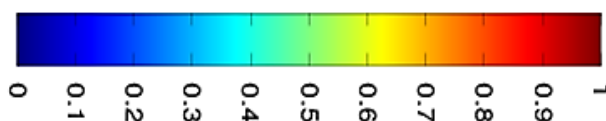


Рис. 4. Стандартная цветовая схема интенсивности промывки образца

Из сравнительной модели следует, что промывка горной породы во время экстракции интенсивнее происходит от центральной части к периферической, наиболее проницаемой для бензольной смеси, из чего следует вывод, что даже в образце горной породы, подвергну-

том физическому эксперименту, эффект «вымывания» сторонних минералов из порового пространства различен: чем ближе к центру образца, тем слабее эффект «вымывания». Это вывод является определяющим в данной работе, а его результаты необходимо учитывать геологам при составлении объемных моделей залежей и подсчете запасов. Данное утверждение позволяет подтвердить с помощью разработанных волновых алгоритмов и программного обеспечения позволяющих обеспечить визуализацию проницаемости пористой среды.

Представление среза с помощью цветовой палитры дает более четкое представление о структурном различии плотностей срезов. Керна по ориентации параметров в пространстве изотропен. В то же время наблюдается увеличение пористости с удалением от центра ядра. Это связано с непрерывным разрушением ядра с течением времени. На рис. 5 представлен срез керна № 6. Зеленая область по периметру рисунка является пустотой, окружающей керна цилиндрической формы. Значение ячейки для данного среза представлено в цветовом диапазоне по шкале от 0 (светло-зеленый) до 12000 (синий). Срез № 6 в некотором роде является граничным. Необходимо учитывать, что на пограничные срезы оказывалось механическое воздействие, также граничные слои разрушались в достаточно короткие сроки времени.

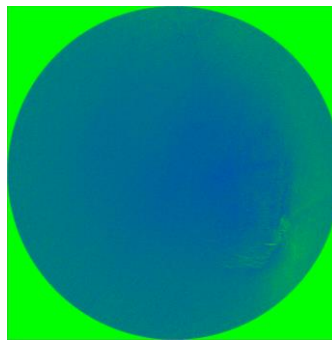


Рис. 5. Срез № 1 томографии керна

Керн, представленный на рис. 6, наглядно демонстрирует зону разрушения керна. Относительно плотные области керна представлены темно-синим оттенком. По мере увеличения порядкового номера среза количество более плотных вкраплений увеличивается.

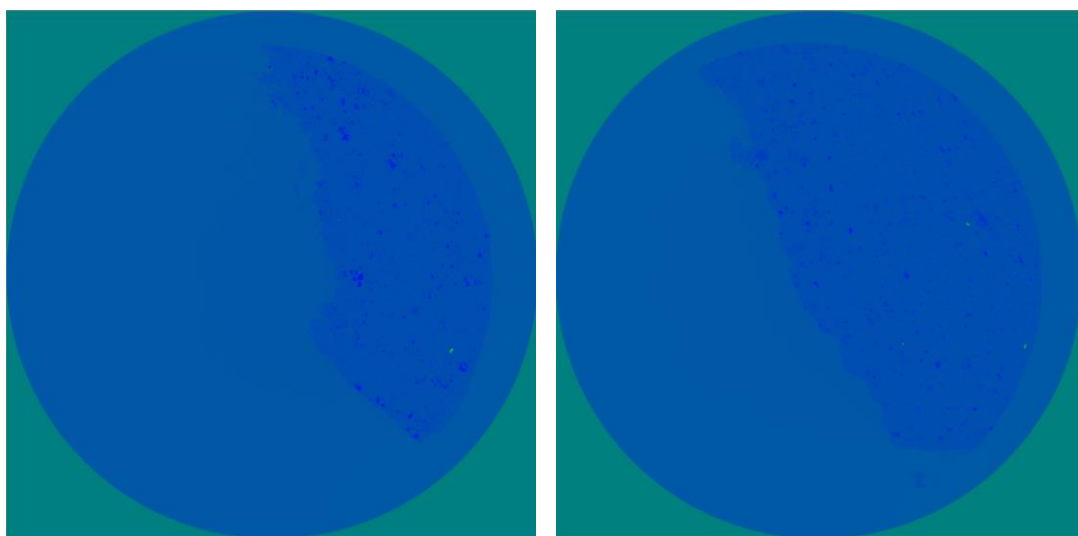


Рис. 6. Срез томографии керна слева № 105, справа № 200

Также на рис. 6 присутствуют малые области с относительно низкой плотностью. Они отмечены зеленым цветом. Данные области не являются ошибкой или отклонением

в одном срезе, а наблюдаются на всех рядом стоящих срезах и представляют собой полые пространства в керне. Распределение плотностей для среза № 200 по шкале Хаунсфилда представлено на рис. 7.

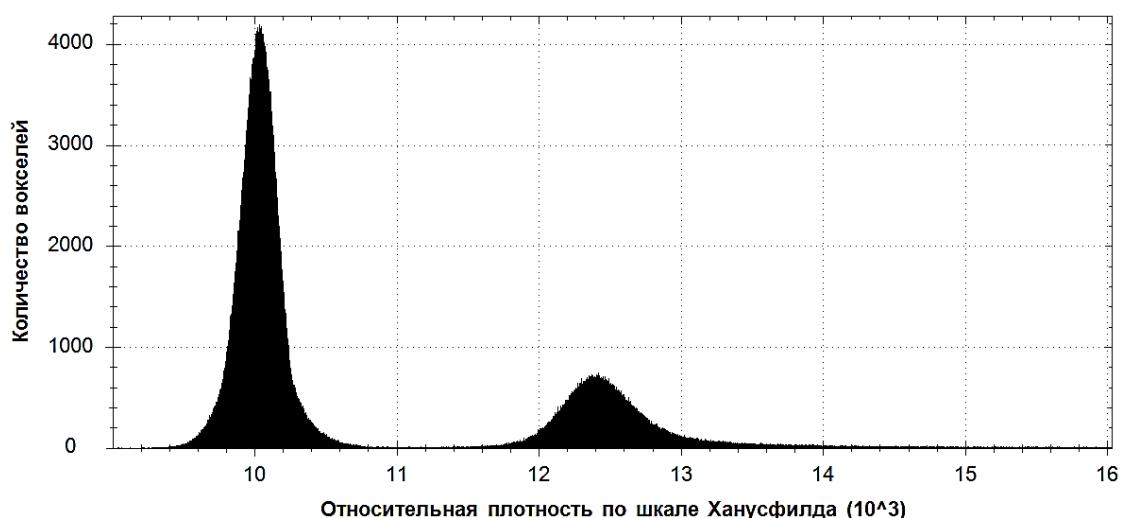


Рис. 7. Распределение плотностей 1 среза по шкале Хаунсфилда
(Ось Y – количество ячеек с значением по шкале Хаунсфилда, Ось X – шкала Хаунсфилда)

Данная диаграмма подтверждает неоднородность керна в целом и наличие в нем как минимум двух компонентов плотностей. С целью анализа проницаемости керна был проведен ряд модельных экспериментов, позволяющих визуально увидеть области керна, потенциально проходимые для флюида. В результате работы волнового алгоритма были получены карты проницаемости ядра с пространственным разрешением 2560×2560 клеток. На рис. 8 представлена карта проницаемости, где белым цветом показаны зоны, через которые проходит жидкость. Красный цвет показывает поры с несмещенной жидкостью. Обычные стенки пористой среды, которые предотвращают проникновение жидкости, показаны черным.

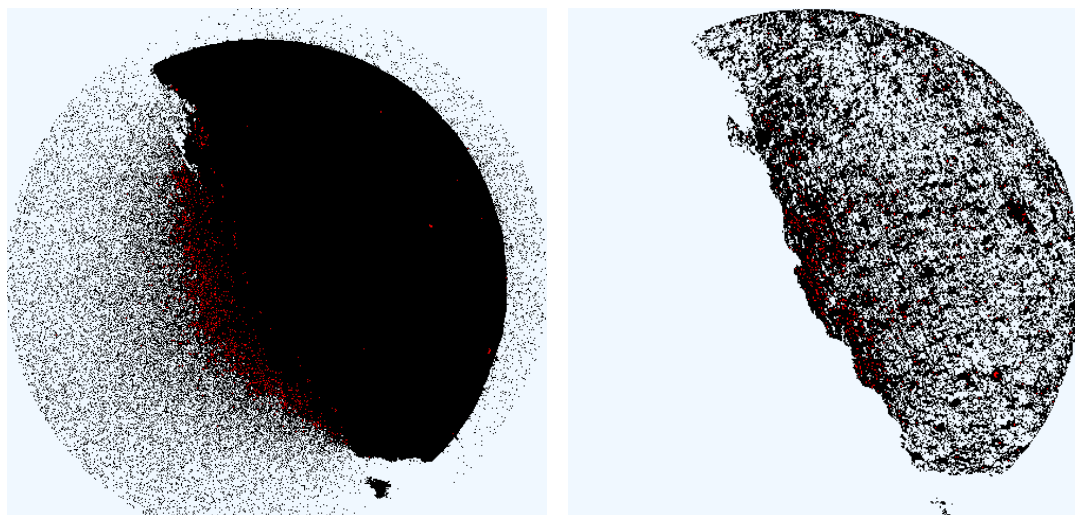


Рис. 8. Карта пористой среды среза № 200 с учетом проницаемости флюидом:
значение фильтра 10 130 единиц (слева); значение фильтра 12 450 (справа)

Значения фильтров установлены согласно пикам частоты встречаемости компонентов по плотности (рис. 7). Вне зависимости от значения фильтра алгоритм хорошо визуализирует наличие пустого связанного пространства. Процент присутствия замкнутых областей не-

лик. На рисунках видны зоны, где вытеснение флюида не может произойти по причине замкнутости пор. Помимо центральных зон присутствуют малые зоны, также потенциально задерживающие флюид.

Выводы:

1. Применение томографа позволило получить объемную растровую модель образца, используя математические алгоритмы анализа растрового изображения в комплексе с использованием данных микроописания образцов. Полученные результаты дают возможность выполнить построение объемных цифровых моделей образцов горной породы и определить общую пористость горной породы. При этом цифровое исследование не заменяет стандартного и специального анализов керн, а дополняет и, самое главное, существенно уточняет их результаты.

2. Применение цифрового анализа для определения и/или уточнения ФЕС целесообразно в случаях, если данные стандартного и специального анализов керн не дают полного представления о строении и свойствах горных пород.

3. Использование встроенных систем визуализации, обработки и анализа позволяют проводить оценку фильтрационно-емкостных свойств горных пород на незначительном или единичном количестве образцов. Разработанное программное обеспечение, предназначенное для изучения пористости и проницаемости двухмерных срезов керн на основе магнитно-резонансной томографии, позволяют использовать этот метод для создания карт и моделей порового пространства, а также позволяют моделировать течение флюида в коллекторе обработки.

4. Экспериментально доказано, что интенсивность промывки образца при экстракции увеличивается от центра к периферийной его части, и установлено, что пористость в проэкстрагированном образце неравномерна и также увеличивается от центра к крайним частям. Анализ изменения параметров пористости с помощью рентгеновской микротомографии после экстракции показал, что полученная пористость является средней по образцу и может составлять 14–16 % в центральной части и достигать до 26–30 % на периферийных его частях.

Литература

1. Михайлюк М. В., Кононов Д. А., Логинов Д. М. Визуализация порового пространства в цифровой модели керн // ИТ-СТАНДАРТ. 2017. № 12. С. 7–10.
2. Лазеев А. Н., Тимашев Э. О., Вахрушева И. А., Серкин М. Ф., Гильманов Я. И. Цифровой керн – текущее состояние и перспективы развития технологии в ПАО НК «РОСНЕФТЬ» // Нефтяное хозяйство. 2018. № 11. С. 18–22.
3. Жижимонтов И. Н. Создание технологии цифровых исследований керн на основе стохастического порово-сетевого моделирования // Бурение и нефть. 2018. № 10. С. 17.
4. Дмитриева Т. Г., Рашковский А. Ю., Артемов Н. А. Протокол испытаний № 2017-07-13 mCT0001. НАЦ РН им. В. И. Шпилемана. Отчет о НИР. М. : СМА, 2017. 38 с.
5. Кривошеков С. Н., Кочнев А. А. Определение емкостных свойств пород-коллекторов с применением рентгеновской томографии керн. Пермь, 2014. С. 120–128.
6. Максимов Е. М. Литология природных резервуаров нефти и газа. М. : ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. 432 с.
7. Смирнов Н. Н., Тюренкова В. В., Киселев А. Б., Никитин В. Ф. Фильтрационные течения в пористой среде // Северный регион: наука, образование, культура. 2015. № 2 (32). Т. 2. С. 74–86.
8. Никитин В. Ф., Стамов Л. И., Михальченко Е. В. Трехмерное математическое моделирование течения вязких жидкостей в многосвязной системе каналов и пор // Вестник кибернетики. 2016. № 2. С. 128–138.
9. Агафонова Г. В., Варламов А. И., Асташкин Д. А. Методика изучения пород нефтегазоносных комплексов (детальное макроскопическое описание керн скважин). М. : ВНИГНИ, 2015. 172 с.

10. Blunt M. J., Bijeljic B., Dong H., Gharbi O., Iglauer S. et al. Pore-scale imaging and modelling // *Advances in Water Resources*. 2013. № 51. P. 197–216.
11. Кривошеков С. Н., Кочнев А. А. Определение емкостных свойств пород-коллекторов с применением рентгеновской томографии керна. Пермь, 2014. С. 120–128.

УДК 621.315.55/.59: 537.312.6

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Е. А. Бородина, Л. Л. Семенова

Сургутский государственный университет, scholohova03@mail.ru, semenovall75@mail.ru

В данной статье рассматривается зависимость температуры от сопротивления некоторых проводниковых и полупроводниковых материалов. Описано свойство из группы теплопроводности шести различных материалов разных маркировок. По результатам измерений была выявлена зависимость сопротивления от температуры, полученные данные представлены в виде графиков. Далее по результатам испытания рассчитан температурный коэффициент сопротивления материалов с линейной зависимостью.

Ключевые слова: полупроводниковый резистор, температурный коэффициент, пленка резисторов, медный провод, кремниевый диод, температурный коэффициент сопротивления.

DEPENDENCE OF TEMPERATURE ON RESISTANCE OF VARIOUS MATERIALS AND DETERMINATION OF THEIR TEMPERATURE COEFFICIENT

E. A. Borodina, L. L. Semenova

Surgut State University, scholohova03@mail.ru, semenovall75@mail.ru

The article considers the dependence of temperature on resistance of some conductor and semiconductor materials. Property from a group of heat conductivity of six various materials of different markings is described. According to the results of measurements dependence of resistance on temperature is received. The obtained data are presented in the form of graphics charts. In the following, based on test results the temperature coefficient of resistance of materials with linear dependence is calculated.

Keywords: semiconductor resistor, temperature coefficient, metal and carbon film of resistors, copper wire, silicon diode, temperature coefficient of resistance.

Проводниковые материалы отличаются от полупроводников и диэлектриков тем, что проводники обладают свободными носителями электрического заряда, вследствие чего возникает высокая электропроводность. В статье описано влияние температуры на сопротивление некоторых материалов, а именно: полупроводникового резистора с положительным температурным коэффициентом (PTC) маркировки «600.13-1; PTC», металлической пленки резисторов типа MF маркировки «600.19-1; MF», углеродной пленки резисторов типа CF маркировки «600.19-2; C», полупроводникового резистора с отрицательным температурным коэффициентом (NTC) маркировки «600.13-3; NTC», медного провода (термопреобразователь сопротивления медный типа дЕС014-50М.В3.20/0,2; номинальное сопротивление при 0⁰–50 Ом) маркировки «600.19-4; Cu», кремниевого диода маркировки «600.19-5; Si».

Во всех представленных ниже графиках первое значение – температура, второе значение – сопротивление при данной температуре:

1. Полупроводниковый резистивный элемент с положительным температурным коэффициентом (далее – PTC) маркировки «600.13-1; PTC».

Резистивный элемент термистора изготавливается с помощью методов порошковой металлургии из оксидов, галогенидов, халькогенидов некоторых металлов в разном виде [1]. При повышении температуры видно, что у полупроводникового резистора с положительным температурным коэффициентом (PTC) повышается и сопротивление. Таким образом, этот проводник обладает линейной возрастающей зависимостью сопротивления от температуры (рис. 1).

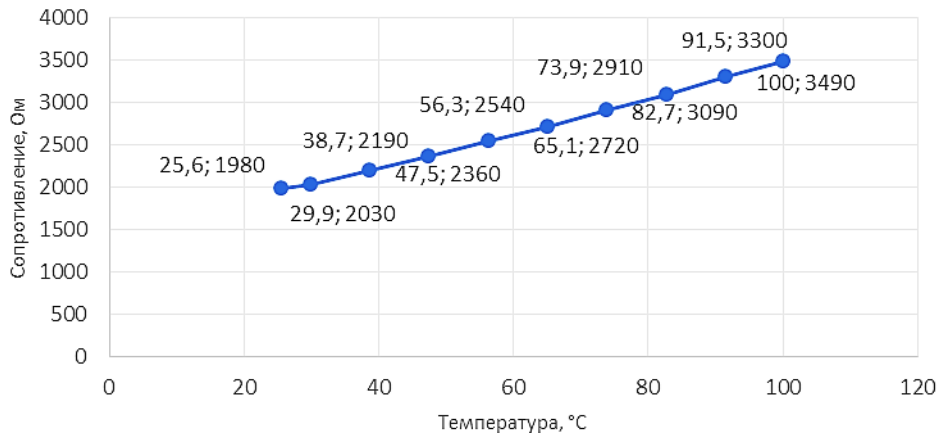


Рис. 1. График зависимости сопротивления от температуры

Произведем расчет температурного коэффициента сопротивления данного резистора по формуле:

$$\alpha = \frac{R(t_2) - R(t_1)}{R(t_1) \times t_2 - R(t_2) \times t_1} \quad (1)$$

где $R(t_2)$, $R(t_1)$ – сопротивление образца, соответственно, при температуре t_2 , t_1 .

Для расчета возьмем сопротивление при температуре 91,5 °C и 47,5 °C.

$$\alpha = \frac{3300 - 2360}{2360 \times 91,5 - 3300 \times 47,5} = 0,016$$

2. Углеродная пленка резисторов маркировки «600.13-1; РТС».

Углеродно-пленочные резисторы производят методом нанесения пленки чистого углерода на керамический цилиндр и дальнейшего удаления углерода, для того чтобы сформировать спираль. Далее на пленку наносится кремний. Толщина и ширина слоя оставшегося углерода контролируют сопротивление. Из-за наличия чистого углерода температурный коэффициент становится меньше [2]. При повышении температуры у углеродной пленки резисторов сопротивление убывает. Таким образом, этот проводник обладает линейной убывающей зависимостью сопротивления от температуры (рис. 2).

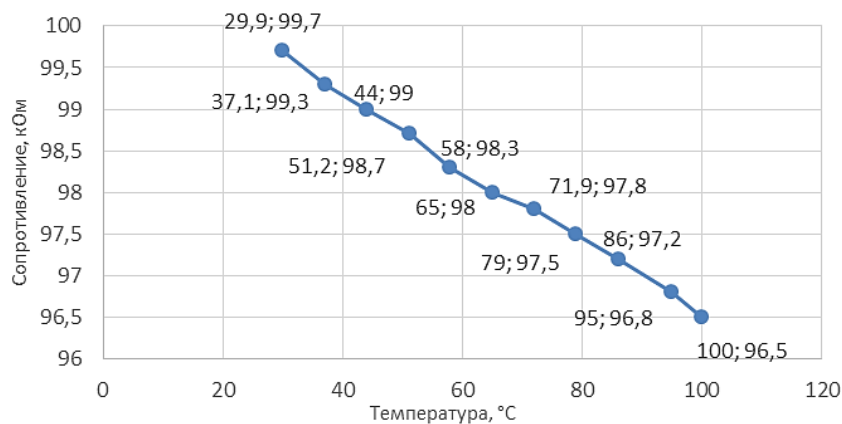


Рис. 2. График зависимости сопротивления от температуры

По формуле (1) рассчитываем температурный коэффициент, возьмем сопротивление при температуре 44 °C и 100 °C.

$$\alpha = \frac{96,5 - 99}{99 \times 100 - 96,5 \times 44} = -0,00044$$

3. Медные термопреобразователи сопротивления (термопреобразователь сопротивления медный типа дЕС014-50М.В3.20/0,2; номинальное сопротивление при 0°–50 Ом) маркировки «600.19-4; Си» [1]. Медные термопреобразователи сопротивления применяются для продолжительного измерения температур в диапазоне от -200 до 200 °С. При повышении температуры у медного провода сопротивление повышается незначительно. Таким образом, этот проводник обладает линейной зависимостью (рис. 3).

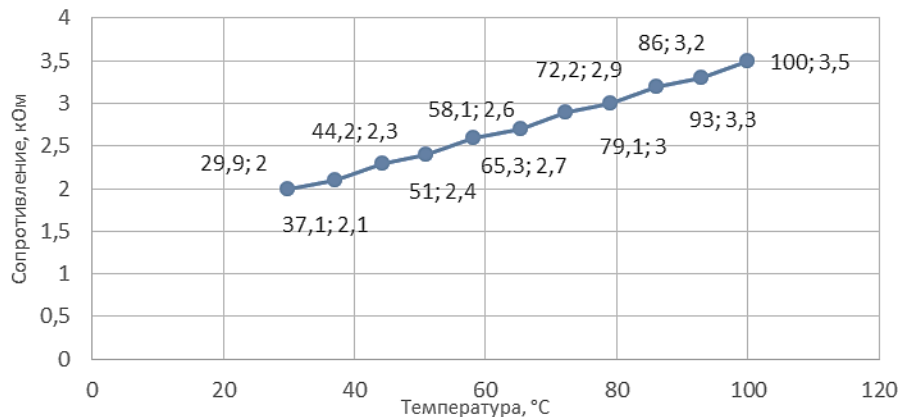


Рис. 3. График зависимости сопротивления от температуры

4. Металлическая пленка резисторов (MF) маркировки «600.19-1; MF».

Для изготовления металлопленочных резисторов применяют тугоплавкие металлы, такие как: тантал, титан, никель, хром, палладий, рений, вольфрам и сплавы на их основе [2]. У металлической пленки резисторов типа MF зависимость сопротивления от температуры можно описать следующим образом: в диапазоне температур от 25,6–55,2 °С сопротивление не изменяется, в диапазоне температур от 55,2 до 70 °С сопротивление уменьшается, в диапазоне температур от 70 до 84,8 °С сопротивление не изменяется, в диапазоне температур от 84,8–100 °С сопротивление не изменяется (рис. 4).

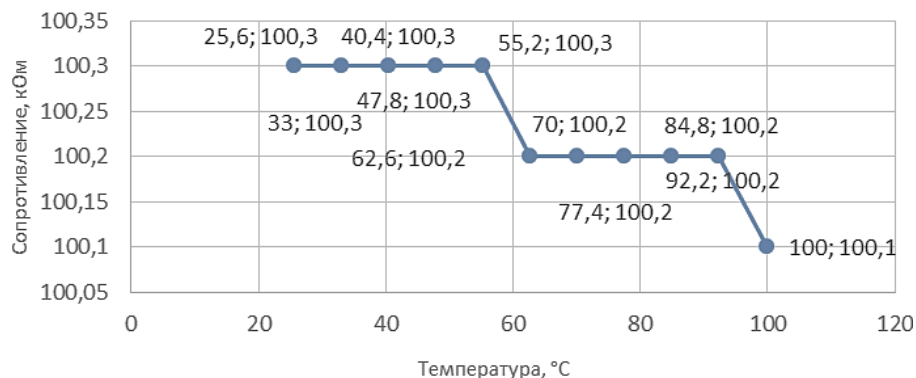


Рис. 4. График зависимости сопротивления от температуры

5. Полупроводниковый резистивный элемент с отрицательным температурным коэффициентом (NTC) маркировки «600.13-3; NTC».

Данные терморезисторы состоят из поликристаллической смеси различных спеченных оксидов [3]. Процесс спекания осуществляется при температуре 1000...1400 °С. Затем изготавливают контакты путем вжигания серебряной пасты. Для обеспечения высокой ста-

бильности сопротивления, прежде всего при длительных измерениях, терморезисторы после спекания подвергают еще искусственному старению. С помощью специальных режимов обработки достигается высокая стабильность сопротивления [1, 4]. Полупроводниковый резистор с отрицательным температурным коэффициентом (NTC) обладает гиперболической убывающей зависимостью сопротивления от температуры [5, 6] (рис. 5).

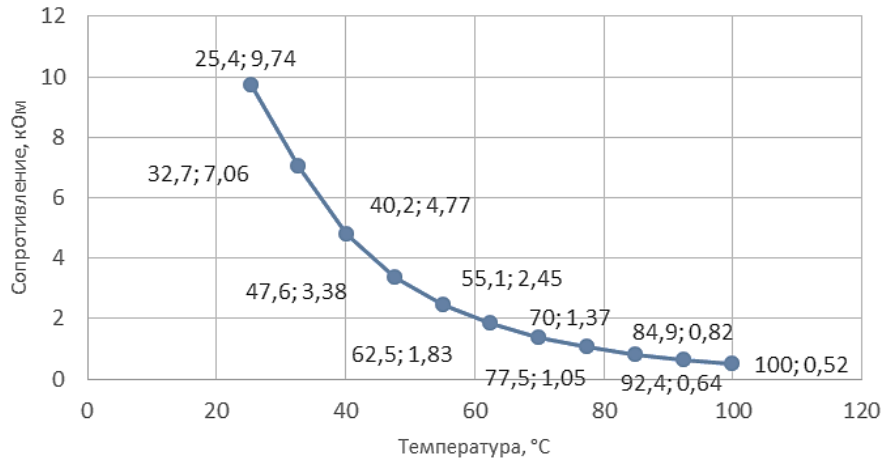


Рис. 5. График зависимости сопротивления от температуры

6. Кремниевый диод (Si) маркировки «600.19-5; Si».

Производство кремниевого диода начинается с очищения кремния [7]. На каждой стороне диода имплантируются примеси (бор на стороне анода, мышьяк или фосфор на стороне катода), а соединение, где встречаются примеси, называется «р-п-переходом». Кремниевые диоды имеют прямое смещение напряжения 0,7 В. Как только разность напряжений между анодом и катодом достигает 0,7 В, диод начнет проводить электрический ток через его р-п-переход. Когда разность напряжений падает менее 0,7 В, р-п-соединение прекратит проводить электрический ток и диод перестанет функционировать как электрический путь [4, 8]. Кремниевый диод обладает гиперболической убывающей зависимостью сопротивления от температуры (рис. 6).

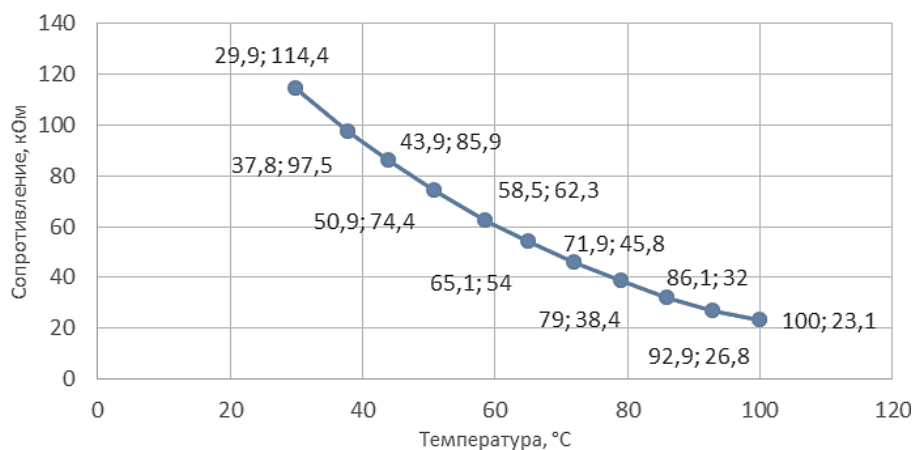


Рис. 6. График зависимости сопротивления от температуры

Исходя из всего вышеизложенного, можно сделать вывод, что влияние температуры на сопротивление проводниковых материалов зависит не только от того, из каких материалов изготовлен тот или иной проводник, но и от определенных свойств каждого элемента, из которого этот материал изготовлен.

Литература

1. Цифровая электроника, вычислительная техника, встраиваемые системы. URL: <http://digitrode.ru> (дата обращения: 23.10.2018).
2. Электроматериаловедение. URL: <http://emv.poznau.com> (дата обращения: 23.10.2018).
3. Давыдова И. С., Максина Е. Л. Материаловедение. М. : ИЦ РИО, 2016. 228 с.
4. ЭлектроТехИнфо: информационная торговая система. URL: <http://www.eti.su> (дата обращения: 23.10.2018).
5. Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П. Материалы и элементы электронной техники: активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники. СПб. : Лань, 2016. 384 с.
6. Новиков И. Л., Дикарева Р. П., Романова Т. С. Материаловедение. Конструкционные и электротехнические материалы. Материалы и элементы электронной техники. Новосибирск : Новосибирск. гос. технич. ун-т, 2010. 35 с.
7. Сорокин В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики. М. : Лань, 2015. 448 с.
8. Сорокин В. С. Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники. М. : Лань, 2016. 208 с.

УДК 004.4.05

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Т. Г. Бурдыко, К. И. Бушмелева

Сургутский государственный университет, tania_dubovik@mail.ru

Статья посвящена вопросам анализа программных средств, что позволяет оценить качество программных продуктов и минимальный уровень качества при неполной информации о программных системах. Оценка качества программных средств является важной задачей, так как уровень сложности программного продукта непрерывно возрастает и, следовательно, увеличивается количество ошибок, которые могут повлиять на качество программных средств.

Ключевые слова: программные средства, международный стандарт, оценка качества, информационная технология, оценка программного продукта, программное обеспечение.

INDICATORS OF SOFTWARE QUALITY

T. G. Burdyko, K. I. Bushmeleva

Surgut State University, tania_dubovik@mail.ru

The article is devoted to the issues of software analysis that allows evaluating the quality of software products and the minimum quality level with incomplete information about software systems. Assessing software quality is an important task. The level of complexity of the software product is continuously increasing, therefore increases the number of errors that may affect the quality of the software.

Keywords: software tools, international standard, quality assessment, information technology, software product evaluation, software.

Известно, что показатель качества программного обеспечения (далее – ПО) представляет собой способность программных средств (далее – ПС) в определенных условиях удовлетворять установленным или предполагаемым требованиям и потребностям. Стремительное развитие средств приводит к возникновению новых проблем, на которые необходимо обращать внимание. Разработка ПС производится для конкретных целей и задач. Однако в результате программное средство не всегда соответствует нужным требованиям и обладает определенными потребительскими свойствами. Качество любого продукта, который поступает к потребителю, является главной составляющей для развития предприятий. Поэтому важно определить показатели, оказывающие влияние на качество программных средств [1]:

- область, где применяется программное средство;
- назначение ПС;
- решаемые задачи и их тип;
- характеристики качества программного средства (состав и значения);
- величина допустимого ущерба из-за недостаточного качества ПС;
- объем программного средства;
- сложность программного средства;
- связь решаемых задач с реальным количеством времени (допустимой длительностью ожидания результатов решения задачи);
- длительность эксплуатации;
- вероятность создания новых версий программных средств;
- применение и тиражирование программного средства.

В настоящее время важной задачей является оценка качества программных средств, которые используются на предприятии. Эта проблема не обошла стороной и государственные

высшие учебные заведения (далее – вузы). Наиболее актуальной стала проблема качества ПС, которое используется для учебного процесса. Каждый вуз закупает или разрабатывает программное средство, исходя из своих потребностей в обучении специалистов и финансовых возможностей.

Согласно требованиям системы качества ISO 9000, каждый процесс нуждается в мониторинге и измерении, а также обработке результатов измерений для разработки воздействий на качество [2].

В развитых странах применяются системы, способные управлять качеством в образовательных учреждениях в соответствии со стандартом ISO 9000.

В нашей стране существует достаточное количество фирм, занимающихся разработкой программного обеспечения для системы образования. Среди них есть общепризнанные лидеры, которые осуществляют массовый выпуск программных средств по различным учебным дисциплинам. Есть учебные заведения, которые самостоятельно занимаются разработкой программного обеспечения, в том числе и программными средствами образовательного назначения. Но, несмотря на разнообразия программной продукции на современном рынке, качественных программных средств образовательного назначения недостаточно, либо не все соответствуют вышеприведенным требованиям. Это объясняется тем, что ни в нашей стране, ни за рубежом не существует целостной и достаточно эффективной системы оценки качества программных средств, в частности тех, которые используются в образовательной отрасли [3, 4].

При решении задач, таких как разработка или модернизация программных средств, возникает задача оценки качества используемого ПО. Также известно, что при оценке качества ПС используется много моделей и стандартов. Наиболее современный и известный стандарт – ISO/ IEC 25000 – представляет собой модель качества в виде набора характеристик (т. е. категорий атрибутов, с помощью которых можно провести оценку качества ПС) и отношений между ними. Набор данных характеристик представляет собой основу для классификации требований к качеству и оценки качества ПО [5]. При этом наибольшее распространение получили модели типа «факторы – критерии – метрики» [6]. Что касается оценки качества ПС в учебных заведениях, необходимо учитывать уровень знаний студентов, которые используют данные программные средства. Также следует отметить, что по скорости и легкости освоения ПС можно судить о качестве продукта, о полноте и удобстве использования функций программного продукта (далее – ПП).

Чтобы оценить качество ПП в вузе, можно провести его тестирование среди студентов для выявления следующих показателей [7–10]:

- надежность;
- корректность;
- удобство применения;
- эффективность;
- универсальность;
- сопровождаемость.

Согласно вышеуказанным показателям качества, можно определить нужные требования к качеству ПС. Для того чтобы выявить, какой программный продукт наиболее соответствует критериям, можно использовать иерархическую структуру оценки качества, которая представлена на рис. 1. Существуют рекомендации РД 50-64-84 «Методические указания по разработке государственных стандартов, устанавливающих номенклатуру показателей качества групп однородной продукции», которые можно использовать для построения структуры свойств качества продукции общих свойств, что составляют первый уровень. Значения общих свойств соответствуют значениям выделенных общих показателей качества, например, таких как эстетические свойства, свойства назначения, эргономические свойства и т. д. Для определенных свойств эти методические указания содержат рекомендации по их изменению на более простые свойства и их использованию.

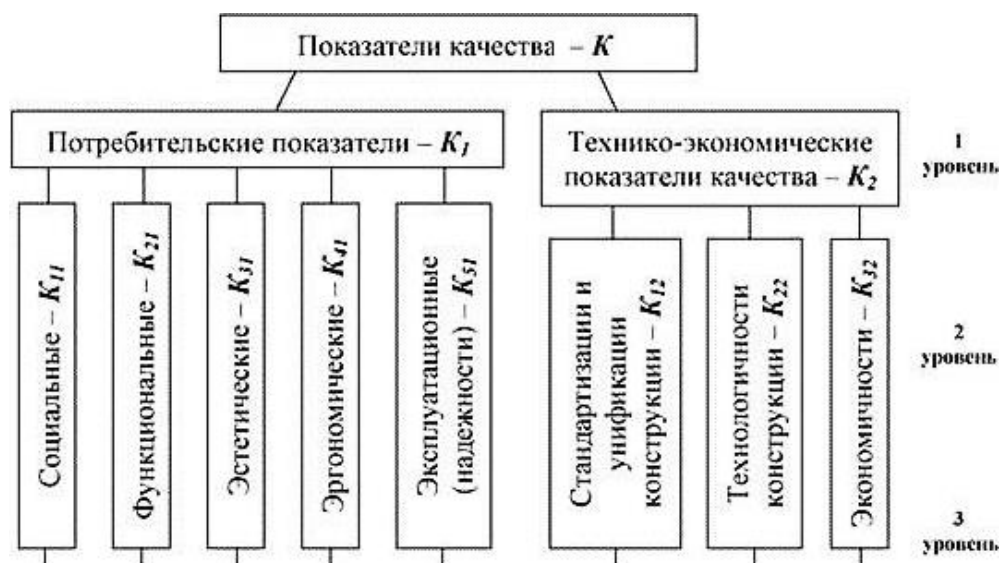


Рис. 1. Иерархическая структура оценки качества

Анализ информации, представленной на рис. 1, показывает, что к 1-му уровню относятся потребительские (K_1) и технико-экономические (K_2) показатели качества (далее – ПК) ПС.

В свою очередь, потребительский уровень состоит из пяти классов показателей качества. Они определяют общественную и индивидуальную ценность для человека-потребителя: социальную (K_{11}), функциональную (K_{21}), эстетическую (K_{31}), эргонометрическую (K_{41}), эксплуатационную (K_{51}) [11]. Однако, если ввести следующий уровень иерархии, позволяющий расширить список данных характеристик, можно добавить следующие показатели:

- полнота (все части ПС должны быть представлены, описаны, а также полностью реализованы);
- завершенность (когда программное средство обладает свойством завершенности, в том числе в нем должны присутствовать все необходимые компоненты, которые разработаны в полном объеме);
- быстродействие (затраченное время на решение задачи пользователя);
- эффективность (рациональное отношение программного средства к таким ресурсам, как процессор, память и т. д., при выполнении своих задач);
- тестируемость (когда программа выполняет проверку характеристик, поддерживает возможность измерения производительности);
- согласованность (когда в программе и в документации используются одни и те же обозначения, соглашения, форматы);
- расширяемость (возможность программного средства увеличивать, если это необходимо, объем памяти для обеспечения хранения необходимых данных расширять для отдельных модулей вычислительные функции);
- краткость (отсутствие ненужной или повторяющейся информации, дублирующиеся части кода преобразовываются в вызов общей процедуры, то же касается и технической документации);
- уровень требований технических средств (объем памяти, наличие сопроцессора и др.);
- сопровождаемость (наличие возможности изменить ПС для удовлетворения новых требований потребителя, это, в свою очередь, указывает на то, что ПС не должно быть запутано и иметь резерв для использования таких ресурсов, как процессор, память и т. д.);
- удобство в использовании (требование относится, прежде всего, к качеству пользовательского интерфейса);
- простота настройки и использования технической среды (принтер, сканер, модем, монитор и др.);

- портируемость (возможность ПС адаптироваться к другой платформе или операционной системе. Возможность перенастроиться на новые условия, такие как изменение законодательства и т. д.);
- коммуникативность (возможность ПС описывать входные данные, а также их копировать и выводить при необходимости полученную информацию);
- информативность (возможность ПС содержать информацию, понятную и необходимую для пользователя);
- возможность работать в сети;
- трудоемкость (оценка временных и материальных затрат на освоение и внедрение ПС);
- оцениваемость (когда ПС используется для конкретного применения и обеспечивает возможность оценки качества его функционирования);
- стоимость (должна удовлетворять требованиям заказчика и потребителя ПС);
- точность (результаты ПС должны иметь точную и достаточную с точки зрения основного их назначения);
- человеческий фактор (ПС выполняет свою работу, не требуя при этом дополнительных временных затрат от пользователя);
- модифицируемость (ПС должно иметь структуру, позволяющую легко вносить требуемые изменения);
- мобильность (когда ПС адаптивно к различным типам платформ и может работать на ЭВМ иного типа, отличающегося от того, для которого предназначено);
- доступность (когда ПС допускает выборочное использование отдельных компонентов);
- безопасность (когда ПС обладает и обеспечивает качество защиты данных от несанкционированного доступа);
- понятность (ПС должно быть понятным и сопровождаться качественной документацией);
- осмысленность (техническая документация к ПС не должна содержать избыточной информации).

Необходимо также отметить, что каждый из упомянутых выше показателей может иметь различные весовые коэффициенты и разделяться на более мелкие составляющие в зависимости от вида ПС.

Технико-экономические показатели (далее – ТЭП) качества ПС определяют степень технического совершенства и используемые методы проектирования. Состоят из трех классов: стандартизации K_{12} , технологичности K_{22} , экономичности K_{32} . Также основными показателями ТЭП являются: эффективность; сложность разработки; основные затраты; конкурентоспособность.

Эффективность представляет собой соотношение затрат и результатов функционирования системы. К основным показателям эффективности относятся следующие: экономический эффект, срок окупаемости вложений, коэффициент экономической эффективности вложений и др. [12].

Экономический эффект – это разность между результатами деятельности субъекта и произведенными для их получения затратами на изменения условий деятельности.

Чаще всего на практике оценивается общий экономический эффект ($\mathcal{E}_{\text{общ}}$) от производства и использования за весь срок службы нового ПП (P), который рассчитывается по формуле (1):

$$\mathcal{E}_{\text{общ}} = \left[\left(3_1 \times \frac{B_2}{B_1} \times \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} - \frac{(U_1 - U_2) - E_H \times (K_2 - K_1)}{P_2 + E_H} \right) - 3_2 \right] \times A_2, \quad (1)$$

где $3_1, 3_2$ – удельные затраты, потраченные на базовый и новый ПП;

B_1, B_2 – годовой объем работ, который может производиться с помощью базового (E_H) и нового ПП;

B_2/B_1 – коэффициент роста производительности нового ПП по отношению к базовому;

$(P_1 + E_n) / (P_2 + E_n)$ – коэффициент учета изменения сроков службы нового ПП по сравнению с базовым;

U_1, U_2 – годовые средние удельные эксплуатационные издержки пользователя при эксплуатации единицы базового и нового ПП;

K_2, K_1 – удельные средние капитальные вложения пользователя при использовании единицы базового и нового ПП в расчете на объем работ, производимых с помощью нового ПП;

$(U_1 - U_2) - E_n \times (K_2 - K_1)$ – средняя величина годовой экономии потребителя на приведенных затратах ПП;

$((U_1 - U_2) - E_n \times (K_2 - K_1)) / (P_2 + E_n)$ – средняя экономия пользователя на приведенных затратах для всего срока службы ПП по сравнению с базовым E_n ;

A_2 – объем внедрения ПП в рассматриваемый период [13].

Сложность разработки ПС в основном зависит от размера-масштаба ПС. Оно выражается числом строк на языке программирования или функциональных точек. Оценку размера-масштаба ПС можно приводить в различных единицах, что, в свою очередь, позволит изменять их численные значения для одних и тех же ПП в несколько раз [14]. Разделим на две основных группы единицы измерения размера-масштаба ПС:

- единицы измерения, которые разрабатываются и анализируются человеком. Так, например, текст программы можно представить в виде следующего кода: код, который используется повторно (пригоден для новых приложений без внесения изменений); новый код (разработан для нового приложения без включения фрагментов ранее написанного кода); наследственный код (разработан для предыдущих приложений и будет использоваться новыми ПП); модифицируемый код (разработан для предыдущих приложений и может быть использован в новом ПП после внесения изменений);

- единицы измерения, которые размещаются в используемом ПС (характеризуют работу самого компьютера, а также объем памяти, который необходим для нормального функционирования ПП);

К основным ресурсам, затрачиваемым на разработку ПС, можно отнести следующие:

- время, определяющее длительность создания ПС;
- допустимые трудозатраты – это затраты, необходимые для разработки ПС с требуемым качеством;
- число специалистов – необходимое и допустимое количество исполнителей, используемое при разработке ПС.

При разработке ПС также рассчитывается общая трудоемкость (T_0) (2):

$$T_0 = K_{сл} \times T_p, \quad (2)$$

где T_p – трудоемкость, оценивающая чел.-дн. и определяющаяся объемом разрабатываемого ПС;

$K_{сл}$ – дополнительный коэффициент сложности.

Трудоемкость определяется для каждого этапа разработки, после чего общая трудоемкость ($T_{общ}$) разработки ПС рассчитывается по формуле (3):

$$T_{общ} = \sum_{j=1}^k T_j, \quad (3)$$

где T_j – трудоемкость на стадиях технического задания, эскизного проекта, технического проекта, рабочего проекта и внедрения.

Количество исполнителей, необходимое и используемое при разработке ПС, рассчитывается по формуле (4):

$$\mathcal{C} = \frac{T_{общ}}{\Phi_{д} \times D}, \quad (4)$$

где $\mathcal{C}$ – число исполнителей;

Φ_D – фонд времени одного работающего в месяц;

D – директивный срок разработки ПС.

Конкурентоспособность ПС – это способность товаров конкурировать между собой. Это то, насколько товар соответствует одному или нескольким выбранным показателям (коммерческим, техническим, экономическим и т. п.) и обеспечивает возможность его сбыта.

При оценке конкурентоспособности учитывается коэффициент эквивалентности ($K_{ЭК}$) ПС, который рассчитывается по формуле (5):

$$K_{ЭК} = \frac{K_{ТН}}{K_{ТБ}}, \quad (5)$$

где $K_{ТН}$ и $K_{ТБ}$ – коэффициенты технического уровня развития нового и базового ПС.

Коэффициент технического уровня развития (K_T) разрабатываемого ПС, в свою очередь, рассчитывается по следующей формуле (6):

$$K_T = \sum_{j=1}^n \beta \times \frac{\Pi_i}{\Pi_{\text{э}}}, \quad (6)$$

где β – весовой коэффициент i -го технического параметра ПС;

n – число используемых параметров;

Π_i – численное значение i -го технического параметра сравниваемого ПС;

$\Pi_{\text{э}}$ – численное значение i -го технического параметра базового ПС.

В результате по формуле (7) можно рассчитать интегральный коэффициент конкурентоспособности ($K_{И}$) разрабатываемого ПС:

$$K_{И} = K_{ЭК} \times K_{ФВ} \times K_{Н} / K_{Ц}, \quad (7)$$

где $K_{ФВ}$ – коэффициент функциональных возможностей разрабатываемого ПС;

$K_{Н}$ – коэффициент соответствия нового ПС нормативным значениям;

$K_{Ц}$ – коэффициент цены потребления ПС.

Оценка таких характеристик качества, как сопровождаемость и надежность, не может быть выполнена, пока не будет получена первая версия программного средства. Еще до конца разработки программного средства метрика сложности позволяет прогнозировать, какие компоненты программного продукта будут способны к отказу, могут сложнее тестироваться и негативно реагировать на изменение настроек или конфигураций.

Метрики сложности определяют трудоемкость разработки комплекса программ. Метрики можно разделить на две группы:

- метрики сложности потока данных (к ним относятся: метрика обращения к глобальным переменным, метрика Чепина и т. д.). Метрики сложности потока данных определяют конфигурацию, использование, а также размещение данных в программе;

- метрики сложности потока управления программами (к ним относятся: метрика Маккейба, метрика подсчета точек пересечения, метрика Майерса, метрика граничных значений, метрика Джилба). С помощью этих метрик оперируют как взаимосвязями этих переходов, так и плотностью управляющих переходов внутри программ.

В заключение необходимо отметить, что оценку качества программных средств может осуществить различными способами. Оценка качества, производимая согласно стандарту ISO 9126, позволяет оценить качество программных средств, при этом можно использовать разные системы показателей качества. Также есть возможность заложить качество средств еще при разработке технического задания, проводить контроль его на всех этапах жизненного цикла, т. е. можно проводить оценку на минимальном уровне качества, не имея полной информации о ПС.

Литература

1. Качество программных средств. Основные понятия и определения. URL: <https://studfiles.net/preview/837772/page:19/> (дата обращения: 08.01.2018).
2. Ивойлов П. А. Разработка и исследование автоматизированных технических и программных средств оценки показателей в системах менеджмента качества : автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.13.18). Саранск, 2004. 5 с.
3. Черников Б. В., Поклонов Б. Е. Оценка качества программного обеспечения. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2012. 400 с.
4. ИСО 9000-3-91. Стандарты в области административного управления качеством и обеспечения качества. Ч. 3. Руководящие указания по применению ИСО 9001 при разработке, поставке и обслуживании программного обеспечения. М. : ВНИИС, 1995. 16 с.
5. ISO/IEC, ISO/IEC 25000: Software Engineering – Software Product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Guide to SQuaRE. Geneva: International Organization for Standardization, 2005. URL: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=35683 (дата обращения: 08.01.2018).
6. Бураков В. В. Модель качества программных средств // Информационно-управляющие системы. 2009. № 2. С. 75–78.
7. Бурдыко Т. Г., Бушмелева К. И. Методы оценки качества программных продуктов в Вузе // Надежность и качество : труды Междунар. симпозиума. Пенза, 2017. Т. 1. С. 21–23.
8. Бурдыко Т. Г., Бушмелева К. И. Анализ использования информационно-коммуникационных технологий в образовании // Надежность и качество : труды Междунар. симпозиума. Пенза, 2016. Т. 1. С. 220–224.
9. Бушмелева К. И., Плюснин И. И., Бушмелев П. Е., Увайсов С. У. Оценка телекоммуникационной системы контроля утечек газа с использованием системы массового обслуживания // Вестник кибернетики. 2016. № 1. С. 81–86.
10. Кривицкая М. А., Бушмелева К. И. О проблемах оценки адекватности при проектировании рабочего учебного плана направления высшего образования // Вестник кибернетики. 2017. № 4. С. 166–168.
11. Зайцев М. Ю., Абуталипова Л. Н. Иерархическая структура показателей качества изделий из полимерных материалов. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/ierarhicheskaya-strukturnaya-shema-pokazateley-kachestva-izdeliy-iz-polimernyh-materialov> (дата обращения: 08.01.2018).
12. Методы оценки технико-экономических показателей проектов программных средств. URL: <http://docplayer.ru/33018659-Metody-ocenki-tehniko-ekonomicheskikh-pokazateley-proektov-programmnyh-sredstv.html> (дата обращения: 08.01.2018).
13. Оценка экономической эффективности. URL: https://studopedia.ru/3_110717_otsenka-ekonomicheskoy-effektivnosti.html (дата обращения: 08.01.2018).
14. Кооперации и паттерны. Паттерн «Наблюдатель». Паттерн «Компоновщик». Паттерн «Команда». URL: <https://studfiles.net/preview/2790184/page:7/> (дата обращения: 08.01.2018).

УДК 53.01; 572.782

НЕСТАБИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ: ПРОБЛЕМА ОДНОРОДНОСТИ ГРУПП

В. В. Григоренко¹, С. В. Горбунов¹, Д. Ю. Хвостов¹, В. В. Касаткин²

¹*Сургутский государственный университет, grigv_84@mail.ru*

²*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН*

Нобелевский лауреат I. R. Prigogine, исследователь теории термодинамики неравновесных (нестабильных) систем, в статье «The philosophy of instability», опубликованной в 1989 году, на которую тогда не обратили внимание, поднял проблему изучения, а точнее неизученности нестабильных систем. В рамках новой теории хаоса-самоорганизации мы раскрываем статистическую нестабильность выборок, полученных как от отдельного испытуемого (в неизменном гомеостазе), так и для группы разных испытуемых. Возникает новая проблема потери однородности в группе, состоящей из нестабильных элементов. Предлагаются новые критерии оценки однородности групп, которые выходят за пределы современной детерминистской и стохастической науки. Это требует новых понятий и новых подходов в биомедицине.

Ключевые слова: нестабильные системы, гомеостаз, живые системы.

UNSTABLE SYSTEMS: THE HOMOGENEITY PROBLEM OF GROUPS

V. V. Grigorenko¹, S. V. Gorbunov¹, D. Yu. Khvostov¹, V. V. Kasatkin²

¹*Surgut State University, grigv_84@mail.ru*

²*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences*

In 1989, I. R. Prigogine was the first to draw attention to the problem of unstable systems. Nobody paid attention to the article “The philosophy of instability”, although the Nobel laureate devoted the theory of the thermodynamics of non-equilibrium systems to unstable systems. In the framework of the new theory of chaos and self-organization, we reveal the statistical instability of samples obtained both from an individual test subject (in unchanged homeostasis) and for a group of different test subjects. A new problem of loss of homogeneity in the group consisting of unstable elements surfaces. New criteria for assessing the homogeneity of groups that go beyond the limits of modern deterministic and stochastic science are proposed. Therefore, new concepts and new approaches in biomedicine are needed.

Keywords: unstable systems, homeostasis, living systems.

Введение. Прошло уже почти 30 лет с момента выхода публикации I. R. Prigogine «Philosophy of instability», где гений XX века пытался обратить внимание всех ученых на проблему изучения нестабильных систем. Напомним, что термодинамика неравновесных систем (далее – ТНС), которую построил I. R. Prigogine, посвящена именно нестабильным системам. Однако перед термодинамикой в классической физике (как общей науке о природных системах) находится статика и кинематика, которые для неравновесных систем на сегодня не построены (как теории). Кроме механики (биомеханики) и ТНС в физике существуют еще разделы: электродинамика и квантовая механика (физика излучений и частиц). Эти науки (как особые разделы биофизики) сейчас для живых систем вообще не представлены, хотя последние работы М. Б. Менского [1] посвящены именно этой тематике (Сознание и квантовая механика, 2011).

Учитывая эти проблемы в физике живых систем, попытаемся сейчас представить некоторые элементы механики (биомеханики) и элементы электродинамики вместе с аналогом квантовой механики (в виде аналога принципа неопределенности Гейзенберга). Подчеркнем, что мы сейчас пытаемся построить именно физику живых систем, которая бы имела опреде-

ленную аналогию (по конструкции) с физикой для систем неживой природы. В традиционной общей физике существуют разделы: механика, термодинамика, электродинамика и физика излучений и частиц (которая включает атомную физику и квантовую механику). Именно эти блоки (в виде элементов) мы сейчас и представим в физике живых систем [2–12]. Подчеркнем, что мы пока не претендуем на построение единой теории биофизики по аналогии с классической физикой, но мы пытаемся это сделать (в том числе на страницах настоящего сообщения).

1. Аналог механики – биомеханика

Главная особенность биомеханики была определена в 1947 г. Н. А. Бернштейном, который выдвинул гипотезу о «повторении без повторений» [13, 14]. В рамках этой гипотезы любые движения (в биомеханике) имеют исторический (ретроспективный) характер. Иными словами, мы реально определяем положение конечности (у нас пальца при регистрации треморограмм (далее – ТМГ) или теппинграмм (далее – ТПГ)), но эта регистрация (как точки в виде $x(t_k)$ или траектория движения $x(t)$) не имеет никакого информационного значения для исследователя (это имеет исторический характер). Последнее подтверждается тем, что мы, повторяя движения пальца (произвольно), не можем попасть в точку $x(t_k)$ или повторить точно траекторию $x(t)$. Декларируя это в 1947 г., сам Н. А. Бернштейн не проверял, до какой степени эта «невозможность» распространяется [11–23].

Иными словами, Н. А. Бернштейн даже не догадывался, что конечное состояние системы $x(t_k)$ и траектория $x(t)$ не только точно не повторяются, но и в рамках стохастики это точно повторить невозможно [13–14, 17–25]. Если мы получим выборки $x(t_k)$ в виде ТМГ или ТПГ или выборки траекторий движения конечности $x(t)$ в пространстве и попробуем повторить регистрацию этих процессов (например, $n = 15$ раз) у одного и того же испытуемого (в неизменном гомеостазе), то оказывается, что сделать это статистически невозможно в принципе. Это относится не только к нервно-мышечной системе (далее – НМС) [1–2, 4–9, 26–29], но и к параметрам главной функциональной системы (далее – ФСО) – сердечно-сосудистой системы (далее – ССС) [4–7, 10, 18, 25, 29–35].

Таблица 1

Матрица парного сравнения треморограмм испытуемого МОА (без нагрузки, число повторов $N = 15$), использовался критерий Вилкоксона (значимость $p < 0,05$, число совпадений $k_1 = 4$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

В табл. 1 мы представляем характерный пример регистрации 15 раз ТМГ у одного и того же испытуемого (в неизменном гомеостазе) и их (этих 15-ти выборок ТМГ) попарное сравнение. Оказалось, что из 105 разных пар сравнения таких выборок ТМГ мы можем полу-

чить только $k < 5\%$ – число пар ТМГ, которые (эти две) можно отнести к одной генеральной совокупности. Подчеркнем, что в табл. 1 это число невелико ($k_1 = 4$), но главное, что все эти 4-е пары имеют свои (разные) генеральные совокупности. Каждая пара выборок ТМГ имеет свою генеральную совокупность, и это означает, что мы не имеем дело с однородными выборками ТМГ. Все 15 полученных выборок ТМГ статистически не совпадают (в целом) [11–12, 14–19, 21–23].

Получение подряд двух одинаковых выборок ТМГ имеет вероятность $p \leq 0,01$ ($f_i(x_i) = f_{j+1}(x_i)$ с $p \leq 0,01$). Но получить уже 3 (и более) подряд одинаковые (статистически) выборки – задача практически невозможная ($p_2 \leq 10^{-5}$ и менее). Иными словами, в биомеханике мы имеем дело с неповторяемыми, невозпроизводимыми (не только точно, но и в рамках стохастики) процессами. Все непрерывно и хаотически изменяется, и это означает, что классическая механика для биомеханики уже не применима. Оперировать в описании биомеханических систем терминами «точка» или «траектория движения» бессмысленно. Нужны другие понятия и другие законы для описания статики и кинематики биосистем – гомеостатических систем [1, 7–12, 15–18, 27–28, 31–34, 36]. В этом случае мы уже используем понятие фазовой траектории и квазиаттракторов [2–8, 26–27, 30], которые в неизменном гомеостазе испытуемого статистически сохраняются [1, 9–10, 28–29, 32–32, 36].

Действительно, всегда можно для координаты $x_1 = x_1(t)$ ввести 2-ую фазовую координату $x_2 = dx_1/dt$ (скорость изменения $x_1(t)$) или 3-ю координату $x_3 = dx_2/dt$ (ускорение) и в таких двумерных (или трехмерных) фазовых пространствах состояний (далее – ФПС) построить траектории движения биомеханического объекта (у нас это палец). Очевидно, что движение пальца ограничено (при треморе или теппинге), т. е. фазовые траектории будут двигаться внутри некоторого объема ФПС. Этот ограниченный объем ФПС мы называем квазиаттрактором (далее – КА). Внутри этого КА мы наблюдаем хаотический калейдоскоп статистических функций распределения $f(x_i)$, что представлено в табл. 1 [12–13, 15–16, 17–20, 24] для гомеостатической системы (далее – ГС).

Существенно, что такие двумерные (или трехмерные для вектора $x(t) = (x_1, x_2, x_3)^T$) фазовые пространства реально представляют статику и кинематику ГС-complexity. Статика будет представлена относительной (статистической) неизменностью параметров квазиаттракторов. В этом случае в таком ФПС выборки ТМГ статистически будут существенно различаться (табл. 1), но параметры КА (их площадь и координаты центра КА) будут различаться незначительно. Подчеркнем, что эффект статистической неустойчивости выборок ТМГ для одного испытуемого (в неизменном гомеостазе), названный как эффект Еськова – Зинченко (далее – ЭЭЗ), распространяется и на группы различных испытуемых [13–14, 18–25].

Это означает, что отсутствует однородность выборок как для одного испытуемого (табл. 1), так и группы разных испытуемых, где $k_2 \leq 5\%$ для ТМГ любой группы испытуемых. В целом мы в биомеханике подошли к полному окончанию применения статистики для описания любых движений человека. Невозможно произвольно два раза подряд повторить выборки ТМГ, невозможно движения описывать не только статистическими функциями $f(x)$, но и спектральными плотностями сигнала (далее – СПС), автокорреляциями $A(t)$ и другими характеристиками $x(t)$. Поэтому мы и используем понятие КА [6–11] для описания биомеханических систем и других ФСО [9–11, 29, 31–34, 36].

Поскольку любая ФСО – это ГС, то сейчас ее динамика нами представлена как непрерывное и хаотическое движение вектора $x(t)$ в ФПС (но в пределах некоторых КА). Тогда возникает вопрос о кинематике ГС: что является движением $x(t)$ в ФПС, если обычное движение (в виде $dx/dt \neq 0$ непрерывно для ТМГ и ТПП) является статикой, если параметры КА существенно не изменяются. В основу кинематики ГС нами было положено понятие движения КА в ФПС. Если центр нового КА₂ вышел за пределы исходного КА₁, то мы говорим о существенных (эволюционных) изменениях параметров ГС. В реальности бывает так, что КА не движется в ФПС, но существенно изменяется объем (или площадь) КА [8, 11, 14, 18, 20–22, 26–27, 30, 35].

Если S -площадь КА (или его объем V) увеличился в два раза (или уменьшился в 2 раза), то это тоже нами интерпретируется как существенное изменение ГС – как кинематика ГС. Эти же критерии мы представляем и к однородности выборок x_i для ГС. Группа будет однородной, если площадь любого (одного, j -го) КА не превышает двукратно S для любого k -го КА $_k$. Иными словами, мы требуем выполнения неравенств для любых j -х КА $_j$ по отношению к любому k -му КА $_k$ в виде $2 > V_j/V_k > 0,5$. Фактически для всех V_j и V_k ($j \neq k$) мы составляем таблицу парных соотношений объемов (или площадей для двумерного ФПС), которая подобна табл. 1, но в ней уже содержатся результаты расчетов V_j/V_k .

В целом статика и кинематика ГС описывается не в виде статике ($dx/dt = 0$ или сохранение статистических функций распределения $f(x_i)$), а базируется на расчете КА, и это уже другое понимание неизменности (статике) или изменений ГС (их эволюции в ФПС). Фактически сейчас мы говорим об инверсии понятий в биомеханике: статика ГС является неизменной в классической механике, так как $dx/dt \neq 0$, но это все происходит внутри КА. Там же хаотически и непрерывно изменяются статистические функции распределения $f(x_i)$ [2–7, 9–11, 31–34].

2. Элементы электродинамики ГС

Напомним, что в физической электродинамике мы имеем понятие связанных (взаимно индуцирующих) электрического и магнитного полей (движение заряженных частиц порождает магнитные поля). Но это касается интимных механизмов полевых взаимодействий. С биосистемами ситуация иначе. Здесь уже биосистема может не изменяться (находиться в относительном покое – гомеостазе), но ее параметры (биопотенциалы мозга – электроэнцефалограммы (далее – ЭЭГ), биопотенциалы мышц – электромиограмма (далее – ЭМГ)) будут непрерывно и хаотически изменяться. Иными словами, статика ГС может порождать динамику ее состояния с позиций классической физики [5–7, 11, 22].

Если говорить слишком общо (и кратко), то все процессы (ЭМГ, в первую очередь) порождаются хаосом биоэлектрической активности мозга (ЭЭГ). Нейросети мозга (далее – НСМ) человека находятся в непрерывной и хаотической активности, для ЭЭГ $dx/dt \neq 0$ непрерывно (даже во сне). Вполне закономерно ожидать, что этот хаос ЭЭГ приводит и к хаосу в системах, которыми НСМ управляют. Хаос ЭЭГ должен порождать хаос и ЭМГ (мышцы управляются со стороны нейросетей мозга) [4–7, 27–28].

Для примера этого тезиса мы представляем хаос ЭЭГ в виде табл. 2, где дано попарное сравнение ЭЭГ одного и того же человека в неизменном состоянии (в неизменном гомеостазе), с одной и той же точки отведения ЭЭГ. Наблюдаются небольшие значения k – числа пар выборок ЭЭГ, которые (эти две) можно отнести к одной генеральной совокупности. Подчеркнем, что в данном примере $k_2 = 25$ и обычно для ЭЭГ $k_2 \leq 30$ %, т. е. доля стохастичности тоже мала, но она больше, чем мы имеем k_3 , (на периферии для ЭМГ) [2–7, 13–14, 16–22, 24]. При этом табл. 2 тоже (как и в табл. 1) демонстрирует отсутствие однородности выборок ЭЭГ, т. е. стохастика в описании НСМ бесполезна.

В табл. 3 мы представляем результаты попарного сравнения ЭМГ, которые были получены от одного испытуемого при напряжении мышцы *adductor digiti mini* (сила сжатия в кисти $F_1 = 50$ Н). Производилось 15 повторений регистрации ЭМГ при $F_1 = 50$ Н, и эти выборы попарно сравнивались в виде матрицы (табл. 3). Здесь, как и для табл. 1 и 2, мы наблюдаем потерю однородности выборок (теперь уже ЭМГ).

Таблица 2

Матрица парного сравнения выборок ЭЭГ одного и того же здорового человека (число повторов $N = 15$) в период релаксации в отведении Fz-Ref, использовался p критерий Вилкоксона (критическое $p \leq 0,05$, число совпадений $k_2 = 25$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,0	0,0	0,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,1	0,6	0,0	0,0
2	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Окончание табл. 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	0,0	0,0		0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,8	0,0	0,0
4	0,2	0,0	0,1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,0
5	0,6	0,0	0,1	0,0		0,6	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,3	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,1	0,0	0,6		0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,0	0,6	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,7	0,0	0,7	0,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,7	0,0	0,0
12	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
13	0,6	0,0	0,8	0,4	0,3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0		0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Очевидно, что $k_3 = 8 < 10 \%$, это меньше более чем в 2 раза того, что мы имеем в табл. 2 для ЭЭГ. Напомним, что для ТМГ мы имеем $k_1 \leq 5 \%$ (табл. 1). Электродинамика ЭЭГ и ЭМГ показывает большую роль стохастики при сравнении с биомеханикой. Однако в любом случае доля стохастики ничтожна. Напомним, что в статистике мы требуем более 95 % совпадения, а у нас, наоборот, 95 % выборок статистически не совпадают.

Таблица 3

Матрица парного сравнения выборок ЭМГ испытуемого ГОА ($F_1 = 50\text{Н}$, число повторов $n = 15$, правая рука), использовался критерий Вилкоксона (значимость $p < 0,05$, число совпадений $k_3 = 8$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
2	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
3	0,5	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,6	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0
14	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

В целом мы наблюдаем устойчивое (двукратное и более) усиление хаоса и падение доли стохастики при переходе от НСМ к периферии в виде ЭМГ, и это все заканчивается ключевым выражением хаоса в работе мозга и мышц – движением конечности в виде ТМГ. Каждый уровень организации снижает долю стохастики и наращивает долю хаоса. Очевидно, что это общий закон нарастания хаоса при переходе от НСМ к периферийным органам. При этом законы поведения динамики биопотенциалов имеют все-таки хаотический характер [2, 5, 19, 25, 27], доля стохастики ничтожна.

3. Принцип неопределенности и относительность движения ГС

Особое место в развитии физики живых систем имеет аналог принципа неопределенности Гейзенберга, где $\Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \geq h/(4\pi m)$, а $x_1(t)$ – реальная координата и $x_2 = dx_1/dt$ – скорость изменения $x_1(t)$. Важно подчеркнуть, что в новой теории хаоса-самоорганизации (ТХС) роль

координаты $x_i(t)$ играет не только перемещение (в биомеханике), но и любая другая (фазовая) координата $x_i(t)$, описывающая параметры гомеостаза. Для этой (любой) фазовой переменной $x_i(t)$ всегда можно найти скорость изменения $\dot{x}_i = dx_i/dt$ и ускорение $\ddot{x}_i = d^2x_i/dt^2$ [4–9, 26–29].

В этих двумерных (или трехмерных) ФПС всегда можно построить фазовые траектории движения такого вектора состояния ГС (по одной координате x_i и ее скорости $\dot{x}_i$, ускорению $\ddot{x}_i$) [1, 4–9, 26–30].

Очевидно, что это является более широкой трактовкой понятия принципа неопределенности Гейзенберга (он сейчас нами распространяется на все диагностические признаки x_i вектора состояния $x(t)$ для ГС). Важно понимать, что этот аналог принципа Гейзенберга появился из-за реальности результатов в табл. 1, 2, 3 и невозможности использования методов стохастики в биомедицине. Как только мы отказываемся от статистики, необходимо вводить понятие квазиаттрактора и новые критерии однородности групп не только в биомеханике, но и в электродинамике ГС. Аналог принципа Гейзенберга в биофизике и нейрокибернетике универсален. Он охватывает статику и кинематику ГС, является базовым, вторым типом неопределенности для ГС. Однако существует и неопределенность 1-го типа [6, 11–12, 23, 33].

Неопределенность 1-го типа проявляется, когда статистика показывает неизменность выборок, а новые методы ТХС – реальное движение КА (эволюцию ГС в ФПС). Этот тип неопределенности также весьма распространен в живой природе, и он отличен от неопределенности 2-го типа. Для раскрытия неопределенности 1-го типа мы обычно используем нейроэмуляторы в двух особых режимах работы: во-первых, это режим хаоса задания начальных параметров (у нас в НЭВМ это хаос начальных весов W_{i0} диагностических признаков x_i); во-вторых, это режим многочисленных ревербераций (повторений (итераций) и настройки нейросети в режиме бинарной классификации) [24, 28].

В этом случае мы реализуем динамику реальных НСМ, которая показана в табл. 2, где $k_2 = 25$ (а остальные пары статистически различны). Табл. 2 демонстрирует, что хаос ЭЭГ превалирует над стохастикой (значит, мы должны вводить в модели НСМ, т. е. в искусственные нейросети – НЭВМ, хаотическое задание W_{i0}). Сейчас мы это делаем искусственно, когда ЭВМ (хаотически) из интервала $W_{i0} \in (0,1)$ выбирает для каждого W_i свои особые (хаотические) значения этих весов. Далее НЭВМ в этом режиме хаоса (не менее $N = 1000$ раз) повторяет настройки НЭВМ и выдает в итоге выборки W_i , признаков x_i (после $N = 1000$ ревербераций).

Хаос и реверберации демонстрируются и в табл. 2, и в табл. 3, но это мы сейчас ввели в работу искусственной нейросети (нейроэмулятора – НЭВМ). Мы делаем работу НЭВМ похожей (подобной) на работу реальной НСМ, и это нам обеспечивает идентификацию параметров порядка (главнейших диагностических признаков x_j^*). При этом понижается размерность ФПС, так как мы в итоге остаемся с параметрами порядка x_j^* , где $j = 1, 2, \dots, n$ при $n < m$.

Таким образом, в рамках ТХС мы не просто разрешаем неопределенность 1-го типа, но мы решаем задачу системного синтеза – находим параметры порядка (x_j^*). Такое решение – это уже моделирование эвристической деятельности мозга, когда при недостатке знаний мы находим главные диагностические признаки. Все это кардинально расширяет наши возможности по созданию принципиально новой физики живых систем, показывает новые практические возможности ТХС [13–14, 16–22, 24].

Теперь мы имеем не только аналог статики и кинематики (новую биомеханику), не только аналог новой электродинамики ГС или аналог квантовой механики, но мы создаем модели эвристической деятельности мозга. Все это расширяет наши возможности изучения живых систем, феномена жизни. Этот феномен основан на хаосе статистических функций распределения $f(x)$ в ФПС.

Одновременно создаются новые модели и новые понятия, которые выходят за пределы современного функционального анализа и любых методов стохастики. Фактически мы уходим от статистики и динамического хаоса Лоренца, так как ТХС использует другие понятия и модели (в рамках ТХС).

Завершая этот краткий обзор в области создания новой науки (новой биофизики и биокибернетики) о живых системах, мы должны упомянуть, что все-таки модели в рамках функционального анализа для ГС имеются. Это компартментно-кластерная теория биосистем (далее – ККТБ) [8] и уравнения с разрывной частью (А. Ф. Филиппова и В. А. Галкина). Именно ККТБ и уравнения с разрывной частью могут показывать обычную динамику ГС (в виде табл. 1, 2, 3). Одновременно такие методы («встряхивание») нами применяются и для работы НЭВМ, нейроэмуляторов, когда мы хаотически задаем на каждой итерации некоторые значения начальных весов W_{io} ($W_{io} \in (0,1)$).

Все это имитирует внезапные (и хаотические) изменения состояния любой регуляторной системы (начиная с НСМ и заканчивая ТМГ и ТПГ). Хаос и реверберации – главная причина появления неопределенности 1-го и 2-го типов, они лежат в основе эвристической работы мозга, что пока не может делать никакая ЭВМ. Приближается новая эпоха изучения ГС, новых знаний о живых системах в виде физики живых систем, создаются и новые биофизика и биокибернетика для гомеостатических систем.

Выводы.

1. Особый хаос и непрерывная самоорганизация ГС, систем 3-го типа (по W. Weaver (1948 г.)) требуют создания особой физики живых систем, которая отлична от механики, термодинамики, электродинамики и квантовой механики в физике неживых систем.

2. Живые (гомеостатические) системы демонстрируют особую биомеханику, электродинамику и особые (два типа) неопределенности (1-го и 2-го типов). Все это требует создания другой физики живых систем, которую мы сейчас определяем как теорию хаоса-самоорганизации – ТХС. Эта ТХС базируется на понятиях квазиаттракторов, на пяти принципах организации ГС и на особых неопределенностях 1-го и 2-го типов.

3. Введение новых (особых) свойств (хаос и реверберации) в динамику поведения нейроэмуляторов и в компартментно-кластерные модели ГС позволяет не только моделировать динамику ГС, но и получать новые свойства нейроэмуляторов. В итоге мы получили модели эвристической деятельности мозга, когда НЭВМ находят параметры порядка – решают задачи системного синтеза. Отметим, что в современной математике эта задача (системный синтез) в общем виде принципиально не решается. В ТХС мы нашли ее решение на базе особых, новых режимов работы нейроэмуляторов (хаос и реверберации НЭВМ).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №18-07-00162 А «Вычислительные системы для идентификации параметров нормогенеза и патогенеза в биомеханике на примере тремора и теппинга», №18-47-860001 р_а «Разработка вычислительной системы для идентификации параметров тремора при стресс-воздействиях в психофизиологии».

Литература

1. Менский М. Б. Сознание и квантовая механика: Жизнь в параллельных мирах (Чудеса сознания – из квантовой реальности). Фрязино, 2011. 320 с.
2. Гавриленко Т. В., Горбунов Д. В., Чертищев А. А., Булатов И. Б. Оценка параметров электромиограмм с позиции термодинамики неравновесных систем И. Р. Пригожина // Вестник кибернетики. 2017. № 2 (26). С. 109–114.
3. Денисова Л. А., Прохоров С. А., Шакирова Л. С., Филатова Д. Ю. Хаос параметров сердечно-сосудистой системы школьников в условиях широтных перемещений // Вестник новых медицинских технологий. 2018. Т. 25. № 1. С. 133–142.
4. Еськов В. В. Эволюция систем третьего типа в фазовом пространстве состояний // Вестник кибернетики. 2017. № 3 (27). С. 53–58.
5. Еськов В. В. Возможности термодинамического подхода в электромиографии // Вестник кибернетики. 2017. № 4 (28). С. 109–115.
6. Еськов В. В., Пятин В. Ф., Ключ Л. Г., Миллер А. В. Гомеостатичность нейросетей мозга // Вестник новых медицинских технологий. 2018. Т. 25. № 1. С. 102–113.

7. Еськов В. В. Проблема статистической неустойчивости в биомеханике и в биофизике в целом // Вестник новых медицинских технологий. 2018. Т. 25. № 2. С. 166–175.
8. Еськов В. М., Зинченко Ю. П., Филатова О. Е. Естествознание: от стохастики к хаосу и самоорганизации // Вестник кибернетики. 2017. № 1 (25). С. 121–127.
9. Пятин В. Ф., Еськов В. В., Алиев Н. Ш., Воробьева Л. А. Хаос параметров гомеостаза функциональных систем организма человека // Вестник новых медицинских технологий. 2018. Т. 25, № 1. С. 143–153.
10. Филатова О. Е., Майстренко Е. В., Болтаев А. В., Газя Г. В. Влияние промышленных электромагнитных полей на динамику сердечно-сосудистых систем работников нефтегазового комплекса // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 7. С. 46–51.
11. Eskov V. V., Filatova O. E., Gavrilenko T. V. and Gorbunov D. V. Chaotic Dynamics of Neuromuscular System Parameters and the Problems of the Evolution of Complexity // Biophysics. 2017. Vol. 62, № 6. P. 961–966.
12. Eskov V. M., Filatova O. E., Eskov V. V. and Gavrilenko T. V. The Evolution of the Idea of Homeostasis: Determinism, Stochastics and Chaos–Self-Organization // Biophysics. 2017. Vol. 62, № 5. P. 809–820.
13. Filatova D. U., Veraksa A. N., Berestin D. K., Streltsova T. V. Stochastic and Chaotic Assessment of Human's Neuromuscular System in Conditions of Cold Exposure // Human Ecology. 2017. № 8. P. 15–20.
14. Ilyashenko L. K., Bazhenova A. E., Berestin D. K., Grigorieva S. V. Chaotic Dynamics Parameters of the Tremorgrams at the Stress Exposure // Russian Journal of Biomechanics. 2018. Vol. 22, № 1. P. 62–71.
15. Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Eskov V. M., Vochmina Yu. V. Static Instability Phenomenon in Type-Three Secretion Systems: Complexity // Technical Physics. 2017. Vol. 62, № 11. P. 1611–1616.
16. Eskov V. M., Gudkov A. B., Bazhenova A. E., Kozupitsa G. S. The Tremor Parameters of Female with Different Physical Training in the Russian North // Human Ecology. 2017. № 3. P. 38–42.
17. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina Y. V., Gorbunov D. V., Ilyashenko L. K. Shannon Entropy in the Research on Stationary Regimes and the Evolution of Complexity // Moscow University Physics Bulletin. 2017. Vol. 72, № 3. P. 309–317.
18. Eskov V. M., Zinchenko Y. P., Filatov M. A., Ilyashenko L. K. Glansdorff-Prigogine Theorem in the Description of Tremor Chaotic Dynamics in Cold Stress // Human Ecology. 2017. № 5. P. 27–32.
19. Eskov V. M., Bazhenova A. E., Vochmina U. V., Filatov M. A., Ilyashenko L. K. N. A. Bernstein Hypothesis in the Description of Chaotic Dynamics of Involuntary Movements of Person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. Vol. 21, № 1. P. 14–23.
20. Filatova O. E., Bazhenova A. E., Ilyashenko L. K., Grigorieva S. V. Estimation of the Parameters for Tremograms According to the Eskov–Zinchenko Effect // Biophysics. 2018. Vol. 63, № 2. P. 262–267.
21. Khadartsev A. A., Nesmeyanov A. A., Eskov V. M., Filatov M. A., Pab W. Fundamentals of Chaos and Self-Organization Theory in Sports // Integrative Medicine International. 2017. Vol. 4. P. 57–65.
22. Leonov B. I., Grigorenko V. V., Eskov V. M., Khadartsev A. A. and Ilyashenko L. K. Automation of the Diagnosis of Age-Related Changes in Parameters of the Cardiovascular System // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52, № 3. P. 210–214.
23. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Eskov V. V. and Eskov V. M. Experimental Study of Statistical Stability of Cardiointerval Samples // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2017. Vol. 164, № 2. P. 115–117.
24. Filatova O. E., Eskov V. V., Filatov M. A., Ilyashenko L. K. Statistical Instability Phenomenon and Evaluation of Voluntary and Involuntary Movements // Russian Journal of Biomechanics. 2017. Vol 21, № 3. P. 224–232.

25. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Ilyashenko L. K., Eskov V. V., Minenko I. A. Experimental Analysis of the Chaotic Dynamics of Muscle Biopotentials under Various Static Loads // *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2018. Vol. 165, № 4. P. 415–418.
26. Еськов В. В., Еськов В. М., Вохмина Ю. В. Гипотеза Н. А. Бернштейна и статистическая неустойчивость выборок параметров треморограмм // *Вестник кибернетики*. 2018. № 1 (29). С. 33–38.
27. Еськов В. В., Белощенко Д. В., Баженова А. Е., Живаева Н. В. Влияние локального холодового воздействия на параметры электромиограмм у женщин // *Экология человека*. 2018. № 9. С. 42–47.
28. Еськов В. М., Вохмина Ю. В., Горбунов С. В., Шейдер А. Д. Кинематика гомеостатических систем // *Вестник кибернетики*. 2017. № 2 (26). С. 87–93.
29. Еськов В. М., Белощенко Д. В., Башкатова Ю. В., Иляшенко Л. К. Параметры кардиоинтервалов испытуемых в условиях гипотермии // *Экология человека*. 2018. № 10. С. 39–45.
30. Еськов В. В., Пятин В. Ф., Еськов В. М., Григорьева С. В. Особенности регуляции сердечно-сосудистой системы организма человека нейросетями мозга // *Вестник новых медицинских технологий*. 2018. Т. 25, № 2. С. 188–199.
31. Мирошниченко И. В., Башкатова Ю. В., Филатова Д. Ю., Ураева Я. И. Эффект Еськова-Филатовой в регуляции сердечно-сосудистой системы – переход к персонифицированной медицине // *Вестник новых медицинских технологий*. 2018. Т. 25, № 2. С. 200–208.
32. Прохоров С. В., Якунин В. Е., Белощенко Д. В., Башкатова Ю. В. Неопределенность параметров кардиоинтервалов испытуемого в условиях физической нагрузки // *Вестник новых медицинских технологий*. 2018. Т. 25, № 2. С. 176–187.
33. Филатова Д. Ю., Башкатова Ю. В., Филатов М. А., Иляшенко Л. К. Анализ параметров деятельности сердечно-сосудистой системы у школьников в условиях широтных перемещений // *Экология человека*. 2018. № 4. С. 30–35.
34. Хадарцев А. А., Еськов В. М., Филатова О. Е., Хадарцева К. А. Пять принципов функционирования сложных систем, систем третьего типа // *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание*. 2015. № 1. С. 1–2.
35. Zilov V. G., Eskov V. M., Khadartsev A. A., Eskov V. V. Experimental Confirmation of the Effect of “Repetition without Repetition” N.A. Bernstein // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2017. Vol. 1. P. 4–8.
36. Мирошниченко И. В., Прохоров С. В., Эльман К. А., Срыбник М. А. Сравнительный анализ хаотической динамики показателей сердечно-сосудистой системы пришлого детско-юношеского населения Югры // *Вестник новых медицинских технологий*. 2018. Т. 25. № 1. С. 154–160.

УДК 651.4/9:004

МОДЕЛЬ РЕВЕРСИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ДОКУМЕНТОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДОКУМЕНТАМИ DIRECTUM

Ф. Ф. Иванов, К. Г. Семенов

*Сургутский государственный университет
iff777@yandex.ru, SemenovK@mail.ru*

В данной статье рассмотрена организация хранения текстов электронных документов в системе управления документами DIRECTUM, а также модель реверсивного перемещения документов. Описано условие размещения текстов электронных документов в оперативных и архивных хранилищах. Предложен подход к рациональному распределению текстов документов между ними. Представленный подход может быть реализован с применением программного робота, что позволит не затрагивать системную функциональность платформы системы управления документами DIRECTUM.

Ключевые слова: архивы электронных документов, прогнозирование, математические модели, модели потоков документов, DIRECTUM, программный робот.

MODEL OF REVERSE MOVEMENT OF DOCUMENTS IN THE DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM DIRECTUM

F. F. Ivanov, K. G. Semenov

*Surgut State University
iff777@yandex.com, SemenovK@mail.ru*

The article considers the organization of the storage of electronic documents in the document management system DIRECTUM and the model of the reverse movement of documents as well. The condition for placing texts of electronic documents in operational and archival repositories is described. An approach to the smart distribution of the texts of documents between them is proposed. The proposed approach can be implemented using a software robot, which will not affect the system functionality of the document management system platform DIRECTUM.

Keywords: archives of electronic documents, forecasting, mathematical models, document flows models, DIRECTUM, software robot.

Каждый документ в полнотекстовой системе DIRECTUM имеет карточку и текст. В карточке хранятся значения выделенных основных реквизитов, таких как наименование, автор, приложение и прочее. Текст – это текст документа в формате приложения-редактора.

Карточки всех документов системы DIRECTUM хранятся в базе данных SQL-сервера. Тексты документов размещаются в хранилищах текстов документов – файловых хранилищах документов [1, 2]. На рис. 1 изображена схема и описание назначения хранилищ текстов документов.

Основным хранилищем текстов является оперативное файловое хранилище документов. Это хранилище всегда есть в системе DIRECTUM. В этом хранилище по умолчанию размещаются тексты всех документов.

Файловые хранилища предназначены для размещения текстов документов в файловых системах одного или нескольких компьютеров. С одной стороны, это позволяет уменьшить объем БД SQL-сервера, снизив тем самым требования к используемым аппаратным средствам, и, как следствие, уменьшить совокупную стоимость владения системой DIRECTUM, с другой – предоставляет широкие возможности в организации работы с документами:

- в файловых хранилищах можно размещать документы больших объемов, например, фото- и видеоматериалы, размер документа в таких хранилищах ограничен только размером дискового пространства;
- можно настроить автоматический перенос текстов документов в архивные хранилища и обратно согласно заданным условиям.

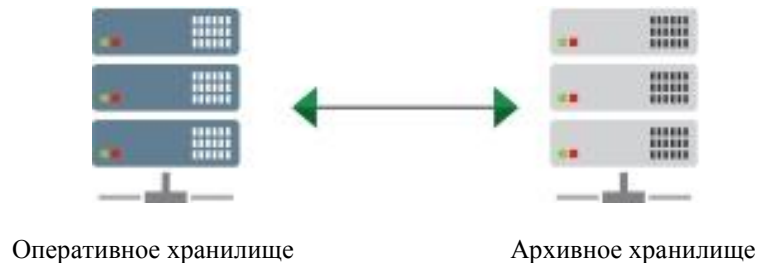


Рис. 1. Файловые хранилища СУД DIRECTUM

Тексты документов из оперативных хранилищ, в которых они размещаются сразу после создания документа, могут автоматически переноситься в архивные хранилища. Условия переноса документов задаются в справочнике «Правила архивирования». Сценарий «Агент архивирования» переносит документы в архивное хранилище.

Архивное хранилище, в которое будут перемещаться тексты документов, задается в записи справочника «Правила архивирования».

В архивных хранилищах тексты документов доступны только для просмотра. Если возникает потребность изменить документ, например, отредактировать текст или создать версию документа, то для выполнения этих действий пользователю нужно подтвердить операцию извлечения документа из архивного хранилища [1].

Основными требованиями к хранилищам документов относительно их типов (оперативное и архивное) являются следующие:

- для оперативного хранилища основным требованием является обеспечение необходимой нагрузочной способности этого хранилища при работе системы с текстами электронных документов (запись, чтение, модификация);
- для архивного хранилища основным требованием является обеспечение минимальной стоимости хранения текстов документов.

Поэтому критерием размещения текста электронного документа в архивном хранилище, в первую очередь, является низкая востребованность этого документа пользователями системы электронного документооборота и непосредственно самой системой документооборота, так как она в автоматическом режиме может производить различные операции над текстами документов.

Оценить востребованность текста электронного документа в СУД DIRECTUM возможно посредством анализа данных таблицы **SBEDocProtocol**, которая содержит протокол работы с документами. Данная таблица обновляется при любых действиях с документами. В таблице представлен набор полей, достаточный для оценки востребованности электронного документа.

Таблица

Состав полей таблицы протокола работы с документами

Поле	Описание
EDocID	ИД документа
Version	Версия документа
UserID	ИД пользователя
...	

Окончание табл.

Поле	Описание
ActionType	Действие: «7» – Разрешение передачи прав доступа «8» – Перешифрование «А» – Изменение прав доступа «В» – Изменение видимости версии «С» – Создание «D» – Удаление «Е» – Изменение «F» – Шифрование сертификатом «G» – Подписание «H» – Удаление версии
ActionDate	Дата и время действия
Detail	Детализация данных о действии
XRecID	ИД записи в таблице
...	

В качестве оценки востребованности документа принимается среднее количество обращений к одному документу за период в одну неделю. Период в одну неделю выбран из соображений необходимой частоты перемещения текста документа из оперативного хранилища в архивное.

$$K_{\text{востреб}}(T_{\text{возвр}}) = \frac{K_{\text{востреб всех}}(T_{\text{возр}})}{K_{\text{док}}} \quad (1)$$

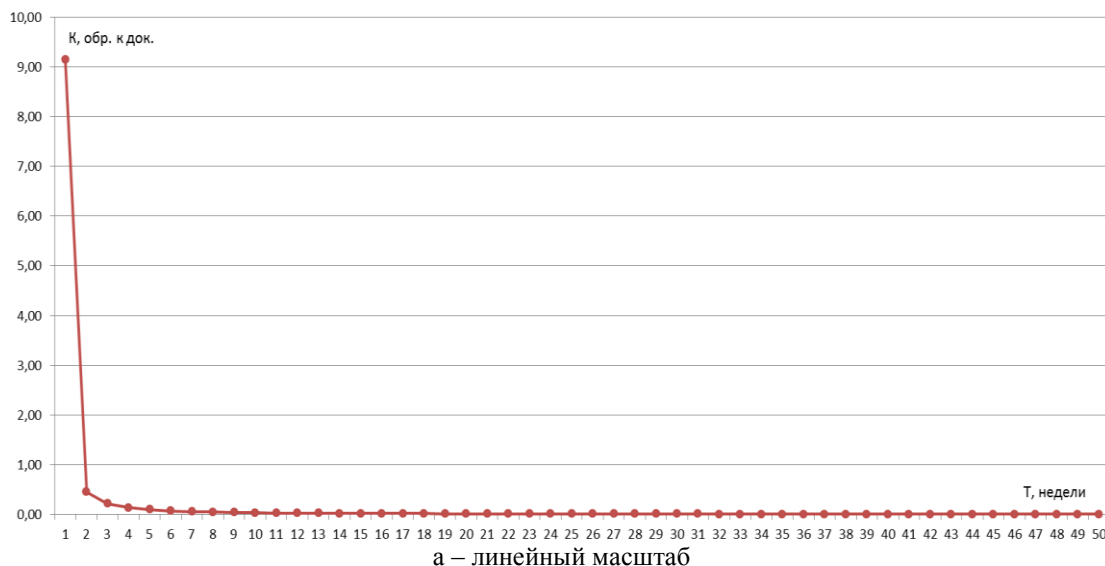
где $T_{\text{возр}}$ – время после создания документа («возраст документа»);

$K_{\text{востреб}}(T_{\text{возр}})$ – среднее количество обращений к одному документу за контрольный период (1 неделя);

$K_{\text{востреб всех}}(T_{\text{возр}})$ – среднее количество обращений ко всем документам за контрольный период (1 неделя);

$K_{\text{док}}$ – количество документов.

Критерий $K_{\text{востреб}}(T_{\text{возр}})$ зависит от времени $T_{\text{возр}}$, прошедшего с момента создания документа, и по сути является возрастом документа. С целью выявления зависимости критерия от времени существования документов проводится разведочный анализ по всем документам независимо от типа. Его результаты представляются в виде графика.



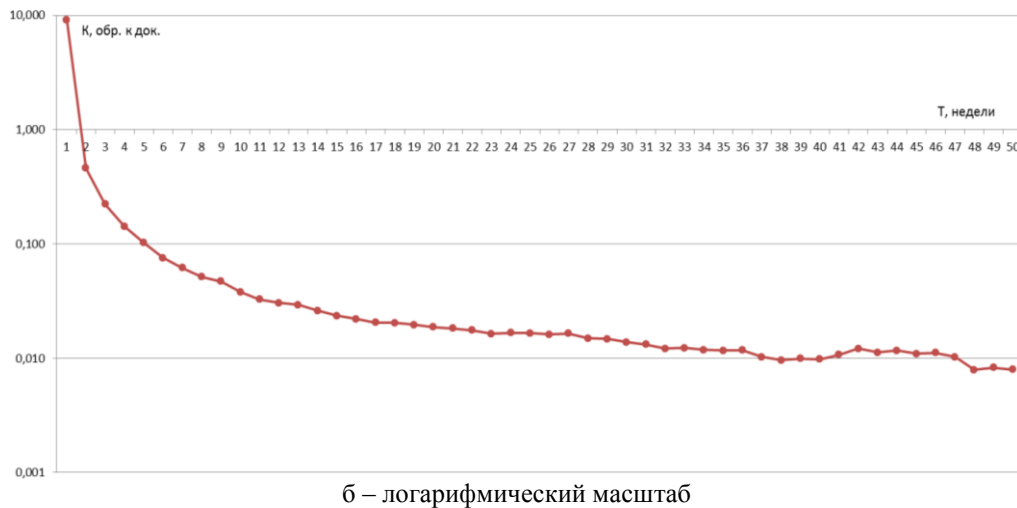


Рис. 2. Среднее количество обращений к документу в течение одной недели от «возраста документа»: а – линейный масштаб; б – логарифмический масштаб

На рис. 2 отображено среднее количество обращений к документу за одну неделю возраста документа, где видно, что кривая зависимости критерия $K_{\text{востреб}}$ от времени достаточно гладкая и монотонная.

Данная зависимость может быть хорошо отражена трендовой моделью.

Трендовая модель – это математическая модель, описывающая изменение прогнозируемого или анализируемого показателя только в зависимости от времени и имеющая вид: $y = f(t)$.

Наиболее распространенным методом прогнозирования является нахождение аналитического выражения (уравнения) тренда [3–5]. Тренд экстраполируемого процесса либо явления – это основная тенденция временного ряда, в некоторой мере свободная от случайных воздействий.

Разработка прогноза заключается в определении вида экстраполирующей функции $y = f(t)$, которая выражает зависимость изучаемой величины от времени на основе исходных наблюдаемых данных. Первым этапом является выбор оптимального вида функции, дающей наилучшее описание тренда. Наиболее часто используются следующие зависимости [3–9]:

- линейная: $y = b_0 + b_1t$; (2)

- параболическая: $y = b_0 + b_1t + b_2t^2$; (3)

- показательная функция: $y = b_0b_1^t$. (4)

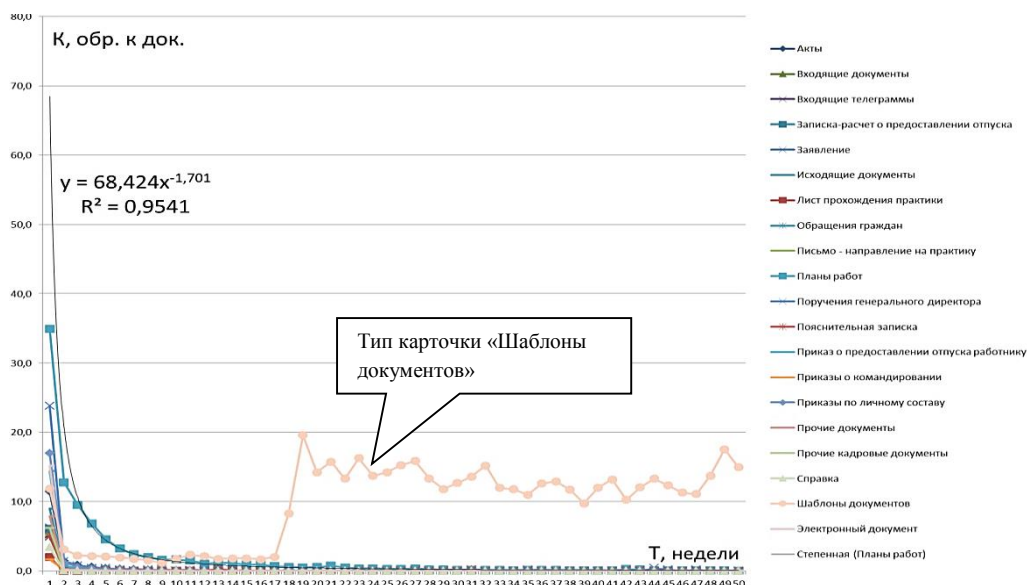


Рис. 3. Среднее количество обращений к документу в течение одной недели от «возраста документа» в разрезе типов карточек документов

На рис. 3 показано среднее количество обращений к документу за одну неделю от возраста документа в разрезе типов документов. Видно, что некоторые кривые не отражают общую тенденцию убывания количества обращений во времени, например, документы с типом карточки «Шаблоны документов» выбиваются из общей тенденции поведения документов.

Известны причины этого. Кривая, отражающая обращения к документам с типом карточки «Шаблоны документов», имеет до 17-й недели сравнительно небольшие значения: 2–3 обращения в неделю, а далее кратно увеличивается и стабилизируется на уровне 15 обращений в неделю. Это объясняется тем, что этот тип документа используется именно по своему названию – как шаблон для создания текста нового документа, и поэтому количество обращений к нему в общем случае будет постоянным. Некоторая задержка в востребованности документа объясняется тем, что новый шаблон некоторое время «приживается» в бизнес-процессе предприятия.

Пример поведения количества обращений к электронному документу с типом карточки «Шаблоны документов» показывает, что в целом тренд критерия будет определяться «бизнес-сущностью» документа и зависеть от значения определенных реквизитов карточки документа.

Основными реквизитами карточки документа, определяющими прикладное назначение документа, являются:

- тип карточки документа;
- вид документа.

Кроме того, такими реквизитами могут являться «стадия жизненного цикла», «автор документа (его структурное подразделение)», «приложение редактор» и другие прикладные реквизиты. Влияние на поведение тренда может оказывать наличие ссылок на документ в других объектах СУД DIRECTUM. Влияние этих факторов на тренд критерия необходимо предварительно определять.

На рис. 4 показан процесс подготовки (вычисления) параметров системы для осуществления переноса в архив и возврата документов из архива. Непосредственно сам перенос документов в архивное хранилище является функцией системы управления документами DIRECTUM. Для его осуществления должны быть определены параметры архивирования.

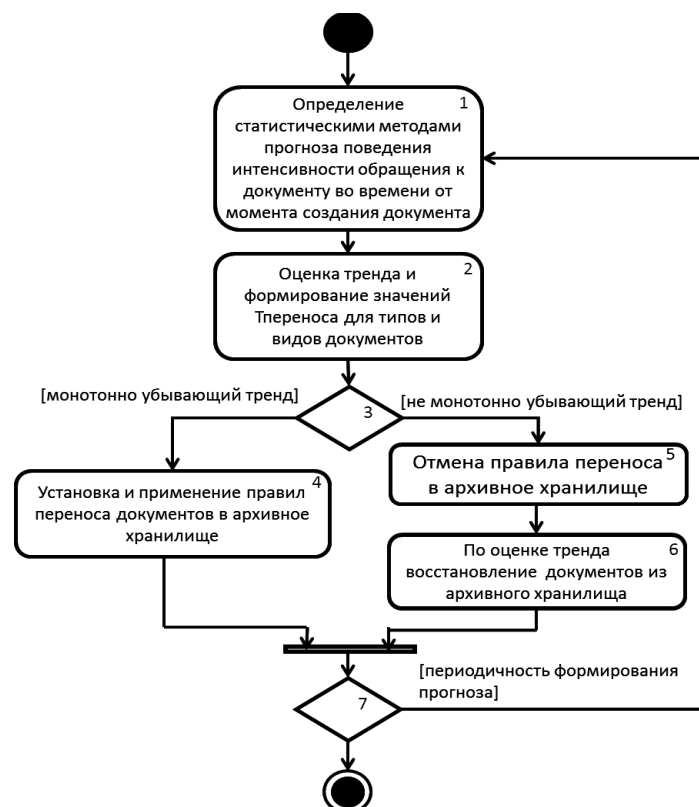


Рис. 4. Процесс-модель подготовки (вычисления) параметров системы для осуществления переноса в архив и возврата документов из архива (реверса)

Алгоритм более детально может быть описан таким образом:

- блок 1 – осуществляет процедуру аппроксимации востребованности к документу для различных видов и типов документов;
- блок 2 – по полученным аналитическим функциям определяется целесообразность осуществления архивирования документа данного вида и, (в случае целесообразности) определяется Т-переноса – параметр для определения условий переноса в архивное хранилище, то есть документы определенного типа будут перенесены в архивное хранилище, если их возраст (время прошедшее после создания) превысило этот параметр;
- блок 3 – осуществляет определение направления движения документов в суд *directum* для видов и типов электронных документов;
- блок 4 – осуществляет установку параметров автоматического архивирования определенных типов и видов документов;
- блок 5 – производит отмену правил архивирования определенных типов и видов электронных документов;
- блок 6 – осуществляет оценку тренда критерия востребованности данного типа, вида документов и осуществляет восстановление их из архивного хранилища;
- блок 7 – осуществляет периодическое повторение этих процедур с целью отслеживания актуальности примененных параметров реверсивного движения документов.

Заключение. Критерием необходимости перемещения текста электронного документа в архивное хранилище можно принять среднее количество обращений к одному документу за определенный (контрольный) период. Используя статистическую адаптивную (трендовую) модель прогнозируемого значения этого критерия от времени после создания документа (возраста документа), возможно прогнозировать снижение интенсивности обращения к электронному документу и устанавливать порог «возраста документа» (Т - переноса), после которого возможно осуществить перенос документа из оперативного хранилища в архивное хранилище, не снижая эксплуатационных характеристик системы управления документами.

Данный подход позволит обеспечить:

- 1) управляемый размер оперативного хранилища;
- 2) в целом обеспечит снижение стоимости хранения электронных документов за счет размещения мало востребованных документов в хранилище с низкой стоимостью хранения;
- 3) по оценке статистической модели в различных разрезах (по видам, типам электронных документов), возможно осуществлять возврат (реверс) документов из архивного хранилища в оперативное для обеспечения возможности интенсивной работы с документами;
- 4) данная модель реверсивного движения документов будет использована в качестве функциональности программного робота СУД *DIRECTUM*.

В дальнейшем предполагается развить математические модели и механизм вычисления параметров модели и технологию перемещения документов с оценкой экономических показателей функционирования в составе СУД *DIRECTUM*.

Литература

1. Directum – корпоративная система электронного документооборота. URL: <http://www.directum.ru/315540.aspx> (дата обращения: 12.10.2018).
2. Перспективы Workflow в России // Еженедельник «ComputerworldРоссия». 2000. № 13. URL: <https://www.osp.ru/cw/2000/13/4101/> (дата обращения: 10.10.2018).
3. Койчубеков Б. К. Биостатистика. Алматы : КГМУ, 2014. 80. 47 с.
4. Лебедева И. М., Федорова А. Ю. Макроэкономическое планирование и прогнозирование. СПб. : Ун-т ИТМО, 2016. С. 23–27.
5. Снитюк В. Е. Прогнозирование. Модели, Методы, Алгоритмы. Киев, 2008. С. 125.
6. Ахмад Б., Кучуганов В. Н. Некоторые подходы к интеллектуализации систем офисного документооборота // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. 2003. № 4 (16). С. 72–81.

7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 9-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. школа, 2003. 479 с.
8. Роберте Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экономическим задачам. М. : Наука, 1986. 496 с.
9. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики. М. : Финансы и статистика, 1982. 344 с.

УДК 535:004.93

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ФОТОННОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦИФРОВОГО ВИДЕО

Г. А. Шадрин, С. А. Кочеров
Сургутский государственный университет
g_shadrin@mail.ru

В статье рассмотрен вопрос создания автоматизированного анализатора мутных сред. Анализ среды основывается на модифицированном методе динамического рассеяния света. В работе представлена методика эксперимента, а также скриншоты из программы-обработчика данных.

Ключевые слова: спектроскопия, корреляционный анализ, обработка видеофайлов, программирование.

HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX OF PHOTON CORRELATION SPECTROSCOPY BASED ON ANALYSIS OF DIGITAL VIDEO

G. A. Shadrin, S. A. Kocherov
Surgut State University
g_shadrin@mail.ru

The article considers the creation of an automated analyzer of turbid media. The analysis of the medium is based on a modified method of dynamic light scattering. The article presents the experimental techniques, as well as screenshots from the data processor.

Keywords: spectroscopy, correlation analysis, video files processing, programming.

Введение. Фотонная корреляционная спектроскопия – это сравнительно новая и быстро развивающаяся область физики. Она соприкасается с областями знаний: физикой, биологией, химией, техникой. На всех этапах своей эволюции человечество взаимодействует с окружающей средой. Водная оболочка, воздушная оболочка и недра Земли в настоящее время подвержены усиливающемуся негативному воздействию со стороны человека. Самым глобальным и значимым является выброс в окружающую среду веществ неестественного происхождения. Ярким примером таких загрязнений являются газообразные и аэрозольные отходы промышленного производства. В результате деятельности многих предприятий возникают отходы в виде мелких твердых или жидких частиц, оказывающих потенциальную опасность для человека [1].

Данная работа актуальна в области охраны труда и безопасности жизнедеятельности человека. Возникают ситуации, когда появляется необходимость в реальном времени фиксировать процессы зарождения пылевого облака и динамику его изменения во времени в конечном пространстве. Требование своевременного и быстрого контроля уровня засоренности не позволяет применять известные методы определения размеров микрочастиц посредством отбора проб и лабораторного анализа.

Статья посвящена созданию автоматизированного экспресс-анализатора (работа которого основана на модифицированном методе динамического рассеяния света) оценки динамики запыленности атмосферы жидкими и твердыми микрочастицами, способного провести анализ в заданном месте без влияния на измеряемый объект в любой момент времени.

Методика эксперимента

Способ нахождения размеров частиц заключается в измерении и дальнейшем анализе осцилляций во времени, яркости (интенсивности) рассеиваемого излучения на микрочасти-

цах. Из-за случайного движения растворенных в другом веществе микрочастиц, вызываемого неуравновешенными колебаниями молекул вещества, яркость рассеиваемого излучения колеблется вокруг своего среднестатистического значения яркости [2].

При прохождении сфокусированного луча через такую среду будет происходить частичное рассеивание излучения на молекулах, растворенных в среде. Осцилляции яркости частично рассеиваемого излучения будут соответствовать осцилляциям локального сосредоточения растворенных в веществе микрочастиц. Информация о скорости движения диффундирующих частиц в веществе (коэффициенте диффузии частиц) связана корреляционной зависимостью с флуктуациями яркости излучения [3].

Автокорреляционная функция (или АКФ) в своем классическом представлении выглядит следующим образом:

$$G(\tau) = \langle I(0) \times I(t - \tau) \rangle = \lim_{tm \rightarrow \infty} \frac{1}{tm} \int_0^{tm} I(t) \times I(t - \tau) \partial \tau, \quad (1)$$

где яркость (или интенсивность излучения) I принимает неодинаковое значение в моментах t и $(t - \tau)$; t_m – время, в течение которого АКФ изменяет свое значение.

Можно утверждать, что в подобной среде АКФ яркости излучения рассеиваемого света снижается с течением времени по экспоненциальному закону и время перехода среды в равновесное состояние однозначно зависит от D . Функция корреляции яркости рассеиваемого излучения (для случая квадратичного детектирования) имеет вид:

$$G(\tau) = a \times \exp\left(\frac{-2 \times \tau}{t_c}\right) + b, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\tau_c} = D_t \times q^2. \quad (3)$$

Волновой вектор флуктуаций концентрации описывается выражением:

$$q = \frac{4 \times \pi \times n}{\lambda} \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (4)$$

В формулах 2–4: a и b – эмпирические числа, n – отношение фазовых скоростей света в вакууме и в веществе, в котором распределены частицы, λ – длина волны лазерного излучения и θ – угол рассеивания света [4].

В лабораторных условиях был создан стенд, на котором проводятся серии экспериментов с рассеянием лазерного излучения на частицах коллоидных растворов. Коллоидный раствор находится в прозрачной кювете, через которую проходит лазерный луч. Структурная схема стенда представлена на рис. 1.

Новизна метода заключается в том, что вместо стандартного оборудования (спектрофотометров) в качестве детектора рассеянного света и используется видеокамера. Компьютерная обработка видеофайла позволяет определить параметры рассеяния света на частицах и параметры частиц.

Помещение, в котором проводится эксперимент, должно быть без посторонних источников света (единственный источник света – это лазер), чтобы камера детектировала только рассеяние лазерного света. Съемка кюветы ведется под углом 90 градусов к оси распространения лазерного луча [5].

Состав оборудования

Все эксперименты проводятся в лаборатории оптики СурГУ на специально организованном стенде. Стенд (рис. 2) состоит из следующих частей:

- лазер – в данной работе используется гелий-неоновый лазер, который имеет рабочую длину волны 632,8 нм, расположенную в красной части видимого спектра;
- камера – цифровая камера высокого разрешения: чем выше качество съемки, тем точнее результаты измерения;
- химические вспомогательные средства – прозрачные кюветы, в которых будут находиться растворы с заранее известными характеристиками для проверки результатов работы.

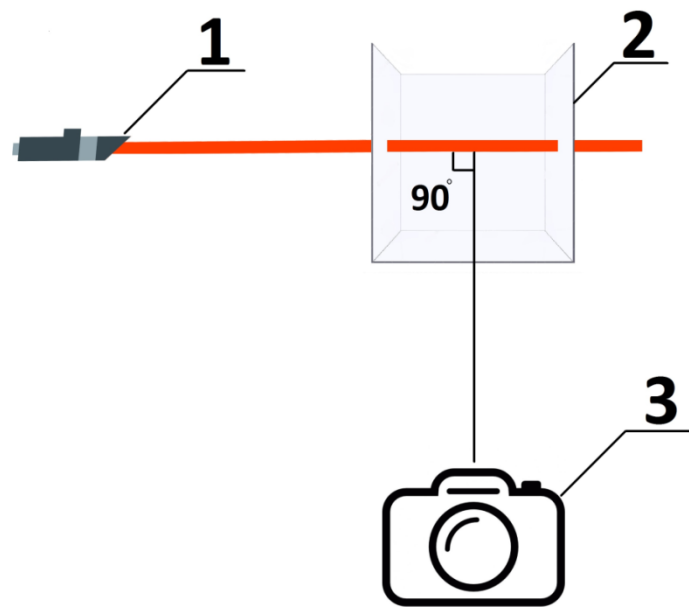


Рис. 1 Структурная схема стенда:

1– лазер; 2 – кювета с коллоидным раствором; 3 – цифровая камера

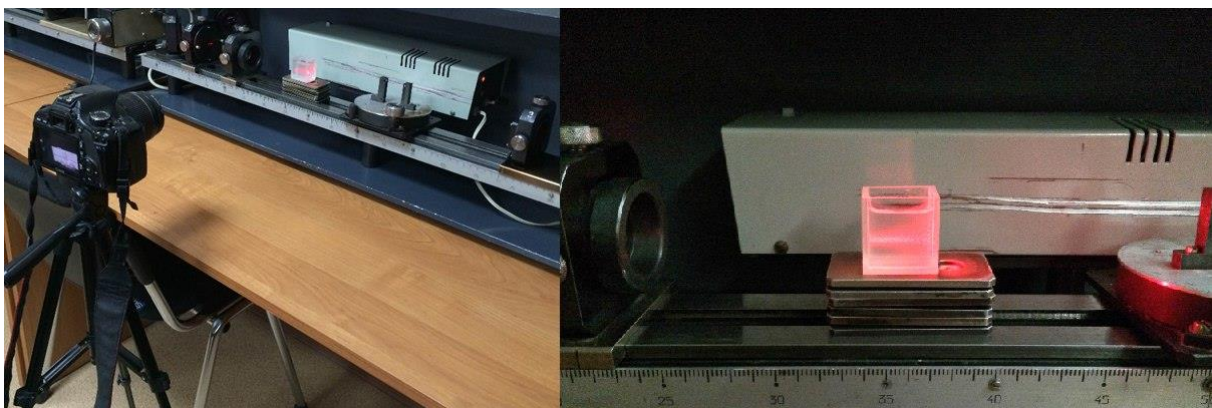


Рис. 2. Фотография стенда

Обработка экспериментальных данных

Поскольку автокорреляционная функция строится для интенсивности рассеянного света на определенной области видеофайла, необходимо извлечь эту информацию из него. Эта область представлена отдельным пикселем, содержащим частицу, на которой рассеивается свет. Для решения данной задачи была реализована программа на языке C++ с ис-

пользованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Интенсивность излучения в OpenCV представлена аддитивной цветовой моделью RGB, значение каждого из трех базовых составляющих изменяется в диапазоне от 0 до 255 [6], [7]. Интерфейс программы представлен на рис. 3.

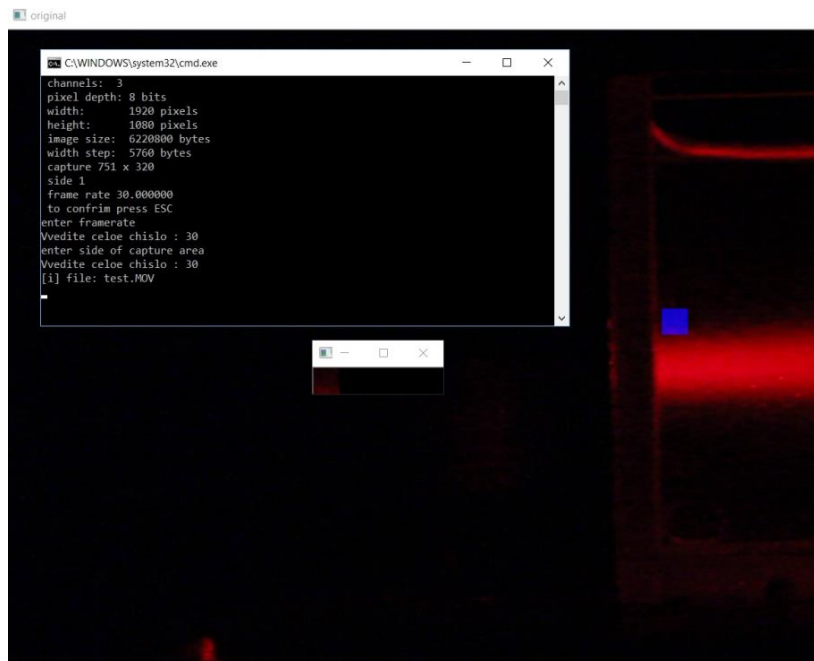


Рис. 3. Интерфейс программы для обработки видеофайла

Заключение. Реализованная программа обладает следующим функционалом:

- возможность выделения области видеофайла;
- регистрация значения интенсивности в каждый момент времени;
- архивация данных;
- расчет автокорреляционной функции;
- интерпретация и визуализация данных.

Были проведены опыты, в которых рассеяние света лазера производилось на кювете с молоком (0,05 г на 200 мг воды). Кадр исследуемого видеофайла и автокорреляционная функция представлены соответственно на рис. 4 и 5.

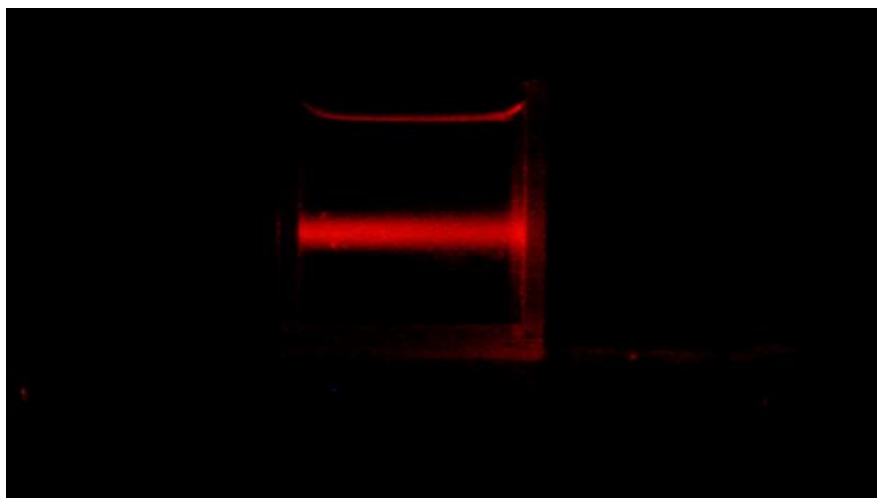


Рис. 4. Кадр из исследуемого видеофайла

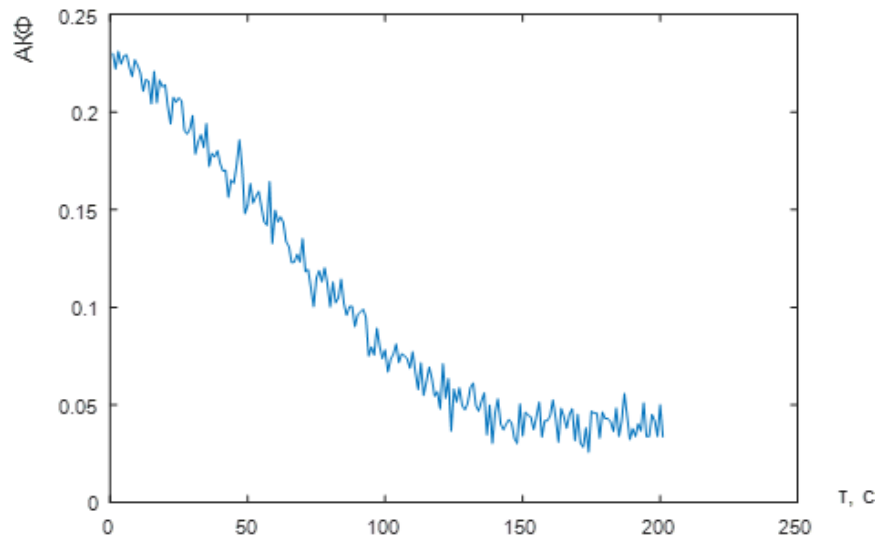


Рис. 5. Автокорреляционная функция рассеиваемого света на частицах жира, эмульсированных в воде

В ходе экспериментов был рассчитан размер частиц жира, эмульсированных в воде. Рассчитанное значение составило 0,000004797 м (или 4,8 мкм). Величина жировых шариков колеблется от 0,5 до 10 мкм [8].

Литература

1. Непомнящая Э. К., Величко Е. Н., Богомаз Т. А., Аксёнов Е. Т. Развитие методов лазерной корреляционной спектроскопии для исследования параметров технических и биологических суспензий // Лазеры. Измерения. Информация, 2014 : сб. докладов 24 Междунар. конф. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. Т. 1. С. 295–306.
2. Brown W. Dynamic Light Scattering: The Method and Some Applications. Oxford : Clarendon Press, 1993. 735 p.
3. Berne B. J., Pecora R. Dynamic Light Scattering with Applications to Chemistry, Biology and Physics. N.Y. : Willey-Interscience, 1976. 376 p.
4. Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов / под ред. Г. Камминса, Э. Р. Пайка. М. : Мир, 1978. 584 с.
5. Шадрин Г. А. Фотонная корреляционная спектроскопия с помощью цифрового видео // Вестник кибернетики. 2015. № 4. С. 68–71.
6. Конев А. А., Пальчикова И. Г. Библиотека OpenCV и ее использование в задачах цитофотометрии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 4, № 2. С. 71–76.
7. OPENCV : официальный сайт библиотеки «компьютерного зрения». URL: <http://opencv.org/> (дата обращения: 11.04.2018).
8. Молоко и молочные продукты. Методы определения жира. ГОСТ 5867-90. М. : Стандартиформ, 2009. 58 с.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОГРАММНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ МАШИН JAVA И .NET

Ф. Ф. Иванов, А. В. Никифоров

Сургутский государственный университет, iff777@yandex.ru, klgdante@gmail.com.

В статье рассматривается вопрос производительности программных интерфейсов взаимодействия виртуальных машин Java и .NET. Тема производительности программных интерфейсов взаимодействия виртуальных машин Java и .NET раскрывается посредством описания хода эксперимента по определению наиболее производительного интерфейса из существующих. По результатам эксперимента делается вывод не только о производительности программных интерфейсов взаимодействия виртуальных машин Java и .NET, но также о подходе к проверке производительности для любых программных интерфейсов взаимодействия и ее обоснованности.

Ключевые слова: производительность программных интерфейсов взаимодействия, виртуальные машины, интерфейсы взаимодействия, программные интерфейсы, Java, .NET.

PERFORMANCE OF INTERACTION PROGRAM INTERFACES OF JAVA AND .NET VIRTUAL MACHINES

F. F. Ivanov, A. V. Nikiforov

Surgut State University, iff777@yandex.ru, klgdante@gmail.com.

The article discusses the performance of the Java and .NET virtual machine interaction program interfaces. The performance subject of the interaction program interfaces (IPI) of the Java and .NET virtual machines is revealed by describing the course of an experiment in determining the most productive interface from the existing ones. According to the results of the experiment, a conclusion is drawn not only about the performance of the program interfaces of interaction between the Java and .NET virtual machines, but also about the approach and the sense of testing performance for any program interfaces of interaction.

Keywords: performance of interaction program interfaces, virtual machines, interaction interfaces, program interfaces, Java, .NET.

На сегодняшний день при разработке программного обеспечения или информационных систем уделяется большое внимание производительности конечного продукта. Чем выше производительность программных интерфейсов взаимодействия (далее – ПИВ), тем быстрее программное обеспечение или информационная система решают поставленные перед ней задачи. Вопрос производительности не обходят стороной и программные интерфейсы взаимодействия, которые являются частью любого программного обеспечения или информационной системы.

Рассмотрим тему производительности программных интерфейсов взаимодействия на примере виртуальных машин Java [1] и .NET [2]. Для виртуальных машин Java и .NET существует два вида ПИВ:

- 1) сетевой интерфейс;
- 2) потоковый интерфейс.

Все подробности о приведенных видах программных интерфейсов взаимодействия и принципах их работы описаны в предыдущей статье [3].

Чтобы определить, какой из интерфейсов обладает наибольшей производительностью, был проведен эксперимент. Для проведения эксперимента были созданы две модели, кото-

рые выполняли расчет заданного количества членов арифметической и геометрической прогрессии. В каждой из моделей был реализован один из видов ПИВ – сетевой или потоковый. В качестве родительской виртуальной машины была выбрана виртуальная машина .NET, а в качестве дочерней – виртуальная машина Java. Данный аспект не играет существенной роли в ходе проведения эксперимента, поскольку возможна и обратная ситуация. Следующим шагом в проведении эксперимента являлся запуск моделей по 1 000 раз для сбора статистических данных. Измерение времени выполнения каждой из моделей для обоих интерфейсов проводилось при помощи бенчмарка «BenchmarkDotNet» [4, 5]. После завершения данного шага были получены две выборки суммарным объемом 2 000 значений. Далее была произведена предварительная обработка полученных в результате эксперимента значений. Из всех значений в каждой выборке были выделены уникальные значения времени выполнения и подсчитаны показатели частоты их повторения в выборке. Полученный результат для каждого из видов ПИВ представлен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения случайной величины времени выполнения потокового интерфейса

x_i (ms) – миллисекунды	f_i – частота
51,3	1
51,4	1
51,5	2
51,7	2
51,8	4
52,1	5
52,2	6
52,3	7
52,4	3
52,5	9
52,6	7
52,7	11
52,8	19
52,9	24
53	43
53,1	49
53,2	42
53,3	46
53,4	34
53,5	47
53,6	46
53,7	36
53,8	43
53,9	45
54	47
54,1	31
54,2	44
54,3	37
54,4	34
54,5	25
54,6	33
54,7	26
54,8	36
54,9	24
55	19
55,1	13
55,2	18
55,3	18

Окончание табл. 1

x_i (ms) – миллисекунды	f_i – частота
55,4	19
55,5	11
55,6	5
55,7	5
55,8	4
55,9	2
56	2
56,1	6
56,2	4
56,3	2
56,6	2
77,5	1

Таблица 2

Значения случайной величины времени выполнения сетевого интерфейса

x_i (ms) – миллисекунды	f_i – частота
69,3	1
70,6	1
71,5	1
71,9	2
72	1
72,1	1
73	1
73,4	1
73,6	2
74	1
74,1	1
74,2	1
74,3	1
74,4	2
74,5	1
74,6	3
74,7	2
74,8	43
74,9	81
75	93
75,1	97
75,2	102
75,3	134
75,4	114
75,5	84
75,6	92
75,7	52
75,8	32
75,9	22
76	9
76,1	3
76,2	2
76,3	3
76,4	1
76,6	2
76,8	1
77,3	1
77,4	2
77,5	2

Окончание табл. 2

x_i (ms) – миллисекунды	f_i – частота
77,6	1
77,8	2
78,8	1
82,7	1

Примечание: x_i – значение случайной величины времени выполнения модели в ms, а f_i – частота появления x_i случайной величины времени выполнения в выборке.

Для определения производительности ПИВ использовался аппарат математической статистики. Этого будет достаточно для получения сравнительной оценки производительности ПИВ [6].

В табл. 3 представлены результаты расчетов среднего значения выборки и стандартного отклонения для обоих видов интерфейсов, а в табл. 4 содержатся интервалы, полученные по правилу 3-х сигм. Также на рис. 1 и 2 показаны графики для каждого вида интерфейсов. На каждом графике присутствуют все уникальные значения и подсчитана их частота для каждого из интерфейсов, а также отмечены интервалы, полученные по правилу 3-х сигм.

Таблица 3

Расчетные значения среднего и стандартного отклонения выборок

	Потоковый интерфейс	Сетевой интерфейс
$\bar{x}$ (ms)	53,96	75,3
σ (ms)	1,15	0,58
$ \bar{x}_n - \bar{x}_c $	21,34	
$ \sigma_n - \sigma_c $	0,56	

Примечание: $\bar{x}$ – среднее значение случайной величины времени выполнения модели, σ – стандартное отклонение случайной величины времени выполнения, а $|\bar{x}_n - \bar{x}_c|$ и $|\sigma_n - \sigma_c|$ – разность по модулю среднего значения и стандартного отклонения между обоими интерфейсами.

Таблица 4

Расчетные значения интервалов

	Потоковый интерфейс	Сетевой интерфейс
$[\bar{x} - \sigma; \bar{x} + \sigma]$	[52,81; 55,1]	[74,71; 75,88]
$[\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma]$	[51,67; 56,25]	[74,13; 76,46]
$[\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma]$	[50,52; 57,4]	[73,55; 77,05]



Рис. 1. Гистограмма частот времени выполнения задачи при потоковом интерфейсе



Рис. 2. Гистограмма частот времени выполнения задачи при сетевом интерфейсе

По графикам, представленным на рис. 1 и 2, видно распределение значений времени выполнения модели по интервалам. По табл. 5 видно, какое количество значений времени выполнения равно среднему, лежит в одном из трех интервалов или не попадает ни в один из интервалов.

Таблица 5

**Количество случайных величин времени выполнения,
равных среднему и входящих в интервалы**

	Потоковый интерфейс	Сетевой интерфейс
$[\bar{x} - \sigma ; \bar{x} + \sigma]$	824	924
$[\bar{x} - 2\sigma ; \bar{x} + 2\sigma]$	991	974
$[\bar{x} - 3\sigma ; \bar{x} + 3\sigma]$	999	981
$(-\infty ; \bar{x} - 3\sigma)$	0	9
$(\bar{x} + 3\sigma ; +\infty)$	1	10

По данным из табл. 3 и 5 можно сделать следующие выводы по производительности ПИВ виртуальных машин Java и .NET.

Из данных в табл. 5 видно, что количество вхождений значений случайной величины времени выполнения на интервале $[\bar{x} - \sigma ; \bar{x} + \sigma]$ у сетевого интерфейса выше, чем у потокового. Однако на интервалах $[\bar{x} - 2\sigma ; \bar{x} + 2\sigma]$ и $[\bar{x} - 3\sigma ; \bar{x} + 3\sigma]$ у потокового интерфейса наблюдается большее количество вхождений значений случайной величины времени выполнения, чем у сетевого. Благодаря этому потоковый интерфейс имеет только одно значение, выходящее за интервал в 3 сигме, а сетевой интерфейс имеет 19 таких значений. И это, несмотря на то, что стандартное отклонение сетевого интерфейса меньше на 0,56 ms, чем у потокового. Данные факты говорят о том, что потоковый интерфейс, в отличие от сетевого, более устойчив перед внешними воздействиями.

Такая ситуация обусловлена тем, что потоковый интерфейс работает на одном компьютере. Сетевой интерфейс же работает на двух компьютерах и требует сетевого соединения между ними. Именно сетевое соединение и второй компьютер оказывают влияние на устойчивость интерфейса перед внешними воздействиями.

Также при сравнении средних значений времени выполнения потоковый интерфейс выполняется на 21,34 ms быстрее, чем сетевой. Что и дает прирост в производительности $\approx 40\%$ при использовании потокового интерфейса в сравнении с сетевым. Однако такой прирост производительности потокового интерфейса справедлив только для моделируемой в ходе эксперимен-

та задачи по расчету членов арифметической и геометрической прогрессии. Для другого типа задач прирост производительности потокового интерфейса может уменьшиться или увеличиться в сравнении с модельной задачей. Например, прирост производительности потокового интерфейса для задачи конвертации XML в PDF составил всего $\approx 2\%$ [7, 8].

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что потоковый интерфейс обладает большей устойчивостью к внешним воздействиям, т. е. является более стабильным при работе в сравнении с сетевым. Также общее время выполнения задачи меньше при использовании потокового интерфейса, а не сетевого. Поэтому потоковый интерфейс для большинства выполняемых задач на виртуальных машинах Java и .NET является наиболее производительным программным интерфейсом взаимодействия. Однако некоторые типы задач могут быть исключением.

Поэтому, несмотря на полученные в ходе эксперимента результаты, хотелось бы отметить, что производительность любых ПИВ зависит от условий внешней среды и задач, для которых они применяются. Это относится и к программным интерфейсам взаимодействия Java и .NET. Правильным решением будет проверка производительности интерфейсов на конкретных задачах и в конкретных условиях внешней среды. Это позволит выбрать оптимальный в плане производительности программный интерфейс взаимодействия для разрабатываемого программного обеспечения или информационной системы.

Литература

1. Виртуальная машина Java. URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 10.02.2019).
2. Виртуальная машина .NET. URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 10.02.2019).
3. Программные интерфейсы взаимодействия виртуальных машин Java и .NET. URL: <http://www.surgu.ru/attachment/16982/download/Sbornik%20materialov%20НИИ%20Открытой%20региональной%20студенческой%20научной%20конференции%20im-%20G-%20I-%20Nazina%20%C2%ABNAUKA%2060-y%20PARALLELI%C2%BB,%2004%20aprelya%202018%20g-.pdf> (дата обращения: 10.02.2019).
4. Бенчмарк. URL: <https://dic.academic.ru> (дата обращения: 10.02.2019).
5. BenchmarkDotNet. URL: <https://benchmarkdotnet.org> (дата обращения: 10.02.2019).
6. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Юрайт, 2018. с. 479.
7. Интеграция виртуальных машин .NET и Java : докл. URL: <https://youtu.be>. (дата обращения: 10.02.2019).
8. Интеграция виртуальных машин .NET и Java : презентация. URL: <https://docplayer.ru/50861859-Integraciya-virtualnyh-mashin-net-i-java.html> (дата обращения: 10.02.2019).

УДК 004.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТ СБОРА ТРЕБОВАНИЙ ДО ВНЕДРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ UML-ДИАГРАММЫ

К. И. Бушмелева, Л. Р. Зарипова
Сургутский государственный университет
bkiya@yandex.ru, zlr23.07@gmail.com

В данной работе представлена модель сети Петри жизненного цикла программного обеспечения от сбора требований до внедрения посредством языка UML. Была дана характеристика бизнес-процессов жизненного цикла программного обеспечения, построены Case-модель и маркированная модель сети Петри с подробным описанием, после чего было реализовано дерево достижимости. Авторами проведен анализ сети Петри на безопасность и ограниченность, в результате которого было выявлено, что программное обеспечение является надежным.

Ключевые слова: сети Петри, программное обеспечение, UML-диаграммы, жизненный цикл.

SOFTWARE LIFE CYCLE MODELING FROM REQUIREMENTS GATHERING TO IMPLEMENTATION BASED ON THE USE OF UML DIAGRAMS

K. I. Bushmeleva, L. R. Zaripova
Surgut State University
bkiya@yandex.ru, zlr23.07@gmail.com

The paper presents a Petri net model of the software life cycle from requirements gathering to implementation via UML. The characteristic of the business processes of the software life cycle is given. The Case-model and the marked Petri net model with detailed description are constructed. Afterwards, the reachability tree is implemented. The authors analyzed the Petri net for security and limitations resulting in the reliability of software.

Keywords: Petri nets, software, UML diagrams, life cycle.

На сегодняшний день проекты по разработке программного обеспечения (далее – ПО) нуждаются в грамотном управлении требованиями, потому что с помощью четко сформулированных требований от заказчика можно получить наглядное представление о выпускаемом продукте, т. е. от полноценного сбора требований зависит качественное описание предметной области и предложенные технические решения.

Управление требованиями к ПО – это процесс, который включает идентификацию, выявление потребностей, документирование концепции, анализ требований, отслеживание ошибок, изменение требований [1].

Основными этапами выработки требований являются:

- подготовка требований – это документирование жизненного цикла (далее – ЖЦ) требований при разработке ПО;
- управление требованиями – это базовая версия управления требованиями, которая подразумевает собой набор функциональных требований, которые разработчики выполняют в определенной итерации программы.

Основная причина, по которой проваливаются проекты, связана с управлением требований от заказчика, прежде всего это неполнота требований, которая в свою очередь влияет на результат работы, на тестирование программы и, как результат, приводит к дополнительным затратам со стороны заказчика [2]. Этапы управления требованиями включают в себя:

- документирование проекта: описание концепции проекта, цели, способов решения, функциональных требований заказчика, составление технического задания;
- контроль над статусом требований;

- изменение требований по результатам тестирования ПО на стороне заказчика.

Шаблон состава требований содержит информацию о дате создания, номере версии ПО, авторе требований (аналитик), заказчике требований, техническом задании (далее – ТЗ).

Требования от заказчика собираются с помощью интервью посредством задавания вопросов по требованиям. Также необходимо детальное изучение цепочки бизнес-процессов и понимание того, в чем заключается ожидаемый заказчиком результат. Следует провести мозговой штурм с разработчиками ПО и получить информацию о возможности реализации нескольких вариантов, сроках выполнения разработки. Далее производится окончательное согласование требований с заказчиком. От данного этапа зависит рентабельность проекта в целом, и тогда можно сделать вывод, будет ли он успешным [3].

Таким образом, для решения указанной проблемы в данной работе вначале было произведено описание бизнес-процессов ЖЦ программного обеспечения от сбора требований до внедрения ПО. Далее была проанализирована надежность ЖЦ ПО с использованием дерева достижимости. Ниже приведена более детальная характеристика происходящих бизнес-процессов (табл. 1) и рассмотрена Case-модель (рис. 1) жизненного цикла программного обеспечения от сбора требований до внедрения на стороне заказчика.

Таблица 1

Характеристика бизнес-процессов ЖЦ ПО

№	Входные значения	Функция	Выходные значения
1	Требования заказчика	Анализ. Аналитик собирает данные у заказчика	Сбор требований
2	Сбор требований	Проектирование ПО. На основе полученного сбора требований аналитик формирует техническое задание	Техническое задание
3	Техническое задание	Кодирование. Аналитик передает ТЗ на разработку ПО программисту	Готовая программа
4	Готовая программа	Тестирование. Программист пишет программный код и производит первоначальную внутреннюю проверку выходных данных ПО, далее отдает ПО на тестирование тестировщику	Результат тестирования
5	Результат тестирования	Внедрение. Сотрудники отдела внедрения получают ПО для внедрения на стороне заказчика	Отчет о внедрении программы
6	Отчет внедрении программы	Тестирование на стороне заказчика. После этапа внедрения ПО у заказчика пользователи также тестируют полученную программу	Отчет о тестировании на стороне заказчика

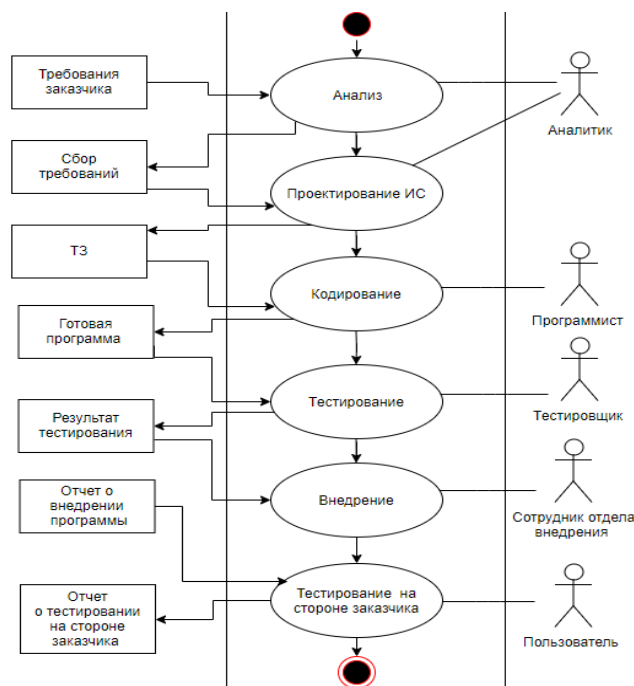


Рис. 1. Case-модель ЖЦ ПО

На следующем этапе была построена маркированная модель сети Петри ЖЦ ПО (рис. 2) и дано ее подробное описание (табл. 2) от сбора требований до внедрения на стороне заказчика. Модель включает возможные варианты перехода событий назад [4].

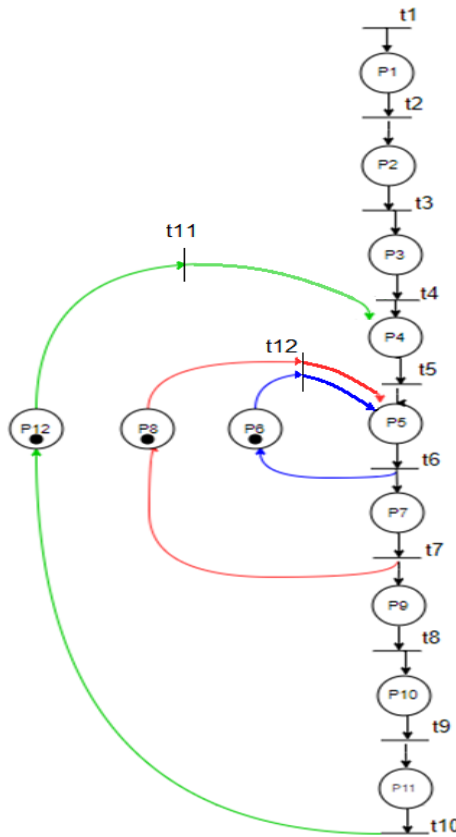


Рис. 2. Маркированная модель сети Петри ЖЦ ПО

Таблица 2

Описание маркированной модели сети Петри ЖЦ ПО

№	Предусловия переходов (T_N)	Позиция (P_{an})	Постусловия переходов (T_N)
1	Идентификация пользователя (t_1)	Пользователь распознан (логин, пароль) (P_1)	Формирование заявки (t_2)
2	Формирование заявки (t_2)	Заявка составлена и передана в службу технической поддержки (P_2)	Обработка заявки (t_3)
3	Обработка заявки (t_3)	Анализ заявки, статус «В разработку» (P_3)	Сбор требований от заказчика. Анализ предметной области (t_4)
4	Сбор требований от заказчика. Анализ предметной области (t_4)	Формирование ТЗ (P_4)	Начало разработки (t_5)
5	Начало разработки (t_5)	Состояние разработки (P_5)	Начало внутреннего тестирования (t_6)
6	Начало внутреннего тестирования (t_6)	Позиция P_6 используется для отображения состояний разработки ПО, если в P_6 имеется метка, то разработчик свободен и пришедшая заявка вызывает срабатывание перехода t_5 . Пока программа не будет корректно работать, метки в P_6 не будет, следовательно, пришедшие в позицию P_5 запросы вынуждены ожидать срабатывания перехода P_6	Доработка программы (t_{12})

Окончание табл. 2

№	Предусловия переходов (T_N)	Позиция (P_{an})	Постусловия переходов (T_N)
7	Начало внутреннего тестирования (t_6)	Состояние тестирования (P_7)	Тестирование выполнено. (t_7)
8	Тестирование выполнено (t_7)	Позиция (P_8) используется для отображения состояний фиксирования багов тестировщиком, если в P_8 имеется метка, то тестировщик свободен и пришедшая заявка вызывает срабатывание перехода t_5 . Пока баг не будет исправлен, метки P_8 не будет, следовательно, пришедшие в позицию P_5 запросы вынуждены ожидать срабатывания перехода	Доработка программы (t_{12})
9	Тестирование выполнено (t_7)	Состояние внедрения (P_9)	Внедрение выполнено (t_8)
10	Внедрение выполнено (t_8)	Передача программы заказчику (P_{10})	Начало тестирования на стороне заказчика (t_9)
11	Начало тестирования на стороне заказчика (t_9)	Пользователи тестируют программу (P_{11})	Тестирование на стороне заказчика выполнено. (t_{10})
12	Тестирование на стороне заказчика выполнено (t_{10})	Новые требования к программному продукту (P_{12})	Сбор требований от заказчика. Анализ предметной области (t_{11})
13	Сбор требований от заказчика. Анализ предметной области (t_{11})	Формирование ТЗ (P_4)	Начало разработки (t_5)
14	Исправление ошибок в разработке программы (t_{12})	Состояние разработки (P_5)	Начало внутреннего тестирования (t_6)

Далее в работе был произведен анализ маркированной модели сети Петри ЖЦ программного обеспечения от сбора требований до внедрения на стороне заказчика за счет разработанного дерева достижимости (рис. 3). Деревом достижимости называется ориентированный граф, вершинами которого являются разметки сети, а дуги взвешены переходами и связывают непосредственно достижимые маркировки [5].

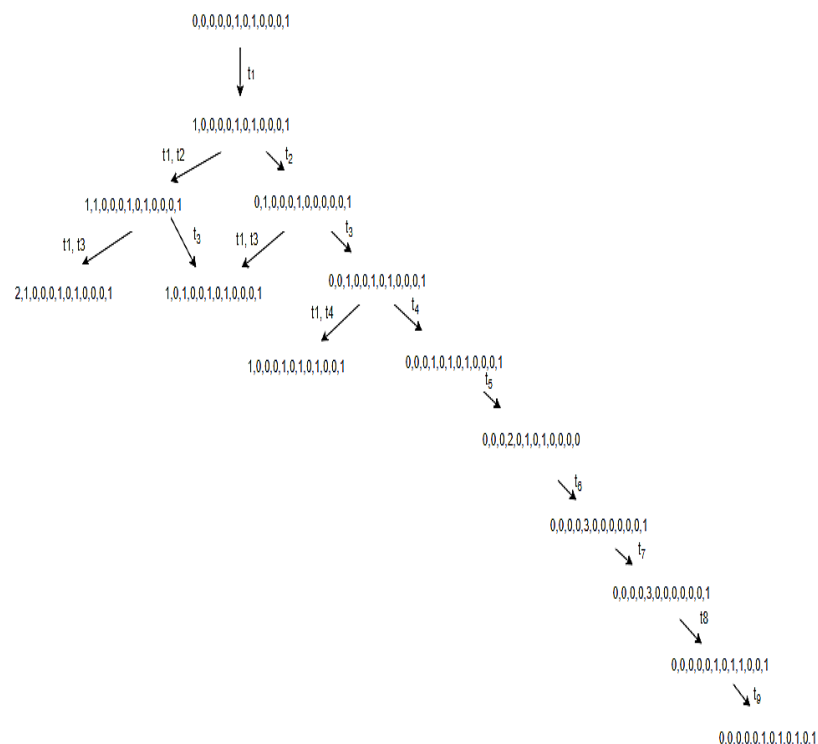


Рис. 3. Дерево достижимости

Для анализа дерева достижимости была использована прикладная теория сетей Петри. Известно, что сеть Петри – это математический аппарат, используемый для моделирования динамических дискретных систем [6].

Структура сети Петри описывается ее позициям и переходами, соединенными между собой дугами (при этом множество позиций и переходов не пересекаются), а также входной и выходной функциями [7]. Событием в данной сети называют срабатывание перехода, при котором метки из входных позиций этого перехода перемещаются в выходные позиции. События происходят мгновенно либо одновременно при выполнении некоторых условий. Сеть Петри (С) может быть представлена четверкой параметров (1):

$$C = (P, T, I, O), \quad (1)$$

где $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ – конечное множество позиций, $n \geq 0$;

$T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$ – конечное множество переходов, $m \geq 0$;

$I: T \rightarrow P$ – входная функция, представленная отображением переходов в комплекты позиций;

$O: P \rightarrow T$ – выходная функция, представленная отображением из комплектов позиций в переходы.

Состав сети Петри определяется по укрепленной входной функции I и выходной функции O (рис. 4).

$C = (P, T, I, O)$

$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}\}$

$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}\}$

$I(p_1) = \{t_1\},$	$O(p_1) = \{t_2\},$	$I(t_1) = \{ \},$	$O(t_1) = \{p_1\},$
$I(p_2) = \{t_2\},$	$O(p_2) = \{t_3\},$	$I(t_2) = \{p_1\},$	$O(t_2) = \{p_2\},$
$I(p_3) = \{t_3\},$	$O(p_3) = \{t_4\},$	$I(t_3) = \{p_2\},$	$O(t_3) = \{t_3\},$
$I(p_4) = \{t_4, t_{11}\},$	$O(p_4) = \{t_5\},$	$I(t_4) = \{p_3\},$	$O(t_4) = \{p_4\},$
$I(p_5) = \{t_5, t_{12}\},$	$O(p_5) = \{t_6\},$	$I(t_5) = \{p_4\},$	$O(t_5) = \{p_5\},$
$I(p_6) = \{t_6\},$	$O(p_6) = \{t_{12}\},$	$I(t_6) = \{p_5\},$	$O(t_6) = \{p_6\},$
$I(p_7) = \{t_6\},$	$O(p_7) = \{t_7\},$	$I(t_7) = \{p_7\},$	$O(t_7) = \{p_8, p_9\},$
$I(p_8) = \{t_7\},$	$O(p_8) = \{t_{12}\},$	$I(t_8) = \{p_9\},$	$O(t_8) = \{p_{10}\},$
$I(p_9) = \{t_7\},$	$O(p_9) = \{t_8\},$	$I(t_9) = \{p_{10}\},$	$O(t_9) = \{p_{11}\},$
$I(p_{10}) = \{t_8\},$	$O(p_{10}) = \{t_9\},$	$I(t_{10}) = \{p_{11}\},$	$O(t_{10}) = \{t_{12}\},$
$I(p_{11}) = \{t_9\},$	$O(p_{11}) = \{t_{10}\},$	$I(t_{11}) = \{p_{12}\},$	$O(t_{11}) = \{p_4\},$
$I(p_{12}) = \{t_{10}\}.$	$O(p_{12}) = \{t_{11}\}.$	$I(t_{12}) = \{p_8\}.$	$O(t_{12}) = \{p_5\}.$

Рис. 4. Структура сети Петри системы управления требованиями

Основные задачи исследования сетей Петри можно разделить на две группы: задачи анализа активности переходов и задачи анализа достижимости, при этом задача достижимости является основной и может быть представлена деревом достижимости. Дерево представляет все возможные последовательности запусков переходов. Всякий путь в дереве, начинающийся в корне, соответствует допустимой последовательности переходов. Для получения дерева достижимости, которое можно считать полезным инструментом анализа, необходимо найти средства ограничения его до конечного размера.

В данной работе анализ дерева достижимости произведен по свойствам: ограниченности и безопасности. Рассмотрим эти свойства сети Петри:

1. Безопасность – единичный риск ограниченности при $K = 1$. Это означает надежность сети Петри, когда ни при каких условиях не может появиться более одной метки в любой позиции [8, 9]. Очевидно, что безопасные сети могут быть реализованы логическими схемами с двоичными элементами памяти, представляющими отдельные позиции этой сети.

2. Ограниченность – величина меток в каждой позиции сети не может превышать некоторого значения K , т. е. не допускается превышения количества меток в данной позиции некоторого фиксированного числа [8, 9].

Подводя итог, можно отметить, что в работе была построена Case-модель жизненного цикла программного обеспечения от сбора требований до внедрения на стороне заказчика. На основе реализованной структуры данной модели была смоделирована маркированная сеть Петри, что позволило реализовать дерево достижимости. В результате получили выводы о том, что анализ безопасной и ограниченной модели ЖЦ ПО с помощью сети Петри доказывает надежность проектирования ПО.

Литература

1. Атисков А. Ю. Разработка технологии и программной системы автоматизированной трансформации диаграмм функционального проектирования в диаграммах UML. URL: <http://www.dissercat.com/content/> (дата обращения: 02.07.2018).
2. Буч Г., Максимчук Р., Энгл М., Янг Б., Коаллен Дж., Хьюстон К. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений. 3-е изд. / пер с англ. М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2010. 720 с.
3. Мараховский В. Б., Розенблюм Л. Я., Яковлев А. В. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. Курс для системных архитекторов, программистов, системных аналитиков, проектировщиков сложных систем управления. СПб. : Профессиональная литература ; АйТи-Подготовка, 2014. 400 с.
4. Воевода А. А. Разработка программного обеспечения с применением UML диаграмм и сетей Петри для систем управления локальным оборудованием : автореф. дис. ... канд. техн. наук. 2012. URL: <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-programmnogo-obespecheniya-s-primeneniem-uml-diagramm-i-setei-petri-dlya-sistem-u> (дата обращения: 20.01.2019).
5. Зарипова Л. Р., Бушмелева К. И. Модель мультиверсионной информационной системы управления изменениями программного обеспечения в информационных проектах // Вестник кибернетики. 2018. № 3 (31). С. 212–216.
6. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирования. М. : Мир, 1984. 264 с.
7. Мальков М. В., Малыгина С. Н. Сети Петри и моделирование // Сборник научных трудов 2010. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/seti-petri-i-modelirovanie> (дата обращения: 20.01.2019).
8. Марков А. В. Автоматизация проектирования анализа программного обеспечения с использованием языка UML и сетей Петри : автореф. дис. ... канд. техн. наук. 2015. 24 с. URL: https://www.nstu.ru/files/dissertations/markov_abstract_142926270737.pdf (дата обращения: 20.01.2019).
9. Пашковская Е. С. Математическое и программное обеспечение мультиверсионной информационной системы с универсальной структурой интерфейсов на основе маркированной сети Петри : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2016. 18 с.

УДК 519.673+004.9

ЗАДАЧА ПРЕСЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ, ПЕРЕДВИГАЮЩИХСЯ ПО РАЗНЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ

А. А. Дубанов

Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ
alandubanov@mail.ru

В настоящей статье предлагается описание математической модели одной из задач преследования, когда преследуемый объект движется по поверхности, заданной точечным базисом, а преследующий объект движется по другой поверхности, расположенной над исходной. Скорости объектов в нашей задаче являются постоянными по модулю величинами. «Инертность» объектов моделируется при помощи угловой скорости вращения. Моделирование процесса движения выполняется в системе компьютерной алгебры MathCAD. В данной статье приведено описание вычислительного алгоритма, по которому в системе MathCAD была разработана программа, реализующая в режиме реального времени процесс преследования и уклонения (уклонения).

Ключевые слова: задача преследования, объект преследования, преследующий объект, динамический базис, локальный базис, смена координат.

PURSUIT PROBLEM OF OBJECTS MOVING ALONG DIFFERENT SURFACES

А. А. Дубанов

Buryat State University named after D. Banzarov, Ulan-Ude
alandubanov@mail.ru

This article considers a description of the mathematical model of one of the pursuit problems when the pursued object moves along a surface defined by a point basis, and the pursuing object moves along another surface located above the original surface. The speeds of the objects in our problem are constant modulo values. The “inertness” of objects is modeled using an angular rate of rotation. The simulation of the movement process is performed in the computer system MathCAD. This article describes the computational algorithm that is used to develop a program in the MathCAD system that implements the process of pursuing and evading the problem in real time.

Keywords: pursuit problem, pursuit object, pursuing object, dynamic basis, local basis, change of coordinates.

Введение. Постановка задачи. В данной статье рассматривается задача преследования, когда преследуемый объект («Кролик») передвигается по поверхности $\vec{P}_{rabbit}(u, v)$, а преследующий объект движется по поверхности $\vec{P}_{fox}(u, v)$. В точках $\vec{R}_{rabbit}(T)$ и $\vec{R}_{fox}(T)$ поверхностей $\vec{P}_{rabbit}(u, v)$ и $\vec{P}_{fox}(u, v)$ соответственно построим динамические локальные базисы $[\vec{E}_1 \ \vec{E}_2 \ \vec{E}_3]$ и $[\vec{Q}_1 \ \vec{Q}_2 \ \vec{Q}_3]$ (рис. 1), где $\vec{E}_1 = \frac{1}{V_{rabbit}} \times \frac{d\vec{R}_{rabbit}(T)}{dT}$ и $\vec{Q}_1 = \frac{1}{V_{fox}} \times \frac{d\vec{R}_{fox}(T)}{dT}$. V_{rabbit} и V_{fox} – постоянные по модулю скорости «Кролика» и «Лисы». $\vec{E}_3$ и $\vec{Q}_3$ – единичные нормали $\vec{n}_{rabbit}$, $\vec{n}_{fox}$ в точках $\vec{R}_{rabbit}(T)$ и $\vec{R}_{fox}(T)$, и $\vec{E}_2 = \vec{E}_3 \times \vec{E}_1$, $\vec{Q}_2 = \vec{Q}_3 \times \vec{Q}_1$.

Далее будем считать, что плоскость Σ образована векторами $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$, а плоскость Π – векторами $\vec{Q}_1$ и $\vec{Q}_2$. Для выбора решения «Кроликом» нам надо спроецировать точку $\vec{R}_{fox}$ на плоскость Σ и получить ее проекцию $\vec{R}'_{fox}$ для анализа, на предмет из какой четверти плоскости Σ приближается проекция «Лисы». Точно также для принятия решения «Лисой» необхо-

можно спроецировать точку $\vec{R}_{rabbit}$ на плоскость Π , получить ее проекцию $\vec{R}'_{rabbit}$, для того чтобы проанализировать, в какой четверти плоскости Π она находится (рис. 1).

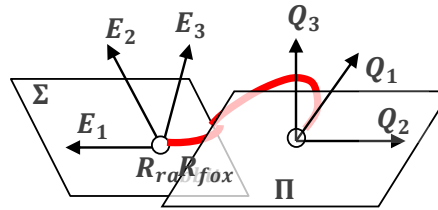


Рис. 1. Динамические базисы

Итак, целью статьи является детальная разработка алгоритма и написание программы в системе компьютерной математики MathCAD для указанной выше задачи преследования.

Моделирование поверхностей

Моделирование поверхности $\vec{P}_{rabbit}(u, v)$, по которой движется «Кролик», производится заданием точек линий горизонталей в среде AutoCAD с последующей полиномиальной регрессией в среде MathCAD при помощи встроенных функций математического пакета. На полученной после полиномиальной регрессии поверхности вводится равномерная сетка с расчетом частных производных в узлах сетки.

С моделью поверхности, по которой движется «Лиса», в нашей программе дело обстоит так. К поверхности «Кролика» $\vec{P}_{rabbit}(u, v)$ строится эквидистантная поверхность (рис. 2) $\vec{P}_{equ}(u, v) = \vec{P}_{rabbit}(u, v) + R_{equ} \times \vec{n}_{rabbit}$, где R_{equ} – расстояние, на которое эквидистантная поверхность отстоит от исходной.

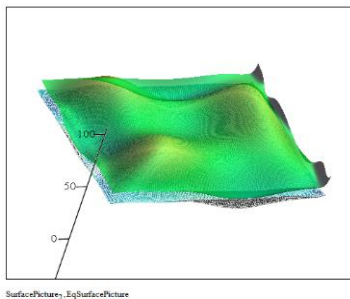


Рис. 2. Эквидистантная поверхность

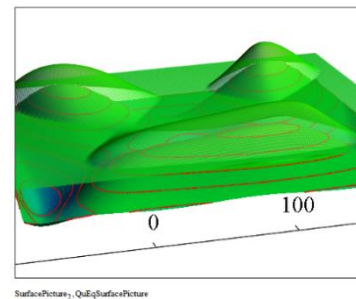


Рис. 3. «Квазиэквидистантная» поверхность

Потом вводится горизонтальная плоскость $z = r_0$, и поверхность $\vec{P}_{fox}(u, v)$ составляется следующим образом: $\vec{P}_{fox}(u, v) = \begin{cases} z, & \text{если } \vec{P}_{equ}(u, v)_z \leq r_0 \\ \vec{P}_{equ}(u, v), & \text{если } \vec{P}_{equ}(u, v)_z > r_0 \end{cases}$, где r_0 – некоторое пороговое значение высоты (рис. 3). После этого на поверхности $\vec{P}_{fox}(u, v)$ вводится равномерная сетка с расчетом частных производных в узлах. На рис. 3 поверхность $\vec{P}_{fox}(u, v)$ представлена в полупрозрачном виде, а исходная поверхность «Кролика» представлена с обозначением горизонталей.

Построение проекций в локальных базисах

Если «Кролик», двигаясь по поверхности $\vec{P}_{rabbit}(u, v)$, образует динамический базис $[\vec{E}_1 \ \vec{E}_2 \ \vec{E}_3]$, то плоскость Σ , образованная векторами $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$, является касательной плоско-

стью к поверхности $\vec{P}_{rabbit}(u, v)$ в точке $\vec{R}_{rabbit}$. Проекция точки $\vec{R}_{fox}$ на плоскость Σ будет такой: $\vec{R}'_{fox} = \vec{R}_{fox} + \frac{\vec{E}_3 \times (\vec{R}_{rabbit} - \vec{R}_{fox})}{\vec{E}_3 \times \vec{E}_3}$ (рис. 4). «Лиса», двигаясь по поверхности $\vec{P}_{fox}(u, v)$, образует динамический базис $[\vec{Q}_1 \ \vec{Q}_2 \ \vec{Q}_3]$. Проекция точки $\vec{R}_{rabbit}$ на плоскость Π , образованную векторами $\vec{Q}_1$ и $\vec{Q}_2$, будет такой: $\vec{R}'_{rabbit} = \vec{R}_{rabbit} + \frac{\vec{Q}_3 \times (\vec{R}_{fox} - \vec{R}_{rabbit})}{\vec{Q}_3 \times \vec{Q}_3}$ (рис. 5).

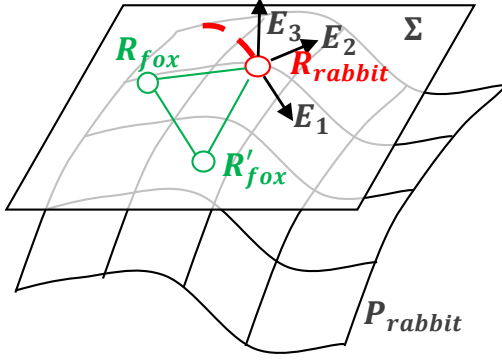


Рис. 4. Проекция «Лисы»

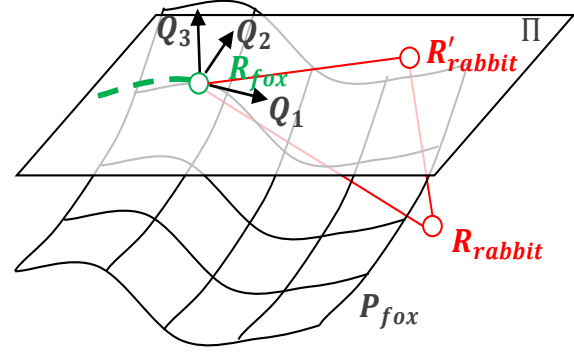


Рис. 5. Проекция «Кролика»

Тогда в базисе $[\vec{E}_1 \ \vec{E}_2 \ \vec{E}_3]$ локальной системы координат «Кролика» координаты

проекции «Лисы» $\vec{R}'_{fox}$ будут такими: $\vec{R}'_{fox}_{\Sigma} = \begin{bmatrix} (\vec{R}'_{fox} - \vec{R}_{rabbit}) \times \vec{E}_1 \\ (\vec{R}'_{fox} - \vec{R}_{rabbit}) \times \vec{E}_2 \\ (\vec{R}'_{fox} - \vec{R}_{rabbit}) \times \vec{E}_3 \end{bmatrix}$. В локальной системе

координат $[\vec{Q}_1 \ \vec{Q}_2 \ \vec{Q}_3]$ «Лисы» координаты проекции «Кролика» $\vec{R}'_{rabbit}$ будут такими:

$\vec{R}'_{rabbit}_{\Pi} = \begin{bmatrix} (\vec{R}'_{rabbit} - \vec{R}_{fox}) \times \vec{Q}_1 \\ (\vec{R}'_{rabbit} - \vec{R}_{fox}) \times \vec{Q}_2 \\ (\vec{R}'_{rabbit} - \vec{R}_{fox}) \times \vec{Q}_3 \end{bmatrix}$. Необходимо отметить, что $(\vec{R}'_{fox} - \vec{R}_{rabbit}) \times \vec{E}_3 = 0$, $(\vec{R}'_{rabbit} - \vec{R}_{fox}) \times \vec{Q}_3 = 0$.

Базис мировой системы координат $[\vec{H}_1 \ \vec{H}_2 \ \vec{H}_3]$ системе координат «Кролика»

будет выглядеть так: $\vec{H}_{\Sigma} = \begin{bmatrix} \vec{H}_{1\Sigma} \\ \vec{H}_{2\Sigma} \\ \vec{H}_{3\Sigma} \end{bmatrix}$, где $\vec{H}_{1\Sigma} = \begin{bmatrix} \vec{H}_1 \times \vec{E}_1 \\ \vec{H}_1 \times \vec{E}_2 \\ \vec{H}_1 \times \vec{E}_3 \end{bmatrix}$, $\vec{H}_{2\Sigma} = \begin{bmatrix} \vec{H}_2 \times \vec{E}_1 \\ \vec{H}_2 \times \vec{E}_2 \\ \vec{H}_2 \times \vec{E}_3 \end{bmatrix}$, $\vec{H}_{3\Sigma} = \begin{bmatrix} \vec{H}_3 \times \vec{E}_1 \\ \vec{H}_3 \times \vec{E}_2 \\ \vec{H}_3 \times \vec{E}_3 \end{bmatrix}$,

а в системе координат «Лисы» так: $\vec{H}_{\Pi} = \begin{bmatrix} \vec{H}_{1\Pi} \\ \vec{H}_{2\Pi} \\ \vec{H}_{3\Pi} \end{bmatrix}$, где $\vec{H}_{1\Pi} = \begin{bmatrix} \vec{H}_1 \times \vec{E}_1 \\ \vec{H}_1 \times \vec{E}_2 \\ \vec{H}_1 \times \vec{E}_3 \end{bmatrix}$, $\vec{H}_{2\Pi} = \begin{bmatrix} \vec{H}_2 \times \vec{E}_1 \\ \vec{H}_2 \times \vec{E}_2 \\ \vec{H}_2 \times \vec{E}_3 \end{bmatrix}$, $\vec{H}_{3\Pi} = \begin{bmatrix} \vec{H}_3 \times \vec{E}_1 \\ \vec{H}_3 \times \vec{E}_2 \\ \vec{H}_3 \times \vec{E}_3 \end{bmatrix}$,

$\vec{H}_{3\Pi} = \begin{bmatrix} \vec{H}_3 \times \vec{E}_1 \\ \vec{H}_3 \times \vec{E}_2 \\ \vec{H}_3 \times \vec{E}_3 \end{bmatrix}$.

Выбор направления движения

Нами написана программа, которая в расчетном цикле на каждом шаге делает выбор, в каком направлении двигаться «Кролику» и «Лисе». Пусть ω_{rabbit} и ω_{fox} – угловые скорости «Кролика» и «Лисы». Для примера рассмотрим выбор направления движения «Кроликом».

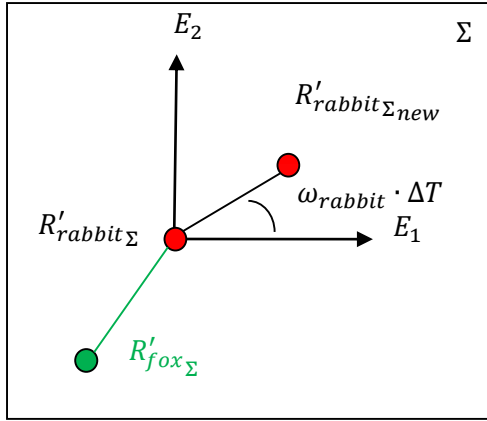


Рис. 6. Выбор направления движения «Кроликом»

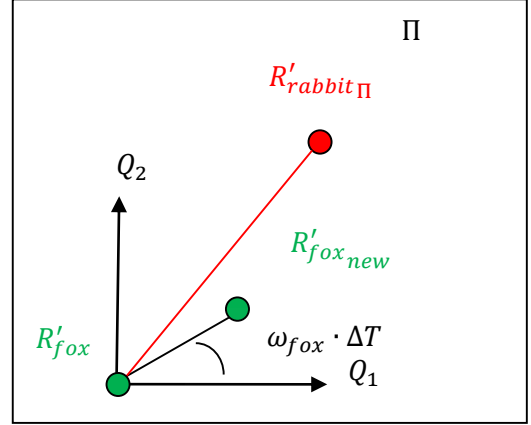


Рис. 7. Выбор направления движения «Лисой»

На плоскости Σ в системе координат «Кролика» координаты «Кролика» равны $\vec{R}'_{rabbit\Sigma} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$. Анализ координат «Лисы» «Кроликом» состоит в том, что если «Лиса» находится в нижней полуплоскости Σ , то «Кролик» совершает шаг против часовой стрелки (рис. 6). Если «Лиса» находится в верхней полуплоскости, то «Кролик» совершает шаг по часовой, то есть новые координаты «Кролика» за промежуток времени ΔT равны в системе координат плоскости Σ :

$$\vec{R}'_{rabbit\Sigma new} = \begin{cases} V_{rabbit} \times \Delta T \times \begin{bmatrix} \cos(\omega_{rabbit} \times \Delta T) \\ \sin(\omega_{rabbit} \times \Delta T) \\ 0 \end{bmatrix}, & \text{if } (\vec{R}'_{fox} - \vec{R}_{rabbit}) \times \vec{E}_2 < 0 \\ V_{rabbit} \times \Delta T \times \begin{bmatrix} \cos(\omega_{rabbit} \times \Delta T) \\ -\sin(\omega_{rabbit} \times \Delta T) \\ 0 \end{bmatrix}, & \text{if } (\vec{R}'_{fox} - \vec{R}_{rabbit}) \times \vec{E}_2 \geq 0 \end{cases}.$$

Так же можно сказать про выбор направления движения «Лисой». Если «Кролик» находится в верхней полуплоскости Π , то «Лиса» совершает шаг против часовой (рис. 7). Если в нижней полуплоскости, то по часовой стрелке:

$$\vec{R}'_{fox\Pi new} = \begin{cases} V_{fox} \times \Delta T \times \begin{bmatrix} \cos(\omega_{fox} \times \Delta T) \\ -\sin(\omega_{fox} \times \Delta T) \\ 0 \end{bmatrix}, & \text{if } (\vec{R}'_{rabbit} - \vec{R}_{fox}) \times \vec{Q}_2 < 0 \\ V_{fox} \times \Delta T \times \begin{bmatrix} \cos(\omega_{fox} \times \Delta T) \\ \sin(\omega_{fox} \times \Delta T) \\ 0 \end{bmatrix}, & \text{if } (\vec{R}'_{rabbit} - \vec{R}_{fox}) \times \vec{Q}_2 \geq 0 \end{cases}.$$

Расчет координат на следующих этапах итераций

Ранее мы рассматривали, как будет выглядеть базис $[\vec{H}_1 \ \vec{H}_2 \ \vec{H}_3]$ мировой системы координат в локальных динамических базисах $[\vec{E}_1 \ \vec{E}_2 \ \vec{E}_3]$ и $[\vec{Q}_1 \ \vec{Q}_2 \ \vec{Q}_3]$. Тогда в мировой системе координат $[\vec{H}_1 \ \vec{H}_2 \ \vec{H}_3]$ новые координаты «Кролика» $\vec{R}'_{rabbit\Sigma new}$ на плоскости Σ будут такими:

$$\vec{R}'_{rabbit new} = \vec{R}_{rabbit} + \begin{bmatrix} \vec{R}'_{rabbit\Sigma new} \times \vec{H}_{1\Sigma} \\ \vec{R}'_{rabbit\Sigma new} \times \vec{H}_{2\Sigma} \\ \vec{R}'_{rabbit\Sigma new} \times \vec{H}_{3\Sigma} \end{bmatrix}.$$

А новые координаты «Лисы» $\vec{R}'_{fox_{\Pi_{new}}}$ на плоскости Π на том же этапе итераций будут выглядеть в мировой системе координат так:

$$\vec{R}'_{fox_{new}} = \vec{R}_{fox} + \begin{bmatrix} \vec{R}'_{fox_{\Pi_{new}}} \times \vec{H}_{1\Pi} \\ \vec{R}'_{fox_{\Pi_{new}}} \times \vec{H}_{2\Pi} \\ \vec{R}'_{fox_{\Pi_{new}}} \times \vec{H}_{3\Pi} \end{bmatrix}.$$

Нам нужны вертикальные проекции точек $\vec{R}'_{rabbit_{new}}$, $\vec{R}'_{fox_{new}}$ на поверхности $\vec{P}_{rabbit}(u, v)$ и $\vec{P}_{fox}(u, v)$ соответственно. Поверхности $\vec{P}_{rabbit}(u, v)$ и $\vec{P}_{fox}(u, v)$, по которым движутся «Кролик» и «Лиса», всегда можно преобразовать к виду: $\vec{P}_{rabbit}(x, y) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ S_{rabbit}(x, y) \end{bmatrix}$ и $\vec{P}_{fox}(x, y) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ S_{fox}(x, y) \end{bmatrix}$. Если координаты точек $\vec{R}'_{rabbit_{new}}$ и $\vec{R}'_{fox_{new}}$, то мы

представим их в ином виде: $\vec{R}'_{rabbit_{new}} = \begin{bmatrix} x_{rabbit_{new}} \\ y_{rabbit_{new}} \\ z_{rabbit_{new}} \end{bmatrix}$, $\vec{R}'_{fox_{new}} = \begin{bmatrix} x_{fox_{new}} \\ y_{fox_{new}} \\ z_{fox_{new}} \end{bmatrix}$. Тогда искомые вертикальные проекции точек $\vec{R}'_{rabbit_{new}}$, $\vec{R}'_{fox_{new}}$ на поверхности можно представить в виде:

$$\vec{R}_{rabbit_{new}} = \begin{bmatrix} x_{rabbit_{new}} \\ y_{rabbit_{new}} \\ S_{rabbit}(x_{rabbit_{new}}, y_{rabbit_{new}}) \end{bmatrix}, \vec{R}_{fox_{new}} = \begin{bmatrix} x_{fox_{new}} \\ y_{fox_{new}} \\ S_{fox}(x_{fox_{new}}, y_{fox_{new}}) \end{bmatrix}.$$

Таким образом, мы считаем итерационный процесс в поставленной нами задаче преследования сформированным. Критерием достижения цели в разработанной нами программе служит расстояние между «Кроликом» и «Лисой» в горизонтальной плоскости проекций:

$\sqrt{(x_{rabbit_{new}} - x_{fox_{new}})^2 + (y_{rabbit_{new}} - y_{fox_{new}})^2} = R_0$, где R_0 – некоторое заданное нами пороговое значение.

Результаты и выводы

В данной статье рассматривалась задача преследования, в которой участники находятся на разных поверхностях. Теоретические аспекты задачи о «водителе-убийце» («катер-торпеда») были рассмотрены в работах Руфуса Айзекса [1]. В работах Л. С. Понтрягина рассматривались теоретические вопросы задачи преследования в пространстве (самолеты) [2]. В работе [3] рассматривалась линеаризованная задача преследования на плоскости с постоянными скоростями и ограниченной кривизной траекторий. В работе [4] рассматривались алгоритмические вопросы управления мобильными роботами в задаче преследования на плоскости.

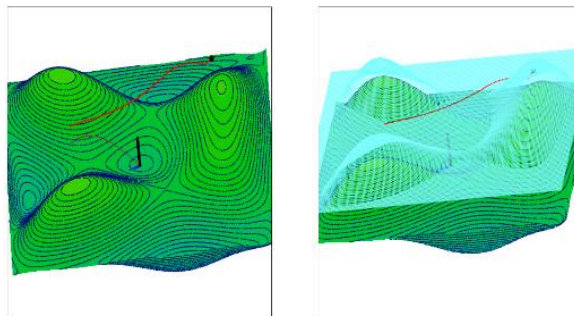


Рис. 8. Преследование по «квазиэквидистанте»

В монографии [5] тоже были предложены алгоритмы для осуществления позиционных стратегий. В работе [6] рассматривались модели движения с ограниченной кривизной траекторий движения.

На основе работ [1–6] предложена математическая модель задачи преследования, когда участники задачи находятся на разных поверхностях. Приближенно можно считать аналогом преследования с воздуха по траектории, учитывающей рельеф местности. Разработан алгоритм построения траекторий в зависимости от пространственного расположения оппонентов. Предложен метод анализа координат оппонента и принятия решений о выборе направления движения.

В системе компьютерной математики MathCAD разработана программа, реализующая данную модель задачи преследования [7]. По результатам работы программы изготовлено анимированное изображение [8].

На рис. 8 представлен первый кадр процесса преследования. В левой части рисунка поверхность «Лисы» не отображена, видимыми являются только траектории «Лисы», «Кролика» и поверхность «Кролика». В правой части рисунка поверхность «Лисы» отображена в полупрозрачном виде.

По мнению автора, результаты исследования, изложенные в данной статье, могут быть востребованы разработчиками робототехнических комплексов с элементами искусственного интеллекта.

Работа выполнена при поддержке проекта конкурса инновационных грантов Бурятского государственного университета 2019 г. на создание аппаратно-программного комплекса сопровождения.

Литература

1. Айзекс Р. Дифференциальные игры. М. : Мир, 1967.
2. Понтрягин Л. С. Линейная дифференциальная игра убегания. Тр. МИАН СССР. 1971. Т. 112. С. 30–63.
3. Желнин Ю. Н. Линеаризованная задача преследования и уклонения на плоскости // Ученые записки ЦАГИ. № 3. Т. 8. 1977. С. 88–98.
4. Бурдаков С. В., Сизов П. А. Алгоритмы управлением движения мобильным роботом в задаче преследования // Научн.-техн. ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 6 (210). С. 49–58.
5. Красовский Н. Н., Субботин А. И. Позиционные дифференциальные игры. М. : Наука, 1974 г. 456 с.
6. Симакова Э. Н. Об одной дифференциальной игре преследования // Автоматика и телемеханика. 1967. № 2. С. 5–14.
7. Движение «Лисы» по «квазиэквидистанте». URL: <http://dubanov.exponenta.ru> (дата обращения: 28.02.2019).
8. Движение «Лисы» по «квазиэквидистанте». URL: <https://www.youtube.com> (дата обращения: 28.02.2019).

УДК 621.31:621.398:658.514-52

КЛАССИФИКАЦИЯ ОШИБОК ПАРАМЕТРОВ ТЕЛЕМЕТРИИ НА ПРИМЕРЕ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ЦЕНТРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДОСТОВЕРИЗАЦИИ

А. С. Занин, К. И. Бушмелева

Сургутский государственный университет, mario85@bk.ru, bkiy@yandex.ru

В статье приведен обзор методов классификации телеметрических систем, представлены результаты системного анализа ошибок телеметрии, возникающих в процессе управления электроэнергетическими системами. Получены принципы классификации ошибок параметров телеметрии на примере диспетчерского центра электроэнергетики. Представлены области применения каждого способа классификации. Приведено обобщенное описание источников сведений о возможных ошибках в телеметрии. Дано общее описание процесса выявления ошибок и восстановления достоверности параметров телеметрии диспетчерского центра акционерного общества «Системный оператор единой энергетической системы» Российской Федерации без использования автоматизации. Приведены стандарты передачи данных, используемые в электроэнергетике. Описаны примеры использования первичных параметров телеметрии для расчета вторичных. Представлены способы восстановления достоверности параметров, содержащих грубые ошибки. Приведен пример таблицы, обобщающей свойства параметров телеметрии для вынесения заключения о достоверности и устранения ошибок нормативно-справочной информации. В общем виде описан процесс автоматизации выявления и восстановления достоверности параметров телеметрии. Описаны предпосылки использования искусственных нейронных сетей для автоматизации процесса достоверизации параметров телеметрии.

Ключевые слова: телеметрия, достоверизация, классификация, энергетическая система, процесс автоматизации.

CLASSIFICATION OF TELEMETRY PARAMETERS ERRORS ON THE EXAMPLE OF ELECTRIC POWER INDUSTRY DISPATCHING CENTER FOR AUTOMATION TASK OF VERIFICATION PROCESS

A. S. Zanin, K. I. Bushmeleva

Surgut State University, mario85@bk.ru, bkiy@yandex.ru

The article considers an overview of the methods of classification of telemetric systems, presents the results of the system analysis of telemetry errors arising in the process of controlling electric power systems. Principles of classification of telemetry parameter errors are obtained using the example of the electric power dispatching center. The application area of each method of classification is shown. A generalized description of the sources of information about possible errors in telemetry is proposed. A general description of the process of detecting errors and restoring the reliability of the telemetry parameters of the dispatching center of the joint-stock company “System Operator of the United Power System” of the Russian Federation without using automation is introduced. The data transmission standards used in the power industry are given. Examples of using primary telemetry parameters for the calculation of secondary ones are described. The ways of restoring the reliability of parameters containing gross errors are enumerated. A table example summarizing the properties of telemetry parameters for making a conclusion about the accuracy and elimination of errors of reference data is given. The automation process of the detection and recovery of the verification of telemetry parameters, in general, is demonstrated. The concepts for using artificial neural networks for automation process of verifying telemetry parameters are mentioned.

Keywords: telemetry, verification, classification, electrical system, automation process.

При выполнении задач по оперативному управлению технологическим процессом важную роль играет достоверность получаемых с объекта управления данных. Совокупность принимаемых с объектов управления параметров не ограничивается непосредственно данными о состоянии технологического процесса. Зачастую в перечень обязательных для передачи в диспетчерский центр параметров входят данные диагностики и состояния устройств сбора и передачи информации. Такие данные нужны для получения сведений о достоверности принимаемых технологически значимых параметров телеметрии (далее – ТМ). Несмотря на то, что при таком подходе количество данных, принимаемых диспетчерским центром, увеличивается в разы, накладывая дополнительные требования на персонал и информационные системы по обработке принимаемой информации, надежное функционирование таких сложных систем, как энергетические, невозможно без указанных сведений.

На сегодняшний день количество принимаемых крупным диспетчерским центром электроэнергетики параметров телеметрии может составлять до пятидесяти тысяч, каждый из которых должен быть предварительно обработан в темпе поступления. По причине малой инертности электромеханических процессов в электроэнергетике, темп поступления телеметрии может быть свыше 50 ед./сек. (такой темп связан с необходимостью мониторинга переходных режимов электроэнергетических систем (далее – ЭЭС), развитие которых моментально отражается на частоте тока) [1]. При передаче и обработке такого количества данных вероятно возникновение сбоев и ошибок принимаемых параметров. Но, как говорилось выше, ошибки в диагностических параметрах и параметрах состояния объектов управления по-разному влияют на технологический процесс диспетчеризации и оказание системных услуг. Еще одним классом параметров ТМ являются так называемые «дорасчетные параметры». Дорасчетными параметрами называются телеизмерения или телесигналы, значения которых рассчитываются по какой-либо формуле из первичных параметров ТМ. Возникновение ошибок в таких параметрах происходит в случае искажения одного или нескольких составляющих дорасчетов.

Ранее вопросам классификации недостоверностей параметров ТМ в контексте автоматизации процесса достоверизации не уделялось большого внимания. В литературе встречается классификация систем телеметрии [2], использование приведенной классификации (рис. 1) допустимо как для телеметрии передаваемой соответствующей телеметрической системой, так и для недостоверностей параметров, возникающих в процессах управления с их использованием.

Для дальнейшего разбиения на классы будет использоваться пример диспетчерского центра (далее – ДЦ) Акционерного общества «Системный оператор единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС») в контексте задачи по автоматизации процесса выявления недостоверных параметров и восстановления их достоверности. Как правило, в ДЦ выполняется классификация по степени влияния телеинформации на процесс оперативного управления ЕЭС. Таким же образом можно произвести классификацию влияния недостоверности на процесс оперативного управления. Исходя из указанного подхода, можно выделить 4 класса недостоверностей параметров:

- оказывающие высокое влияние на процесс управления;
- оказывающие среднее влияние на процесс управления;
- оказывающие низкое влияние на процесс управления;
- не оказывающие влияния на процесс управления.

Необходимость такой классификации порождается в основном разностью подходов к времени (срочности) устранения разных классов недостоверностей. Так, например, параметры перетоков активной и реактивной мощности объектов класса напряжения 500 КВ оказывают огромное влияние на процесс управления энергосистемой, и их недостоверность должна устраняться в кратчайшие сроки. Данное выполняется с использованием административного подхода – все параметры, имеющие наивысший приоритет, включены в утвержденный локальный нормативный акт «Перечень передаваемой диспетчеру телеинформации».

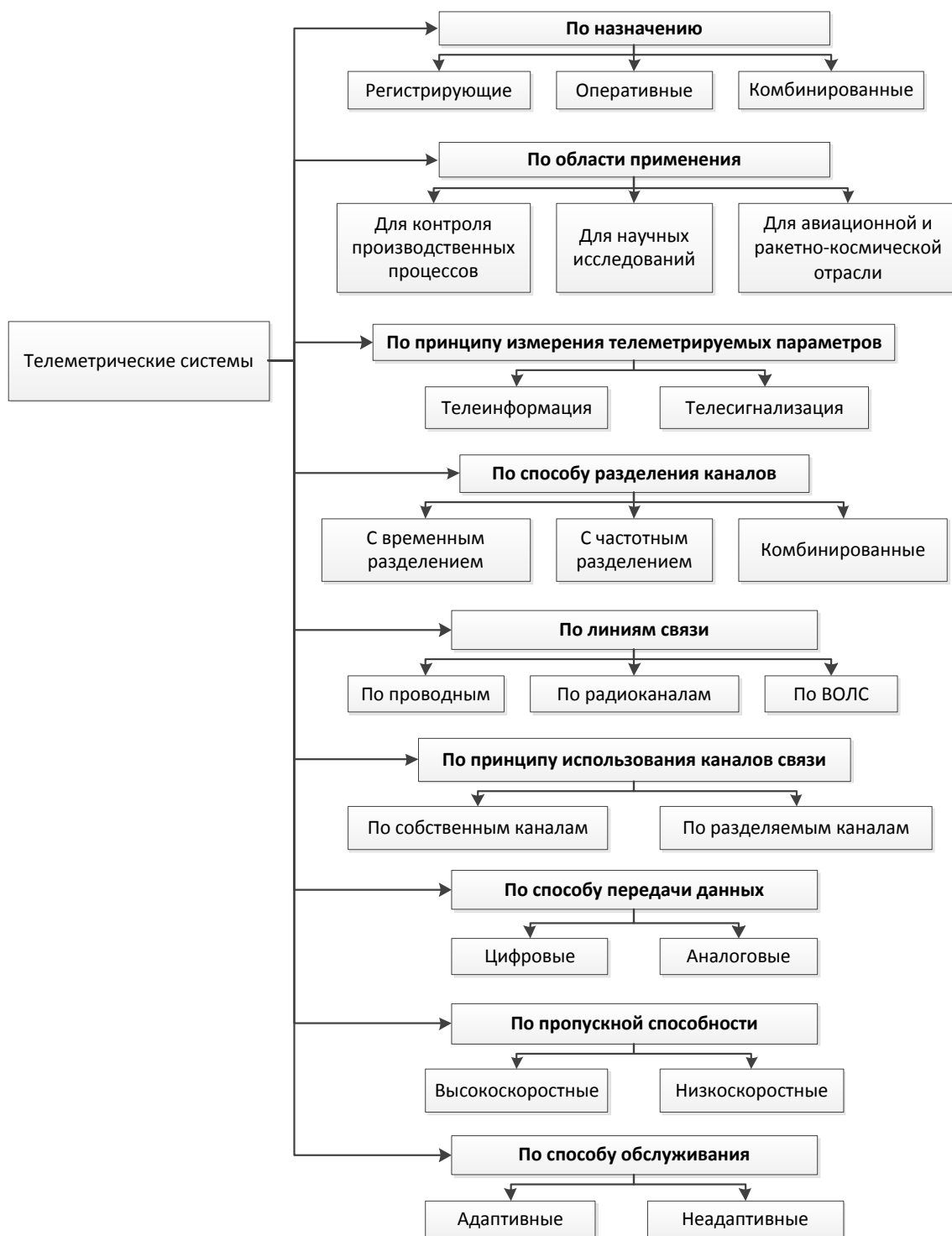


Рис. 1. Классификация телеметрических систем

Еще одним вариантом классификации является разделение достоверности по типу параметра в Оперативном информационном комплексе (далее – ОИК) СК-2007 [3], т. е., как говорилось выше, все параметры ТМ разделяются на первичные (непосредственно принимаемые с объектов управления) и вторичные (рассчитываемые или образуемые из слагаемых, слагаемыми могут быть как первичные параметры ТМ, так и константы). Например, для расчета суммарной генерации энергообъекта используется интегральная сумма по правилу трапеции значений моментальной мощности. Для расчета обобщенных теле-сигналов состояния высоковольтных линий (далее – ВЛ) электропередачи используется со-

вокупность телесигналов состояний (далее – ТС) выключателей в соответствующих ячейках распределительных устройств, а также значение напряжения, получаемого с разных концов ВЛ. Пример расчета обобщенного ТС приведен в формуле 1:

$$OTC354 = TC123 \text{ and } TC345 \text{ and } TC467 \text{ and if } TI890 > 89(1,0,1). \quad (1)$$

Выявление недостоверности составляющих дорасчета является наиболее сложным с точки зрения трудозатрат. Так, например, в случае получения параметров телеметрии из другого ДЦ первичный контроль осуществляется на стороне первого ДЦ, получающего данные непосредственно с объекта управления, и для экономии системных ресурсов дополнительный контроль в вышестоящем ДЦ не осуществляется и не проверяется:

- недостоверность первичного параметра ТМ;
- недостоверность дорасчета;
- недостоверность параметра ТМ, принимаемого из другого ДЦ.

Классификация по типу параметра ТМ позволяет определить на начальном этапе приоритет среди параметров, сведения о недостоверности которых поступили к персоналу, занимающемуся восстановлением достоверности.

Следующий способ классификации является безотносительным к классу недостоверного параметра, в нем предлагается использовать разделение по источнику сведений о недостоверности [4, 5]:

- код качества ОИК СК-2007;
- оценивание состояния;
- автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электроэнергии;
- обращение персонала.

Такая классификация позволяет вынести предварительное заключение об источнике недостоверности, так, например, по расшифровке кода качества ОИК может быть получено заключение о неисправности низового устройства, а по расхождению принимаемых параметров ТМ с математической моделью, используемой при оценивании состояния, может быть выявлена ошибка в нормативно справочной информации (далее – НСИ). Из этого способа классификации вытекает следующее: по принципу восстановления достоверности параметры можно разделить на:

- требующие взаимодействия с объектом управления;
- требующие корректировки НСИ;
- требующие иного способа восстановления.

Данная классификация позволяет вынести предварительное заключение о сроке восстановления достоверности того или иного параметра телеметрии.

Важным в контексте поиска и устранения недостоверностей способом классификации параметров ТМ является разделение на основе протокола передачи данных. В силу внушительного возраста некоторых объектов диспетчеризации в их системах сбора и передачи информации используют устаревшее оборудование, которое работает по протоколам, не имеющим защиты от случайного искажения. Для обозначенной задачи достаточно разделить параметры ТМ на получаемые с использованием протоколов:

- ГОСТ Р МЭК 60870-5-101-2006 [6];
- ГОСТ Р МЭК 60870-5-104-2004 [7].

Несмотря на то, что инструментарий ОИК СК-2007 позволяет успешно обнаруживать искажения данных, связанных с особенностями передачи по устаревшим протоколам, для задач восстановления достоверности таких параметров понимание особенностей структуры передающего тракта может оказать дополнительную помощь.

Все вышеописанные виды классификации могут быть применены в программном обеспечении для автоматизации установления недостоверности и восстановления достоверности параметров ТМ. В настоящее время процесс выявления ошибок телеметрии регулируется

ется в АО «СО ЕЭС» регламентом достоверизации параметров ТМ ДЦ. В соответствии с вышеуказанным документом обращения по любому классу ошибки обрабатываются специалистами отдела оперативной эксплуатации автоматизированных систем управления. На рис. 2 приведена схема процесса достоверизации параметров телеметрии [8].

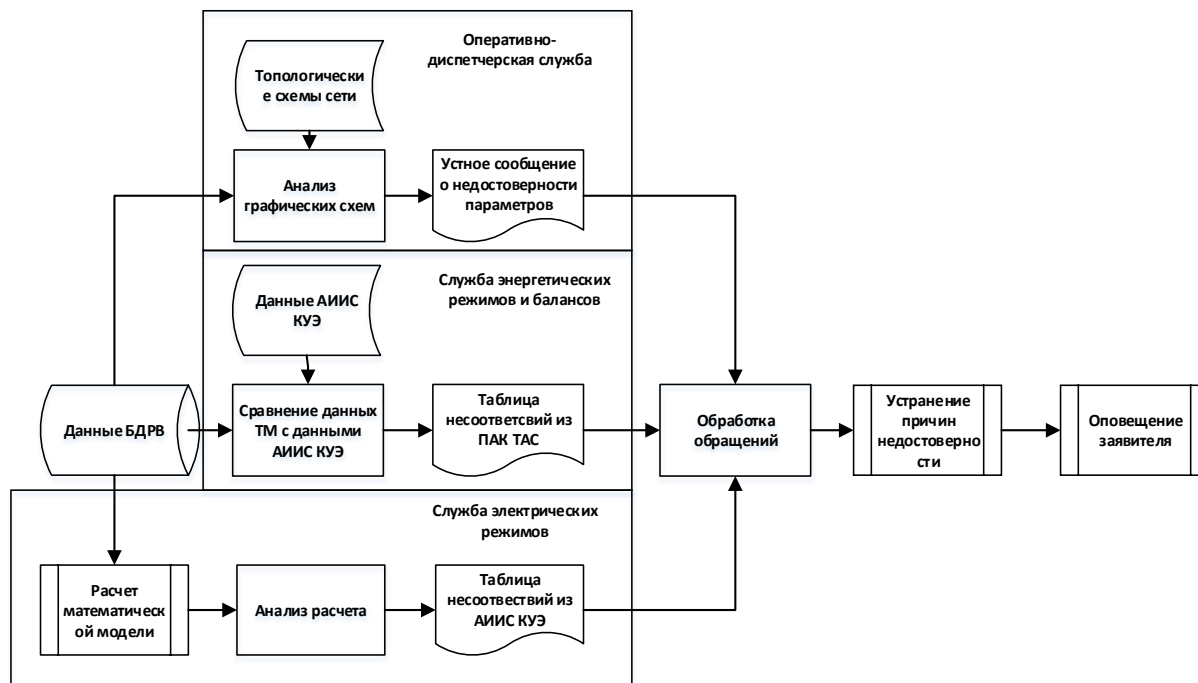


Рис. 2. Порядок выполнения работ по достоверизации телеметрической информации в АО «СО ЕЭС»

Как можно судить из схемы на рис. 2, даже частичная автоматизация процесса определения истинно-недостоверных параметров позволит уделить больше внимания другим немаловажным задачам в целом и восстановлению достоверности истинно-недостоверных параметров в частности. Для разработки программного обеспечения (ПО) автоматизации указанного процесса необходимо выполнить ряд организационных и подготовительных мероприятий, таких как:

- унификация формы обращения по услуге «Недостоверность»;
- установление минимального объема информации, передаваемого в форме обращения;
- добавление меток времени.

После получения всех обращений возможно формирование результирующей таблицы, содержащей информацию о характере недостоверности в соответствии со способами классификации, рассмотренными выше. Приблизительный вид результирующей таблицы достоверизации приведен в таблице.

Таблица

Характер недостоверностей телеметрической информации на объектах АО «СО ЕЭС»

№	Идентификатор ОИК	Наименование	Метка времени	Тип параметра	Источник сведений о недостоверности	Приоритет восстановления	Протокол передачи параметра	Способ восстановления
1	27351	Тобольская ТЭЦ 110 кВ U	07:14:21.16	П	ОИК	1	101	Передать на объект

Окончание табл.

№	Идентификатор ОИК	Наименование	Метка времени	Тип параметра	Источник сведений о недостоверности	Приоритет восстановления	Протокол передачи параметра	Способ восстановления
2	11328	Вынгапур 1СШ 110 кВ U _{bc}	01:20:01.36	П	ОС	2	101	НД
3	10611	Бачкун 1С 110 кВ F /тэс	07:14:21.40	ДДЦ	Пользователь	1	104	Корректировка НСИ

Целью создания результирующей таблицы является получение заключения о необходимом способе восстановления параметров, по которым поступили обращения. Для автоматизации процесса вынесения заключений необходимо собрать статистику заключений по параметрам, обладающим одинаковыми свойствами, после чего алгоритмизировать вынесение заключения. В случае противоречивых данных об истинности недостоверности параметра и способе его восстановления необходимо дополнение таблицы столбцом, полученным эмпирическим путем. Для исключения необходимости корректировки алгоритма работы программы предлагается использовать нейронную сеть, набор входных данных которой будет состоять из свойств параметров, полученных путем их классификации по различным принципам. Процесс формализации входных данных будет сведен к адаптации их для восприятия выбранной НСИ.

Литература

1. Жуков А., Куликов Ю., Демчук А., Мацкевич И. Система мониторинга переходных режимов // Электроэнергия. Передача и распределение. 2010. № 2. С. 52–57.
2. Назаров А. В., Козырев Г. И., Шитов И. В. и др. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб. : Наука и техника, 2007. 672 с.
3. Официальный сайт Системного оператора единой энергетической системы Российской Федерации. URL: <http://so-ups.ru> (дата обращения: 05.02.2019).
4. Гамм А. З., Герасимов Л. Н., Колосок И. Н. и др. Оценивание состояния в электроэнергетике. М. : Наука, 1983. 320 с.
5. Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) подстанции СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007- 35.240.01.023-2009. М. : ОАО «ФСК ЕЭС», 2009. С. 7.
6. Обобщающий стандарт по основным функциям телемеханики. Часть 5. Протоколы передачи раздел 101. ГОСТ Р МЭК 60870-5-101-2006 М. : Стандартинформ, 2006. 141 с.
7. Обобщающий стандарт по основным функциям телемеханики. Ч. 5. Протоколы передачи раздел 104. ГОСТ Р МЭК 60870-5-104-2004. М. : ИПК Изд-во стандартов, 2004. 46 с.
8. Занин А. С., Бушмелева К. И. Автоматизация процесса достоверизации телеметрии диспетчерского центра электроэнергетики // Вестник кибернетики 2017. № 4 (28). С. 139–145.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания surgu.ru и в базе данных Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. (3462) 76-30-67.

Дата выхода в свет 00.06.2019.

Формат 60 × 84/8.

Уч.-изд. л. 11,3.

Цена свободная.