



ISSN 2712-9942

УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2024
T. 5 № 2

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СИСТЕМНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

**Том 5
№ 2**

**Vol. 5
No. 2**

Москва
2024

Учредитель и издатель

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»
(ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

«Успехи кибернетики» — это рецензируемый научный журнал, в котором публикуются научные статьи по следующим специальностям (физико-математические, технические науки):

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств;
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации.

Миссия журнала — развитие научных направлений по заявленной тематике в России и за рубежом, соответствующих приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, а также перечню критических технологий РФ.

Журнал ориентирован на пропаганду передовых идей в области физики, математики, технических наук, участие в реализации задач, сформулированных Президентом РФ в Указе от 01.12.2016 № 642, по научно-технологическому развитию РФ, а также импортозамещению по приоритетным направлениям стратегического развития страны, соответствующим тематике журнала, обеспечение печатными площадями высококвалифицированных кадров, повышение качества диссертационных исследований в данных отраслях путем развития механизма профессионального и общественного обсуждения их научных результатов, воспитание молодого поколения ученых.

Журнал принимает к публикации оригинальные статьи; переводы статей, опубликованных в зарубежных журналах (при согласии правообладателя на перевод и публикацию); обзоры; эссе; комментарии; другие информационные материалы.

Издание будет полезно ученым, работающим в соответствующих областях наук, а также аспирантам и студентам.

Главный редактор

Бетелин Владимир Борисович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Заместитель главного редактора

Галкин Валерий Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, директор, Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут

Члены редакционной коллегии

Власов Сергей Евгеньевич, д. т. н., директор, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, вице-президент, Российская академия наук; заведующий кафедрой медицинской физики, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН — филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Соифер Виктор Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем научных исследований, Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С. П. Королева, Институт систем обработки изображений РАН, Самара

Чубариков Владимир Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой математических и компьютерных методов анализа, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Чаплыгин Юрий Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, Московский институт электронной техники, Москва

Петров Игорь Борисович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой информатики, Московский физико-технический институт, Москва

Смирнов Николай Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заместитель декана механико-математического факультета, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, заместитель директора по стратегическим информационным технологиям, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Тишкин Владимир Федорович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры вычислительных методов, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Губайдуллин Амир Анварович, д. ф.-м. н., профессор, директор, Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН, Тюмень

Яковлевский Михаил Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва

Шагалиев Рашид Мирзагалиевич, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., заместитель директора Федерального научного центра

Старков Сергей Олегович, д. ф.-м. н., профессор, начальник отделения интеллектуальных кибернетических систем, Обнинский институт атомной энергетики, Обнинск

Еськов Валерий Матвеевич, д. ф.-м. н., д. б. н., профессор, заведующий отделом, Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут

Лаврентьев Михаил Михайлович, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН, Новосибирск

Пятков Сергей Григорьевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

Ильин Валерий Павлович, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры прикладной математики, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Крыжановский Борис Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., руководитель, Центр оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Нагорнов Олег Викторович, д. ф.-м. н., профессор, первый проректор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Земто Ясунари, PhD (Physics), Университет Хосэй, Токио, Япония

Пападопулос Атанас, Doctorat d'Etat (Habilitation), mathematics, Университет Страсбурга, Национальный центр научных исследований Франции, Страсбург, Франция

Ответственный секретарь

Гавриленко Тарас Владимирович, к. т. н.

Ответственный редактор

Чалова Анна Петровна, к. филол. н.

Технические редакторы

Моргун Дмитрий Алексеевич, к. ф.-м. н., доцент

Бобровская Ольга Павловна

Садыков Тимур Наилевич

Переводчик

Троицкий Дмитрий Игоревич, к. т. н., доцент

Художественное оформление обложки

© Горбунов Александр Сергеевич

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77-78857 от 04.08.2020.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 27 июня 2022 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».

Издается с 2020 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1.

Телефон: +7 9226-54-57-88, факс: +7 (495) 719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Сайт: jcyb.ru.

Founder and Publisher

Federal State Institution

Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences (SRISA)

Russian Journal of Cybernetics is peer-reviewed.

The journal publishes papers on physics, mathematics, and engineering. The key areas of interest are:

- simulation, numerical methods, and simulation software
- electronic components for micro- and nanoelectronics, and quantum devices
- system analysis, control, and information processing.

Our mission is advancing these research areas in Russia and globally, supporting the national priority fields of research and development, and the critical technologies.

The Journal promotes advanced concepts in physics, mathematics, engineering, and facilitates the national research and technology development under the Russian President Decree No. 642 dated 01.12.2016, and phasing out strategic imports. We offer an opportunity for professional researchers to publish. We improve the doctorate research quality through public peer review and educate the new generation of researchers.

The Journal accepts original papers; translations of papers from international journals (consent of the right holders for the translation and publication is required); reviews; essays; remarks, and event reports.

The Journal is intended for researchers, university, and doctorate students.

Chief Editor

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

Vice Chief Editor

Prof. *Valery A. Galkin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, SRISA, Surgut Branch, Surgut

Editorial Board

Prof. *Sergey E. Vlasov*, Doctor of Science (Engineering), Director, SRISA, Moscow

Prof. *Vladislav Ya. Panchenko*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Vice President, Russian Academy of Sciences (RAS), Chairperson of the Department of Medical Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Prof. *Gennady I. Savin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math),
Academic Director, Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences, SRISA subdivision, Moscow

Prof. *Viktor A. Soifer*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, Chief Researcher Lab for Automated Research Systems, Korolev Samara National Research University, Academic Director, Institute of Image Processing Systems, RAS, Samara

Prof. *Vladimir N. Chubarikov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Mathematical and Computer Analysis Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Prof. *Yuri A. Chaplygin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, National Research University of Electronic Technology, Moscow

Prof. *Igor B. Petrov*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Informatics,

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow

Prof. *Nikolay N. Smirnov*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Dean, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Deputy Director for Strategic Information Technology, SRISA, Moscow

Prof. *Vladimir F. Tishkin*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Computational Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Prof. *Amir A. Gubaidullin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, Tyumen Division, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, RAS Siberian Branch, Tyumen

Prof. *Mikhail V. Iakovovski*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow

Prof. *Rashit M. Shagaliyev*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director, Federal Research Center

Prof. *Sergey O. Starkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Head, Division of Intelligent Cybernetic Systems, Obninsk Institute of Atomic Energy, Obninsk

Prof. *Valery M. Eskov*, Doctor of Science (Phys&Math), Doctor of Science (Biology), Head of Division, SRISA, Surgut Branch, Surgut

Prof. *Mikhail M. Lavrentiev*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Institute of Automation and Electrometry, RAS Siberian Branch, Novosibirsk

Prof. *Sergey G. Pyatkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Further Mathematics, Yugra State University, Khanty-Mansiysk

Prof. *Valerii P. Ilyin*, Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Prof. *Boris V. Kryzhanovskii*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Director, Opto-neural Technologies Center, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences (SRISA), Moscow

Prof. *Oleg V. Nagornov*, Doctor of Science (Phys&Math), First Vice-Rector, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Prof. *Yasunari Zempo*, PhD (Physics), Hosei University, Tokyo, Japan

Prof. *Athanase Papadopoulos*, Doctorat d'Etat (Habilitation), Mathematics, University of Strasbourg, French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France

Executive Editor

Taras V. Gavrilenko, Ph.D. (Engineering)

Managing Editor

Anna P. Chalova, Ph.D. (Linguistics)

Technical Editors

Dmitry A. Morgun, Ph.D. (Phys&Math), Assoc. Prof.

Olga P. Bobrovskaya

Timur N. Sadykov

Translator

Dmitry I. Troitsky, Ph.D. (Engineering), Assoc. Prof.

Cover Design

© Alexander S. Gorbunov

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.

Mass media registration certificate EL No. FS 77-78857 dated on 04.08.2020.

On June 27, 2022 the National Board for Academic Degrees and Titles put the Russian Journal of Cybernetics on the list of leading journals for publishing papers by doctorate students.

Published since 2020. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

SRISA, Russia 117218, Moscow, Nakhimovsky pr., 36/1.

Tel.: +7(922)654-5788, fax: +7(495)719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Web: jcyb.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

70 лет Николаю Николаевичу Смирнову!	6
Б. В. Крыжановский	
Фазовая нейросеть хопфилдова типа	8
С. Г. Вольпин, И. В. Афанаскин, Д. В. Солопов, Ю. Б. Чен-лен-сон	
Односкважинная CRM-модель для анализа обводнения скважины законтурной водой в высоко- проницаемом пласте	13
О. П. Бобровская, Т. В. Гавриленко, В. А. Галкин	
О применении понятия температуры для описания транспортного потока	26
А. Д. Смородинов, Т. В. Гавриленко, А. О. Дубовик, Д. А. Моргун	
Реализация программного обеспечения для решения задачи Коши с различными конфигурациями полей начальных данных и визуализации результатов математического моделирования течения тяжелой примеси	35
В. И. Егоров, Б. В. Крыжановский	
Анализ точности и производительности алгоритма Ванга–Ландау при расчете плотности состоя- ний для модели Изинга	46
Н. В. Замятин, Г. В. Смирнов	
Профили пользователей умного дома	53
А. А. Рассадин, А. В. Ряховский	
Моделирование турбулентного течения на примере задачи об обтекании профиля крыла	64
Т. В. Гавриленко, Д. В. Горбунов, В. А. Востров	
Состояние и основные проблемы развития аддитивных технологий	75
К. И. Бушмелева, К. П. Мягких	
Анализ существующих методов оценки производственного травматизма в структурах Министер- ства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликви- дации последствий стихийных бедствий	84
В. А. Жебель, А. И. Солдатов	
Проверка данных на модификацию в корпоративной сети при помощи коэффициента достовер- ности	90
Г. В. Газя, Н. Ф. Газя, В. В. Еськов, Е. А. Манина	
Непредсказуемость и неопределенность создают реальную Complexity	97
С. А. Сазонов, Д. В. Горбунов	
Классификация состояния фистулы пациента, находящегося на гемодиализе, с использованием спектральных признаков аудиосигнала	103
Н. Р. Урманцева, Р. А. Чирко	
Голосовой помощник для интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента	110

CONTENTS

Prof. Nikolay Smirnov Turns 70	6
B. V. Kryzhanovsky	
Hopfield Type Phase Neural Network	8
S. G. Volpin, I. V. Afanaskin, D. V. Solopov, Yu. B. Chen-len-son	
Single-Well Capacitance Resistive Model (CRM) for Analyzing Well Watercutting by Formation Water in Highly Permeable Reservoirs	13
O. P. Bobrovskaya, T. V. Gavrilenko, V. A. Galkin	
The Traffic Flow Temperature Concept	26
A. D. Smorodinov, T. V. Gavrilenko, A. O. Dubovik, D. A. Morgun	
Software for Solving the Cauchy Problem and Visualizing Heavy Impurity Flow Simulation Results	35
V. I. Egorov, B. V. Kryzhanovsky	
Analyzing the Accuracy and Performance of the Wang-Landau Algorithm for Calculating the Density of States in the Ising Model	46
N. V. Zamyatin, G. V. Smirnov	
Smart Home User Profiles	53
A. A. Rassadin, A. V. Ryakhovskij	
Turbulent Flow Simulation for the Wing Airfoil Analysis Problem	64
T. V. Gavrilenko, D. V. Gorbunov, V. A. Vostrov	
Additive Technologies: Current Status and Challenges	75
K. I. Bushmeleva, K. P. Myagkikh	
Analysis of Occupational Injury Rate Assessment Procedures Used by the Russian Emergency Control Ministry	84
V. A. Zhebel, A. I. Soldatov	
Detection of Data Modifications in Corporate Networks Using a Confidence Coefficient	90
G. V. Gazya, N. F. Gazya, V. V. Eskov, E. A. Manina	
Unpredictability and Uncertainty Create Real Complexity	97
S. A. Sazonov, D. V. Gorbunov	
Categorization of Fistula Condition in Hemodialysis Patients Using Spectral Analysis of Audio Signals	103
N. R. Urmantseva, R. A. Chirko	
Voice Assistant for Intelligent Comprehensive Assessment of Lower Extremity Vein Health	110

70 ЛЕТ



НИКОЛАЮ НИКОЛАЕВИЧУ СМИРНОВУ!

19 апреля 2024 года исполнилось 70 лет со дня рождения профессора, доктора физико-математических наук, заместителя директора по стратегическим информационным технологиям Федерального научного центра Научно-исследовательского института системных исследований РАН (филиала НИЦ «Курчатовский институт») Николая Николаевича Смирнова!

Н. Н. Смирнов является воспитанником механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (поступил в 1971 г., окончил в 1976 г., получив диплом с отличием). В 1980 г. Н. Н. Смирнов защитил кандидатскую диссертацию, в 1990 г. — докторскую. Ученое звание старшего научного сотрудника присвоено ему в 1987 г., звание профессора — в 1994 г.

После окончания в 1979 г. аспирантуры МГУ имени М. В. Ломоносова Николай Николаевич работает на механико-математическом факультете. С 1992 г. Н. Н. Смирнов является профессором кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. В настоящее время им читаются дисциплины: основной курс «Механика сплошной среды», «Введение в специальность» для студентов отделения механики, обязательные курсы «Распространение волн в жидких средах», «Методика подготовки презентаций и ведения дискуссий на английском языке», специальные курсы «Распространение волн в реагирующих средах» (ЕНС на английском языке) и «Детонация и горение» (на английском языке).

С 2010 г. Николай Николаевич работает в Федеральном научном центре Научно-исследовательском институте системных исследований РАН в должности заместителя директора по

стратегическим информационным технологиям.

Профессором Н. Н. Смирновым написано более 300 печатных работ в рецензируемых изданиях, подготовлено 200 выступлений на научных конференциях, 10 изобретений, 9 монографий и 10 учебных пособий, в том числе «Газодинамика горения» (1987 г.), «Гетерогенное горение» (1992 г.), «Лекции по механике сплошной среды» (1995 г.), первая в мире научная монография по моделям «космического мусора» (2002 г.). Среди его учеников 19 кандидатов наук и 2 доктора наук. За последние 5 лет им подготовлено 4 учебных пособия и одно учебное издание.

Н. Н. Смирнов — лауреат премии Минвуза СССР (1985 г.), лауреат премии им. И. И. Шувалова (1993 г.) и премии им. М. В. Ломоносова за педагогическую деятельность (2024 г.), стипендиат государственной научной стипендии для ученых 1997–1999 гг. и 2000–2002 гг. в области механики и машиностроения. Награжден РАЕН золотой медалью П. Л. Капицы «Автору научного открытия» (2007 г.), медалями имени С. П. Королева (2007 г.), М. В. Келдыша (2008 г.), Ю. А. Гагарина (2015 г.), медалью имени Г. А. Тюлина, учрежденной Федерацией космонавтики России (2014 г.), медалью имени В. Г. Грабина, учрежденной Российской академией ракетных и артиллерийских наук (2009 г.), медалью имени Х. А. Рахматулина, учрежденной Российским национальным комитетом по теоретической и прикладной механике (2010 г.), медалью МЧС (2011 г.), медалью имени М. Т. Калашникова (2013 г.), А. Я. Сагомоняна (2014 г.), медалью имени Б. Е. Гельфанда, учрежденной Российской секцией Международного института горения (2013 г.).

Н. Н. Смирнову присвоено почетное звание «Заслуженный профессор Московского университета» (2017 г.), а также им получены награда за выдающееся служение Международной астронавтической федерации (2019 г.) и высшая награда инженерных наук от Международной академии астронавтики (2020 г.). Николай Николаевич является членом Научного совета по горению и взрыву при Президиуме РАН, заместителем председателя Совета РАН по координации научных исследований по направлению «Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения», членом комитета по микрогравитации Международной астронавтической федерации, членом Международного института горения (председателем Российской секции), членом специализированных советов. В 1992 г. он был избран членом-корреспондентом АТН РФ, в 1998 г. — членом-корреспондентом, а в 2007 г. — действительным членом РАЕН, в 2005 г. — членом-корреспондентом Международной астронавтической академии, академик — с 2008 г., секретарь отделения № 1 по физическим наукам в космосе.

Н. Н. Смирнов является ведущим специалистом по математическому моделированию динамических процессов в многофазных средах с учетом физических и химических превращений.

Развитие образования, науки и инноваций — залог успешного решения задач, поставленных Президентом в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. В высшей степени плодотворная работа Н.Н. Смирнова вызывает глубокое уважение и служит примером для молодых ученых!

Редакционная коллегия желает Николаю Николаевичу доброго здоровья, удачи во всех начинаниях и дальнейших творческих успехов!

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-01

ФАЗОВАЯ НЕЙРОСЕТЬ ХОПФИЛДОВА ТИПА**Б. В. Крыжановский***Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация**ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0901-6370>,  kryzhanov@mail.ru*

Аннотация: исследованы свойства полносвязной нейронной сети, построенной на фазовых нейронах по правилу Хэбба. Сигналы, протекающие по межсвязям сети, представляют собой единичные импульсы с определенными фазами. Решающее правило срабатывания нейрона задается следующим образом: в суммарном сигнале, поступающем на вход нейрона, выделяется фазовая компонента с наибольшей амплитудой, и нейрон испускает единичный импульс с такой же фазой. Фазы, кодирующие компоненты векторов ассоциативной памяти, распределены случайным образом. Для оценки ошибки распознавания применяется техника Чернова–Чебышёва, не зависящая от типа распределения кодирующих фаз. Показано, что объем ассоциативной памяти такой нейросети в четыре раза больше, чем у классической сети хопфилдова типа, оперирующей бинарными паттернами. Соответственно, в четыре раза больше и радиус области притяжения.

Ключевые слова: фазовый нейрон, ассоциативная память, правило Хэбба, распознавание.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания НИИСИ РАН № FNEF-2024-0001.

Для цитирования: Крыжановский Б. В. Фазовая нейросеть хопфилдова типа. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):8–12. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-01.

Поступила в редакцию: 27.04.2024.

В окончательном варианте: 28.05.2024.

HOPFIELD TYPE PHASE NEURAL NETWORK**B. V. Kryzhanovsky***Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation**ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0901-6370>,  kryzhanov@mail.ru*

Abstract: this study examines the properties of a fully connected neural network composed of phase neurons, following the Hebbian learning rule. The signals transmitted through the network’s interconnections are single pulses with specific phases. A neuron’s firing rule is defined as follows: among the total signals received at a neuron’s input, the phase component with the highest amplitude is identified, and the neuron emits a single pulse with the same phase. The phases encoding the components of associative memory vectors are randomly distributed. To estimate the recognition error, we employ the Chernov-Chebyshev technique, which is independent of the phase encoding distribution type. Our findings demonstrate that the associative memory capacity of this neural network is four times greater than that of a traditional Hopfield network that operates with binary patterns. Consequently, the radius of the attraction region is also four times larger.

Keywords: phase neuron, associative memory, Hebbian learning rule, recognition.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences.

Cite this article: Kryzhanovsky B. V. Hopfield Type Phase Neural Network. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):8–12. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-01.

Original article submitted: 27.04.2024.

Revision submitted: 28.05.2024.

Введение

Динамика широко известных бинарных моделей нейронных сетей [1, 2] состоит в том, что выход каждого из нейронов определяется знаком воздействующего на него локального поля (знаком суммы входящих сигналов). Ассоциативная память такой сети относительно невелика: $M \sim N/2 \ln N$,

где N — число нейронов, M — число запоминаемых паттернов [3–7]. Объем памяти нейросети зависит как от способа организации взаимодействия между нейронами, так и от ее динамики (от способа релаксации в устойчивое состояние). Однако разработчики обычно ограничиваются исследованием различного рода нейросетевых архитектур и их особенностей [8–11]. При этом используется стандартный спиновый тип нейросетевой динамики (параллельной или асинхронной), применяемый в модели Хопфилда. В работах [12–15] предложены новые типы нейронов (параметрический и векторный нейроны), функционирующие в q -мерном пространстве, и показано, что память таких нейросетей в q^2 раз выше классических бинарных аналогов. Динамика указанных q -нарных сетей формально описывается динамикой спиновой системы, состоящей из q -мерных спинов Поттса [16–18].

Здесь мы хотим показать, что значительный прогресс может быть также достигнут и за счет изменения динамики нейрона, адаптированной для воплощения в виде реального устройства.

Описание фазовой модели

Рассмотрим систему из N спинов, взаимодействие которых описывается гамильтонианом:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^N J_{kr} s_k s_r, \quad k, r = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

а матрица межсвязей организована по правилу Хэбба:

$$J_{kr} = \sum_{\mu=1}^M s_{\mu k} s_{\mu r} \quad (2)$$

на M эталонных векторах $S_{\mu} = (s_{\mu 1}, s_{\mu 2}, \dots, s_{\mu N})$, $\mu = 1, \dots, M$. Диагональные элементы матрицы межсвязей полагаются равными нулю, а воздействующее на k -й нейрон локальное поле вычисляется в традиционном виде $h_k = -\partial E / \partial s_k$:

$$h_k = \sum_{r=1}^N J_{kr} s_r. \quad (3)$$

Положим, что сигналы s_k , протекающие по межсвязям, представляют собой единичные импульсы с определенными фазами:

$$s_k = e^{i\varphi_k}. \quad (4)$$

Тогда матрица (2) запишется в виде:

$$J_{kr} = \sum_{\mu=1}^M e^{i(\varphi_{\mu k} - \varphi_{\mu r})}. \quad (5)$$

Пусть на вход сети поступает некоторый вектор $S = S_m$, являющийся одним из семейства записанных в памяти паттернов S_{μ} , $\mu = 1, 2, \dots, M$. Тогда входной сигнал на k -й нейрон (3) примет вид:

$$h_k = \sum_{\mu=1}^M \sum_{r \neq k}^N e^{i(\varphi_{\mu k} - \varphi_{\mu r} + \varphi_{mr})}. \quad (6)$$

Для выработки решающего правила представим (6) в виде $h_k = H e^{i\varphi_{mk}}$, где:

$$H = (N - 1) + \sum_{\mu \neq m}^M \sum_{r \neq k}^N e^{i(\varphi_{\mu k} - \varphi_{\mu r} + \varphi_{mr} - \varphi_{mk})}. \quad (7)$$

Решающее правило таково: в входном сигнале определяется фазовая компонента с наибольшей амплитудой, и k -й нейрон испускает единичный импульс с этой фазой. Нетрудно заметить, что правильное распознавание, т. е. испускание нейроном сигнала $s_k(out) = e^{i\varphi_{mk}}$, соответствующего распознаваемому вектору S_m , происходит при условии:

$$ReH > 0. \quad (8)$$

Распознающая способность сети

Рассмотрим, насколько решающее правило (8) хорошо работает для правильного распознавания подаваемого на вход сети вектора $S = S_m$. Для простоты анализа будем рассматривать случай, когда фазы $\varphi_{\mu k}$ случайным образом распределены на отрезке $0 \leq \varphi_{\mu k} \leq 2\pi$. В этом случае вероятность ошибки распознавания определится в виде:

$$P_{err} = \Pr \left\{ \sum_{\mu \neq m} \sum_{r \neq k}^N \cos(\varphi_{\mu k} - \varphi_{\mu r} + \varphi_{mr} - \varphi_{mk}) > (N-1) \right\}. \quad (9)$$

Поскольку фазы $\varphi_{\mu k}$ случайным образом распределены на отрезке $0 \leq \varphi_{\mu k} \leq 2\pi$, то и величины $\theta_l = \varphi_{\mu k} - \varphi_{\mu r} + \varphi_{mr} - \varphi_{mk}$ также случайным образом распределены на отрезке $0 \leq \varphi_{\mu k} \leq 2\pi$. Здесь индекс l пробегает значения от 1 до $L = (N-1)(M-1)$, однако для простоты выражений будем полагать N достаточно большим и заменим всюду $N-1$ на N , т. е. $L = N(M-1)$. Для оценки (9) используем выражение Чернова–Чебышёва, не связанное со статистикой фаз $\varphi_{\mu k}$:

$$\begin{aligned} P_{err} = \Pr \left\{ \sum_{l=1}^L \cos \theta_l > N \right\} &\leq \Pr \left\{ e^{\rho \sum_{l=1}^L \cos \theta_l} > e^{\rho N} \right\} \leq \\ &\leq e^{-\rho N} \left\langle \exp \left(\rho \sum_{l=1}^L \cos \theta_l \right) \right\rangle \leq e^{-\rho N} \left\langle e^{\rho \cos \theta} \right\rangle^L. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь угловые скобки означают усреднение, а ρ — некоторая произвольная величина, изменяя которую можно минимизировать правую часть выражения (10), т. е. найти верхнюю границу ошибки. Поскольку в (10) усреднению подвергается производящая функция модифицированных функций Бесселя:

$$e^{\rho \cos \theta} = I_0(\rho) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_k(\rho) \cdot \cos(k\rho), \quad (11)$$

то в результате усреднения остается только член $I_0(\rho)$, т. е. $\langle e^{\rho \cos \theta} \rangle = I_0(\rho)$.

С учетом сказанного для вероятности ошибки из (9)–(11) окончательно получим:

$$P_{err} \leq R^N, \quad R = [I_0(\rho)]^{M-1} e^{-\rho}. \quad (12)$$

Здесь мы выделили величину R , зависящую только от ρ и M и не содержащую N , которую мы будем минимизировать по ρ при заданном значении M .

Перейдем к определению минимума по ρ верхней границы ошибки. Наиболее просто это сделать при $M = 2$. В этом случае $R = I_0(\rho)e^{-\rho}$ при $\rho \rightarrow \infty$ обращается в ноль. Это означает, что при $M = 2$ сеть распознает входной паттерн безошибочно.

В более общем случае $M > 2$ функция $R = R(\rho)$ имеет минимум при конечных значениях ρ , поскольку при больших значениях параметра ρ она экспоненциально нарастает как $R \approx e^{\rho M} / \sqrt{2\pi\rho}$. Минимум функции $R = R(\rho)$ определится выражением:

$$M \frac{d}{d\rho} \ln [I_0(\rho)] = 1. \quad (13)$$

Простой анализ функции $R = R(\rho)$ показывает, что экстремум по ρ находится на отрезке $0 < \rho < 1$. Более того, с возрастанием $M \gg 1$ точка экстремума стремится к нулю. Соответственно, при $M \gg 1$, используя разложение $I_0(\rho)$ в ряд, можно получить из (13) соотношения для оптимального значения параметра ρ :

$$\rho = \frac{1}{2M}. \quad (14)$$

Тогда для верхней границы ошибки распознавания из (12) получим:

$$P_{err} \leq e^{-\frac{2N}{M}}. \quad (15)$$

Выражением (15) определяется верхняя граница ошибки распознавания на отдельно взятом нейроне. Вероятность ошибки нейросети в целом в N раз больше. Соответственно, если мы хотим, чтобы сеть распознавала весь паттерн целиком, т. е. не допускала ошибки даже на одном нейроне, то необходимо выполнение условия $N \exp(-2N/M) < 1$. Отсюда мы получаем ограничение на размер ассоциативной памяти рассматриваемой нейросети:

$$M \leq M_{\max} = \frac{2N}{\ln N}. \quad (16)$$

Очевидно, что с ростом M при превышении величины $M_{\max}$ сеть начинает все хуже распознавать входящие паттерны, и при некотором значении M ассоциативная память полностью разрушится, т. е. ни один паттерн не будет распознаваться [19]. Исследование такой ситуации требует развития соответствующего статфизического подхода, аналогичного развитому в [20].

Обсуждение результатов

Нами была рассмотрена полносвязная нейросеть, основанная на фазовых нейронах. Выражения (10)–(16) были получены в предположении, что на вход нейросети подается паттерн S_m — неискаженный вариант одного из семейства паттернов $\{S_\mu\}$, прописанных в матрице межсвязей (6). Рассмотрение достаточно легко обобщается на случай, когда на вход нейросети подается вектор $\tilde{S}_m$, представляющий собой искаженный вариант вектора S_m . Например, вектор S_m , покрытый мультипликативным шумом. В этом случае в выражении (7) вместо слагаемого $N - 1$ следует подставить $(N - 1)(1 - 2p)$, где p — вероятность изменения фазы на π . Проводя все последующие вычисления для объема памяти вместо (16), получим:

$$M_{\max} = \frac{2N}{\ln N}(1 - 2p).$$

Как видим, наличие искажений может существенно уменьшить величину ассоциативной памяти.

В заключение отметим, что рассмотренный вариант нейросети обладает в четыре раза большим объемом памяти, чем у классической бинарной модели Хопфилда. Соответственно, в четыре раза больше и радиус области притяжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hopfield J. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 1982;79:2554–2558.
2. Hebb D. *The Organization of Behavior*. New York: Wiley; 1949. 365 p.
3. Palm G., Sommer F. Information Capacity in Recurrent McCulloch-Pitts Networks with Sparsely Coded Memory States. *Network*. 1992;3:177–186.
4. Kuh A., Dickinson B. Information Capacity of Associative Memory. *IEEE Trans. on Inf. Theory*. 1989;35:59–68.
5. Herz A., Marcus C. Distributed Dynamics in Neural Networks. *Phys. Rev. E*. 1993;47:2155–2161.
6. McEllice R., Posner E. et al. Capacity of the Hopfield Associative Memory. *IEEE Trans. on Inf. Theory*. 1987;33:461–482.
7. Bolle D., Dupont P., Mourik J. van. Stability Properties of Potts Neural Networks with Biased Pattern and Low Loading. *J. Phys. A*. 1991;24:1065.
8. Kazanovich Y., Borisjuk R. Dynamics of Neural Networks with Central Element. *Neural Networks*. 1999;12:441–454.
9. Kryzhanovsky B. V., Magomedov B. M., Mikaelian A. L. A Domaine Model of Neural Network. *Doklady Mathematics*. 2005;71:310–314.
10. Vogt H., Zippelius A. Invariant Recognition in Potts-Glass Neural Network. *J. Phys. A*. 1992;25:2209.
11. Sompolinsky H. Neural Network with Non-linear Synapses and Static Noise. *Phys. Rev. A*. 1986;34:2571.
12. Крыжановский Б. В., Микаэлян А. Л. О распознающей способности нейросети на нейронах с параметрическим преобразованием частот. *Доклады АН. Сер. Мат. физика*. 2002;383(3):318–321.
13. Крыжановский Б. В., Микаэлян А. Л. Ассоциативная память, способная распознавать сильно скоррелированные образы. *Доклады АН. Сер. Информатика*. 2003;390(1):27–31.

14. Mikaelian A. L., Kryzhanovsky B. V., Litinskii L. B. Parametrical Neural Network. *Optical Memory&Neural Network*. 2003;12(3):227–236.
15. Kryzhanovsky B. V., Litinskii L. B., Mikaelian A. L. Vector-Neuron Models of Associative Memory. *2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. Budapest; 2004. P. 909–1004.
16. Kanter I. Potts-Glass Models of Neural Networks. *Phys. Rev. A*. 1988;37(7):2739.
17. Bolle D., Dupont P., Huyghebaert J. Thermodynamic Properties of the q-State Potts-Glass Neural Network. *Phys. Rev. A*. 1992;45:4194.
18. Wu F. Y. The Potts Model. *Rev. Mod. Phys.* 1982;54:235.
19. Amit D. J., Gutfreund H., Sompolinsky H. Information Storage in Neural Networks with Low Levels of Activity. *Phys. Rev. A*. 1987;35:2293.
20. Karandashev I., Kryzhanovsky B., Litinskii L. Weighted Patterns as a Tool to Improve the Hopfield Model. *Physical Review E*. 2012;85:041925.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-02

ОДНОСКВАЖИННАЯ CRM-МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ОБВОДНЕНИЯ СКВАЖИНЫ ЗАКОНТУРНОЙ ВОДОЙ В ВЫСОКОПРОНИЦАЕМОМ ПЛАСТЕ

С. Г. Вольпин^{1,a}, И. В. Афанаскин^{2,b}, Д. В. Солопов^{1,c}, Ю. Б. Чен-лен-сон^{1,d}

¹ Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

² Независимый исследователь, эксперт Евразийского союза экспертов по недропользованию (ЕКОЭН), г. Москва, Российская Федерация

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3591-2910>,  sergvolpin@gmail.com

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0617-221X>, ivan@afanaskin.ru

^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4357-7462>, dsolid@mail.ru

^d ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7484-6872>, chen-len-son@mail.ru

Аннотация: в статье представлена авторская односкважинная CRM-модель для анализа обводнения скважины законтурной водой в высокопроницаемом пласте. Во введении кратко рассматриваются различные типы CRM-моделей, включая CRMT, CRMP, CRMIP, CRM Omega, CRMs, CRM-Block, ML-CRM и модификации CRMT-M, CRMP-M и CRMIP-M. Преимуществом CRM-моделей является отказ от использования в вычислениях пластового давления, которое заменяется на соотношение, содержащее забойное давление, дебит жидкости и коэффициент продуктивности. Вид соотношения определяется конструкцией скважины. Особое внимание уделено математической модели для прогнозирования забойного давления и дебита жидкости при обводнении одиночных скважин законтурной водой. Приведены формулы для забойного давления при заданном дебите жидкости, дебита жидкости при заданном забойном давлении, средней насыщенности в дренируемом объеме, насыщенности на стенке скважины, обводненности, дебитов нефти и воды, притока воды из законтурной области. Дополнительно приведены эмпирические формулы для средней насыщенности в дренируемом объеме. Рассмотрен промысловый пример на месторождении Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Модель позволяет оценить объемы дренирования и коэффициенты продуктивности. Построены прогнозные модели для забойного давления, дебита жидкости, средней насыщенности и обводненности. Результаты показывают различия в точности прогнозов в зависимости от удаленности скважин от других работающих скважин и выбранных моделей насыщенности.

Ключевые слова: CRM-модель, анализ разработки, обводнение скважин, прогнозирование разработки, упруговодонапорный режим, аквифер, материальный баланс.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИ-СИ РАН «Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)» по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах».

Для цитирования: Вольпин С. Г., Афанаскин И. В., Солопов Д. В., Чен-лен-сон Ю. Б. Односкважинная CRM-модель для анализа обводнения скважины законтурной водой в высокопроницаемом пласте. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):13–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-02.

Поступила в редакцию: 01.06.2024.

В окончательном варианте: 12.06.2024.

SINGLE-WELL CAPACITANCE RESISTIVE MODEL (CRM) FOR ANALYZING WELL WATERCUTTING BY FORMATION WATER IN HIGHLY PERMEABLE RESERVOIRS

S. G. Volpin^{1,a}, I. V. Afanaskin^{2,b}, D. V. Solopov^{1,c}, Yu. B. Chen-len-son^{1,d}

¹ Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation

² Independent researcher, expert of the Eurasian Union of Subsoil Use Experts (EUSUE), Moscow, Russian Federation

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3591-2910>,  sergvolpin@gmail.com

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0617-221X>, ivan@afanaskin.ru^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4357-7462>, dsolid@mail.ru^d ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7484-6872>, chen-len-sony@mail.ru

Abstract: this article presents a single-well Capacitance Resistive Model (CRM) developed by the author for analyzing well flooding by peripheral water in highly permeable formations. The introduction briefly discusses various types of CRM models, including CRMT, CRMP, CRMIP, CRM Omega, CRMs, CRM-Block, ML-CRM, and the modified CRMT-M, CRMP-M, and CRMIP-M versions. The key advantage of CRM models is the omission of reservoir pressure in calculations. It is replaced with a ratio involving bottomhole pressure, fluid flow rate, and productivity factor, determined by well design. The article focuses on a simulation model for predicting bottomhole pressure and fluid flow rate in single wells experiencing peripheral water flooding. It provides equations for calculating bottomhole pressure at a given fluid flow rate, fluid flow rate at a given bottomhole pressure, average saturation in the drained volume, saturation on the well wall, water cut, oil and water flow rates, and water inflow from the aquifer. Additionally, empirical formulas for average saturation in the drained volume are presented. A field example from the Timan-Pechora oil and gas province is examined. The model can estimate drainage volumes and productivity coefficients. We also constructed predictive models for bottomhole pressure, fluid flow rate, average saturation, and watercutting. The results indicate differences in predictive accuracy based on the distance of wells from other operating wells and the selected saturation models.

Keywords: CRM model, development analysis, well watercutting, development forecasting, elastic pressure regime, aquifer, material balance.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, project GP 47 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Volpin S. G., Afanaskin I. V., Solopov D. V., Chen-len-son Yu. B. Single-Well Capacitance Resistive Model (CRM) for Analyzing Well Watercutting by Formation Water in Highly Permeable Reservoirs. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):13–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-02.

Original article submitted: 01.06.2024.

Revision submitted: 12.06.2024.

Введение

Емкостно-резистивная модель (CRM, Capacitance Resistive Model) представляет собой математический инструмент, применяемый для анализа взаимодействия скважин в нефтяном пласте. Основой модели являются два типа уравнений: уравнение сохранения объема жидкости, характеризующее «емкость» (C), и уравнение притока к скважине, характеризующее «сопротивление» (R). Уравнение емкости является разновидностью уравнения материального баланса и используется при предположении фильтрации слабосжимаемой жидкости в упругом пласте. В качестве уравнения притока чаще всего применяется формула Дюпюи или ее аналоги в зависимости от конструкции скважины. Модель в большинстве случаев применяется для однофазного потока. В зависимости от размеров пласта, рассматриваемых в уравнении емкости (дренируемый объем одной добывающей скважины, общий поровый объем взаимодействующей пары добывающей и нагнетательной скважин или весь поровый объем пласта), а также учитываемых физических явлений, выделяются несколько типов CRM-моделей.

Рассмотрим основные виды CRM-моделей:

1. **CRMT:** все скважины рассматриваются как дренирующие единый поровый объем [1, 2, 7, 8, 11–13].
2. **CRMP:** каждая добывающая скважина имеет свой дренируемый поровый объем. Нагнетательные скважины влияют на поровые объемы одной или нескольких добывающих скважин [2, 6–9, 11–13].
3. **CRMIP:** анализируется общий поровый объем каждой пары взаимодействующих скважин (добывающая и нагнетательная) [3, 7, 8, 12].
4. **CRM Omega:** модификация CRMIP, учитывающая изменения продуктивности при пусках и остановках скважин для учета нестационарности потока [3].
5. **CRMs:** каждая скважина (добывающая и нагнетательная) имеет свой поровый объем. Поровые объемы взаимодействуют. Учитывается двухфазный поток нефти и воды, а также влияние аквифера.

Модель учитывает нестационарный приток при пусках и остановках и использует численное решение дифференциальных уравнений [10].

6. **CRM-Block**: расширение моделей CRMT или CRMIP, где общий дренируемый объем взаимодействующих скважин делится на несколько блоков, расположенных последовательно с перетоком жидкости из одного в другой [7, 8]. Модель обеспечивает более реальную картину возмущения пласта.

7. **ML-CRM**: многопластовая модель, предполагающая вскрытие нескольких изолированных друг от друга пропластков парой взаимодействующих скважин [7].

8. **CRMT-M, CRMP-M и CRMIP-M**: модификации моделей CRMT, CRMP и CRMIP для учета системы «газ — нефть» в пласте [5, 8].

Преимуществом CRM-моделей является отказ от использования в вычислениях пластового давления, которое меняется в процессе разработки, а его определения в промысловой практике носят редкий и часто несистемный характер, что затрудняет адаптацию модели по пластовому давлению и понижает точность расчетов.

Настоящая работа рассматривает авторскую односкважинную CRM-модель для анализа обводнения скважины законтурной водой в высокопроницаемом пласте.

Математическая модель

В высокопроницаемых пластах, разрабатываемых без системы поддержания пластового давления на упруговодонапорном режиме, в первом приближении интерференцией скважин можно пренебречь. Рассмотрим односкважинную математическую модель для прогнозирования показателей разработки при обводнении скважин водой из законтурной водоносной области (аквифера).

Для прогнозирования забойного давления при заданном дебите или для прогнозирования дебита жидкости при заданном забойном давлении воспользуемся CRM-моделью:

$$V_p c_t \frac{dP}{dt} = -q_l(t) + q_a(t), \quad (1)$$

$$q_l(t) = PI[p(t) - p_w(t)], \quad (2)$$

$$V_{p,a} c_{t,a} \frac{dp_a}{dt} = -q_a(t), \quad (3)$$

$$q_a(t) = PI_a[p_a(t) - p(t)], \quad (4)$$

где V_p — дренируемый поровый объем на одну скважину; c_t — суммарная сжимаемость системы «пласт — флюид»; $p(t)$ — пластовое давление; t — время; $q_l(t)$ — дебит жидкости; $q_a(t)$ — приток воды из законтурной водоносной области в дренируемый объем; PI — коэффициент продуктивности скважины; $p_w(t)$ — забойное давление; $V_{p,a}$ — поровый объем аквифера, взаимодействующий со скважиной; $c_{t,a}$ — суммарная сжимаемость системы «пласт — вода» в аквифере; $p_a(t)$ — давление в аквифере; PI_a — «коэффициент продуктивности» аквифера.

Уравнения (1)–(4) записаны в пластовых условиях и предоставляют собой:

- 1) уравнение (1) — уравнение материального баланса для области дренирования скважины в дифференциальной форме;
- 2) уравнение (2) — уравнение притока жидкости к скважине;
- 3) уравнение (3) — уравнение материального баланса для законтурной водоносной области в дифференциальной форме;
- 4) уравнение (4) — уравнение притока воды к области дренирования скважины.

Предположения, принятые для записи системы (1)–(4):

1. Поддержание пластового давления (ППД) отсутствует.
2. Интерференцией добывающих скважин пренебрегаем (она частично учитывается путем введения понятия «дренируемый объем»).
3. Активность аквифера (законтурной водоносной области) велика.
4. Жидкость слабосжимаемая, пласт упругий.
5. Пластовое и забойное давления больше давления насыщения.
6. При расчете забойного давления или дебита жидкости изменением насыщенности пренебрегаем.
7. Зона дренирования скважины представляется в виде единого, однородного резервуара.

Начальные условия для системы (1)–(4):

$$p_w(t=0) = p_a(t=0) = p(t=0) = p_0, q_l(t=0) = 0. \quad (5)$$

Такие начальные условия (5) означают, что в начальный момент времени система находится в равновесии.

Перепишем (2) относительно $p(t)$ и продифференцируем:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dp_w}{dt} + \frac{1}{PI} \frac{dq_l}{dt}. \quad (6)$$

Подставим (6) в (1):

$$V_p c_t \left(\frac{dp_w}{dt} + \frac{1}{PI} \frac{dq_l}{dt} \right) = -q_l(t) + q_a(t). \quad (7)$$

Интегрируя (7), можно получить формулы для $p_w(t)$ и $q_l(t)$.

Запишем формулу для $p_w(t)$:

$$p_w(t) = p_0 - \frac{Q_l(t) - Q_a(t)}{V_p c_t} - \frac{q_l(t)}{PI}, \quad (8)$$

где $Q_l(t)$ и $Q_a(t)$ — накопленная добыча жидкости и накопленный приток воды.

Учитывая, что:

$$Q_l(t) = Q_l(t - \Delta t) + t q_l(t), \quad (9)$$

$$Q_a(t) = Q_a(t - \Delta t) + t q_a(t), \quad (10)$$

аналогично (7) и (8) получим из (3) и (4) формулу для $q_a(t)$:

$$q_a(t) = \frac{PI_a \left[\frac{Q_l(t)}{V_p c_t} - \Omega Q_a(t - \Delta t) \right]}{1 + PI_a \Omega \Delta t}, \quad (11)$$

где $\Omega = \frac{1}{V_p c_t} + \frac{1}{V_{p,a} c_{t,a}}$.

Заметим, что $Q_a(t)$ зависит от $q_a(t)$, зависящего от $Q_l(t)$, зависящей, в свою очередь, от $q_l(t)$.

Так как Δt мало, получим из (8) с учетом (9)–(11) формулу для $q_l(t)$, заменяя $Q_a(t)$ $Q_a(t - \Delta t)$:

$$q_l(t) = \frac{p_0 - \frac{Q_l(t - \Delta t) - Q_a(t - \Delta t)}{V_p c_t} - p_w(t)}{\frac{1}{PI} + \frac{\Delta t}{V_p c_t}}. \quad (12)$$

Запишем уравнение сохранения объема воды в стандартных условиях (СУ):

$$Fh \frac{d}{dt} \left(\frac{m S_m}{B_w} \right) = -q_w(t) + q_a(t). \quad (13)$$

где F, h — площадь и толщина зоны дренирования; S_m — средняя водонасыщенность; B_w — объемный коэффициент воды, причем $B_w(p = p_0) = B_{w,0}$; $q_w(t)$ — дебит воды; m — пористость, причем $m(p = p_0) = m_0$; c_r — сжимаемость пласта; c_w — сжимаемость воды.

Как отмечалось ранее, выше (13) все формулы записаны в пластовых условиях. В (13) и ниже все дебиты приведены в СУ.

Начальное условие для уравнения (13):

$$S_m(t=0) = S_0. \quad (14)$$

Замыкающие соотношения для уравнения (13):

$$m = m_0 [1 + c_r(p - p_0)], \quad B_w = B_{w,0} [1 - c_w(p - p_0)]. \quad (15)$$

Очевидно, что:

$$V_p = Fh m_0. \quad (16)$$

Получим из (13) уравнение для средней водонасыщенности с учетом (15) и (16):

$$V_p \left[\frac{ds}{dt} + (c_r + c_w) s_m(t) \frac{dp}{dt} \right] = -B_{w,o} [q_w(t) - q_a(t)]. \quad (17)$$

Разностная схема для уравнения (17):

$$S_m(t + \Delta t) = S_m(t) - \Delta t \frac{B_{w,o}}{V_p} [q_w(t) - q_a(t)] - (c_r + c_w) s_m(t) [p(t + \Delta t) - p(t)]. \quad (18)$$

Пренебрегая упругими силами:

$$S_m(t + \Delta t) = S_m(t) - \Delta t \frac{B_{w,p}}{V_p} [q_w(t) - q_a(t)]. \quad (19)$$

Если активность законтурной области велика (большие запасы воды и хорошая связь), то $q_a(t) \approx q_l(t)$, то есть режим разработки близок к жесткому водонапорному.

Тогда:

$$-(q_w - q_o) = -(q_w - q_l) = -(q_w - q_w - q_o) = q_o, \quad (20)$$

где q_o — дебит нефти.

Тогда:

$$S_m(t + \Delta t) = S_m(t) + \Delta t \frac{B_{w,o}}{V_p} q_o(t). \quad (21)$$

Согласно теории Баклея–Левретта, средняя насыщенность в пласте $S_m(t)$ и насыщенность на стенке скважины $S_L(t)$ связаны формулой [14]:

$$S_m(t) = S_L(t) + \frac{1 - f(S_L(t))}{f(S_L(t))}, \quad (22)$$

где $f(S)$ — функция Баклея–Левретта [14]:

$$f(S) = \frac{k_{rw}(S)}{k_{rw}(S) + k_{ro}(S) \frac{\mu_w}{\mu_o}}, \quad (23)$$

где $k_{rw}(S)$ и $k_{ro}(S)$ — относительные фазовые проницаемости (ОФП) по воде и нефти; μ_w , μ_o — динамические вязкости воды и нефти.

Дебиты нефти и воды, обводненность $w(t)$ определяются как:

$$q_w(t) = q_l(t)w(t), \quad (24)$$

$$q_o(t) = q_l(t) [1 - w(t)] = q_l(t) - q_w(t), \quad (25)$$

$$w(t) = \frac{k_{rw}(S_L)}{k_{rw}(S_L) + k_{ro}(S_L) \frac{\mu_w B_{w,0}}{\mu_o B_{o,0}}}. \quad (26)$$

На стенке скважины при $S(t) = S_L(t)$ функция Баклея–Левретта равна обводненности в пластовых условиях.

Следует помнить, что формулы теории Баклея–Левретта получены для несжимаемых жидкостей и пласта, капиллярными и гравитационными силами пренебрегается. Теория Баклея–Левретта создана в предположении однородного пласта, однако она позволяет связать водонасыщенность и обводненность указанным выше способом. Учитывая неоднородность пласта по проницаемости, при переходе к практическим данным и промысловым примерам разницей между $S_m(t)$ и $S_L(t)$ можно пренебречь (что проверено нами на практике) и использовать везде в расчетах по приведенным выше формулам $S_m(t)$ вместо $S_L(t)$.

Для практических целей формулу (21) можно переписать в следующем виде:

$$S_m(t + \Delta t) = a + bQ_o(t), \quad (27)$$

где a, b — коэффициенты аппроксимации, $Q_o(t)$ — накопленная добыча нефти.

В неоднородном пласте лучшие результаты, по сравнению с (27), могут давать следующие эмпирические формулы:

$$S_m(t + \Delta t) = a + b \cdot \ln [cQ_o(t) + d], \quad (28)$$

$$S_m(t + \Delta t) = a + b[cQ_o(t) + d]^e, \quad 0 < e < 1, \quad (29)$$

где a, b, c, d, e — коэффициенты аппроксимации.

Далее по тексту работы формула (27) будет называться линейной моделью, формула (28) — логарифмической моделью, а формула (29) — степенной моделью.

Промысловый пример

Рассмотрим нефтяное месторождение, расположенное в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Продуктивный пласт представлен отложениями верхнего девона. Коллектор карбонатный, трещиновато-порово-кавернозный.

Основные свойства пласта и жидкостей:

1. Глубина ВНК — 2905 м.
2. Пористость — 0.12 д. ед.
3. Проницаемость — 350 мД.
4. Начальное пластовое давление — 311 бар.
5. Вязкость нефти — 5.9 мПа·с.
6. Объемный коэффициент нефти — $1.08 \text{ м}^3/\text{м}^3$.
7. Вязкость воды — 1.1 мПа·с.
8. Объемный коэффициент воды — $1.001 \text{ м}^3/\text{м}^3$.
9. Суммарная сжимаемость системы «пласт — флюид» — $3.4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/бар}$.

Схема расположения скважин и границ приведена на рисунке 1. В работе будут анализироваться скважины №№ 2 и 24, при этом скважины №№ 10, 18, 1302 и 1303 работали, а скважины №№ 23, 1103, 1106, 1107, 1108, 1109 простаивали. Всего проанализировано 11 месяцев истории, построены прогнозные модели для забойного давления при заданном дебите, дебита при заданном забойном давлении и обводненности. Модели предполагают работу всех скважин на текущем режиме эксплуатации. Модель позволяет оценить объемы дренирования и коэффициенты продуктивности.

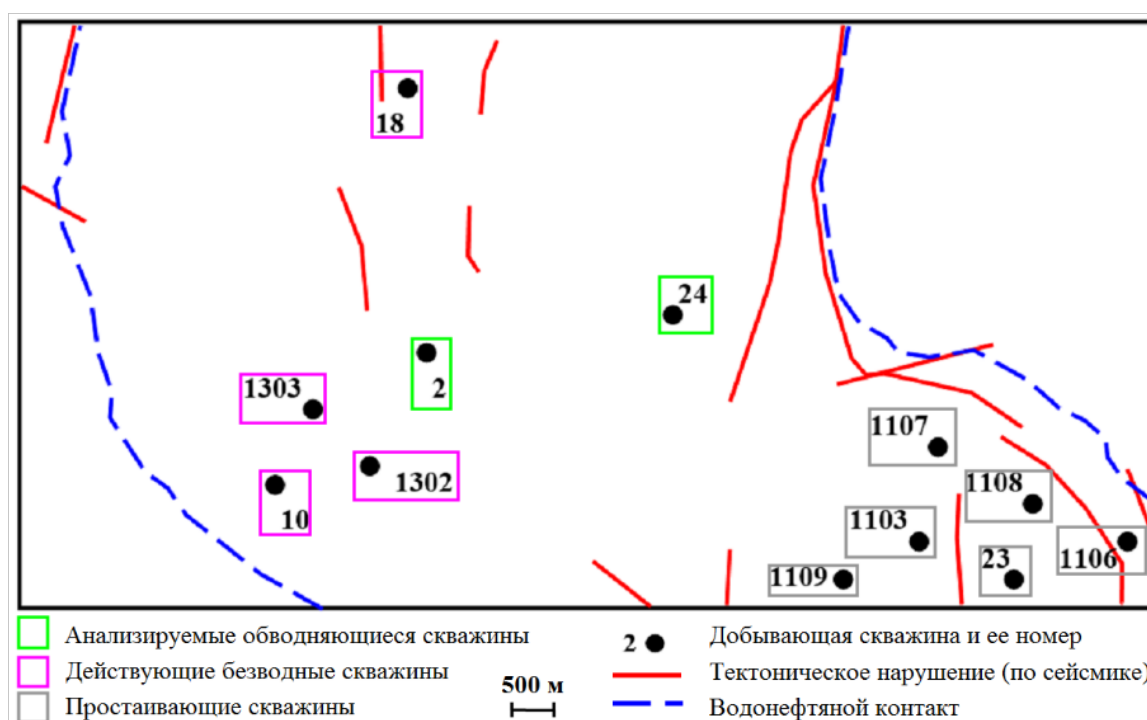


Рис. 1. Схема расположения скважин и границ

На рисунке 2 приведена история работы скважин по дебиту жидкости.

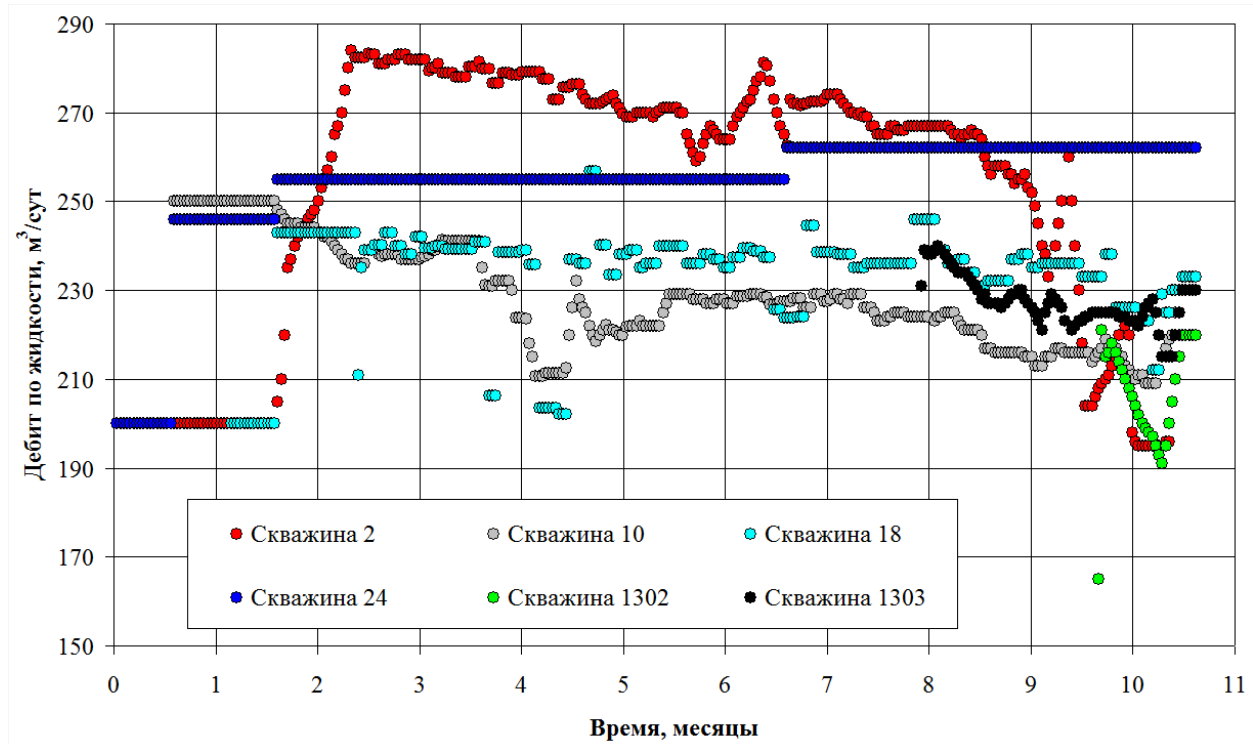


Рис. 2. История работы скважин по дебиту жидкости

На рисунке 3 приведены функции относительных фазовых проницаемостей (ОФП) по нефти и воде и функция Бакли–Леверетта для керновых данных.

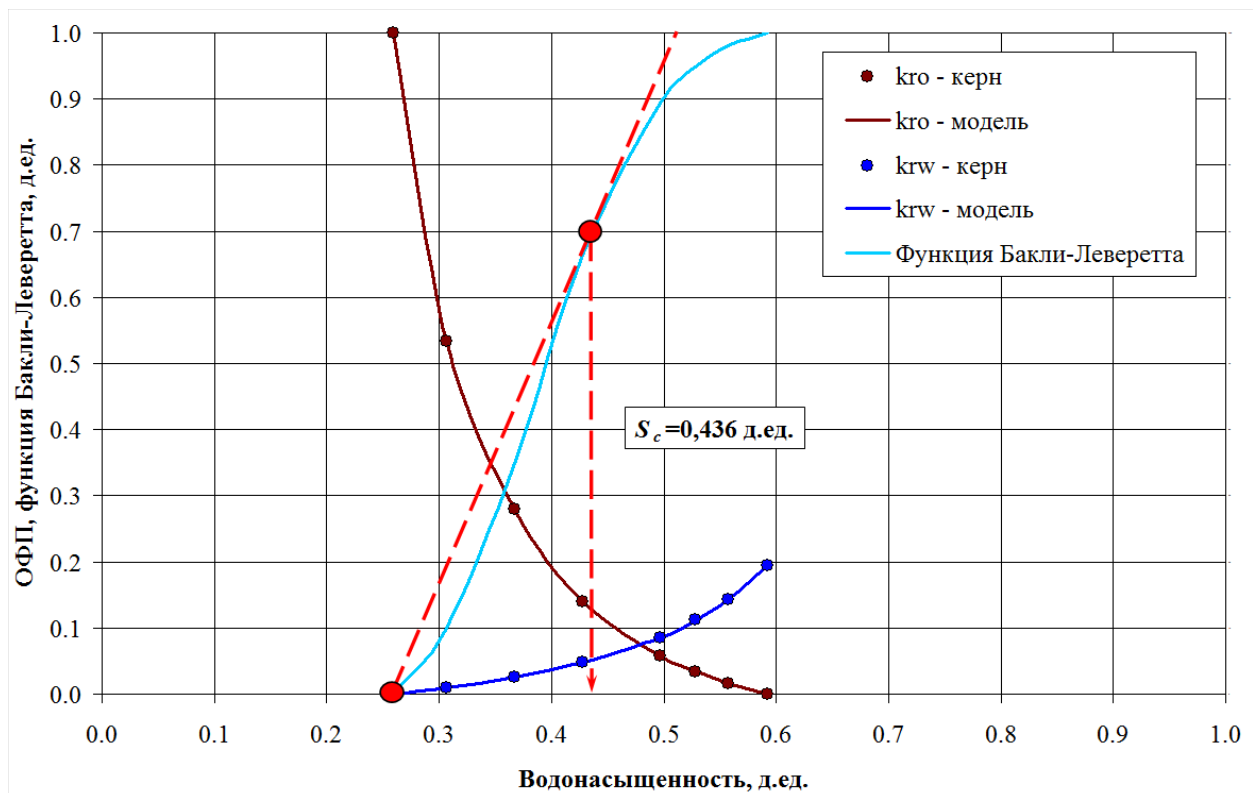


Рис. 3. Функции относительных фазовых проницаемостей (ОФП) по нефти (k_{ro}) и воде (k_{rw}) и функция Бакли–Леверетта

На рисунке 4 приведена связь между водонасыщенностью на стенке скважины и обводненностью, использованная для построения моделей насыщения.

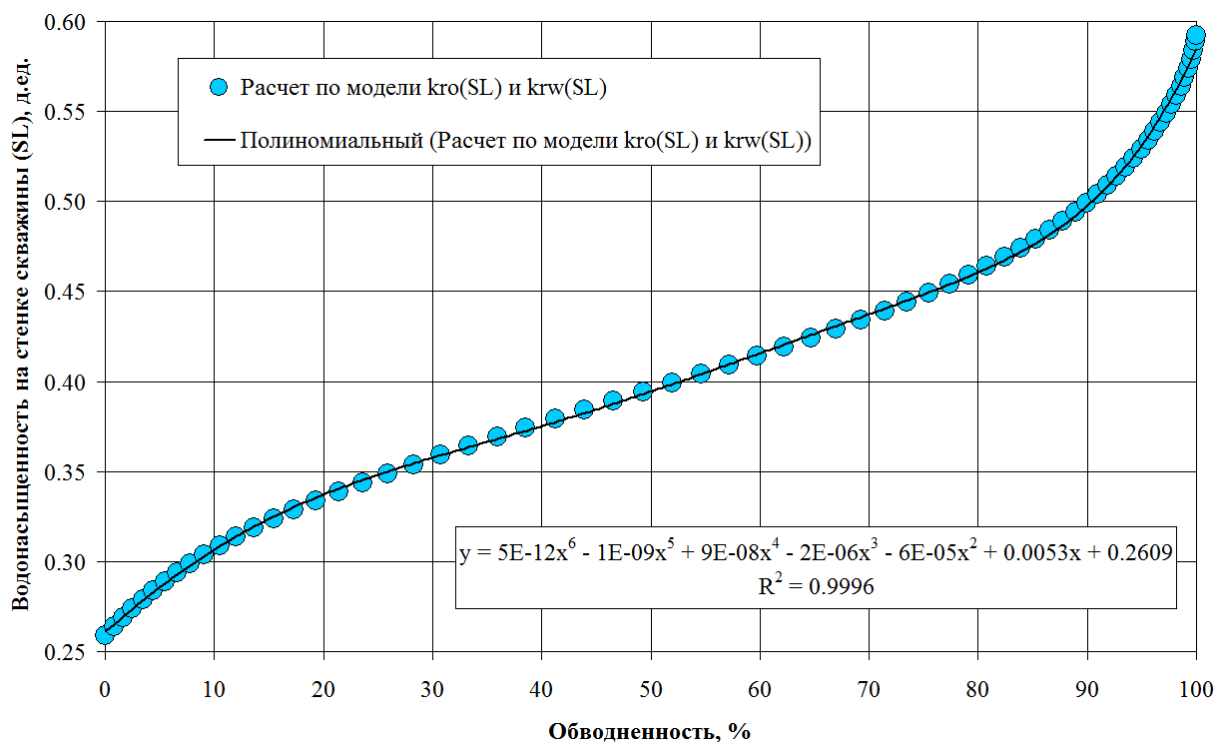


Рис. 4. Связь между водонасыщенностью на стенке скважины и обводненностью

На рисунке 5 приведена связь между насыщенностью на стенке скважины и средней насыщенностью в дренируемом объеме, полученная по формуле (22).

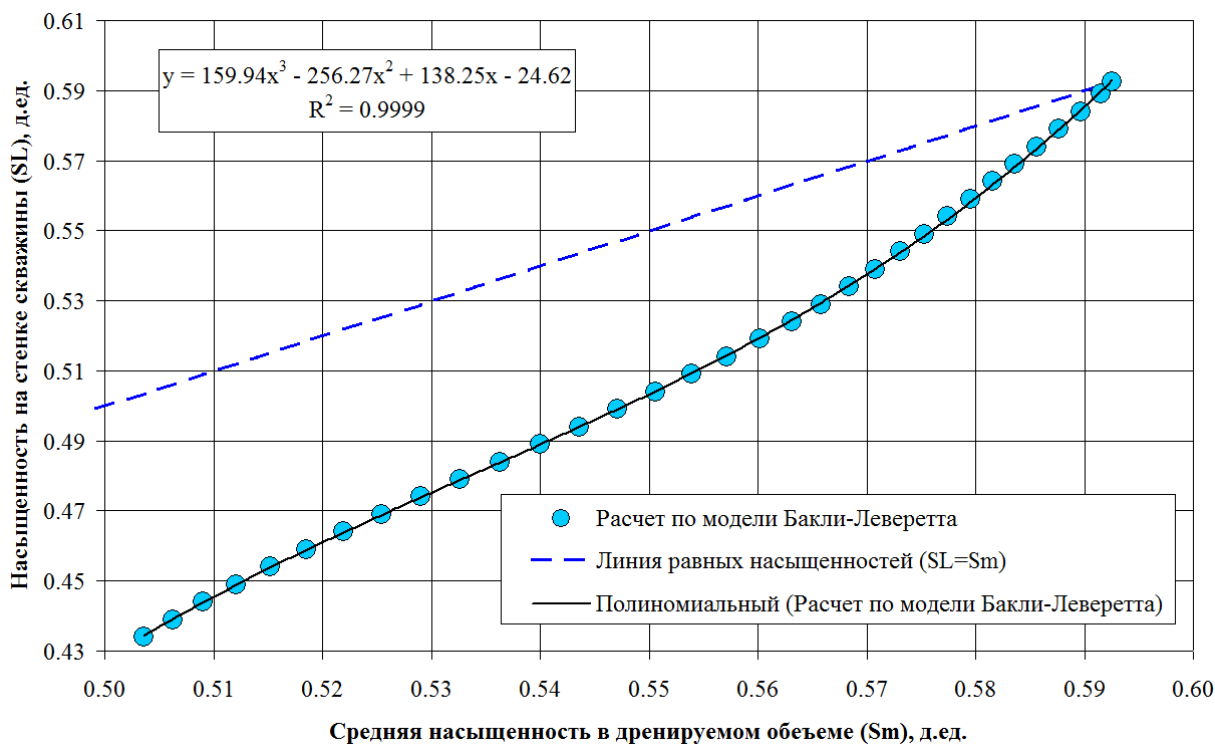


Рис. 5. Связь между насыщенностью на стенке скважины и средней насыщенностью в дренируемом объеме

На рисунках 6 и 7 приведен анализ забойного давления и дебита жидкости соответственно скважины № 2. Видно, что при использовании в качестве истории разработки 7 месяцев и дальнейшем прогнозе расчетные и фактические кривые показателей разработки расходятся, что обусловлено изменениями режимов работы окружающих скважин, которые показаны на рисунках.

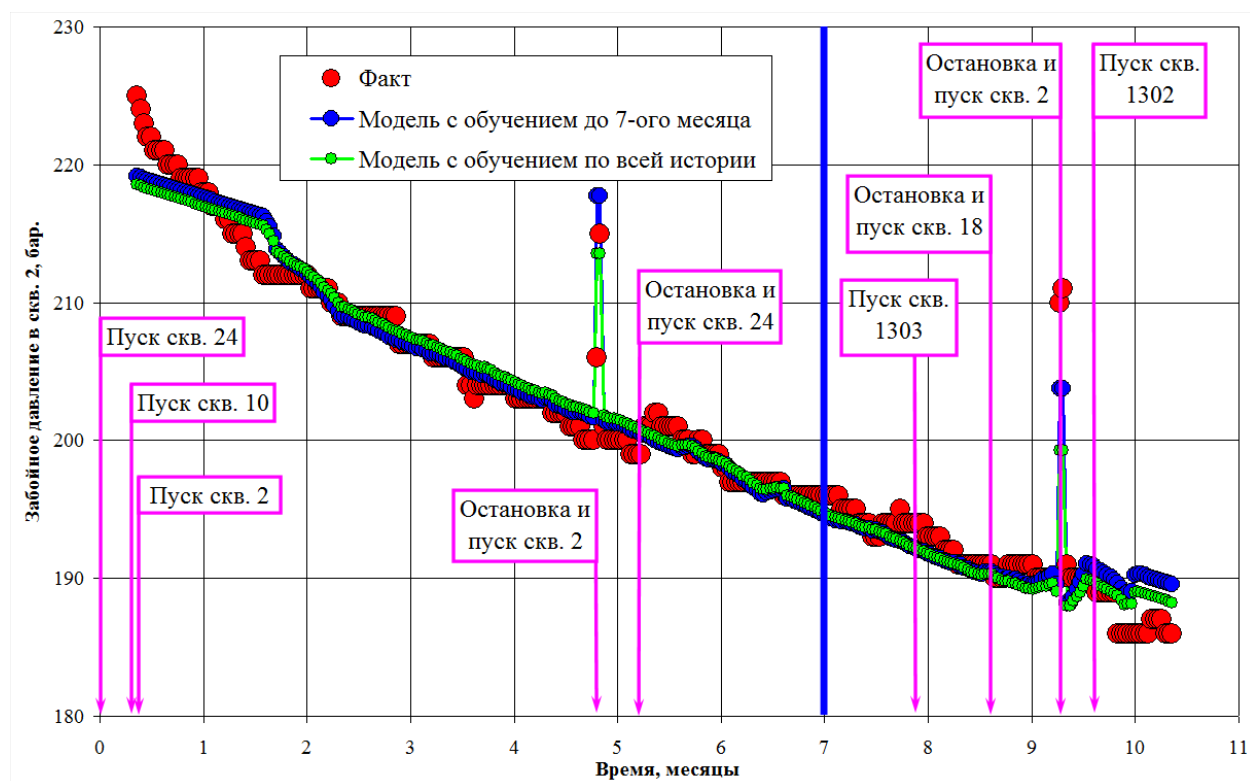


Рис. 6. Анализ забойного давления скважины № 2

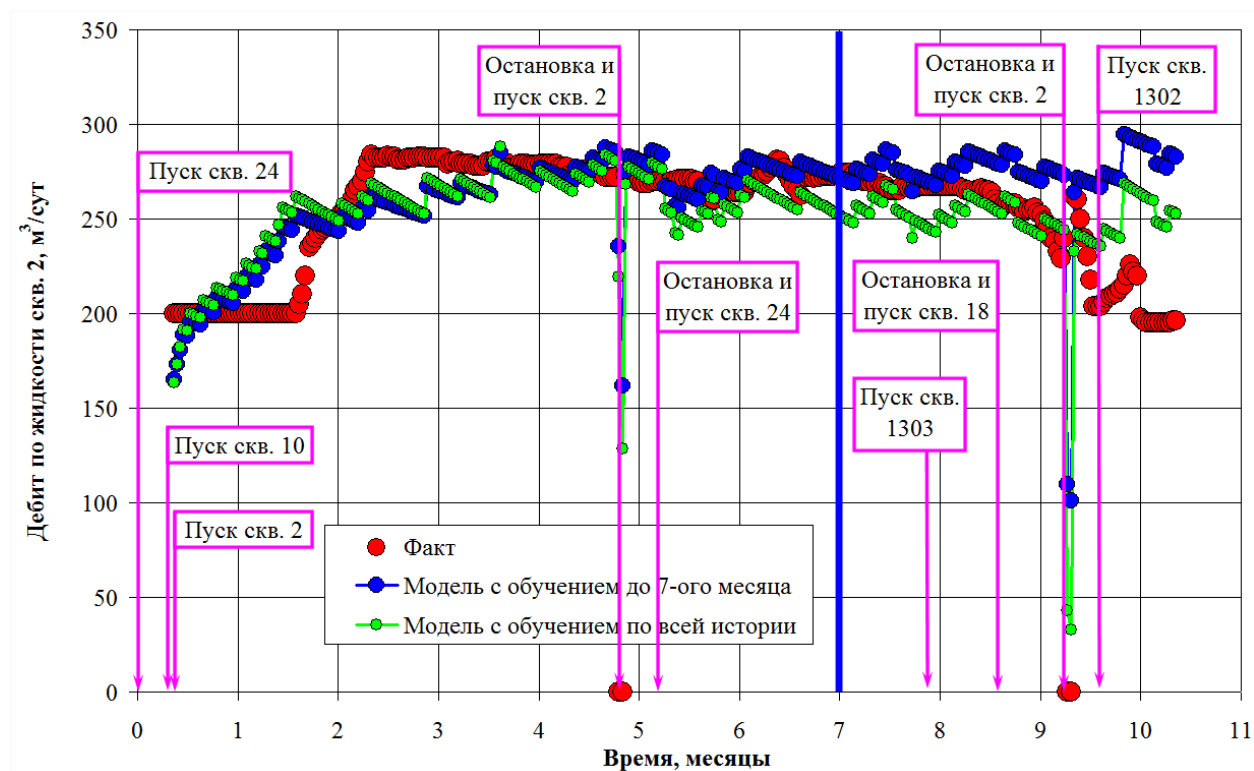


Рис. 7. Анализ дебита жидкости скважины № 2

На рисунках 8 и 9 приведен анализ забойного давления и дебита жидкости соответственно скважины № 24. Видно, что при использовании в качестве истории разработки 7 месяцев и дальнейшем прогнозе расчетные и фактические кривые показателей разработки практически совпадают, в отличие от скважины № 2. Это может быть обусловлено большим (по сравнению со скважиной № 2) удалением скважины № 24 от других работающих скважин.

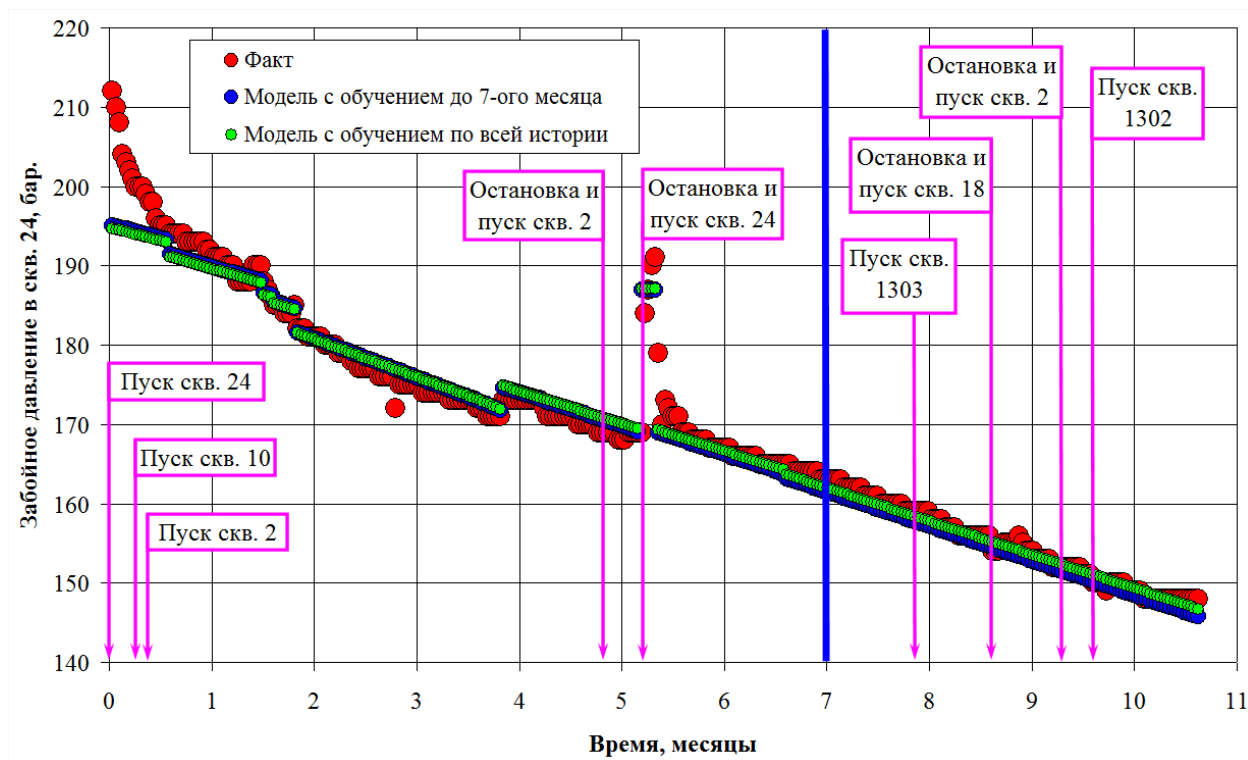


Рис. 8. Анализ забойного давления скважины № 24

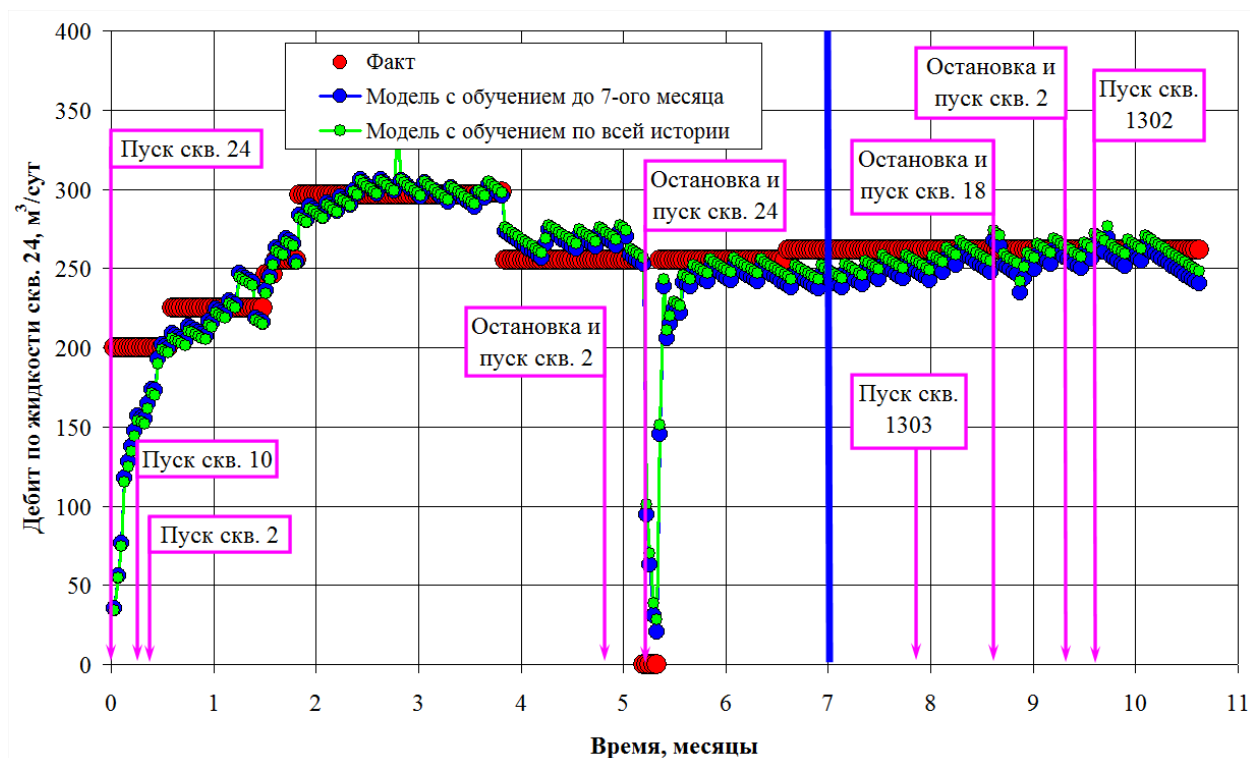


Рис. 9. Анализ дебита жидкости скважины № 24

На рисунках 10 и 11 приведен анализ средней насыщенности в районе скважины № 2 и ее обводненности соответственно. Для моделирования насыщенности использованы три модели: линейная (27), логарифмическая (28) и степенная (29). Для них рассмотрены два варианта: а) обучение до 7 месяцев и дальше переход на прогноз; б) обучение по всей истории разработки (11 месяцев). При обучении до 7 месяцев наилучший результат в прогнозе насыщенности показывает степенная модель. При обучении в течении всей истории наилучший результат показывает степенная модель, логарифмическая модель также дает хороший результат. При переходе от насыщенности к обводненности степенная модель проигрывает линейной как при обучении до 7 месяцев, так и при обучении в течение всей истории разработки.

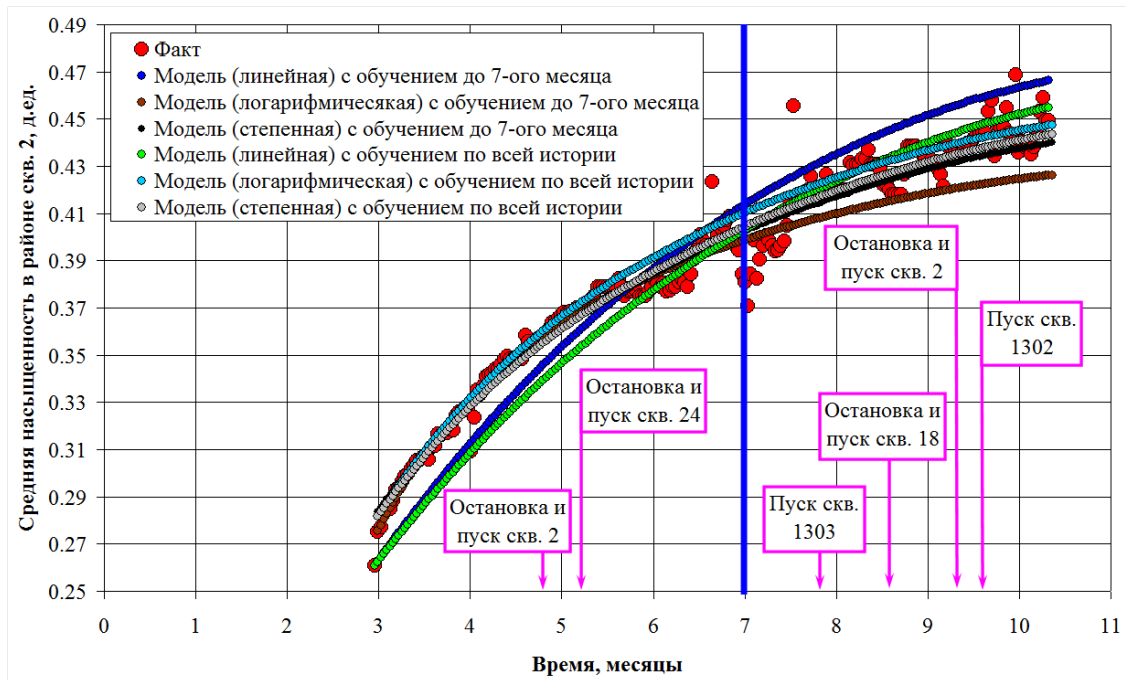


Рис. 10. Анализ средней насыщенности в районе скважины № 2

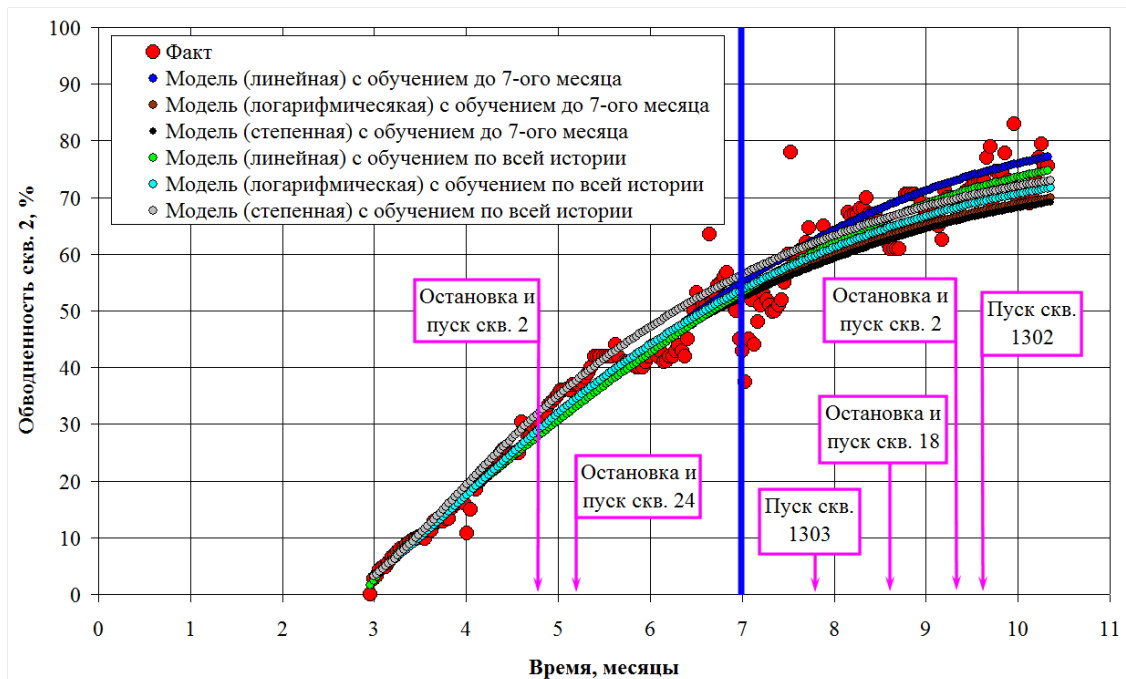


Рис. 11. Анализ обводненности скважины № 2

На рисунках 12 и 13 приведен анализ средней насыщенности в районе скважины № 24 и ее обводненности соответственно. Для моделирования насыщенности использованы те же три модели. Для них рассмотрены также два варианта. При обучении до 7 месяцев наилучший результат в прогнозе насыщенности показывает линейная модель. При обучении в течении всей истории наилучший результат показывает логарифмическая модель. При переходе от насыщенности к обводненности эта тенденция сохраняется, однако при обучении в течение всей истории разработки разница между моделями невелика.

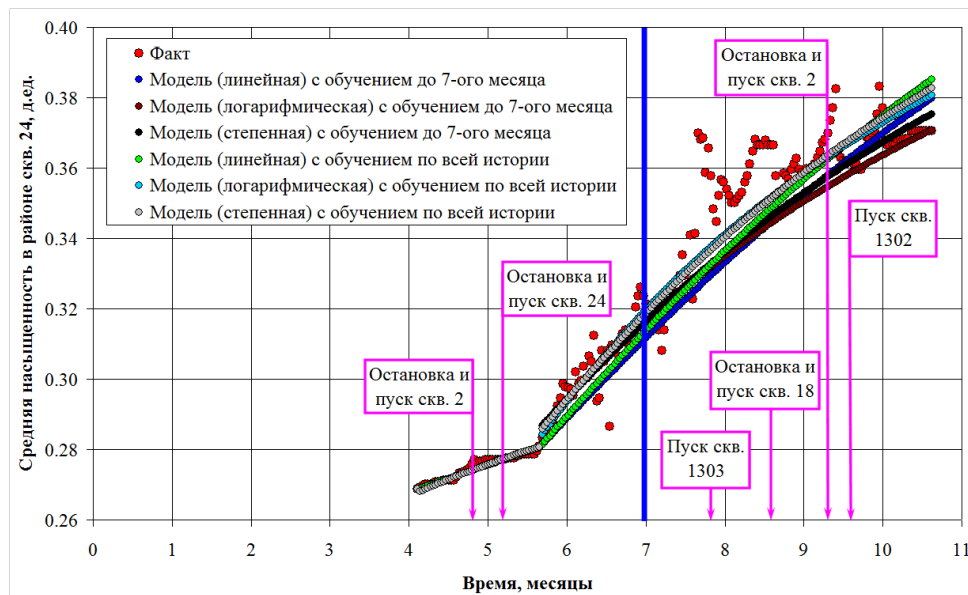


Рис. 12. Анализ средней насыщенности в районе скважины № 24

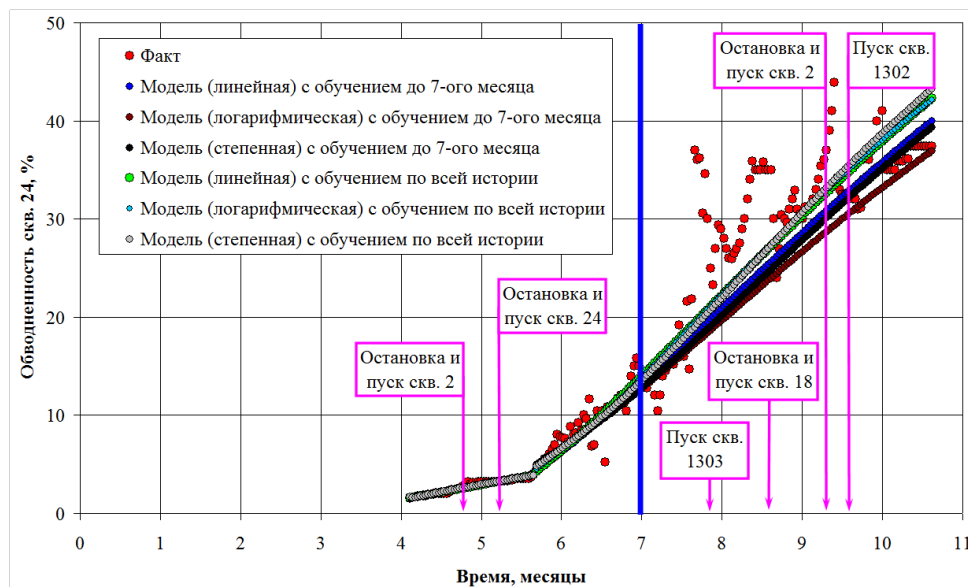


Рис. 13. Анализ обводненности скважины № 24

Следует отметить, что в отличие от дебита жидкости и забойного давления, влияние изменения режимов работы окружающих скважин на среднюю насыщенность в районе скважины и на обводненность практически отсутствует.

Заключение

Представленная односкважинная CRM-модель позволяет эффективно анализировать обводнение скважины законтурной водой в высокопроницаемом пласте.

Промысловый пример на месторождении Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции подтвердил практическую применимость модели для прогнозирования забойного давления, дебита жидкости и обводненности.

Модель показала более высокую точность прогнозов для скважины, удаленной от других работающих скважин, что уменьшает влияние изменения режимов работы окружающих скважин.

Логарифмическая и степенная модели насыщенности продемонстрировали лучшие результаты в прогнозах средней насыщенности и обводненности по сравнению с линейной моделью.

Влияние изменения режимов работы окружающих скважин на среднюю насыщенность в районе скважины и на обводненность практически отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данько М. Ю., Бриллиант Л. С., Завьялов А. С. Применение метода динамического материального баланса и CRM-метода (Capacitance-Resistive Model) к подсчету запасов ачимовских и баженовских коллекторов. *Недропользование XXI век*. 2019;4:76–85.
2. Ручкин А. А., Степанов С. В., Князев А. В. и др. Исследование особенностей оценки взаимовлияния скважин на примере модели CRM. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2018;4(4):148–168. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-148-168.
3. Хатмуллин И. Ф., Андрианова А. М., Маргарит А. С. Полуаналитические модели расчета интерференции скважин на базе класса моделей CRM. *Нефтяное хозяйство*. 2018;12:38–41. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-12-38-41.
4. Gladkov A., Sakhibgareev R., Salimov D. et al. Application of CRM for Production and Remaining Oil Reserves Reservoir Allocation In Mature West Siberian Waterflood Field. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow; 2017. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-aabstract/17RPTC/3-17RPTC/D033S021R005/244889>. DOI: 10.2118/187841-MS.
5. Yousefi S. H., Rashidi F., Sharifi M. et al. Prediction of Immiscible Gas Flooding Performance: a Modified Capacitance-Resistance Model and Sensitivity Analysis. *Petroleum Science*. 2019;16:1086–1104. DOI: 10.1007/s12182-019-0342-6.
6. Lasdon L., Shirzadi S., Ziegel E. Implementing CRM Models for Improved Oil Recovery in Large Oil Fields. *Optimization and Engineering*. 2017;18:87–103. DOI: 10.1007/s11081-017-9351-8.
7. Holanda R. W., Gildin E., Jensen J. L. et al. A State-of-the-Art Literature Review on Capacitance Resistance Models for Reservoir Characterization and Performance Forecasting. *Energies*. 2018;11(12):33–68. DOI: 10.3390/en11123368.
8. Sayarpour M. *Development and Application of Capacitance-Resistive Models to Water/CO₂ Floods. Dissertation by Ph.D.* Austin; 2008. 236 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1798.3847.
9. Степанов С. В., Поспелова Т. А. Новая концепция математического моделирования для принятия решений по разработке месторождений. *Нефтяное хозяйство*. 2019;4:50–53. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-4-50-53.
10. Olenchikov D., Posvyanskii D. Application of CRM-Like Models for Express Forecasting and Optimizing Field Development. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow; 2019. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-abstract/19RPTC/3-19RPTC/D033S022R008/219236>.
11. Sayarpour M., Kabir C. S., Lake L. W. Field Applications of Capacitance Resistive Models in Waterfloods. *SPE Reservoir Engineering*. 2009;12(6):853–864. DOI: 10.2118/114983-MS.
12. Sayarpour M., Zuluaga E., Kabir C. S. et al. The Use of Capacitance-Resistance Models for Rapid Estimation of Waterflood Performance and Optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009;69:227–238. DOI: 10.1016/j.petrol.2009.09.006.
13. Sayarpour M., Kabir C. S., Sepehrnoori K. et al. Probabilistic History Matching with the Capacitance-Resistance Model in Waterfloods: A Precursor to Numerical Modeling. *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. Tulsa; 2010. DOI: 10.2118/129604-MS.
14. Басниев К. С., Кочина И. Н., Максимов В. М. *Подземная гидродинамика*. М.: Недра; 1993. 416 с.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-03

О ПРИМЕНЕНИИ ПОНЯТИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА**О. П. Бобровская^{1,2,a}, Т. В. Гавриленко^{1,2,b}, В. А. Галкин^{1,2,c}**¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация² Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7045-9085>, o-bobrovskaya@mail.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru

Аннотация: для характеристики транспортного потока предлагается использовать понятие температуры из Больцмановской кинетической теории. Приведен вывод формулы условной температуры транспортного потока. Проведены эксперименты с различными стартовыми условиями моделирования: количеством агентов (транспортных средств) и их расположением. На графиках отражены характеристики транспортного потока: количество перестроений между полосами, зависимость интенсивности от плотности, средняя скорость, температура.

Ключевые слова: транспорт, температура транспортного потока, микроскопическая модель транспортного потока, температура газа.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (Выполнение фундаментальных научных исследований ГП 47) по теме № 0580-2021-0007 «Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления».

Для цитирования: Бобровская О. П., Гавриленко Т. В., Галкин В. А. О применении понятия температуры для описания транспортного потока. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):26–34. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-03.

Поступила в редакцию: 20.04.2024.

В окончательном варианте: 21.05.2024.

THE TRAFFIC FLOW TEMPERATURE CONCEPT**O. P. Bobrovskaya^{1,2,a}, T. V. Gavrilenko^{1,2,b}, V. A. Galkin^{1,2,c}**¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation² Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7045-9085>, o-bobrovskaya@mail.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru

Abstract: this paper proposes using the concept of temperature from Boltzmann’s kinetic theory to characterize transport flow. We derive a formula for the conditional temperature of the transport flow. Experiments are conducted with various initial conditions, including the number of agents (vehicles) and their locations. The results, presented in graphs, display key characteristics of the transport flow: the number of lane-to-lane conversions, the intensity-density relationship, the average speed, and the temperature.

Keywords: temperature, transport flow temperature, microscopic traffic flow model, gas temperature.

Acknowledgements: this study is the 47 GP government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, project No. 0580-2021-0007 Advancing Distribution System Simulation and Computation Methods.

Cite this article: Bobrovskaya O. P., Gavrilenko T. V., Galkin V. A. The Traffic Flow Temperature Concept. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):26–34. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-03.

Original article submitted: 20.04.2024.

Revision submitted: 21.05.2024.

Введение

Транспортный поток, представляющий собой движение транспортных средств, является предметом активного исследования. Изучаются проблемы сбора характеристик реального транспортного потока [1], имитационного моделирования [2], управления потоком [3]. Целью исследований являются улучшение дорожной обстановки, выявление проблем транспортной сети и поиск их решений, автоматизация транспортных перевозок.

Изменения скоростей и полос/коридоров, происходящие при движении транспортных средств по треку, можно назвать хаотичными. В подтверждение этому в работе [4] отмечается, что транспортная система городского трафика в общем случае является хаотической системой. Кроме того, в теории транспорта имеется традиция выделения нескольких фаз транспортного потока, что является явной параллелью с моделями, рассматриваемыми в термодинамике. Выделялись 2 фазы: свободный поток и заторный (пробка), которые отражает фундаментальная диаграмма. Позже Б. Кернером была предложена трехфазная модель с дополнительной фазой синхронизированного потока [5].

В физическом смысле понятие температуры связано со средней кинетической энергией [6]. В физике хаотичность связана с температурой и внутренней энергией потока [7]. Возможность рассмотрения транспортного потока как аналога потока частиц жидкости или газа в физике уже находила отражение в некоторых исследованиях. В работе [8] предпринята попытка использовать термодинамические методы для анализа нефизических процессов на примере транспортного потока и проведены эксперименты с данными из Голландского тоннеля. Авторы [9] исследуют поток автоматизированных транспортных средств в открытой системе как аналог потока зернистой среды. Далее предлагается для характеристики состояния транспортного потока применить метод оценки температуры газа.

Температура как характеристика транспортного потока

Представим агентов (автомобили в транспортном потоке) в виде частиц, которые имеют одинаковые положительные массы. Тогда плотность распределения агентов в исследуемой области (рис. 1) будет определяться [10]:

$$\rho = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^n m_i, \quad (1)$$

где N — общее количество частиц в пространстве; n — количество частиц в исследуемой области (агенты, расположенные от -2 м до 2 м); S — площадь среза исследуемой области (количество коридоров); m — масса частицы в пространстве.

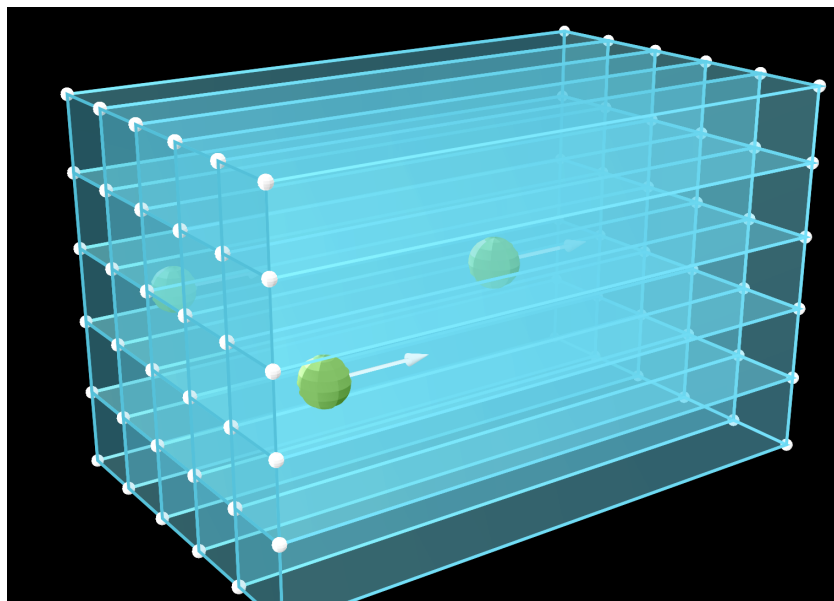


Рис. 1. Пример исследуемой области маршрута: 25 доступных коридоров, расположенных квадратом 5x5; с 3-мя агентами

Определив статистическую оценку среднекинетической энергии хаотического движения частицы с помощью (2), получаем формулу для определения давления (3):

$$\delta^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^1 \left(\sum_{i=1}^n \left(\bar{v}_i^{(j)} \right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \bar{v}_i^{(j)} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где $v_i^{(j)}$ — (продольная проекция скорости) скорость движения i -го агента по траектории;

$$P = \frac{\delta^2}{3}. \quad (3)$$

Классическое соотношение Клапейрона–Менделеева для определения состояния идеального газа:

$$P = R\rho T, \quad (4)$$

где R — газовая постоянная; ρ — плотность; T — температура.

В результате получим условную температуру потока:

$$T = \frac{NS\delta^2}{3Rn}. \quad (5)$$

Можем увидеть и оценить динамику ее изменений: чем выше температура, тем сильнее хаотичность движения агентов в потоке [11].

Классификатор по температуре. Температура транспортного потока

Из приведенных выше уравнений можно сделать следующие выводы:

1. Если температура равна нулю, то поток «холодный». Это значит, что все агенты либо стоят на месте, либо двигаются равномерно.
2. Ненулевая температура свидетельствует о возмущениях в потоке. Единичные агенты или их множество двигаются в транспортном потоке с ускорением.

Значения температуры потока можно использовать в качестве триггерного элемента для мониторинга потока и управления. Резко возрастающее значение температуры или превышение заданного значения служит сигналом, чтобы обратить внимание на дорожную обстановку и принять необходимые меры. Таким возмущением может являться опасное вождение или превышение скорости со стороны одного из агентов.

При малом количестве отслеживаемых агентов изменение поведения одного из них сильнее влияет на изменения значения температуры. Изменение количества агентов в наблюдаемой области может вызвать колебания температуры, если эта область влияет на их поведение (перекресток, светофор, место, в котором образовалась пробка).

Численное моделирование

Модель транспортного потока, основанная на потенциале действия, описана в [12]. Она была разработана для обеспечения движения транспортных средств без столкновений. Транспортные средства представлены частицами, притягивающимися или отталкивающимися друг от друга в зависимости от расстояния между ними. Траектория для движения агентов была строго задана окружностью с несколькими коридорами, в которые возможны перестроения.

Ниже результаты моделирования для 1000 агентов, в начальный момент времени равномерно распределенных по одной полосе (снизу, слева квадрата) и имеющих начальную скорость 8 м/с. Радиус трека 36 м. Количество доступных коридоров 100, расположенных квадратом 10x10. Время моделирования 2 мин. Ограничение скорости 8 м/с. В начале моделирования агенты останавливались из-за малых дистанций согласно правилам алгоритма и перестраивались по возможности в соседние коридоры (на самом первом шаге в верхний и правый коридоры с одинаковой вероятностью). Результаты моделирования в виде графиков представлены на рис. 2.

Количество перестроений увеличивается за первую минуту до 20 ед./с в среднем и спадает на пару единиц к концу второй минуты. На фундаментальной диаграмме отражается свободный поток.

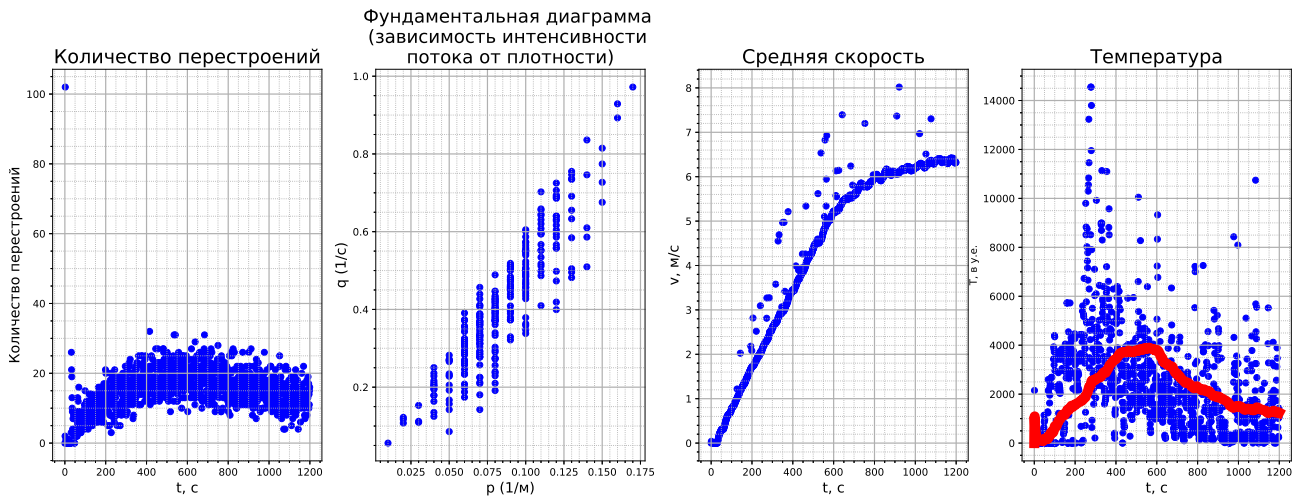


Рис. 2. 1000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

Средняя скорость поднимается до 6 м/с. Температура повышается за 1/6 времени моделирования до 4000, а затем плавно снижается до 1000; при этом наблюдаются выбросы. На графике представлена кривая скользящего среднего с окном 350, сглаживающая эти выбросы.

Следующий эксперимент проводился при тех же условиях, но начальное положение агентов изменено с одного коридора на равномерное распределение по всем 100 коридорам (рис. 3).

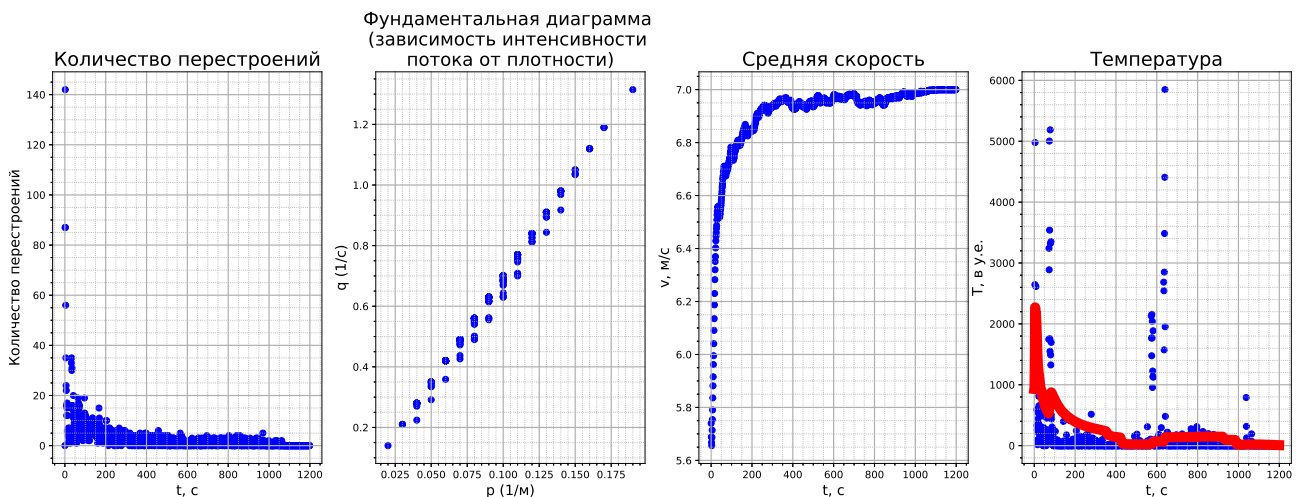


Рис. 3. 1000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

Так как агенты изначально были равномерно распределены по треку, количество перестроений быстро достигает стабильного значения около 15 ед. в с. На фундаментальной диаграмме отражается свободный поток. Средняя скорость сразу приближается к значению 7 м/с и больше не возрастает. Некоторые колебания и выбросы свидетельствуют о краткосрочных и малых по объему заторах. Низкое значение температуры (за исключением тех же выбросов) свидетельствует о движущихся равномерно и свободно (без взаимодействий) агентах.

При тех же начальных условиях количество агентов было увеличено в 2 раза. Результаты моделирования для начального положения на одной полосе и равномерного распределения по всем полосам представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Увеличение количества агентов привело к увеличению количества перестроений и большему разбросу значений на фундаментальной диаграмме. Уменьшилось значение максимально достигаемой средней скорости. Значения температуры стали больше и с большим разбросом. Отсутствие перегиба на графике средней скорости (рис. 4) свидетельствует о том, что максимально возможная средняя скорость потока не достигается за время моделирования, и может объясняться тем, что не все агенты начали движение.

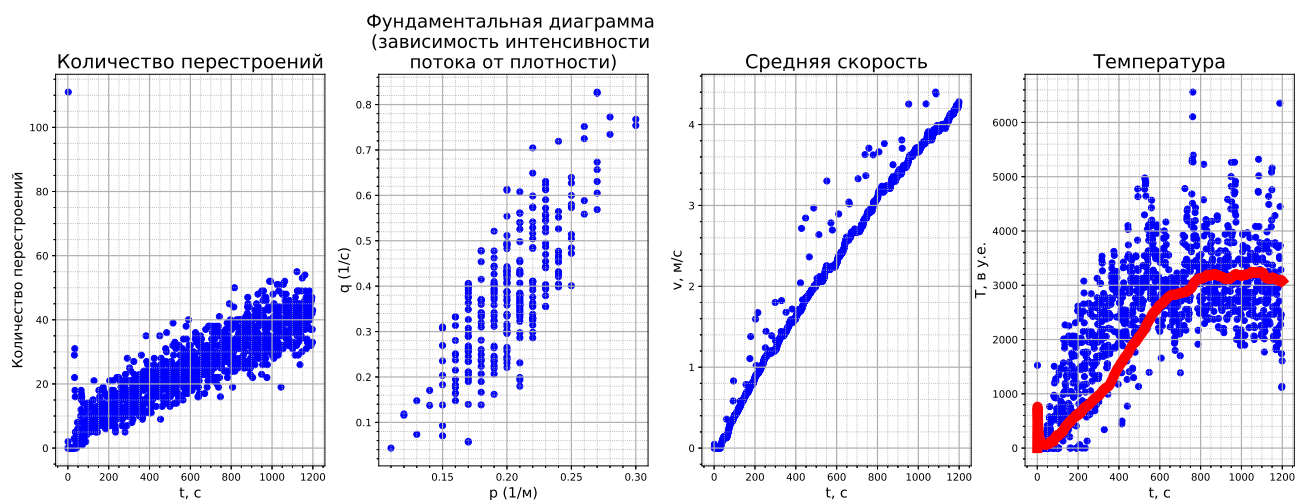


Рис. 4. 2000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

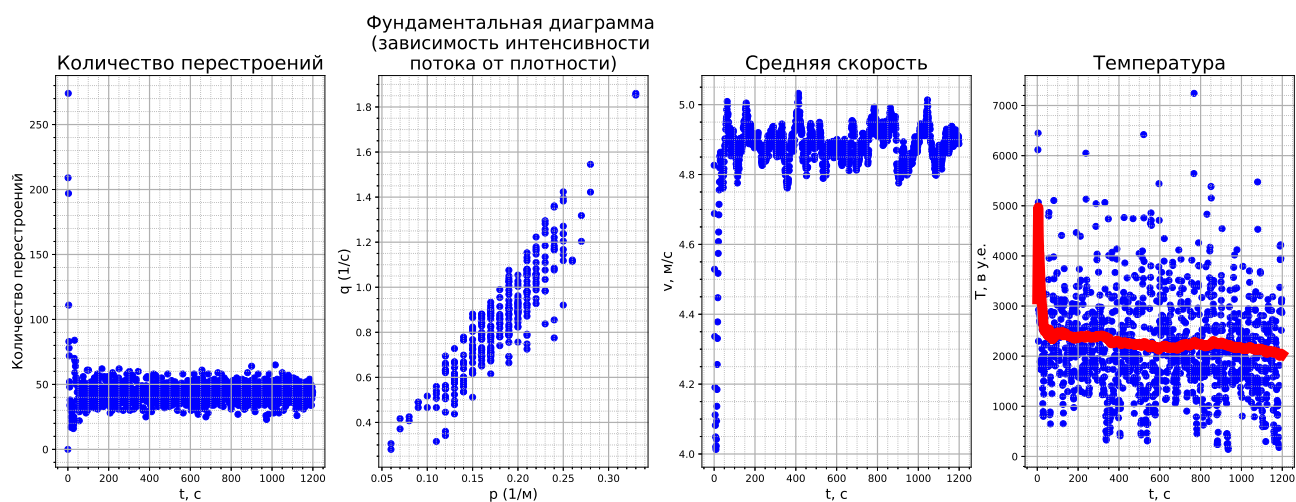


Рис. 5. 2000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

На рис. 6 и 7 представлены запуски 4000 агентов, изначально расположенных в одном коридоре и с равномерным начальным распределением по всем коридорам, соответственно.

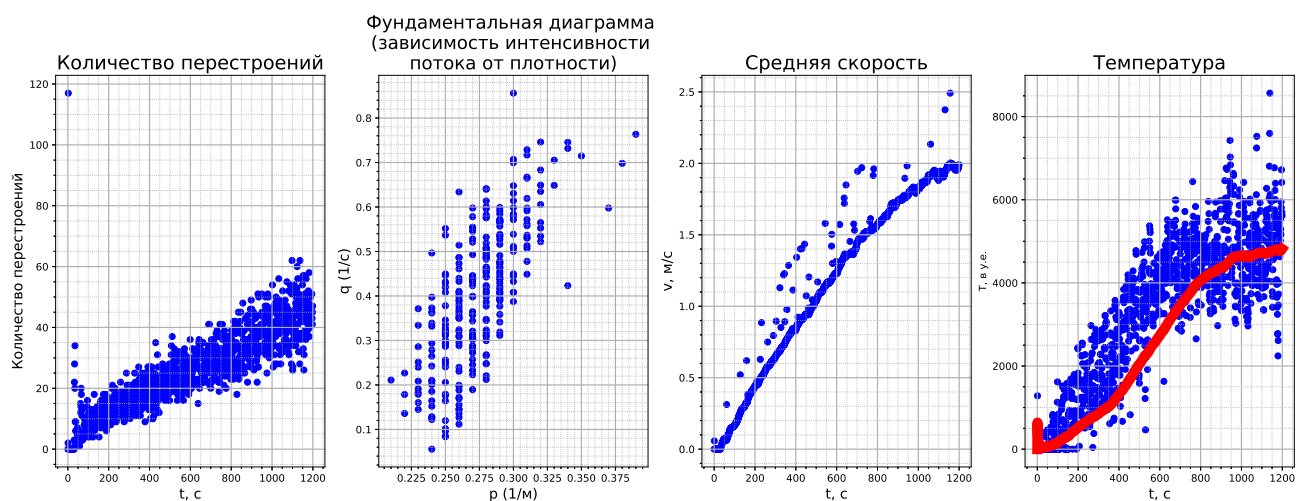


Рис. 6. 4000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

В первом случае агенты перестраиваются, чтобы занять все доступное пространство, в процес-

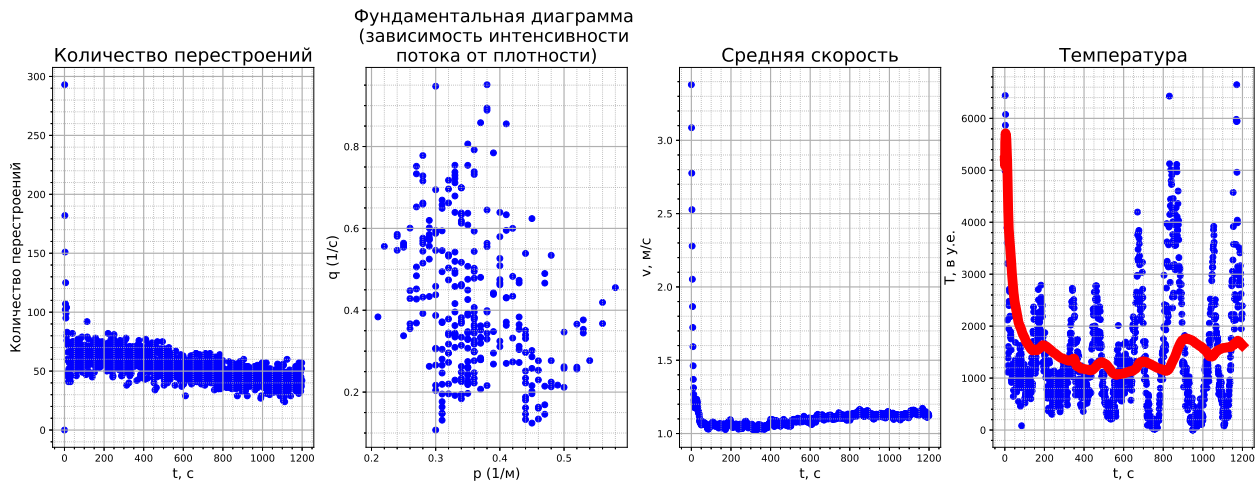


Рис. 7. 4000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

се появляется все больше агентов, движущихся с ненулевой скоростью, поэтому температура возрастает. Во втором случае свободного пространства, которое можно занять, нет, поэтому возможности для сильного разброса в скоростях у агентов тоже нет, соответственно, температура возрастает не столь сильно.

На рис. 7 значение средней скорости в отличие от рис. 5 не увеличивается, а уменьшается после запуска. Значение средней температуры стало меньше, при этом выделились заметные колебания. На фундаментальной диаграмме видно, что поток перестал быть свободным и приближается к заторному.

Количество агентов задано равным 5000, изначально все агенты находятся в одном коридоре (рис. 8).

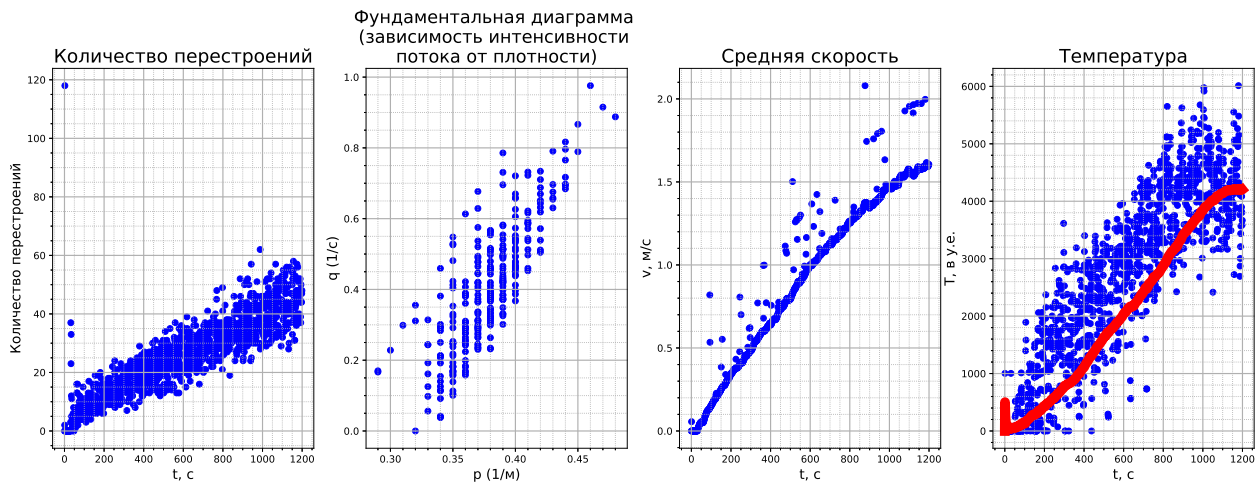


Рис. 8. 5000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

По сравнению с 4000 агентами на рис. 6 увеличилась плотность потока. При этом сохранилось значение максимальной интенсивности. Соответственно, уменьшились максимально достигаемые за время моделирования средняя скорость и температура.

Количество агентов задано равным 5000, начальное распределение равномерное по всем коридорам (рис. 9).

В начальный момент времени у агентов есть положительная начальная скорость и немного пространства впереди. Но затем большинство агентов большую часть времени моделирования стоят на месте, поэтому и средняя скорость, и температура находятся около нуля.

Количество агентов было увеличено в 2 раза до 10000 (10^4). В момент старта все агенты располагались в одном коридоре, при этом под конец 2-й мин многие там и остались. Результаты представлены на рис. 10.

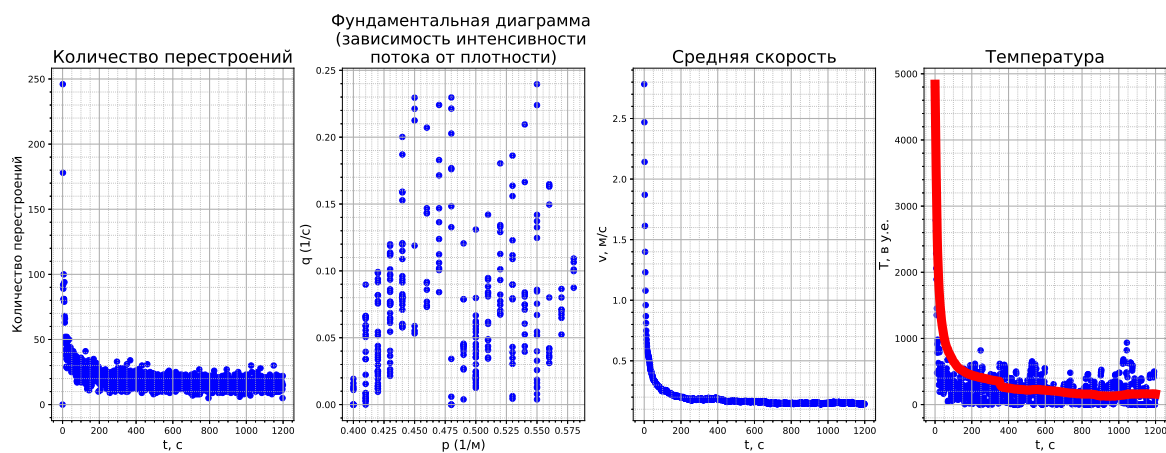


Рис. 9. 5000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

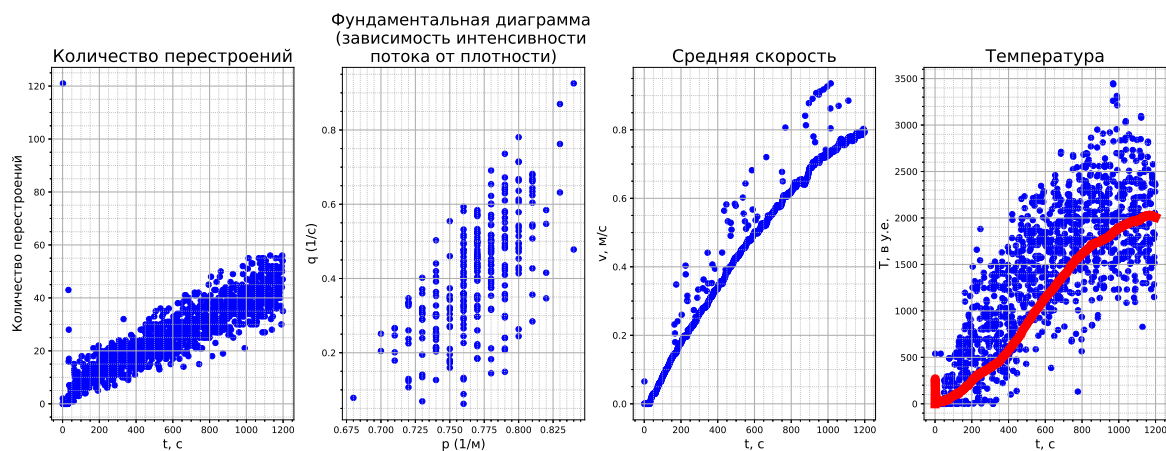


Рис. 10. 10 000 агентов, старт с одной полосы. Красным выделена средняя температура потока

Увеличение в 2 раза количества агентов не повлияло на количество перестроений. Значение максимальной средней скорости агентов уменьшилось в 2 раза по сравнению с рис. 8. В 2 раза уменьшилась температура потока.

Запуск 10000 агентов, равномерно распределенных по всем полосам, представлен на рис. 11.

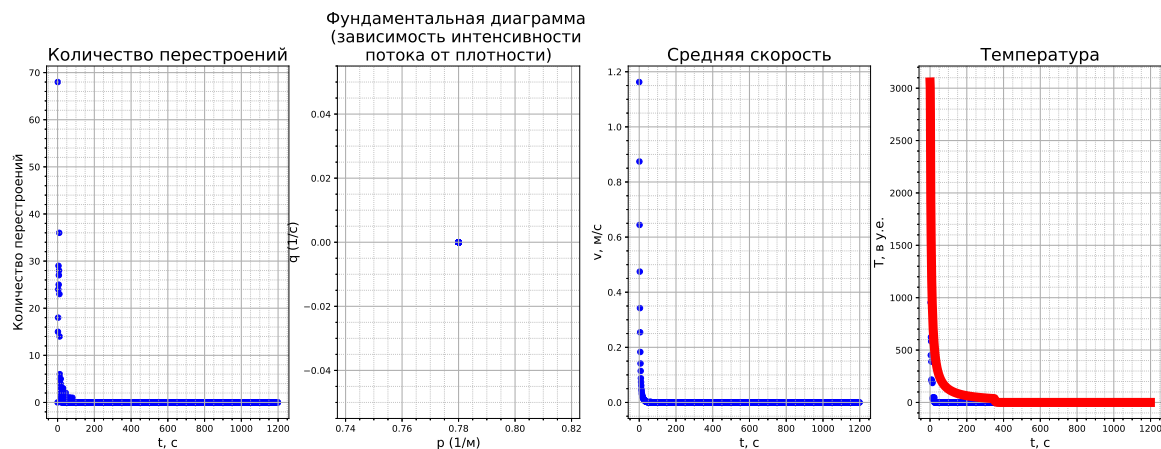


Рис. 11. 10 000 агентов, старт со всех полос. Красным выделена средняя температура потока

Движение наблюдается на протяжении около 100 с, поскольку в начальный момент времени агенты имеют скорость 8 м/с. Замедление из-за большой плотности приводит к тому, что все агенты останавливаются.

Обсуждение

В таблице ниже приведены обобщенные данные со стартовыми условиями экспериментов, установившимися характеристиками потока и температурой для 3-х равных промежутков времени 2-минутного интервала моделирования.

Таблица

Сводка результатов

Кол-во агент.	Кол-во старт. полос	Макс. плотн., 1/м	Макс. интенс., 1/с	1/3 Ср. темп., К	2/3 Ср. темп., К	3/3 Ср. темп., К
1000	1	0.17	1.0	4000	2000	1500
1000	100	0.18	1.3	200	200	0
2000	1	0.30	0.8	1500	3000	3000
2000	100	0.30	1.6	2300	2200	2000
4000	1	0.35	0.8	1500	4000	4800
4000	100	0.50	0.9	1200	1200	1500
5000	1	0.45	0.9	1000	3000	4200
5000	100	0.58	0.2	400	200	200
10000	1	0.83	0.8	500	1600	2000
10000	100	0.78	0.0	0	0	0

Два нулевых значения температуры соответствуют свободному потоку, когда 1000 агентов равномерно распределены на 100 полосах и движутся со скоростью 7 м/с, и полномасштабной пробке, когда 10000 агентов стоят на месте.

Можно отметить возрастание температуры с течением времени для всех случаев старта агентов с одной полосы. При этом старт со всех полос, в основном, приводил к уменьшению температуры в процессе моделирования.

Заключение

Была рассмотрена условная температура транспортного потока в качестве полезной характеристики для понимания происходящих в транспортном потоке взаимодействий транспортных средств.

Приведены графики, характеризующие состояние транспортного потока для заданной модели движения агентов без столкновений при различных начальных условиях моделирования. Изменения, происходящие в процессе моделирования, отслеживались по временным графикам количества перестроений и средней скорости, фундаментальной диаграмме. График температуры потока содержал информацию, отсутствующую на предыдущих графиках.

Это может быть полезно при мониторинге дорожной сети и управлении ею.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мосева М. С. О методах сбора и анализа основных характеристик транспортного потока. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*. 2022;16(2):29–38.
2. Бабичева Т. С. Транспортные потоки: математическое и имитационное моделирование. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2015;2(11):290–296.
3. Дивеев А. И., Софронова Е. А., Михалев В. А. Нейроадаптивное управление транспортными потоками в сети городских дорог. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2018;1:49–58. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-1-49-58.
4. Колесниченко А. В. Самоорганизация стохастической транспортной системы под влиянием индуцированных мультипликативным шумом фазовых переходов. *Матем. моделирование*. 2015;27:11:120–134.
5. Jin C. J., Wang W., Jiang R., Wang H. An Empirical Study of Phase Transitions from Synchronized Flow to Jams on a Single-Lane Highway. *J. Phys. A: Math. Theor.* 2014;47(12):125104. DOI: 10.1088/1751-8113/47/12/125104.

6. Черчиньяни К. *Математические методы в кинетической теории газов* / пер. с англ. В. С. Галкина [и др.] ; под ред. М. Н. Когана. М.: Мир; 1973. 245 с.
7. Галкин В. А. *Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2011. 408 с.
8. Reiss H., Hammerich A. D., Montroll E. W. Thermodynamic Treatment of Nonphysical Systems: Formalism and an Example (Single-Lane Traffic). *Journal of Statistical Physics*. 1986;42(3–4):647–687. DOI: 10.1007/BF01127733.
9. Larraga M. E., del Rio J. A., Mehta A. Two Effective Temperatures in Traffic Flow Models: Analogies with Granular Flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002;307(3):527–547. DOI: 10.1016/S0378-4371(01)00583-0.
10. Быковских Д. А., Галкин В. А., Гавриленко Т. В. Моделирование движения невзаимодействующих частиц в пространстве. *Северный регион: наука, образование, культура*. 2015;2(32):48–55.
11. Еловой С. Г., Гавриленко А. В. Информационная система анализа состояния сердечно-сосудистой системы на основе гидродинамических показателей. *Вестник кибернетики*. 2016;1(21):114–119.
12. Бобровская О. П., Гавриленко Т. В., Галкин В. А. Модель транспортного потока, основанная на взаимодействии частиц с потенциалом действия. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2022;40(3):72–87.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-04

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ С РАЗЛИЧНЫМИ КОНФИГУРАЦИЯМИ ПОЛЕЙ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ТЯЖЕЛОЙ ПРИМЕСИ

А. Д. Смородинов^{1,2,a}, Т. В. Гавриленко^{1,2,b}, А. О. Дубовик^{1,2,c}, Д. А. Моргун^{1,2}

¹ Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-1844>, sachenka_1998@mail.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

^c ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4158-9646>, alldubovik@gmail.com

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0692-1583>, morgun_da@office.niisi.tech

Аннотация: в работе представлен метод подготовки данных и последующая визуализация решения задачи Коши, которая возникает при моделировании динамики примеси в потенциальных течениях, а также при моделировании динамики примеси в вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической области течения. Задача Коши решалась с использованием метода Рунге–Кутты 4-го порядка точности. Разработано программное обеспечение для решения задачи Коши в трехмерном пространстве, которое в автоматическом режиме визуализирует полученные результаты. Такая постановка задачи может применяться для моделирования динамики течения безынерционной недиффундирующей примеси, растворенной в жидкости, в случае, когда векторное поле $\vec{V}$, являющееся решением задачи Коши, удовлетворяет уравнениям гидродинамики. Задача Коши рассматривается на целом множестве начальных данных, задающем поле распределения примеси в начальный момент времени. Разработанное программное обеспечение позволяет проводить вычисления с распределением по доступным ядрам ЭВМ на основе технологии OpenMP. В качестве средства визуализации использовалась библиотека MathGL. Представлены результаты тестирования программного обеспечения.

Ключевые слова: математическое моделирование, уравнение Навье–Стокса, метод Рунге–Кутты, задача Коши.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Для цитирования: Смородинов А. Д., Гавриленко Т. В., Дубовик А. О., Моргун Д. А. Реализация программного обеспечения для решения задачи Коши с различными конфигурациями полей начальных данных и визуализации результатов математического моделирования течения тяжелой примеси. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):35–45. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-04.

Поступила в редакцию: 06.05.2024.

В окончательном варианте: 10.06.2024.

SOFTWARE FOR SOLVING THE CAUCHY PROBLEM AND VISUALIZING HEAVY IMPURITY FLOW SIMULATION RESULTS

A. D. Smorodinov^{1,2,a}, T. V. Gavrilenko^{1,2,b}, A. O. Dubovik^{1,2,c}, D. A. Morgun^{1,d}

¹ Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-1844>, sachenka_1998@mail.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

^c ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4158-9646>, alldubovik@gmail.com

^d ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0692-1583>, morgun_da@office.niisi.tech

Abstract: this paper presents a method for data preparation and visualization of the solution to the Cauchy problem, which arises in simulating the dynamics of impurities in potential flows and in a viscous incompressible liquid within a cylindrical flow region. The Cauchy problem was solved using the 4th-order Runge-Kutta method. We developed software that solves the Cauchy problem in 3D space and automatically visualizes the results. This method can simulate the dynamics of an inertialess, non-diffusing impurity in a liquid, provided that the vector field $\vec{V}$, which solves the Cauchy problem, satisfies the hydrodynamics equations. The problem is considered for the entire set of initial data defining the impurity distribution at the initial time. The software performs calculations distributed over available computer cores using OpenMP. The MathGL library was employed for visualization. The paper also presents the results of software testing.

Keywords: simulation, Navier-Stokes equation, Runge-Kutta method, Cauchy problem.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, project No.1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Smorodinov A. D., Gavrilenko T. V., Dubovik A. O., Morgun D. A. Software for Solving the Cauchy Problem and Visualizing Heavy Impurity Flow Simulation Results. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):35–45. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-04.

Original article submitted: 06.05.2024.

Revision submitted: 10.06.2024.

Одной из ключевых задач в науке является качественное и эффективное представление результатов математического моделирования. Качественная визуализация позволяет оценить эффективность решения, определить наличие выбросов, ошибок и несоответствие параметризации.

В работе представлен метод подготовки данных и последующая визуализация решения задачи Коши, которая возникает при исследовании различных процессов, которые могут быть определены дифференциальным законом эволюции и начальным состоянием. В работе задача Коши используется при моделировании двух процессов: первый — моделирование динамики примеси в потенциальных течениях, второй — моделирование динамики примеси в вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической области течения. Для расчетов применялся метод Рунге–Кутты 4-го порядка точности [1–3].

Разработано программное обеспечение для решения трехмерной задачи Коши следующего вида:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{V}(\vec{x}), \quad (1)$$

начальное условие вида:

$$\vec{x}_{t=0} = (x_1^0, x_2^0, x_3^0),$$

где поле $\vec{V}(\vec{x})$ — произвольная функция, и в автоматическом режиме визуализирует полученные результаты без прямого участия исследователя. Уравнение (1) может быть использовано для описания динамики течения безынерционной недиффундирующей примеси, растворенной в жидкости, в случае, когда векторное поле $\vec{V}(\vec{x})$ удовлетворяет уравнениям гидродинамики. Тогда уравнение (1) рассматривается на целом множестве начальных данных, задающем поле распределения примеси в начальный момент времени.

Для проведения расчетов с распределением вычислений по доступным ядрам вычислительной машины использовалась технология OpenMP [4]. В качестве средства визуализации использовалась библиотека MathGL, которая предназначена для создания качественной научной графики на различных платформах, для быстрой обработки и отображения больших массивов данных. Кроме того, данная библиотека позволяет работать в графическом и консольном режимах и легко интегрируется в различные программные обеспечения [5].

В качестве системы разработки и тестирования была использована ЭВМ на базе процессора AMD Ryzen Threadripper 2990WX 32-Core-Processor, 32 Гб оперативной памяти с частотой 2 400 МГц под управлением ОС Debian.

Важной составляющей любого исследования является сохранение результатов и его повторяемость. Для этого в разработанном программном обеспечении предусмотрена возможность ввода/вывода и сохранения параметров эксперимента в файл конфигурации.

В программе модуль решения задачи Коши отделен от модуля визуализации. Параметры визуализации, такие как частота кадра, задаются в файле конфигурации. Общая схема работы программы решения задачи Коши представлена на рисунке 1.

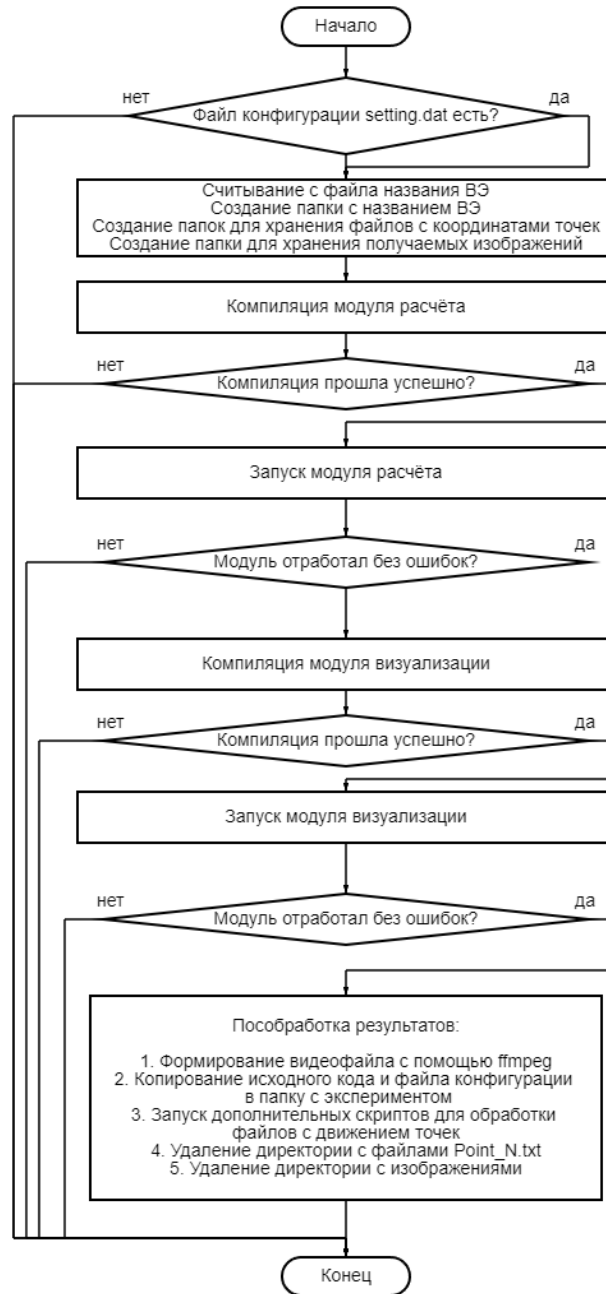


Рис. 1. Схема работы программы решения задачи Коши

Выполнение программы начинается с запуска скрипта автоматизации процессов расчета и визуализации. Работы данного программного комплекса можно условно разделить на 5 частей:

1. Подготовка параметров вычислительного эксперимента.
2. Решение задачи Коши.
3. Визуализация полученных данных.
4. Формирование видеофайлов из кадров для каждого момента времени.
5. Очистка временных файлов.

1 и 5 пункты выполняются средствами, предоставляемыми командной оболочкой `bash`. 4 пункт реализуется с использованием набора свободных библиотек для работы с аудио- и видеофайлами `Ffmpeg`.

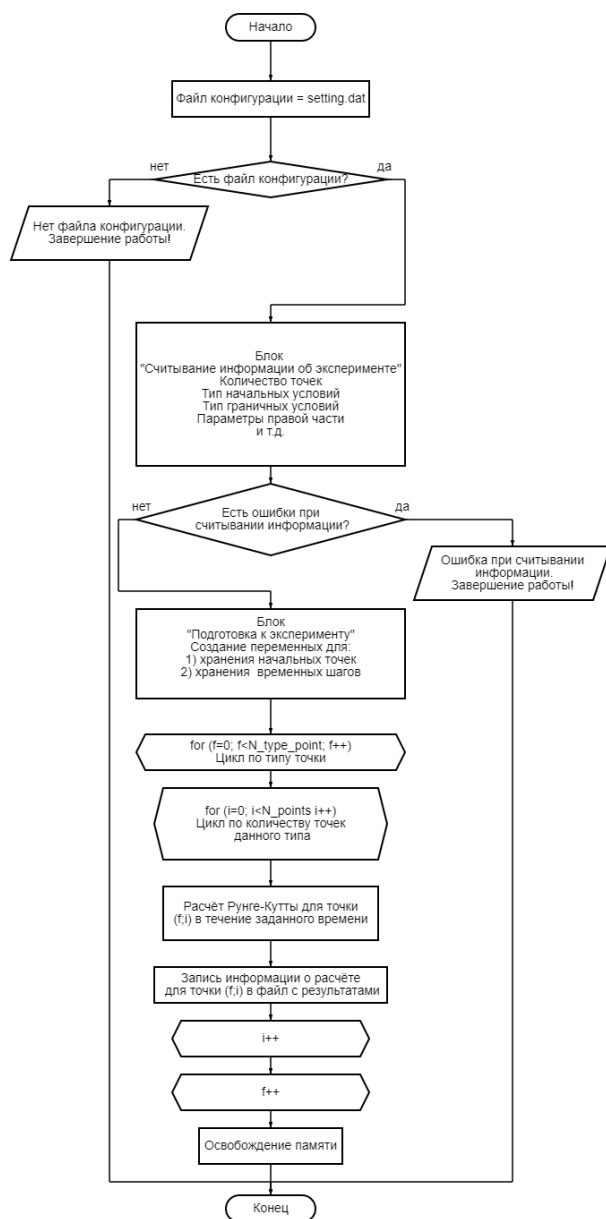


Рис. 2. Схема работы модуля расчета

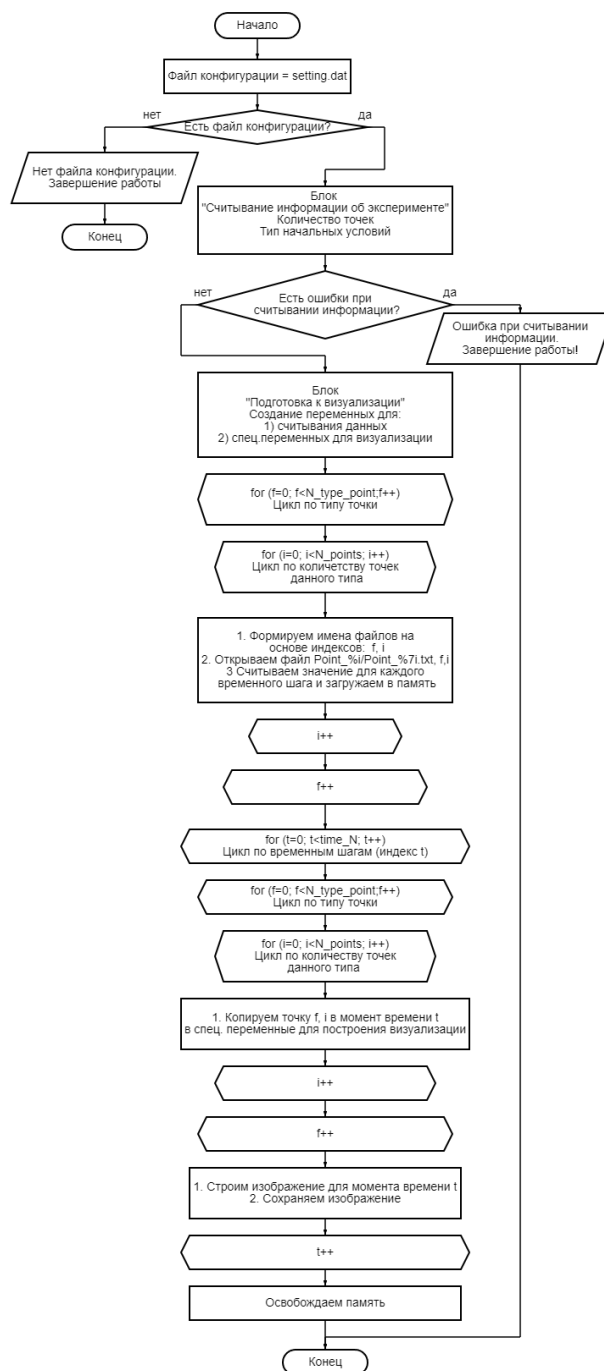


Рис. 3. Схема работы модуля визуализации

Схема работы 2 части программного комплекса представлена на рисунке 2. Работу данного модуля можно разделить на несколько этапов:

1. Ввод параметров расчета задачи.
2. Выделение памяти для вычислительного эксперимента.
3. Определение начальных точек согласно правилам, описанным в файле конфигурации.
4. Решение задачи Коши для каждой начальной точки и сохранение результатов в файл.
5. Освобождение памяти.

Решение задачи Коши для каждой начальной точки распределено между потоками процессора, каждую задачу решает один поток.

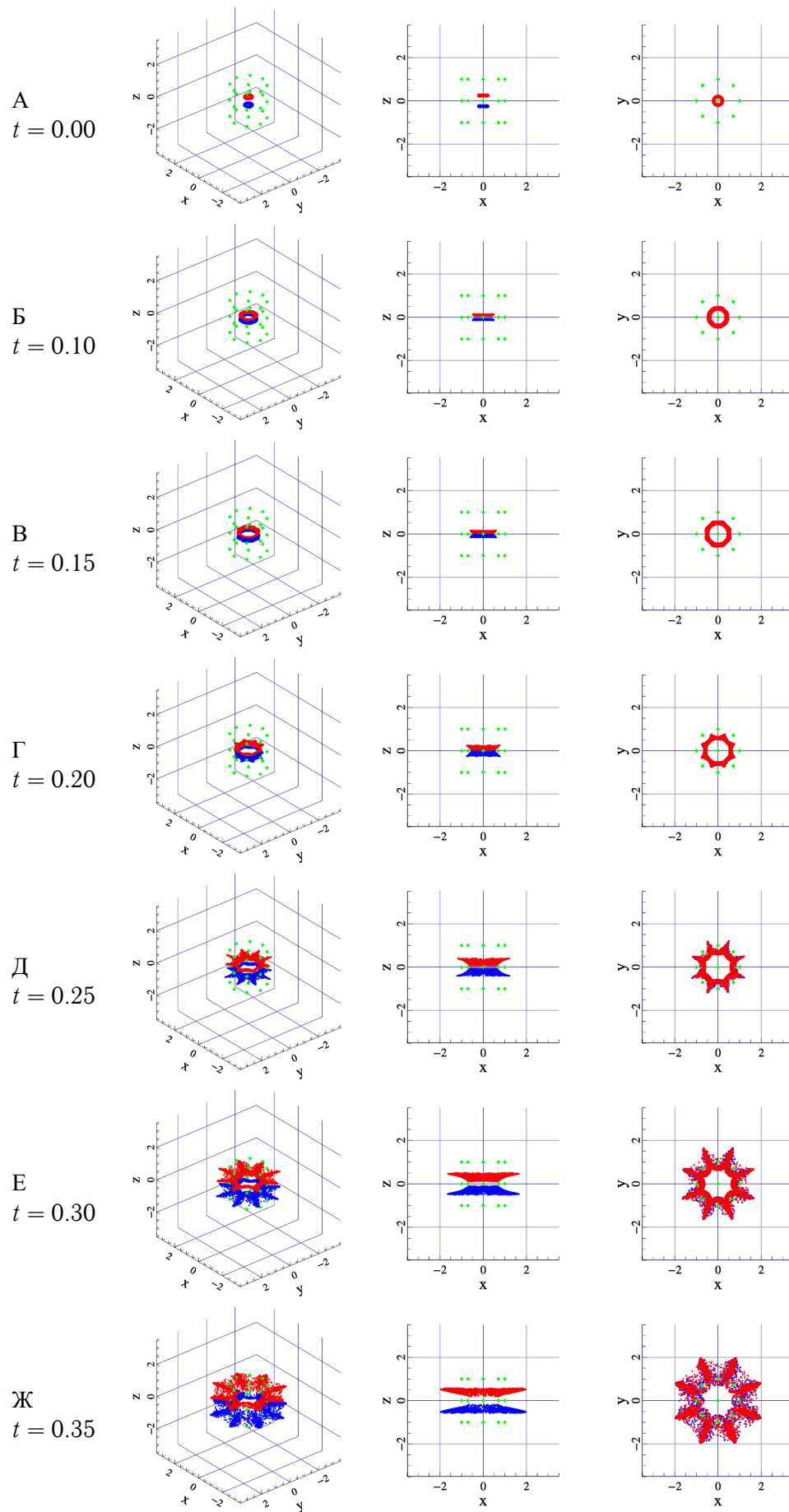


Рис. 4. Математическое моделирование столкновения двух потоков, заданного двумя мощными источниками и 24 источниками меньшей мощности, $0 \leq t \leq 0.35$

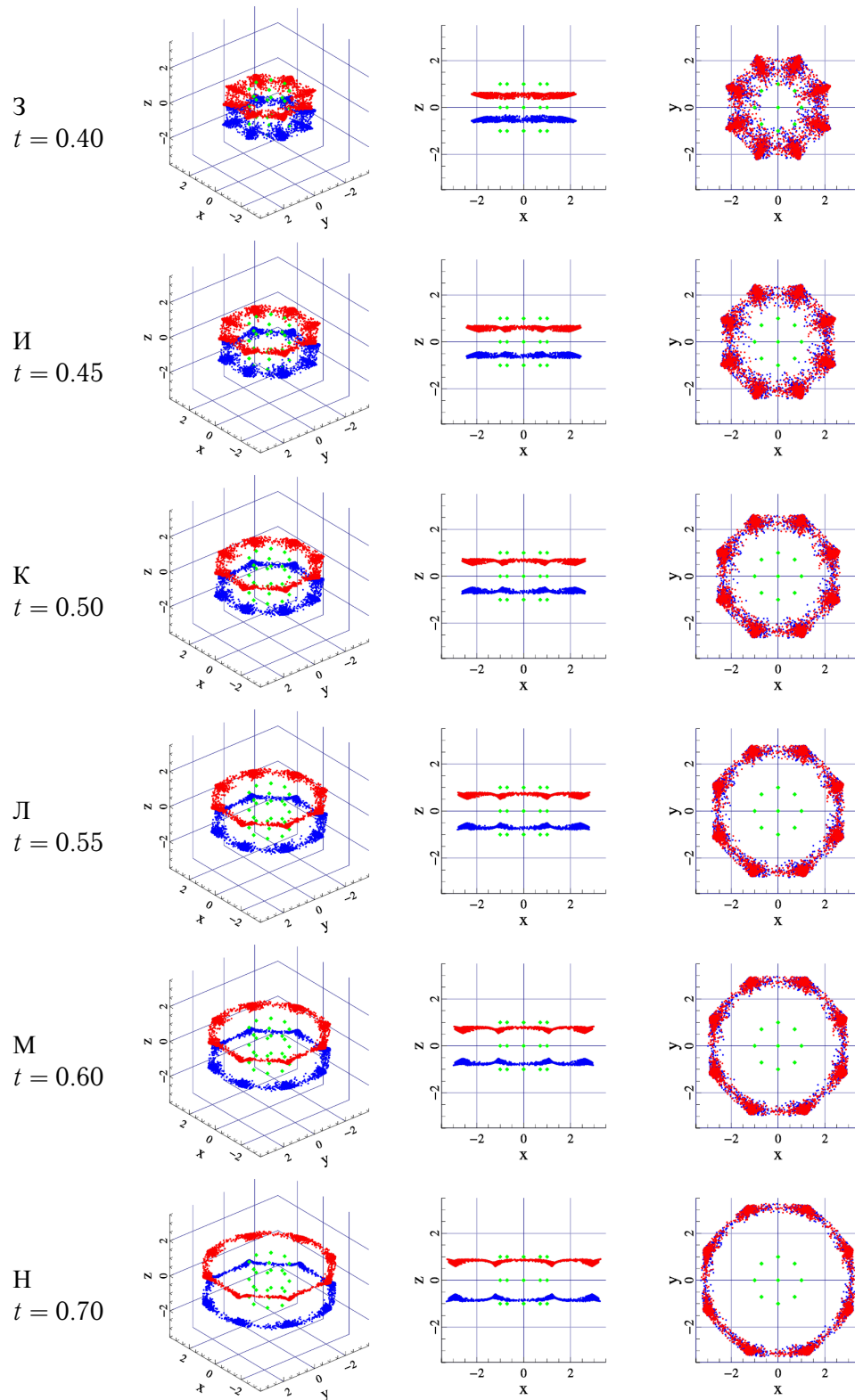


Рис. 5. Математическое моделирование столкновения двух потоков, заданного двумя мощными источниками и 24 источниками меньшей мощности, $0.40 \leq t \leq 0.70$


```

Name_experiment1: 26_istok_two_tor
#Условия_для_времени
Start_time: 0.0
End_time: 0.7
Step_time: 0.001
N_time: 701
#Количество_точек
#Если_0_то_одно_кол-во_точек_для_каждого_цвета
#Если_1_разное_кол_то_точек_для_каждого_цвета
all_type: 1
#Если_0_то_отсюда_считаем_количество_типов_точек
#Если_1_то_отсюда_считаем_количество_типов_и_сразу_кол_кол_точек
num_type_point: 2
5000 5000
#Если_0_то_одно_КОЛВО_ТОЧЕК_ЧИТАЕМ_ОТСЮДА
num_point: 644
#Тип_расположения_начальных_точек
type_pi: 3
#Тип_правой_части
type_rp: 2
#Сохраняем_каждый_X_шаг_по_времени
Time_save: 1
#Строим_каждую_X_картинку_по_времени
Time_save_img: 1

```

Рис. 6. Файл конфигурации для 1-го теста

Схема работы модуля визуализации представлена на рисунке 3. В работе модуля выделяются следующие этапы:

1. Ввод параметров экспериментов.
2. Выделение памяти для загрузки результатов прошлого расчета.
3. Визуализация расчетов для каждого момента времени и сохранение в формате png.
4. Освобождение памяти.

Данный модуль в некоторой части совпадает с модулем расчета, их можно объединить, чтобы визуализация выполнялась сразу после расчета. Но применяемый подход позволяет продолжить расчеты в случае сбоя, а также делает универсальным данный программный комплекс. При необходимости пользователь может провести только расчет, а затем визуализировать результат в любом другом визуализаторе, например, Paraview. В то же время пользователь, наоборот, может воспользоваться только визуализатором для визуализации полученных им данных.

Для тестирования представленной программы будем решать задачу, описываемую системой уравнений гидродинамики с условием скольжения на границе:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla, \vec{V}) + \frac{1}{\rho} \nabla P = \varepsilon^2 \Delta \vec{V}, \\ \operatorname{div} \vec{V} = 0, \\ (\vec{V}, \vec{n})|_{\partial D} = 0, \\ \frac{\partial N}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) N = g \vec{k}. \end{cases}$$

Приведенная система позволяет моделировать движение безынерционных недиффундирующих примесей. Сначала рассмотрим случай, когда гравитация не учитывается, т. е. $g = 0$. В качестве теста возьмем решение задачи Коши заданной системой ДУ вида (1), рассмотренное в [6], в котором поле скоростей $\vec{V}(\vec{x})$ имеет вид:

$$\vec{V}(\vec{x}) = \nabla \left(\sum_{i=1}^k \frac{q_i}{\|\vec{x} - M_i\|} \right), \quad (2)$$

где $k = 26$, точки M_i имеют следующие координаты:

$$\begin{aligned} M_1 &= (0, 0, 1); & M_2 &= (0, 0, -1); \\ M_i &= \left(\cos\left(\frac{i\pi}{4}\right), \sin\left(\frac{i\pi}{4}\right), 0 \right), & i &= 3, \dots, 10; \\ M_i &= \left(\cos\left(\frac{i\pi}{4}\right), \sin\left(\frac{i\pi}{4}\right), 1 \right), & i &= 11, \dots, 18; \\ M_i &= \left(\cos\left(\frac{i\pi}{4}\right), \sin\left(\frac{i\pi}{4}\right), -1 \right), & i &= 19, \dots, 26; \end{aligned}$$

q_i принимают значения: $q_1 = 5$, $q_2 = 5$, остальные $q_i = 0.05$.

В начальный момент времени генерируются стартовые положения точек случайным образом с использованием встроенного в язык программирования C++ генератора случайных чисел, по 5000 точек в окрестностях точек M_1 и M_2 , в форме тора, имитирующие струи по следующим правилам: количество точек — 5000 для каждой струи, шаг по времени — $1/1000$, шагов по времени 700, радиус $R = 0.2$, радиус r изменялся от 0 до 0.05 для равномерного заполнения области. Центры торов находились в точках $(0; 0; -0.25)$ и $(0; 0; 0.25)$.

Результаты моделирования приведены на рисунках 4,5. Содержимое файла конфигурации эксперимента для данной задачи приведено на рисунке 6.

В качестве еще одного теста разработанного программного обеспечения рассмотрим поле $\vec{V}(\vec{x})$ следующего вида, с учетом действия силы тяжести:

$$V(x) = e^{-\lambda^2 \mu t} \frac{1}{\lambda^2} \begin{bmatrix} a_k J'_0(a_k p) \{x_2 \lambda \sin(b_k(x_3 - z_k)) + x_1 b_k \cos(b_k(x_3 - z_k))\} \\ a_k J'_0(a_k p) \{-x_1 \lambda \sin(b_k(x_3 - z_k)) + x_2 b_k \cos(b_k(x_3 - z_k))\} \\ a_k^2 J_0(a_k p) \sin(b_k(x_3 - z_k)) \end{bmatrix} - g \vec{k}. \quad (3)$$

Такое поле является точным решением уравнения Навье–Стокса и представлено в [7]. Отличие этого теста от предыдущего заключается в другой правой части системы (1). Векторное поле (3) описывает динамику примеси, растворенной в жидкости в поле тяготения.

В данном случае начальное положение точек задавалось в виде плоского цилиндра радиусом 2.709 и высотой 0.4, количество точек — 1000. Здесь в файле конфигурации дополнительно устанавливаются значения коэффициентов a_k , b_k , z_k , g , μ :

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad b_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \lambda^2 = a_1^2 + b_1^2, \quad \mu = 0.05, \quad g = 0.05, \quad z_k = 0.$$

Шаг по времени равен 0.01, количество шагов — 40 000.

Результаты моделирования представлены на рисунках 7,8.

Целью данного вычислительного эксперимента была проверка наличия выпадения осадка при движении примеси, что наблюдается в момент времени $t = 400$.

Файл конфигурации представлен на рисунке 9. В данном случае в файле конфигурации описываются не только правила для расчета по методу Рунге–Кутты, но и коэффициенты правой части. В прошлом тестовом расчете из-за большого количества параметров было удобнее реализовать ввод сразу через сохранение в массив.

Заключение

В ходе данной работы разработано программное обеспечение для подготовки проведения вычислительного эксперимента и визуализации решения задачи Коши. Проведен ряд вычислительных экспериментов для тестирования разработанного программного обеспечения на примере двух задач. Первая заключалась в моделировании и визуализации результатов динамики безынерционной примеси в потенциальных потоках, задаваемых кулоновскими потенциалами. Вторая задача заключалась в моделировании и визуализации результатов динамики примеси в вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической области течения. Полученный программный комплекс может быть оформлен в виде библиотеки программного обеспечения и применяться для моделирования и визуализации течения безынерционной недиффундирующей примеси, растворенной в жидкости.

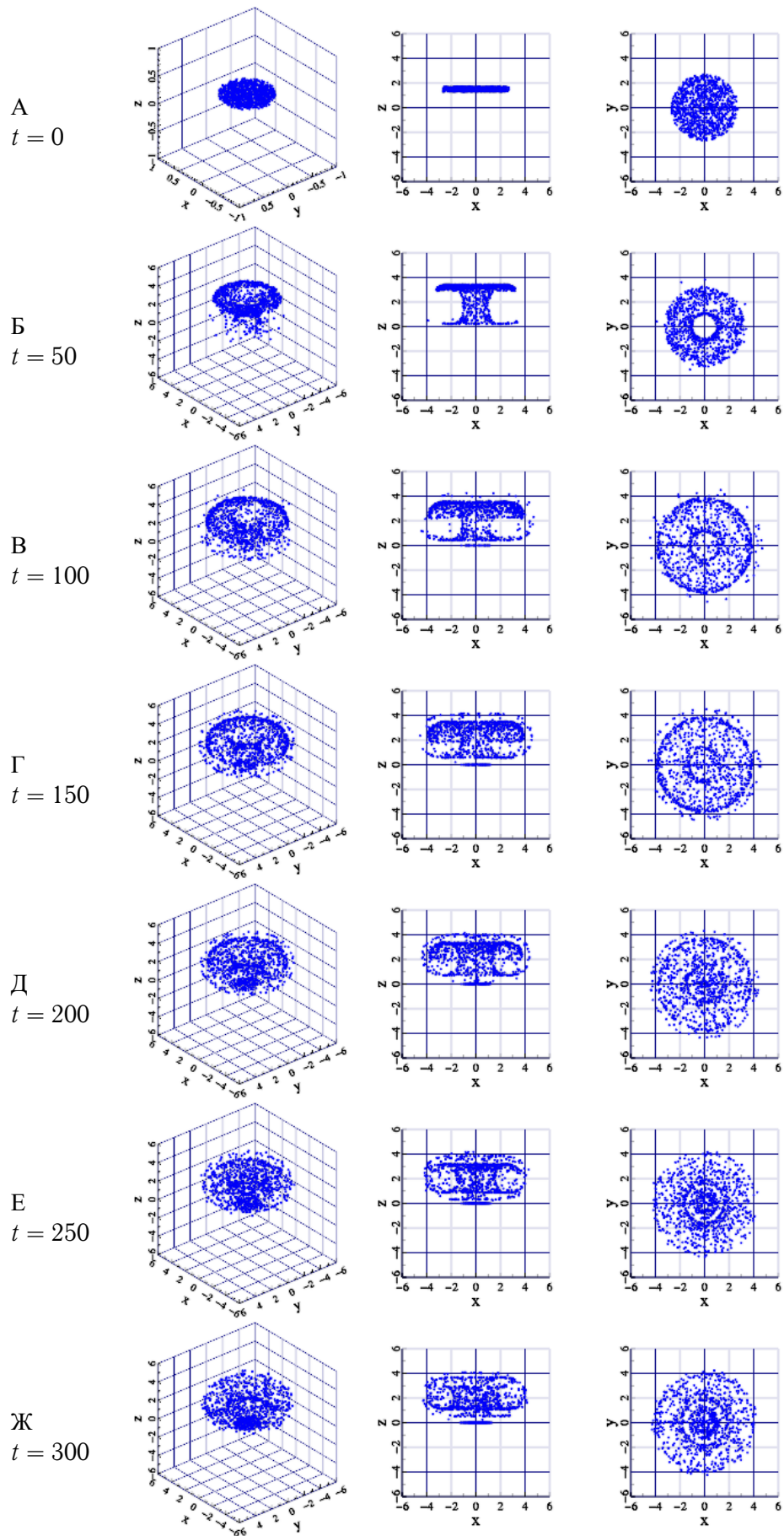


Рис. 7. Результаты моделирования движения примеси, $0 \leq t \leq 300$

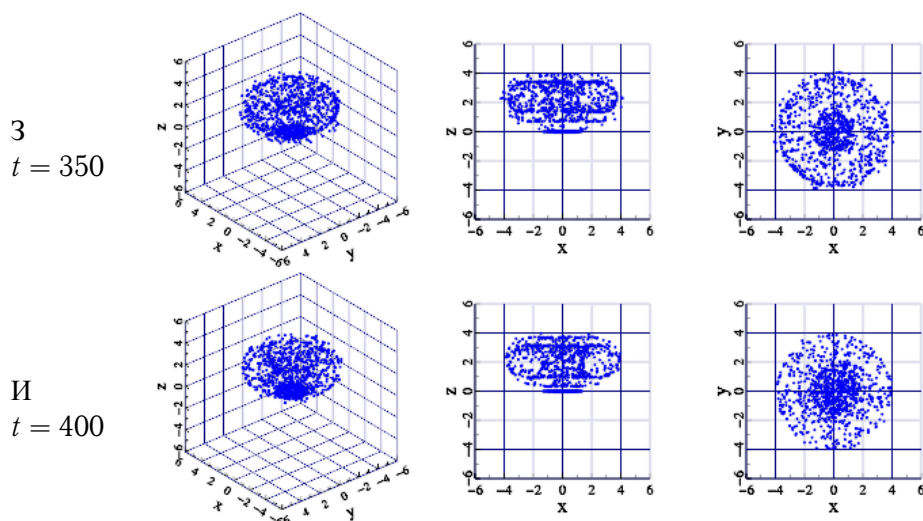


Рис. 8. Результаты моделирования движения примеси, $350 \leq t \leq 400$

```
Name_experiment1: test_img_naska
#Условия_для_времени
Start_time: 0.0
End_time: 400.0
Step_time: 0.01
N_time: 40001
#Количество_точек
#Если_0_то_одно_кол-во_точек_для_каждого_цвета
#Если_1_разное_кол_то_точек_для_каждого_цвета
all_type: 1
#Если_0_то_отсюда_считаем_количество_типов_точек
#Если_1_то_отсюда_считаем_количество_типов_и_сразу_кол_кол_точек
num_type_point: 2
1000 1000
#Если_0_то_одно_КОЛВО_ТОЧЕК_ЧИТАЕМ_ОТСЮДА
num_point: 644
#Тип_расположения_начальных_точек
type_nu: 1
#Тип_правой_части
type_gr: 1
#Сохраняем_каждый_X_шаг_по_времени
Time_save: 100
#Строим_каждую_X_картинку_по_времени
Time_save_img: 1
#Гравитация_одна_для_всего_эксперимента_отключить 0.0
Graviton_value: 0.0005
#Вязкость
Num_viscosity: 1
0.05
Lamda: 1
#####
#Для_СУПЕРПОЗИЦИИ
super_Ak: 1
1 2 -1
ak: 1
0.707106
bk: 1
0.707106
zk: 1
0
```

Рис. 9. Файл конфигурации для 2-го теста

ЛИТЕРАТУРА

1. Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З. *Численные методы анализа*. 3-е изд. М.: Наука; 1967. 368 с.
2. Ильина В. А., Силаев П. К. Численные методы для физиков-теоретиков. Ч. 2. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований; 2004. 118 с.
3. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М.: Лаборатория Базовых Знаний; 2001. 630 с.
4. *OpenMP*. Режим доступа: <https://www.openmp.org/>.
5. *MathGL*. Режим доступа: https://mathgl.sourceforge.net/doc_ru/Main.html.
6. Галкин В. А., Смородинов А. Д., Моргун Д. А. Решение уравнения Навье–Стокса для сталкивающихся потоков. *Успехи кибернетики*. 2023;4(2):8–15. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-2-01.
7. Галкин В. А., Дубовик А. О. Об одном классе точных решений системы уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости. *Математическое моделирование*. 2023;35(8):3–13.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-05

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА ВАНГА–ЛАНДАУ ПРИ РАСЧЕТЕ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИ ИЗИНГА**В. И. Егоров^a, Б. В. Крыжановский^b***Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*^a ✉ rvladegorov@rambler.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0901-6370>, kryzhanov@mail.ru

Аннотация: проведен анализ точности результатов и скорости выполнения алгоритма Ванга–Ландау при расчете плотности состояний для двумерной модели Изинга. Показано, что вычисление плотности состояний одновременно по энергии и намагниченности способствует увеличению точности расчета статистических моментов энергии. Относительная ошибка определения плотности состояний по энергии уменьшается с ростом размера решетки. Обнаружено, что для больших решеток невозможно заранее оценить время выполнения алгоритма, так как критерий перехода в режим $1/t$ не выполняется.

Ключевые слова: алгоритм Ванга–Ландау, плотность состояний, скорость алгоритма, критический переход.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания НИИСИ РАН № FNEF-2024-0001.

Для цитирования: Егоров В. И., Крыжановский Б. В. Анализ точности и производительности алгоритма Ванга–Ландау при расчете плотности состояний для модели Изинга. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):46–52. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-05.

*Поступила в редакцию: 14.05.2024.**В окончательном варианте: 25.05.2024.***ANALYZING THE ACCURACY AND PERFORMANCE OF THE WANG-LANDAU ALGORITHM FOR CALCULATING THE DENSITY OF STATES IN THE ISING MODEL****V. I. Egorov^a, B. V. Kryzhanovsky^b***Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation*^a ✉ rvladegorov@rambler.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0901-6370>, kryzhanov@mail.ru

Abstract: we analyzed the accuracy and performance of the Wang-Landau algorithm in calculating the density of states for the two-dimensional Ising model. Our findings indicate that calculating the density of states simultaneously by energy and magnetization enhances the accuracy of energy moment estimations. As the lattice size increases, the relative error in the density of states decreases. However, for large lattices, it is not possible to estimate the execution time of the algorithm in advance, as the criterion for switching to the $1/t$ mode is never met.

Keywords: Wang-Landau algorithm, density of states, algorithm performance, critical transition.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences.

Cite this article: Egorov V. I., Kryzhanovsky B. V. Analyzing the Accuracy and Performance of the Wang-Landau Algorithm for Calculating the Density of States in the Ising Model. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):46–52. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-05.

*Original article submitted: 14.05.2024.**Revision submitted: 25.05.2024.***Введение**

Алгоритм Ванга–Ландау (ВЛ) [1] является эффективным методом, позволяющим напрямую оценить плотность состояния системы, т. е. вырожденность ее энергетических уровней. Особенно интересной возможностью алгоритма является получение совместной плотности состояний по энергии

и другим параметрам, например, намагниченности. Используя такую совместную плотность состояний, можно получить плотность распределения по энергии и намагниченности при любых значениях температуры и внешнего поля. Известно, что в классической реализации алгоритма в определенный момент происходит сатурация ошибки и дальнейшие вычисления не способствуют увеличению точности оценки плотности состояний. В случае двумерной модели Изинга это приводит к флуктуационной ошибке порядка 10^{-4} . Хотя такая ошибка кажется на первый взгляд достаточно малой, погрешность вычисления измеряемых в «реальном эксперименте» величин, таких как теплоемкость, может быть значительной. Стоит отметить работу [2], где было показано, что для избежания сатурации ошибки вычислений модификационный множитель должен уменьшаться в процессе моделирования как $1/t$, где t — время моделирования. Однако до сих пор не был выполнен анализ применимости данной схемы к вычислению совместной плотности состояний.

Как отмечают некоторые авторы, например, [3], основной проблемой при выполнении расчетов по алгоритму Ванга–Ландау является то, что в процессе случайного блуждания сложно достичь состояний с низкой энергией. В результате при моделировании решеток средних и больших размеров значительно увеличивается время выполнения алгоритма. Возможным способом решения этой проблемы является распараллеливание алгоритма и ограничение случайного блуждания в некоторой области энергии и намагниченности. Например, в работах [4, 5] случайное блуждание выполняется путем перевода двух спинов с противоположными значениями, тем самым сохраняется постоянное значение намагниченности. Однако, как отмечено в работах [6, 7], разделение пространства энергий приводит к ошибке вычислений, поэтому необходимо введение обмена конфигураций между подокнами и их взаимное перекрытие.

В этой работе мы провели анализ эффективности и точности алгоритма Ванга–Ландау по схеме $1/t$ при вычислении обычной и совместной плотности состояний для двумерной модели Изинга. При этом исследовалась точность расчета не только самой плотности состояний, но и вычисляемой с ее помощью теплоемкости.

Расчет одномерной плотности состояний $g(E)$

Для расчета плотности состояний $g(E)$, то есть числа конфигураций с энергией E , модели Изинга на решетке $L \times L$ с периодическими граничными условиями использовался описанный ниже алгоритм. Сначала задавалось начальное приближение для плотности состояний $g(E) = 1$, начальное значение модификационного множителя $f = e$ и инициализировалась гистограмма $H(E) = 0$. Далее выполнялось случайное блуждание по конфигурациям системы путем переворота случайного спина. Переход в новую конфигурацию $i \rightarrow j$ принимался с вероятностью

$$P(i \rightarrow j) = \min \left(\frac{g(E_i)}{g(E_j)}, 1 \right). \quad (1)$$

Вне зависимости от того, принята новая конфигурация или нет, для энергии текущей конфигурации выполняется обновление плотности состояний и гистограммы:

$$g(E) \rightarrow f \cdot g(E), \quad H(E) \rightarrow H(E) + 1. \quad (2)$$

Когда для всех значений энергии гистограмма отлична от нуля $H(E) > 0$, модификационный множитель уменьшается $f \rightarrow \sqrt{f}$ и гистограмма обнуляется. Данный процесс продолжается до тех пор, пока $\ln f > 1/t$, где $t = n/N_E$, n — общее число попыток переворота спина с начала моделирования, $N_E = L^2 - 1$ — число возможных значений энергий. Как только выполняется условие $\ln f \leq 1/t$, процесс моделирования изменяется: модификационный множитель меняется каждый шаг моделирования согласно соотношению $\ln f = 1/t$, а гистограмма посещения состояний больше не используется. Моделирование прекращается, когда $\ln f < \ln f_{final} = 5 \cdot 10^{-8}$. Полученные плотности состояний были перенормированы таким образом, чтобы значение $g(E_0)$, где E_0 — основное состояние, было равно двум. Здесь стоит отметить, что общее число итераций (попыток переворота спина) за все время моделирования составляет $N_E / \ln f_{final} = 2 \cdot 10^7 (L^2 - 1)$, что позволяет заранее оценить время выполнения алгоритма.

По данному алгоритму были рассчитаны плотности состояний $g(E)$ для решеток с линейным размером от $L = 10$ до $L = 256$. Некоторые из полученных зависимостей $G(E) = \ln g(E)$ показаны

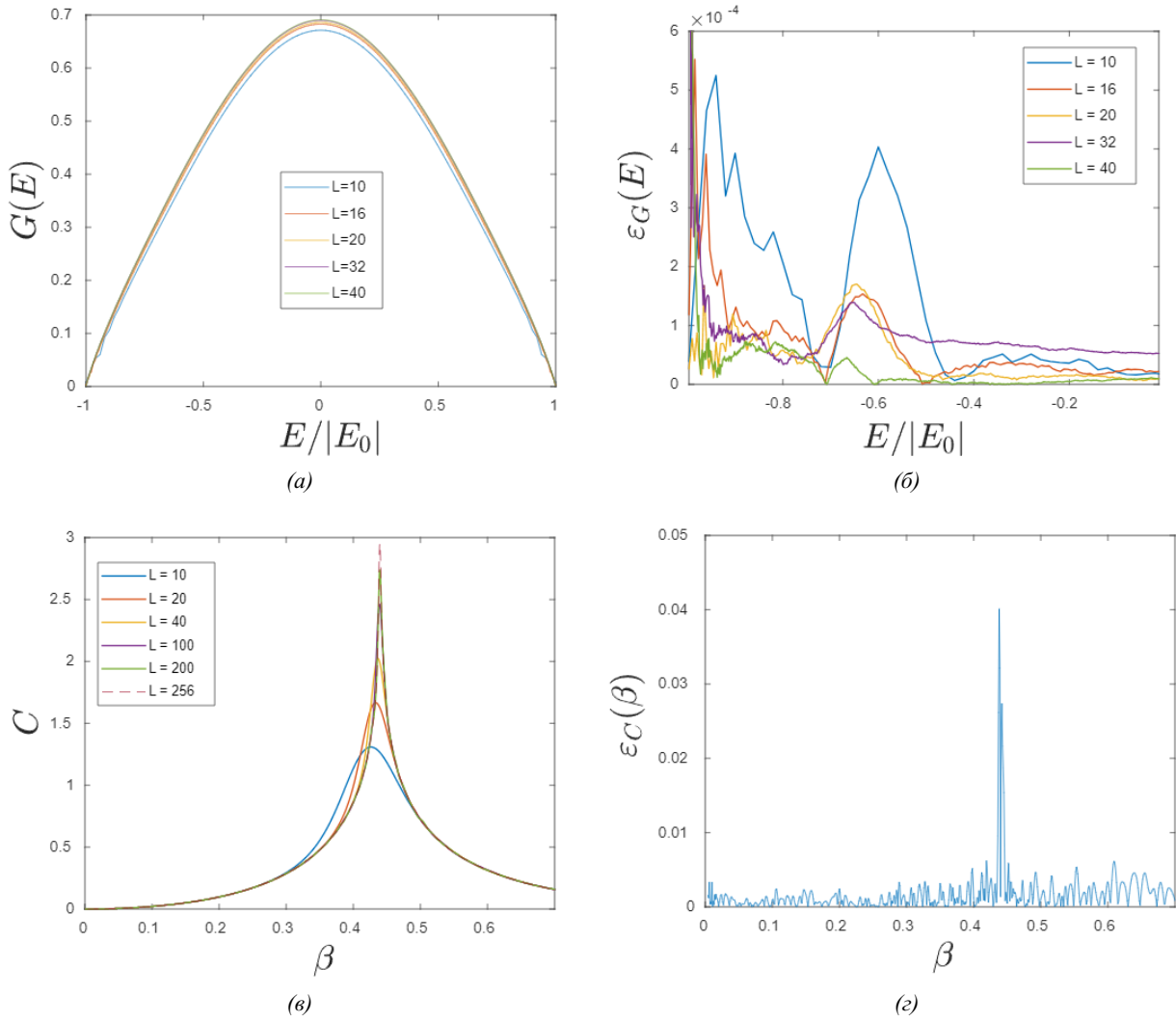


Рис. 1. Результаты расчета одномерной плотности состояний $g(E)$. (а) Зависимости логарифма плотности состояний $G(E)$, полученные в результате моделирования. (б) Относительная ошибка $G(E)$ по сравнению с точным значением. (в) Температурные зависимости теплоемкости $C(\beta)$, рассчитанные по результатам моделирования. (г) Относительная ошибка рассчитанной теплоемкости для решетки $L = 256$

на рисунке 1а. Для оценки точности результатов моделирования было проведено сравнение с аналитическими зависимостями для двумерной модели Изинга, рассчитанными по методу из работы [8]. Также было проведено сравнение температурных зависимостей теплоемкости $C(\beta)$ ($\beta = 1/k_B T$ — обратная температура), рассчитанных по результатам моделирования (рис. 1в), с точными зависимостями, полученными из статсуммы Кауфман [9]. Определим относительную ошибку логарифма плотности состояний и теплоемкости следующим образом:

$$\epsilon_G(E) = \left| \frac{G(E) - G_{ex}(E)}{G(E) + G_{ex}(E)} \right|, \quad \epsilon_C(\beta) = \left| \frac{C(\beta) - C_{ex}(\beta)}{C(\beta) + C_{ex}(\beta)} \right|, \quad (3)$$

где $G_{ex}(E)$ и $C_{ex}(\beta)$ — точные значения логарифма плотности состояний и теплоемкости.

Графики относительной ошибки логарифма плотности состояний $\epsilon_G(E)$ показаны на рисунке 1б, а средние $\langle \epsilon_G(E) \rangle$ и максимальные значения ошибки $\max(\epsilon_G(E))$ представлены в таблице 1. Метод из работы [8] не позволяет рассчитать плотность состояний для решеток с $L > 40$, поэтому для больших решеток нельзя оценить точность непосредственно самой плотности состояний. Из рисунка 1б видно, что ошибка в основном имеет систематический характер со сравнительно небольшими флуктуациями. Для всех зависимостей можно выделить две точки, где ошибка имеет максимум. Первая точка

находится вблизи основного состояния, а вторая — вблизи критического значения внутренней энергии. При этом с ростом размера решетки ошибка в целом уменьшается. Исключение составляют результаты для решетки $L = 32$, однако в данном случае необычно большое значение ошибки обусловлено неудачным выбором нормировки. Отметим, что мы пробовали нормировать плотность состояний по общему числу конфигураций, но такая нормировка, как правило, имела худшее согласие с точными значениями. Среднее значение ошибки $\langle \epsilon_G(E) \rangle$ для большинства решеток имеет порядок 10^{-5} , а максимальное значение $\max(\epsilon_G(E)) - 10^{-4}$ (см. табл. 1). При этом в целом $\langle \epsilon_G(E) \rangle$ уменьшается с ростом размера решетки L , а $\max(\epsilon_G(E))$ — увеличивается.

Используя полученную в результате моделирования плотность состояний $g(E)$, мы рассчитали температурные зависимости теплоемкости $C(\beta)$ в интервале β от 0.001 до 0.7 с шагом 0.001 (см. рис. 1в). На рисунке 1г показана ошибка $\epsilon_C(\beta)$ для решетки с $L = 256$. Видно, что ошибка носит флуктуационный характер и имеет максимум в критической точке. Среднее значение ошибки $\langle \epsilon_C(\beta) \rangle$ имеет порядок 10^{-4} – 10^{-3} , а максимальное значение $\max(\epsilon_C(\beta)) - 10^{-3}$ – 10^{-2} (см. табл. 1). И среднее, и максимальное значение ошибки увеличиваются с ростом размера решетки.

Отметим также особенности выполнения схемы $1/t$ при расчете одномерной плотности состояний $g(E)$. Обозначим за t_0 значение t , при котором изменяется процесс моделирования, то есть происходит переход от стандартной схемы алгоритма к схеме $1/t$. Из таблицы 1 видно, что значение t_0 увеличивается с ростом размера решетки L , то есть переход на новую схему происходит позднее. Для решетки $L = 256$ переход на схему $1/t$ не происходит вообще, так как все время моделирования выполняется условие $\ln f > 1/t$. Вследствие этого для решеток размера $L \geq 256$ невозможно заранее оценить длительность выполнения алгоритма Ванга–Ландау при выбранном конечном значении модификационного множителя $f_{final} = \exp(5 \cdot 10^{-8})$.

Таблица 1

Результаты расчета одномерной плотности состояний $g(E)$. L — линейный размер решетки, N_E — число возможных значений энергии, $\langle \epsilon_G(E) \rangle$ и $\max(\epsilon_G(E))$ — средняя и максимальная ошибка логарифма плотности состояний, $\langle \epsilon_C(\beta) \rangle$ и $\max(\epsilon_C(\beta))$ — средняя и максимальная ошибка теплоемкости, t_0 — шаг моделирования, на котором происходит переход алгоритма в режим $1/t$

L	N_E	$\langle \epsilon_G(E) \rangle$	$\max(\epsilon_G(E))$	$\langle \epsilon_C(\beta) \rangle$	$\max(\epsilon_C(\beta))$	t_0
10	99	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$5.3 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^3$
12	143	$9.7 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$6.5 \cdot 10^3$
14	195	$8.2 \cdot 10^{-5}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^4$
16	255	$6.7 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^4$
18	323	$3.2 \cdot 10^{-5}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$5.4 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^4$
20	399	$4.4 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-4}$	$9.7 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^4$
32	1023	$8.2 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.0 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^5$
40	1599	$3.3 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^5$
100	9999	-	-	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^6$
150	22499	-	-	$2.4 \cdot 10^{-3}$	0.0146	$9.8 \cdot 10^6$
200	39999	-	-	$1.9 \cdot 10^{-3}$	0.0569	$1.2 \cdot 10^7$
256	65535	-	-	$1.7 \cdot 10^{-3}$	0.0401	-

Таким образом, с ростом размера решетки L эффективность алгоритма Ванга–Ландау значительно уменьшается. Хотя средняя ошибка оценки плотности состояний уменьшается, ошибка теплоемкости, рассчитанной с помощью этой плотности, увеличивается. При этом для больших решеток становится невозможно заранее оценить время выполнения алгоритма.

Расчет совместной плотности состояний $g(E, M)$

Теперь рассмотрим вычисление совместной плотности состояний $g(E, M)$ по энергии E и намагниченности M с использованием схемы $1/t$. Время моделирования теперь определяется как $t = n/N_{E,M}$, где $N_{E,M}$ — общее число возможных комбинаций энергии и намагниченности. Число $N_{E,M}$ (см. табл. 2) определялось по результатам предварительного моделирования по алгоритму Ванга–Ландау без обновления значения модификационного множителя. Мы смогли рассчитать плотность состояний $g(E, M)$ только для решеток небольшого размера, так как число $N_{E,M}$ достаточно большое и требуется

большое количество, чтобы достичь конечного значения модификационного множителя. На рисунке 2а показан график $G(E, M) = \ln g(E, M)$ для наибольшей из рассмотренных нами решеток ($L = 28$). Нормировка $g(E, M)$ также выполнялась по основному состоянию.

Таблица 2

Результаты расчета совместной плотности состояний $g(E, M)$. $N_{E, M}$ — общее число возможных комбинаций энергии и намагниченности. Для расшифровки остальных условных обозначений см.

подпись к таблице 1

L	$N_{E, M}$	$\langle \epsilon_G(E) \rangle$	$\max(\epsilon_G(E))$	$\langle \epsilon_l(\beta) \rangle$	$\max(\epsilon_l(\beta))$	t_0
10	4200	$7.8 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$	$8.8 \cdot 10^{-5}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$	$7.8 \cdot 10^3$
12	8972	$5.5 \cdot 10^{-5}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^4$
14	16982	$5.2 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^4$
16	29430	$6.2 \cdot 10^{-5}$	$5.8 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$6.2 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^4$
18	47724	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$6.4 \cdot 10^{-4}$	$5.1 \cdot 10^4$
20	73448	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-4}$	$8.8 \cdot 10^4$
24	154530	$3.0 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^5$
28	289252	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$9.1 \cdot 10^{-5}$	$5.7 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^5$

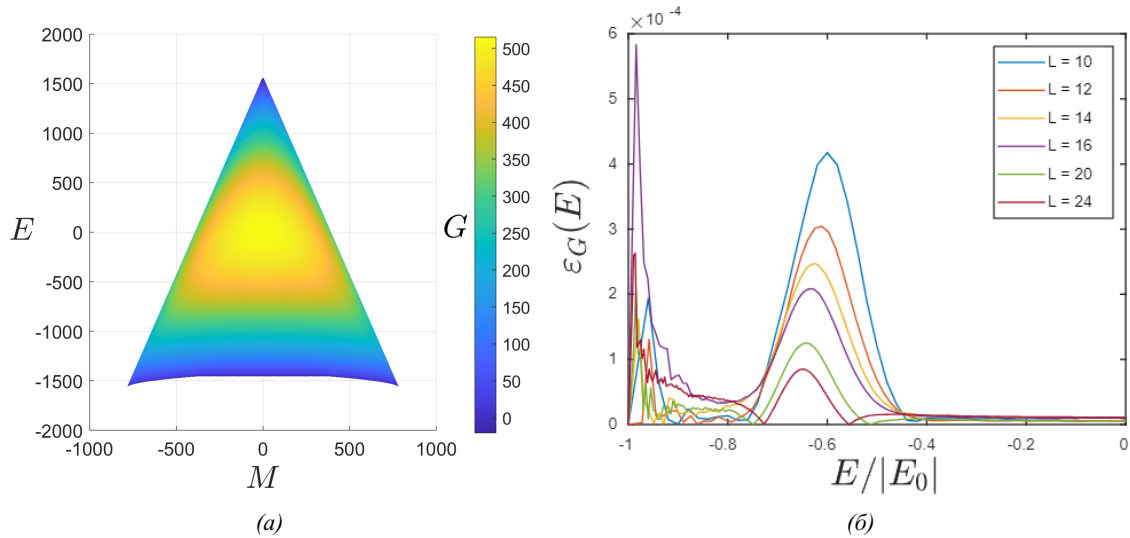


Рис. 2. (а) Логарифм совместной плотности состояний $G(E, M)$. Данные получены в результате моделирования для решетки $L = 28$. (б) Относительная ошибка $G(E)$, полученного из $g(E, M)$ в результате суммирования, по сравнению с точным значением

Используя совместную плотность состояний $g(E, M)$ путем суммирования по M , мы получили плотность состояний по энергии $g(E) = \sum_M g(E, M)$. Графики относительной ошибки этой плотности $\epsilon_G(E)$ (см. рис. 2б) являются гораздо более гладкими по сравнению с результатами непосредственного расчета одномерной плотности состояний. Флуктуации на этих зависимостях присутствуют только вблизи энергии основного состояния. Средняя относительная ошибка $\langle \epsilon_G(E) \rangle$ уменьшилась приблизительно в два раза для большинства решеток (см. табл. 2). Точность оценки температурных зависимостей теплоемкости также увеличилась почти на порядок (табл. 2).

Точные значения совместной плотности состояний $g(E, M)$ для двумерной модели Изинга неизвестны, однако можно рассчитать среднюю энергию $\bar{E}$, дисперсию энергии D и последующие статистические моменты при заданном значении намагниченности M [11]. В случае двумерной модели Изинга средняя энергия и дисперсия энергии определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{ex}(M) &= E_0 \frac{(N - 2n)^2 - N}{N(N - 1)}, \\ D_{ex}(M) &= 2N \frac{(1 - m^2)(1 - m^2 - 4\delta + 4\delta^2)}{(1 - \delta)(1 - 2\delta)(1 - 3\delta)} \left(1 - \frac{4}{N - 1}\right),\end{aligned}\quad (4)$$

где $N = L^2$, $\delta = 1/N$, $m = M/N$, $n = (1 - m)/2$.

Аналогично выражению (3) определим относительную ошибку средней энергии и дисперсию энергии при заданном значении M :

$$\epsilon_{\bar{E}}(M) = \left| \frac{\bar{E}(M) - \bar{E}_{ex}(M)}{\bar{E}(M) + \bar{E}_{ex}(M)} \right|, \quad \epsilon_D(M) = \left| \frac{D(M) - D_{ex}(M)}{D(M) + D_{ex}(M)} \right|, \quad (5)$$

где $\bar{E}(M)$ и $D(M)$ — значения средней энергии и дисперсии энергии, рассчитанные через совместную плотность состояний $g(E, M)$. Величины средней ошибки $\langle \epsilon_{\bar{E}}(M) \rangle$ и $\langle \epsilon_D(M) \rangle$ для различных решеток представлены в таблице 3. Видно, что для всех решеток средняя величина ошибки порядка 10^{-4} , то есть результаты моделирования хорошо совпадают с точными значениями.

Таблица 3

Средняя ошибка энергии и дисперсии энергии при фиксированном значении намагниченности M

L	$\langle \epsilon_{\bar{E}}(M) \rangle$	$\langle \epsilon_D(M) \rangle$
10	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$1.23 \cdot 10^{-4}$
12	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$1.12 \cdot 10^{-4}$
14	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.25 \cdot 10^{-4}$
16	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$1.03 \cdot 10^{-4}$
18	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.44 \cdot 10^{-4}$
20	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.26 \cdot 10^{-4}$
24	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.32 \cdot 10^{-4}$
28	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$1.27 \cdot 10^{-4}$

В заключение параграфа отметим, что величина t_0 , то есть номер шага, при котором происходит переход в режим $1/t$, растет с увеличением размера решетки (табл. 2). То есть при расчете совместной плотности состояний для больших решеток могут возникать проблемы с оценкой времени выполнения алгоритма, так же, как и при расчете одномерной плотности состояний.

Обсуждение результатов

Был проведен анализ эффективности и точности алгоритма Ванга–Ландау по схеме $1/t$ при вычислении одномерной и совместной плотности состояний для двумерной модели Изинга. Показано, что вычисление плотности состояний одновременно по энергии и намагниченности способствует увеличению точности расчета статистических моментов энергии (в частности, дисперсии). Обнаружено, что алгоритм Ванга–Ландау при вычислении плотности состояний дает систематическую ошибку, величина которой уменьшается с ростом размера решетки. Однако производительность алгоритма при этом значительно уменьшается, и для больших решеток становится невозможным предварительно оценить время выполнения вычислений.

Предложенный алгоритм естественным образом использует разбиение конфигурационного пространства состояний системы на непересекающиеся области, что позволяет вычислять их характеристики независимо и параллельно. При этом время работы алгоритма уменьшается пропорционально линейному размеру решетки; появляется дополнительная возможность учета распределения намагниченностей; повышается точность вычислений; в отличие от классического алгоритма Ванга–Ландау, разработанный алгоритм позволяет описывать систему в присутствии магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang F., Landau D. P. Efficient, Multiple-Range Random Walk Algorithm to Calculate the Density of States. *Physical Review Letters*. 2001;86(10):2050.

2. Belardinelli R. E., Pereyra V. D. Wang–Landau Algorithm: A Theoretical Analysis of the Saturation of the Error. *The Journal of Chemical Physics*. 2007;127:18.
3. Bhar S., Roy S. K. A Comparison of the Performance of Wang–Landau–Transition–Matrix Algorithm with Wang–Landau Algorithm for the Determination of the Joint Density of States for Continuous Spin Models. *Computer Physics Communications*. 2013;184(5):1387–1394.
4. Petrov P., Averkiev N., Bogoslovskiy N. Analytical and Numerical Calculations of the Magnetic Properties of a System of Disordered Spins in the Ising Model. *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. 2023;65(1):7–13.
5. Bogoslovskiy N. A., Petrov P. V., Averkiev N. S. Phase Diagram of a Ferromagnetic Semiconductor: Origin of Superparamagnetism. *Physical Review B*. 2024;109(2):024436.
6. Vogel T., Li Y. W., Wüst T., Landau D. P. Generic, Hierarchical Framework for Massively Parallel Wang–Landau Sampling. *Physical Review Letters*. 2013;110:210603.
7. Vogel T., Li Y. W., Wüst T., Landau D. P. Scalable Replica-Exchange Framework for Wang–Landau Sampling. *Physical Review E*. 2014;90(2):023302.
8. Beale P. D. Exact Distribution of Energies in the Two-Dimensional Ising Model. *Physical Review Letters*. 1996;76(1):78.
9. Ferdinand A. E., Fisher M. E. Bounded and Inhomogeneous Ising Models. I. Specific-Heat Anomaly of a Finite Lattice. *Physical Review*. 1969;185(6):832.
10. Kryzhanovsky B., Litinskii L. Generalized Approach to Description of Energy Distribution of Spin System. *Optical Memory and Neural Networks*. 2015;24:165–185.
11. Крыжановский Б. В., Литинский Л. Б. Обобщенное уравнение Брегга–Вильямса для систем с произвольным дальним действием. *Доклады АН*. 2014;459(6):680–684.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-06

ПРОФИЛИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ УМНОГО ДОМА

Н. В. Замятин^а, Г. В. Смирнов^б

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,
Российская Федерация

^а ✉ zamnv47@gmail.com, ^б smirnov@main.tusur.ru

Аннотация: сформулированы проблемы умного дома, решение которых заключается в том числе в эффективном профилировании. Кратко рассмотрены платформы для умного дома пользователей. Определены профили классов пользователей с учетом их предпочтений и конфликтов предпочтений пользователей, способы их разрешения. Представлен менеджер профилей с примером программы на XML. Приведен нейросетевой алгоритм определения активности пользователей. Показана методика реализации профилей пользователей умного дома.

Ключевые слова: умный дом, профили пользователей, менеджер профилей, конфликты, нейронная сеть.

Для цитирования: Замятин Н. В., Смирнов Г. В. Профили пользователей умного дома. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):53–63. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-06.

Поступила в редакцию: 14.04.2024.

В окончательном варианте: 18.05.2024.

SMART HOME USER PROFILES

N. V. Zamyatin^a, G. V. Smirnov^b

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

^a ✉ zamnv47@gmail.com, ^b smirnov@main.tusur.ru

Abstract: this study presents some issues of smart home technology and proposes a solution based on user profiles. The paper includes a brief review of smart home platforms. We identified user categories and profiles, their preferences, possible conflicts, and resolutions. We also present a Profile Manager software implemented in XML, and a neural network-based algorithm to track the user activity.

Keywords: smart home, user profiles, profile manager, conflicts, neural network.

Cite this article: Zamyatin N. V., Smirnov G. V. Smart Home User Profiles. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):53–63. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-06.

Original article submitted: 14.04.2024.

Revision submitted: 18.05.2024.

Введение

Понятие «умный дом» используется для определения жилого помещения, оснащенного технологиями, подключенными к сети (Wi-Fi, Bluetooth или аналогичным протоколам), которые предвидят потребности жильцов и реагируют на них, стремясь обеспечить им комфорт, удобство, безопасность, медицинское сопровождение и развлечения посредством управления технологиями внутри дома. Концепция умного дома направлена на повышение качества повседневной жизни и ставит человека в центр будущего развития общества, основанного на знаниях и информационно-коммуникационных технологиях. В основе умного дома лежит окружающий интеллект (AmI, Ambient Intelligence), включающий технологии: повсеместные вычисления, повсеместную коммуникацию и интеллектуальный пользовательский интерфейс с целью предоставления приложений и услуг. Контекст пользователя является незаменимым компонентом этого подхода, учитывающего потребности пользователя путем профилирования (персонализации).

Суть профилирования состоит в извлечении полезной информации из текущего контекста, связанного с пользователем, определении потребностей пользователей и выборе подходящих услуг, чтобы обеспечить действия умного дома в соответствии с предпочтениями, деятельностью и ожиданиями пользователей. Следовательно, процедуры по профилированию необходимы для создания осознанной, адаптивной и реагирующей среды для удовлетворения потребностей и пожеланий пользователей. Существует ряд проблем, снижающих интерес к этой области:

- гибкость: система должна адаптироваться к любому типу технологий без ограничений по их назначению, обеспечивая хороший уровень совместимости между различными решениями;
- настройка: система должна адаптироваться к распорядку дня, задачам и предпочтениям каждого пользователя и понимать, что пользователи не всегда хотят одних и тех же решений;
- стоимость: затраты на оборудование, установку и техническое обслуживание этих систем не должны являться серьезной проблемой для пользователей. Также следует учитывать время, необходимое для их установки, настройки и управления;
- удобство использования: запутанные интерфейсы ограничивают использование системных функций. Хотя пользователи постепенно адаптируются к более сложным устройствам, следует учитывать, что они не обладают специальными техническими знаниями.

Одним из основных аспектов успеха «умного дома» является его способность и возможность удовлетворять требования каждого пользователя, так как люди предъявляют различные требования, и у каждого человека есть свои предпочтения относительно услуг, доступных в умном доме [1]. Таким образом, существует необходимость характеризовать каждого пользователя индивидуально, тщательно фиксируя эти предпочтения и привычки. Поэтому вводится концепция профиля пользователя, соответствующая набору предпочтений, которые пользователь хочет получить для конфигурации «умного дома» и которые могут включать, например, температуру, предпочтительную яркость ламп, нужный телевизионный канал или музыкальный жанр. Кроме того, в жилом помещении обычно проживает несколько человек, и, даже когда люди живут одни, их могут навещать родственники или друзья. Разные типы людей могут делить одно и то же пространство, что приводит к конфликтам между их предпочтениями. Поэтому нужно разрабатывать системы окружающего интеллекта, способные управлять предпочтениями нескольких пользователей, но не исключающие пользовательский опыт. Они позволяют пользователю настроить «умный дом» с помощью профилей пользователей и поддерживаются механизмом разрешения конфликтов, что дает возможность нескольким пользователям с разными предпочтениями совместно использовать одно и то же пространство. Решение указанных задач должно быть ориентировано на пользователя, но большинство существующих систем решают только часть указанных проблем, тем самым не представляя целостный подход.

Таким образом, профили должны быть легко настраиваемыми, адаптируемыми и простыми в использовании, разрешающими конфликты, если они возникнут. Механизм разрешения конфликтов должен быть гибким, чтобы учитывать все виды предпочтений, и масштабируемым, чтобы допускать любое количество пользователей. «Умный дом» должен функционировать автоматически в соответствии с предпочтениями и ожиданиями пользователя. Для достижения этой цели и должна быть реализована деятельность по профилированию.

Платформы для «умного дома»

AmI в «умном доме» направлен на интеграцию систем и технологий, разработанных для улучшения управления домашней средой. Умный дом оснащен сопутствующими технологиями, используемыми для включения и выключения устройств или для отправки и получения информации. Существует значительное количество работ, касающихся настройки «умного дома» и общих систем обнаружения и разрешения конфликтов. Многие предлагаемые системы для настройки «умного дома» имеют функцию распознавания привычек, определяющую распорядок дня пользователей и обеспечивающую высокий уровень автоматизации жилого помещения, практически не требуя настройки.

Рассмотренные системы обнаружения и разрешения конфликтов в основном делятся на две категории: подходы, основанные на правилах, и подходы по удовлетворению ограничений.

Решения, основанные на правилах, по мнению пользователей, считаются плохо управляемыми. Когда меняется домашняя ситуация и у пользователей меняются предпочтения, они должны изменить все правила системы. Кроме того, правила трудно отлаживать, когда они не работают; пользователи либо смиряются с проблемами, либо отключают правила.

Подходы к удовлетворению ограничений не очень гибкие из-за необходимости постоянно соблюдать налагаемые ограничения. Также из-за большого количества конфликтующих пользователей с противоположными предпочтениями трудно удовлетворить каждого из них.

Услуги «умного дома» можно разделить на пять групп:

1. Услуги связи.
2. Контроль и автоматизация.

3. Телемедицинское обслуживание.
4. Домашняя сеть.
5. Развлечения.

Наиболее известные платформы для «умного дома» [2]:

- MajorDoMo — это динамично развивающаяся открытая платформа, имеющая большое сообщество русскоязычных пользователей. MajorDoMo поддерживает множество протоколов связи и большое количество оборудования от различных производителей. В концепции MajorDoMo используется Apache + PHP + MySQL, что также позволяет разворачивать MajorDoMo на множестве различных платформ (Windows, Linux, Raspberry Pi);

- OpenHAB — открытая платформа, реализованная на Java, что позволяет разворачивать OpenHAB на любых системах с поддержкой Java (Windows, Linux, MacOS, Raspberry Pi, PINE и др.). Разработано большое количество драйверов под эту платформу для подключения самого разного оборудования. Система поддерживает голосовое управление, мобильные приложения для iOS и Android, интегрируется с Apple HomeKit (то есть управление возможно с устройств Apple вообще без установки каких-либо приложений). Имеется возможность увязать друг с другом события, происходящие в доме, и настроить поведение устройств в зависимости от таких событий;

- ioBroker — имеет продуманную и универсальную архитектуру. ioBroker разработан на платформе Node.js. Благодаря этому его можно развернуть и запустить практически на любой операционной системе или виртуальной машине: Windows, Mac, Linux, в контейнере Docker и даже на Android. Это позволяет масштабировать систему исходя из потребностей пользователей. Система имеет визуальный редактор планов помещений. Легко интегрируется с любыми MQTT-серверами (или брокерами), а также сама выступает в качестве MQTT-сервера/брокера для IoT-устройств, поддерживающих протокол MQTT. Удобная настройка и конфигурация: IoT Manager — это программное обеспечение для домашней автоматизации, которое не является полноценной системой управления «умным домом», но может использоваться как средство мониторинга и передачи простых команд посредством протокола MQTT. Продукт сфокусирован на визуализации управления, отображении графиков и прочих атрибутов на мобильных устройствах. Приложение обращается непосредственно к устройствам с использованием шины MQTT и через нее же получает ответы, которые тут же визуализирует в графическом виде.

Профили пользователя

Контекстно-зависимый «умный дом» должен динамически учитывать потребности широкого круга пользователей и контекст или ситуации поведения. Это ориентированное на пользователя функционирование систем «умного дома» должно поддерживаться адекватной пользовательской моделью. Интеллект и интерфейс системы должны быть осведомлены о способностях пользователя и ограничениях, чтобы взаимодействовать с человеком должным образом. Модель пользователя должна включать информацию о когнитивном уровне человека, его сенсорных и физических особенностях (рис. 1).

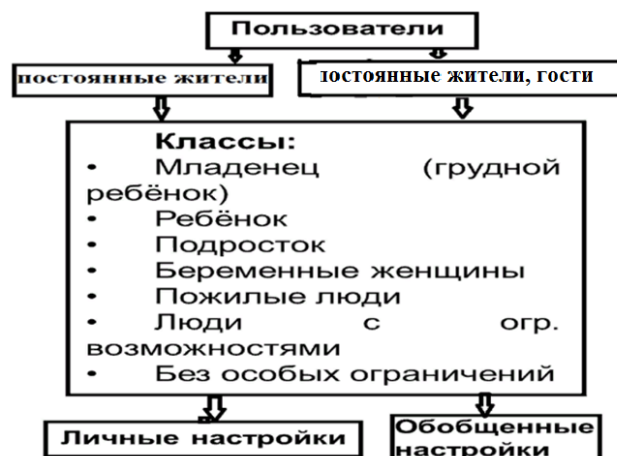


Рис. 1. Профили пользователей «умного дома»

Профиль представляет собой набор свойств пользователей системы, которые могут быть ис-

пользованы для определения. Эти свойства хранятся в базе данных и постоянно обновляются. Содержимое профиля довольно статично, потому что информация хранится в базе данных и редко меняется в повседневной деятельности. Формальным образом профиль содержит следующую информацию о пользователе: пол, возраст, роль в доме, семейное положение, количество детей.

Профилирование представляет собой непрерывную фоновую деятельность, включающую извлечение полезной информации от пользователя и его текущего контекста (например, местоположение пользователя, его поведение, температура в помещении), помогающей идентифицировать потребности пользователя, выбирать подходящие услуги и настраивать параметры выбранных услуг, чтобы позволить среде AmI вести себя в соответствии с предпочтениями, действиями и ожиданиями пользователей. Следовательно, деятельность по профилированию необходима для создания осознанной, адаптивной и отзывчивой среды для удовлетворения потребностей и предпочтений пользователей. Соответственно, если профилирование не работает должным образом, некоторые функции AmI могут быть никогда не реализованы

Профиль конечного пользователя включает в себя «личность» пользователя (это может быть необходимо только для получения идентификатора или использования режима идентификации) и его/ее предполагаемые потребности и предпочтения. Профиль услуги описывает параметры услуги, эксплуатационные требования и доступность услуги.

Данные

Профили — это, по сути, подмножества устройств, установленных на каждом объекте, принадлежащем пользователю. У каждого пользователя может быть один или несколько профилей. Идея заключается в том, чтобы позволить пользователю группировать свои устройства для «умного дома» подходящим образом. Хотя у пользователя может быть один профиль для всех своих устройств, у него также может быть один профиль, показывающий только камеры у входной двери для всех его объектов. Или, например, один профиль только для термометров, установленных во всех комнатах его квартиры.

Все профили, созданные пользователями, хранятся в profile таблице [3]. Для каждого профиля определяется список всех включенных в него устройств. Этот список хранится в profile_device_list таблице и содержит список уникальных profile_id — device_id пар. Эта пара внешних ключей формирует первичный ключ таблицы (рис. 2).

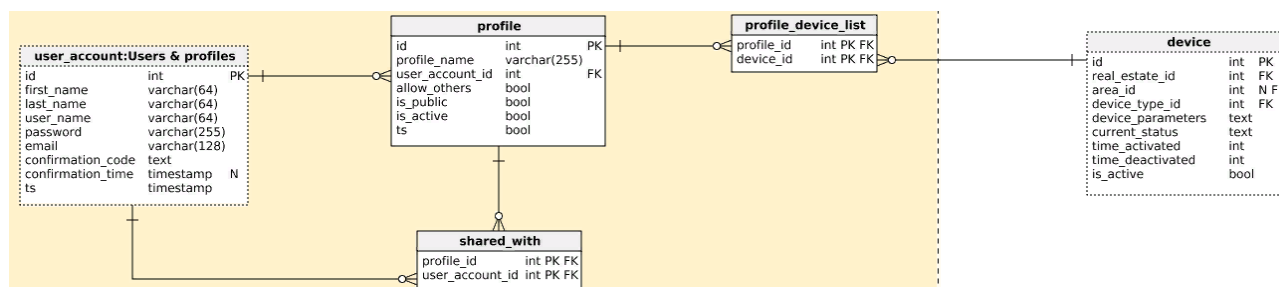


Рис. 2. База данных профилей

Для каждой записи может быть следующее:

- profile_name — имя профиля, выбранное пользователем;
- user_account_id — ссылка на пользователя, создавшего этот профиль. Этот атрибут и profile_name-атрибут образуют уникальный ключ таблицы;
- allow_others — флаг, обозначающий, доступен ли этот профиль другим пользователям;
- is_public — флаг, обозначающий, является ли этот профиль общедоступным. Хотя можно ожидать, что в большинстве случаев для этого параметра будет установлено значение «False», могут быть случаи, когда пользователю захочется поделиться профилем со всеми;
- is_active — флаг, обозначающий, активен этот профиль или нет;
- ts — временная метка, указывающая, когда была вставлена эта запись.

Таблица профилей позволяет пользователям делиться своими профилями с другими зарегистрированными пользователями. Это нужно, например, если всем управляет один человек, а другие зарегистрированные пользователи (например, члены семьи) хотят просматривать профили, созданные вла-

дельцем. В shared_with таблице сохраняется список всех уникальных пар profile_id — user_account_id. Эта пара внешних ключей является первичным ключом таблицы.

Структура и технологии системы профилирования

Структура системы профилирования состоит из двух основных компонентов. Менеджер профилей — это инструмент, ответственный за создание используемых профилей и управление ими. Пользователи взаимодействуют непосредственно с инструментом через графический интерфейс, который связывает все операции. Второй компонент предназначен для правильного разрешения конфликтов между предпочтениями и применения оптимизации к профилям. Полученным результатом являются действия в среде, в которой находятся пользователи. Структура системы профилирования показана на рисунке 3. Элементы (с закруглениями) являются конкретными элементами и тесно связаны с деятельностью по профилированию. Элементы (без закругления) являются пространственными элементами, относящимися к пространству AmI. Они осуществляют сбор данных для профилирования (осведомленности об окружающей среде) и применяют результаты профилирования соответствующим способом [4].

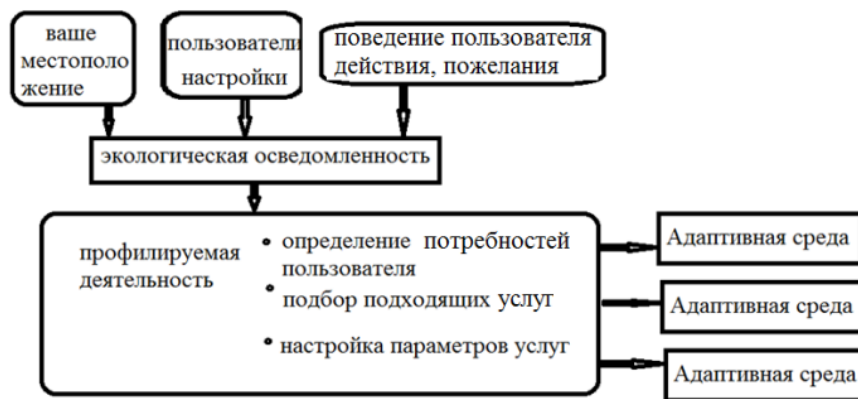


Рис. 3. Профилирование в «умном доме»

Сохранение данных достигается с помощью XML-файла, из которого считываются и в который сохраняются профили пользователей. Коммуникационные протоколы используются для выполнения действий над устройствами в соответствии с предпочтениями пользователей.

Profile Manager — это программное обеспечение, предназначенное для жителей «умного дома» или посетителей, которые могут определять, редактировать и просматривать свои пользовательские профили. Поскольку разработка ориентирована на пользователя, одним из основных свойств этого инструмента является удобство использования. Это должен быть интуитивно понятный и практичный интерфейс, позволяющий пользователям быстро осваиваться, что делает создание профиля эффективным. Основными функциональными возможностями приложения являются: контроль доступа, управление пользователями и управление профилем.

Менеджер профилей также извлекает и применяет профили в процессе рассуждения. Профиль определяет предпочтения пользователя для каждого контекста. Используя профиль в рассуждениях, можно повлиять на результирующий контекст, а также на обычные сервисы. Ранее профиль использовался только для поддержки персонализированных сервисов [5, 6, 7]. Менеджер профиля написан с использованием расширяемого языка шаблонов (XML), пример которого показан на рисунке 4 [8].

Работа с профилем. После входа в систему обычные пользователи переходят непосредственно в окно управления профилем, где профили пользователей отображаются в виде списка, отсортированного по типу профиля. В правой части списка нужно показать несколько кнопок, а именно: Создать Профиль, Показать профиль, Отредактировать профиль и Удалить профиль. В процессе создания нового профиля можно указать тип профиля, который настраивается: общий, специфический или Activity. В случае выбора общего профиля (по одному для каждого пользователя) будет предложено настроить одну или несколько областей предпочтений. Процесс определения нового действия аналогичен процессу создания общего профиля, разница в том, что с его деятельностью также связано название, облегчающее идентификацию. Конкретный профиль должен включать подразделение или несколько подразделений (включая тип номера), к которым применяются предпочтения. Пример сценария показан в таблице [9].

```

<?xml version=1.0 encoding=ISO-8859-1 ?>
  <UserProfile>
    <UPMProfileID>pid</UPMProfileID>
    <UPMObject>
      <ObjectName>general</ObjectName>
      <Attribute>
        <AttributeName>UserID</AttributeName>
        <AttributeType>alphanum</AttributeType>
        <AttributeValue>.</AttributeValue>
      </Attribute>
      <Attribute>
        <AttributeName>UserName</AttributeName>
        <AttributeType>alpha</AttributeType>
        <AttributeValue>.</AttributeValue>
      </Attribute>
    </UPMObject>
    <UPMObject>
      <ObjectName>Application1</ObjectName>
      <Attribute>
        <AttributeName>.</AttributeName>
        <AttributeType>.</AttributeType>
        <AttributeValue>.</AttributeValue>
      </Attribute>
      <Method>
        <MethodName> </MethodName>
        <MethodType>.</MethodType>
        <MethodValue> </MethodValue>
        <MethodInput> </MethodInput>
        <MethodOutput> ..</MethodOutput>
      </Method>
    </UPMObject>
  </UserProfile>

```

Рис. 4. XML-определение профиля пользователя

Для формирования профилей необходимо определение активности жителей «умного дома». Существует много алгоритмов на основе датчиков движения, датчиков холла для определения входа — выхода, датчиков изображения. Пример нейросетевого алгоритма в определении активности представлен ниже [10].

Обобщенный алгоритм для нейронной сети

1. Процедура Определение АКТИВНОСТИ.
2. Создать нейронную сеть.
3. Обучение нейронной сети на известных значениях присутствия и состояния двери.
4. Считывание из файла значений присутствия и состояния дверей.
5. Опрос нейронной сети.
6. Line ← строка fileReading содержит значения присутствия и двери с одинаковой меткой времени.
7. Если Line = null, то
8. Состояние (значение присутствия [Line], значение состояние двери [Line]).
9. Активность распознана нейронной сетью.
10. Если Активность = 0, тогда никакой деятельности.
11. Печать результатов активности.

В зависимости от доступности входных и выходных данных, обучение в ANN делится на кон-

Таблица

Пример сценария профиля

Сценарий	Описание
Утренний пик	Каждое утро перед тем, как идти на работу, Жуан любит включать на кухне телеканал, чтобы просмотреть информацию о дорожном движении. Входя в ванную, Пользователь может наслаждаться интенсивностью освещения 90% и слушать любимую радиостанцию.
Активность в гостиной	Пользователь находится в гостиной, читает книгу и включает на телевизоре интересующий его фильм. Таким образом, он выбирает действие «Просмотр фильма», которое учитывает его предпочтения в освещении, температуре, уровень зрения.
Конфликт на кухне	Готовя завтрак, Анна любит слушать радиостанцию FM и использует освещение на уровне 80%. Педро заходит на кухню одновременно с Анной, чтобы приготовить себе завтрак. Однако у него есть свои предпочтения по радиостанции: он любит RFM, температуру 24 С и уровень света 55%. Позже присоединяется Жозе, и ему нравится температура 21% и уровень освещенности 40%.
Уточнение профиля	У Джона в профиле идеальный уровень освещенности 40%. Однако этот уровень освещенности больше не соответствует его потребностям. Поэтому он отменяет это значение вручную до 90%.

тролируемое, неконтролируемое и обучение с подкреплением. В рамках этих реализаций рассматривается контролируемое обучение, предполагающее, что набор входных и ожидаемых выходных данных известен. Для обучения сети необходимо пройти фазу обучения, на которой свяжем между нейронами присваиваются веса. Алгоритмы обучения обычно присваивают соединениям псевдослучайные номера в начале процесса. Веса меняются в зависимости от срока действия результатов до тех пор, пока можно допускать низкий уровень ошибки. После обучения сеть пригодна для распознавания активности даже на данных, отличающихся от обучающего набора.

Типы профилей

Нужно создавать легко настраиваемый, но в то же время автоматически реализуемый профиль. Целесообразно создавать три типа профилей пользователей: общий профиль, профиль активности и конкретный профиль.

Универсальный профиль — практичный и эффективный, связанный с одной или несколькими предпочтительными областями, должен быть быстрым и простым в настройке (требуется только начальная настройка). Этот профиль позволяет пользователю устанавливать свои самые обычные предпочтения. Его работа происходит автоматически.

Мероприятия — служат другой цели, поскольку они связаны с регулярными занятиями, такими как чтение, просмотр телевизора или физические упражнения. Они активируются пользователем вручную и позволяют выполнять задачи спонтанно. Например, для режима чтения можно установить интенсивность освещения на уровне 90% и уменьшить громкость звука, в то время как для физических упражнений можно включить музыку и установить громкость на 80%. Действия настраиваются индивидуально каждым пользователем и также не зависят от места проживания.

Конкретный профиль — этот профиль активируется автоматически и позволяет пользователям указывать свои предпочтения в зависимости от комнаты (например, гостиной или кухни). Этот тип профиля позволяет индивидуально настраивать устройства в помещении. Следовательно, из-за высокой степени настраиваемости этот тип профиля требует усилий со стороны пользователя. Это может быть полезно, например, если нужно установить особые условия для работы в кабинете.

Обнаружение и разрешение конфликтов

Трудности могут возникнуть, когда предпочтения и требования нескольких присутствующих пользователей противоречат друг другу или накладываются друг на друга. «Умный дом» является примером многопользовательской среды, и функции профилирования должны разрешать такие конфликты.

Например, конфликт по поводу использования общих ресурсов, то есть совместного использования объектов или услуг разными пользователями, например, одного телевизора в доме, является довольно распространенным явлением. Одним из решений является объединение профилей для одновременного реагирования на пользователей или для направления пользователям конкретной среды / материала / объекта в зависимости от приоритетов, установленных в процессе объединения.

Обнаружение конфликтов. Поскольку система будет использоваться в «умном доме», местоположение пользователей всегда должно быть известно. Алгоритмы используют эту информацию для разрешения конфликтов и применения профилей пользователей. Эту информацию можно получить с помощью умных часов, смартфонов или оборудования, позволяющего автоматически распознавать пользователя при входе в помещение и выходе из него. Зная эту информацию, можно определить, соответствуют ли профили предпочтения пользователей, находящихся в общем пространстве, или противоречат друг другу, и немедленно применить механизм разрешения конфликтов.

Разрешение конфликтов. Стратегия разрешения конфликтов основана на решении учета уровня предпочтений пользователей для каждой из областей предпочтений. При разрешении конфликтов конечную величину каждого свойства нужно рассчитывать отдельно. Например, значение, которое система присваивает свойству интенсивности света, вычисляется отдельно от значения, которое должно быть присвоено свойству температуры. В исходное уравнение должен быть введен новый параметр, представляющий иерархию пользователей. Поскольку все пользователи имеют определенный уровень доступа, с учетом иерархии обеспечивается большее влияние на разрешение конфликтов для пользователей с более широким доступом. Это учтено в уравнении CR [11]. Переменные L_a и L_b представляют уровень предпочтений пользователя А и В соответственно над областью предпочтений. Переменные A_a и A_b соответствуют уровню доступа или привилегиям, которые пользователи А и В имеют перед системой. Переменные P_a и P_b — это значения, которые пользователи А и В соответственно предпочитают для этого свойства.

$$CR = \frac{L_a \cdot P_a + L_b \cdot A_b \cdot P_b}{L_a \cdot A_a \cdot A_b}.$$

С другой стороны, в ситуациях, когда существуют примеры, такие как телевизионные каналы, радиостанции, любимые виды музыки, подход должен быть различным, потому что невозможно конкретно уравнивать, например, канал. Для разрешения ситуаций с конфликтами такого типа нужно использовать таблицы. Каждому из доступных каналов присваивается значение, соответствующее умножению уровня предпочтений пользователя (для развлекательной зоны) на его уровень доступа. В другой ситуации система отдает приоритет телеканалу, который смотрит наибольшее количество пользователей. Наконец, если количество пользователей одинаково, приоритет будет отдан предпочтению пользователя, который находится в помещении дольше всех.

Области предпочтений профилей пользователей

Целесообразно ввести концепцию зон предпочтения для выбора пользователю, какими сервисами из «умного дома» он хочет управлять. «Умный дом» может иметь несколько зон, таких как освещение, уединение, кондиционирование воздуха, развлечения, телемедицина.

Каждая из этих областей состоит из определенных свойств, относящихся к рассматриваемой области. Например, зона развлечений может иметь такие свойства, как телевизионный канал, радиостанция, громкость, в то время как зона конфиденциальности может включать в себя такие свойства, как положение штор. Зона телемедицины имеет такие свойства, как сигналы с датчиков, состояние здоровья.

Эти области являются динамическими и могут быть изменены по количеству и типу. Если, например, в жилом помещении нет регулируемых жалюзи, зона уединения может быть удалена. В другом доме, может быть, нужно иметь зону, связанную с безопасностью. Если необходимо добавить или удалить свойства из области, это можно сделать, например, удалив свойство радиостанции и добавив другое, связанное с типом музыки. Из существующих областей предпочтений пользователь может выбрать, для каких областей он хочет сохранить предпочтения (только для двух областей или для всех).

Каждый пользователь должен явно указать уровень предпочтений для выбранных им областей. Конкретно уровень предпочтений соответствует шкале от «очень низко», «невысоко», «нейтрально», «высоко» и «очень высоко», представленной натуральными числами от 1 до 5 соответственно.

Фреймворк для «умного дома»

Основная цель системы «умного дома» состоит в интеграции устройств различных технологий, таких как датчики и исполнительные механизмы, и поддержке взаимодействия с X10, KNX и другими технологиями. Управляющая сеть должна обеспечивать высокую масштабируемость и не зависеть от количества устройств. Архитектура в общем может состоять из модулей управления (СМ) и модулей контроля (СМ), которые соединены между собой с помощью com-портов (рис. 5) [12].

Коммуникационная сеть позволяет им взаимодействовать друг с другом. СМ реализуются на базе микропроцессоров, которые подключаются непосредственно к переключателям, датчикам температуры, инфракрасным приемникам и другим устройствам ввода, и они могут управлять силовой электроникой, используемой, например, для регулировки интенсивности освещения или для включения / выключения небольших двигателей, насосов, ламп, электронагревателей или кондиционеров воздуха. Каждый СМ способен управлять несколькими устройствами и выполнять различные другие функции. Такой подход более экономичен (рис. 5).

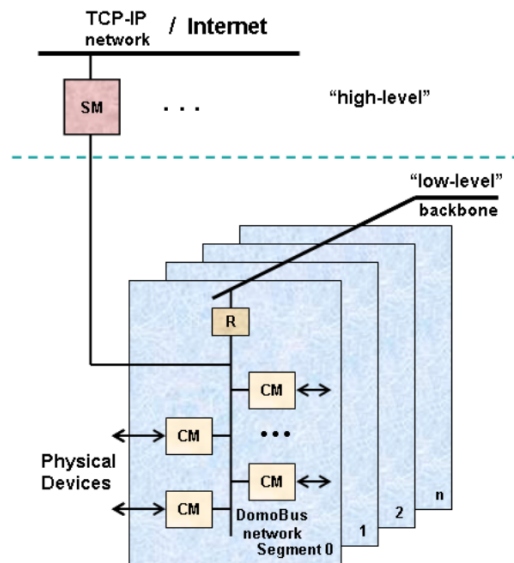


Рис. 5. Структурная схема фреймворка для «умного дома»

СМ отвечают за системное управление и надзор. Они получают информацию от СМ, обрабатывают ее в соответствии с запрограммированными правилами и требуемым поведением и выдают соответствующие команды для СМ.

Модель устройств «умного дома» должна быть простой и модульной, что позволит ей стать гибкой и расширяемой системой, обеспечивающей хороший уровень функциональности. Чтобы позволить различным технологиям сосуществовать в одной и той же системе, нужно иметь абстрактную модель для единообразного представления каждого устройства, представленную в виде общего объекта, характеризующегося одним или несколькими свойствами. Определение любого устройства может быть выполнено динамически, добавляя столько свойств, сколько требуется для выражения функционального уровня, необходимого для устройства.

Например, если представить регулируемый источник света, можно описать его в общем виде, используя два свойства: свойство «состояние», которое определяет, включен или выключен свет, и «интенсивность» — свойство, представляющее интенсивность света по шкале от 0 до 100%. Эту модель можно легко использовать для представления более сложных устройств, например, телевизора. Предполагая, что это имеет значение только для управления состоянием, каналом и громкостью телевизора, необходимы только три свойства: «состояние» (вкл./выкл.), «канал» (1–250) и «громкость» (0–20). Аналогичный подход можно использовать с кондиционерами и другим оборудованием.

Протокол связи должен определять простой и универсальный способ взаимодействия устройств, основанный всего на трех типах сообщений:

- ПОЛУЧИТЬ — позволяет считывать значение свойства данного устройства; используя это сообщение, можно в любой момент отслеживать состояние любого устройства;

- УСТАНОВИТЬ — позволяет записать новое значение в свойство устройства; это сообщение предлагает механизм для изменения состояния устройства и, таким образом, управления им;
- УВЕДОМЛЯТЬ — это сообщение автоматически передается устройствами всякий раз, когда изменяется значение одного из его свойств. Это позволяет приложениям уровня контроля или пользовательским интерфейсным приложениям всегда быть в курсе последних событий без необходимости постоянной отправки сообщений GET для получения информации о текущем состоянии системы.

Методика оценки удобства использования профилей

Оценку удобства использования профилей лучше выполнять из заданий, которые позволят пользователям ознакомиться с менеджером профилей и использовать все доступные функции. Таким образом, можно обеспечить полный охват инструмента и получить отзывы о пользовательском опыте. Пользователи должны начинать с выполнения простых задач, таких как создание пользователя, и, в конце концов, создавать более полный профиль. При этом пользователи создают три типа профилей и имеют дело непосредственно с соответствующими понятиями, такими как область предпочтений, уровень предпочтений, свойства и их значения.

Все пользователи должны выполнить один и тот же набор задач. Для каждой задачи необходимо определить среднее значение в зависимости от времени выполнения, количества ошибок и пользовательского опыта, чтобы провести статистический анализ результатов и оценить удобство создания профилей пользователей.

Заключение

В последние годы популярность «умных домов» возросла. Однако их использование происходит медленнее по сравнению с тем, что ожидалось, поскольку доступные решения все еще имеют некоторые ограничения. Существующие системы в основном основаны на технологически ориентированных подходах, а не на более простых, ориентированных на пользователя решениях [13].

Успех «умных домов» напрямую связан с удовлетворением потребностей пользователей и простотой использования. В этом контексте вводится понятие профиля пользователя. Профиль предоставляет возможность настраивать систему, позволяя пользователям выражать свои предпочтения в подробной или обобщенной форме. Целесообразно использовать общий и специальный профили:

- общий профиль: основной характеристикой такого профиля является простота настройки предпочтений пользователя, независимо от места проживания. Действие дает пользователю возможность определить и активировать, в любой момент они отдадут предпочтение выполнению определенной задачи;
- специальный профиль гарантирует возможность детальной настройки параметров определенных устройств, а также персонализации предпочтений в соответствии с разделением дома.

Поскольку пользователи могут иметь различные предпочтения, существует необходимость разрешать конфликты между различными пользовательскими требованиями. Механизм разрешения учитывает множество факторов, а именно иерархический уровень пользователей, предпочтения, выраженные пользователями в отношении определенного аспекта, количество вовлеченных пользователей и порядок поступления в пространство. Кроме того, нужно ввести механизм для уточнения профиля, который учитывает количество раз, когда пользователь вручную изменяет свойство среды, и величину этого изменения, автоматически корректируя его профиль. Управление профилями пользователей и их создание обеспечивается с помощью менеджера профилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wilson C., Hargreaves T., Hauxwell-Baldwin R. Smart Homes and Their Users: a Systematic Analysis and Key Challenges. *Personal and Ubiquitous Computing*. 2014;19(2):463–476. DOI: 10.1007/s00779-014-0813-0.
2. Casas R. et al. *User Modelling in Ambient Intelligence for Elderly and Disabled*. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/221010185>. DOI: 10.1007/978-3-540-70540-6_15.
3. Feki M. A., Abdulrazak B., Mokhtari M. *XML Modelisation of Smart Home Environment*. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/236877448_XML_modelisation_of_smart_home_environment. DOI: 10.1109/ICTTA.2004.1307646.

4. Яковлева М. О., Углев В. А. Методическое и алгоритмическое обеспечение интеллектуальной системы управления в технологии «умный дом». *Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта: Материалы Международной конференции*. Днепропетровск: НГУ; 2016. С. 252–257.
5. Morikawa D., Honjo M., Yamaguchi A., Ohashi M. A Proposal of User Profile Management Framework for Context-Aware Service. *Proceedings of the Symposium on Applications and the Internet Workshops*; 2005. Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Proposal-of-User-Profile-Management-Framework-for-Morikawa-Honjo/8d4e946fe04ac7a64425c7055901f5328c508ecd>. DOI: 10.1109/SAINTW.2005.1620007.
6. Groppe J., Mueller W. Profile Management Technology for Smart Customizations in Private Home Applications. *Database and Expert Systems Application*; 2005. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/4174875_Profile_Management_Technology_for_Smart_Customizations_in_Private_Home_Applications. DOI: 10.1109/DEXA.2005.156.
7. Thomsen J., Vanrompay Y., Berbers Y. Evolution of Context-Aware User Profiles. *International Conference on Ultra Modern Telecommunications and Workshops*; 2009. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/221003387_Evolution_of_context-aware_user_profiles. DOI: 10.1109/ICTTA.2004.1307646.
8. Ma Z., Silver D. L., Shakshuki E. M. User Profile Management: Reference Model and Web Services Implementation. *Int. J. Web and Grid Services*. 2010;6(1):1–34. DOI: 10.1504/IJWGS.2010.032189.
9. Chaki D., Bouguettaya A., Mistry S. A Conflict Detection Framework for IoT Services in Multi-resident Smart Homes. *IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*; 2020. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/347868130_A_Conflict_Detection_Framework_for_IoT_Services_in_Multi-resident_Smart_Homes. DOI: 10.1109/ICWS49710.2020.00036.
10. Skocir P. et al. Activity Detection in Smart Home Environment. *Procedia Computer Science*. 2016;96:672–681. DOI: 10.1016/j.procs.2016.08.249.
11. Park I., Lee K., Lee D., Hyun S. J., Yoon H. Y. A Dynamic Context Conflict Resolution Scheme for Group-Aware Ubiquitous Computing Environments. *Proceedings of the 1st International Workshop on Personalized Context Modeling and Management for UbiComp Applications (ubiPCMM 2005)*; 2005. Режим доступа: <https://ceur-ws.org/Vol-149/paper07.pdf>.
12. Iliev Y., Ilieva G. A Framework for Smart Home System with Voice Control Using. *NLP Methods. Electronics*. 2023;12:116. DOI: 10.3390/electronics12010116.
13. Bejarano A., Fernández A., Jimeno M., Salazar A., Wightman P. M. Towards the Evolution of Smart Home Environments: A Survey. *International Journal of Automation and Smart Technology*. 2016;6(3):105–136. DOI: 10.5875/ausmt.v6i3.1039.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-07

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ОБ ОБТЕКАНИИ ПРОФИЛЯ КРЫЛА**А. А. Рассадин^{1,а}, А. В. Ряховский^{2,1,б}**¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация² Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация^а ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5596-0891>, ✉ rassadin_aa@edu.surgu.ru^б ryakhovskij_av@surgu.ru

Аннотация: в статье рассмотрена задача об обтекании крыла турбулентным потоком; проведено сравнение полученных данных с результатами численных и натурных экспериментов других авторов; для моделирования турбулентности использовались уравнения, усредненные по Рейнольдсу, совместно с моделью Спаларта–Аллараса; расчеты выполнены средствами программной платформы OpenFOAM.

Ключевые слова: моделирование турбулентности, несжимаемая жидкость, обтекание крыла NACA0012, верификация платформы OpenFOAM.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Для цитирования: Рассадин А. А., Ряховский А. В. Моделирование турбулентного течения на примере задачи об обтекании профиля крыла. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):64–74. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-07.

Поступила в редакцию: 13.05.2024.

В окончательном варианте: 24.05.2024.

TURBULENT FLOW SIMULATION FOR THE WING AIRFOIL ANALYSIS PROBLEM**A. A. Rassadin^{1,а}, A. V. Ryakhovskij^{2,1,б}**¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation² Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation^а ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5596-0891>, ✉ rassadin_aa@edu.surgu.ru^б ryakhovskij_av@surgu.ru

Abstract: this paper considers the problem of turbulent flow around an airfoil. The data obtained were compared with the results of numerical and physical experiments by others. Turbulence is modeled through Reynolds-averaged Navier–Stokes equations together with the Spalart–Allmaras model. We used the OpenFOAM software for the analysis.

Keywords: turbulent flow simulation, incompressible flow, NACA0012 airfoil, OpenFOAM verification.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, project No.1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Rassadin A. A., Ryakhovskij A. V. Turbulent Flow Simulation for the Wing Airfoil Analysis Problem. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):64–74. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-07.

Original article submitted: 13.05.2024.

Revision submitted: 24.05.2024.

Введение

Как известно, в природе и технических устройствах преобладают турбулентные течения. Например, движение воздушных масс в атмосфере Земли, следы при обтекании судов, автомобилей и летательных аппаратов. Турбулентность обеспечивает интенсивное перемешивание вещества, этим часто пользуются в химической промышленности.

В турбулентном течении происходят хаотические изменения скорости и давления. Оно крайне неустойчиво, то есть малейшие изменения начальных или граничных условий приводят к существенным различиям при дальнейшем развитии потока. Причем турбулентность не связана со свойствами вещества, а является одним из видов движения сплошной среды [1].

В настоящее время при изучении различных физических процессов часто прибегают к вычислительным экспериментам. Этот метод исследования не требует больших затрат, которые могут возникнуть при проведении натурных измерений. Также с помощью компьютера можно за сравнительно небольшое время провести целую серию симуляций при различных условиях. Но нужно заметить, что результаты, полученные в ходе вычислительного эксперимента, напрямую зависят от используемой математической модели.

Для решения задач механики сплошных сред разработано множество специальных программ, которыми пользуются как ученые-исследователи, так и обычные инженеры. При разработке численных методов обязательно учитывают влияние турбулентности. Но «прямое» численное моделирование турбулентности приводит к огромным вычислительным затратам, поэтому существуют различные способы моделирования турбулентности. В рамках каждого из них существует несколько моделей, разработанных под конкретные частные случаи течений.

В зависимости от программы реализация одной и той же математической модели может отличаться. Поэтому для выбранной программы проводят так называемую верификацию. В процессе верификации данные, полученные в выбранной программе, сравнивают с «эталонными» значениями, чаще всего это результаты натурных экспериментов. Верифицированную программу можно использовать для численного исследования процессов механики сплошных сред.

В данной работе проведена верификация программной платформы OpenFOAM [2] на примере задачи об обтекании крыла турбулентным дозвуковым потоком [3]. Сделано сравнение результатов расчетов, выполненных с использованием средств OpenFOAM, с данными численных [4] и натурных [5], [6] экспериментов других авторов.

Математическое моделирование турбулентности

Основные уравнения механики сплошных сред

Математические модели механики сплошных сред предполагают, что жидкость или газ непрерывно заполняют рассматриваемую область пространства. Поэтому в уравнениях фигурируют **макроскопические характеристики**:

$$\begin{cases} \mathbf{x} \in D \subset \mathbb{R}^3, t \geq 0 \\ \rho = \rho(\mathbf{x}, t) \text{ — плотность} \\ p = p(\mathbf{x}, t) \text{ — давление} \\ \mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = (u_1(\mathbf{x}, t), u_2(\mathbf{x}, t), u_3(\mathbf{x}, t)) \text{ — скорость.} \end{cases} \quad (1)$$

При описании состояния сплошной среды могут быть использованы и другие макроскопические характеристики, например, температура $T(\mathbf{x}, t)$. Но в данной работе рассматривается вязкая, несжимаемая, изотермическая сплошная среда. При таком предположении являются постоянными плотность среды $\rho \equiv \text{const}$ и её вязкость $\mu \equiv \text{const}$.

Уравнения движения¹ для трехмерного течения вязкой несжимаемой жидкости [7]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x^k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x^i} + \nu \frac{\partial}{\partial x^k} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x^i} + \frac{\partial u_i}{\partial x^k} \right) + f_i, \quad i = 1, 2, 3$$

где f_i — удельная объемная сила,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ — кинематическая вязкость } (\mu, \rho \equiv \text{const}).$$

¹ В работе используется соглашение о суммировании по повторяющимся индексам. Например, в выражении $a^k b_k$ подразумевается суммирование: $a^k b_k = a^1 b_1 + a^2 b_2 + a^3 b_3$ (число слагаемых определяется из контекста).

Выражения (2) называют **уравнениями Навье–Стокса**. При фиксированном значении индекса i в левой части равенства (2) записано удельное изменение импульса, а в правой части — сумма сил, действующих на элемент среды. К уравнениям Навье–Стокса добавляется *ограничение*, называемое **уравнением неразрывности**. Оно отражает закон сохранения массы и для несжимаемой среды записывается в виде:

$$\frac{\partial u_k}{\partial x^k} = 0. \quad (3)$$

В настоящее время считается [1], [7], [8], что уравнения Навье–Стокса пригодны для описания турбулентности. Турбулентное движение очень сложное, в частности, в нем возникают вихри различных масштабов. Поэтому расчет нужно проводить на очень мелких пространственно-временных сетках, которые учитывают масштабы самых мелких вихрей. Из-за этого прямое численное решение уравнений (2), (3) требует огромных вычислительных ресурсов. Для практических расчетов прибегают к различным способам моделирования турбулентности.

Режим течения можно определить через число Рейнольдса [7], [9] $Re = \frac{\rho V L}{\eta} = \frac{V L}{\nu}$, где ρ — плотность среды, V и L — характерные скорость и длина соответственно, η — динамическая вязкость, $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ — кинематическая вязкость. Для различных областей течения существуют критические значения числа Рейнольдса $Re_{кр}$. Течение считается турбулентным, если $Re > Re_{кр}$.

Моделирование турбулентности методом RANS

В данной работе используется метод RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes) [7], [8]. При таком подходе расчет ведется только для *средних* значений скорости и давления. При этом используется так называемое **Рейнольдсово разложение**:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{U}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{u}'(\mathbf{x}, t), \quad p(\mathbf{x}, t) = P(\mathbf{x}, t) + p'(\mathbf{x}, t). \quad (4)$$

Согласно формуле (4) скорость и давление состоят из двух компонент: *средней* ($\mathbf{U}, P$) и *хаотически изменяющейся* ($\mathbf{u}', p'$). При теоретическом обосновании RANS подхода могут использоваться различные способы вычисления средних значений скорости и давления [7], [8].

Наиболее общим считается **статистическое усреднение** [8]. С этой точки зрения величины в турбулентном потоке рассматриваются как **случайные процессы**. Например, для скорости $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ это означает, что в фиксированной точке $\mathbf{x}_0$ переменная $\mathbf{u}(\mathbf{x}_0, t)$ будет **случайной величиной** для каждого момента времени. При описании всех возможных значений скорости трехмерного течения вводится пространство $\mathbb{R}^3$. Для скорости $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ в пространстве $\mathbb{R}^3$ вводится **функция плотности вероятности** (ФПВ) $f_u(\mathbf{V}; \mathbf{x}, t)$, удовлетворяющая условию нормировки:

$$\forall (\mathbf{x}_0, t_0) \in D : \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_u(\mathbf{V}; \mathbf{x}_0, t_0) dV_1 dV_2 dV_3 = 1, \quad (5)$$

где D — расчетная область.

Операция статистического усреднения обозначается горизонтальной чертой. По определению среднее значение скорости вычисляется с помощью функции плотности вероятности по следующей формуле:

$$\overline{u_i(\mathbf{x}, t)} = U_i(\mathbf{x}, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} V_i f_u(\mathbf{V}; \mathbf{x}, t) dV_1 dV_2 dV_3, \quad i = 1, 2, 3. \quad (6)$$

Для определения усредненного давления $P(\mathbf{x}, t)$ проводятся почти аналогичные выкладки с естественным учетом того, что в отличие от векторного поля скорости давление является скалярным полем.

Усредненное уравнение неразрывности (7) получается подстановкой разложения (4) в уравнение (3):

$$\frac{\partial U_k}{\partial x^k} = 0. \quad (7)$$

Равенство (7) формально не отличается от исходного уравнения (3), так как уравнение неразрывности *линейное*. Уравнения Навье–Стокса (2) содержат *нелинейные* слагаемые, поэтому их усредненная форма (8) отличается от исходной (2):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_k \frac{\partial U_i}{\partial x^k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x^i} + \nu \frac{\partial}{\partial x^k} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x^i} + \frac{\partial U_i}{\partial x^k} \right) + \bar{f}_i - \frac{\partial}{\partial x^k} \left(\overline{u'_i u'_k} \right), \quad i = 1, 2, 3. \quad (8)$$

В усредненных уравнениях (8) есть дополнительные неизвестные величины $-\overline{u'_i u'_k}$, которые образуют тензор **Рейнольдсовых напряжений** [1]. Слагаемые вида $-\overline{u'_i u'_k}$ появляются в результате усреднения *конвективной части* изменения импульса элемента жидкости. Их можно интерпретировать как дополнительные силы, изменяющие *средний импульс* элементов жидкости. Это проявляется в том, что у жидкости «увеличивается» вязкость.

Различные модели турбулентности в рамках RANS подхода отличаются тем, как в них рассчитываются Рейнольдсовы напряжения $-\overline{u'_i u'_k}$. Наиболее распространены модели, которые связаны с расчетом турбулентной вязкости. Концепция турбулентной вязкости была предложена французским ученым Жозефом Буссинеском в 1877 году, когда он выдвинул следующую гипотезу: *Рейнольдсовы напряжения пропорциональны градиентам компонент средней скорости течения* [8]. Аналитически гипотеза Буссинеска выражается формулой:

$$\begin{aligned} -\overline{u'_i u'_k} &= \nu_t \frac{\partial}{\partial x^k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x^k} + \frac{\partial U_k}{\partial x^i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ik}, \\ \text{где } \nu_t &\text{ — турбулентная вязкость } [\nu_t] = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right], \\ k &= \frac{1}{2} \left(\overline{u'_k u'_k} \right) \text{ — кинетическая энергия турбулентности,} \\ \delta_{ik} &\text{ — символ Кронекера: } \begin{cases} \delta_{ik} = 0, & i \neq k \\ \delta_{ik} = 1, & i = k \end{cases}. \end{aligned} \quad (9)$$

Формула (9) является определением турбулентной вязкости ν_t . Фактически Буссинеск предположил, что для Рейнольдсовых напряжений справедлив закон, аналогичный закону вязкости Ньютона [1]. Нужно заметить, что *турбулентная вязкость ν_t не является физическим свойством среды. Это лишь искусственный коэффициент пропорциональности.* Сравнение размерностей в формуле (9) и уравнениях RANS подхода (8) приводит к тому, что коэффициент ν_t должен быть пропорционален средней скорости. Следовательно, ν_t может изменяться в различных точках области течения.

Модель Спаларта–Аллмараса

Эта модель была представлена 1994 году в научной работе [10]. Изначально она разрабатывалась для аэродинамических расчетов. Сейчас ее часто используют и в других случаях, например, при моделировании процессов в турбинах.

Авторы модели вводят *промежуточную* величину $\tilde{\nu}$. Турбулентная вязкость ν_t рассчитывается с помощью величины $\tilde{\nu}$ по формуле:

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}, \quad c_{v1}, \nu \equiv \text{const}. \quad (10)$$

На вспомогательную величину $\tilde{\nu}$ эмпирически выведено дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^k} &= \\ &= c_{b1} (1 - f_{t2}) \tilde{S} \tilde{\nu} - \left[c_{\omega 1} f_{\omega} - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x^k} \left((\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^k} \right) + c_{b2} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^j} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^j} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Левая часть уравнения (11) — это стандартная форма «полной» производной по времени для величины $\tilde{\nu}$, находящейся в *несжимаемом* течении [8]. Слагаемые в правой части (11) можно разделить на 3 группы:

1. Согласно гипотезе Буссинеска (9) Рейнольдсовы напряжения, для моделирования которых используется величина $\tilde{\nu}$, тем больше, чем больше градиенты средних скоростей. Для этого введено слагаемое:

$$c_{b1}(1 - f_{t2})\tilde{S}\tilde{\nu}.$$

2. Эффекты турбулентности уменьшаются по мере приближения к твердым стенкам. Потому что становится существенным наличие молекулярной вязкости. Это обстоятельство учитывается слагаемым:

$$- \left[c_{\omega 1} f_{\omega} - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2.$$

3. Для подавления явлений, связанных с отрывом течения от поверхностей твердых стенок, используется слагаемое:

$$\frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x^k} \left((\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^k} \right) + c_{b2} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^j} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^j} \right].$$

Важно, что функции (f_{t2} , $\tilde{S}$, f_{ω} , d) — это всего лишь алгебраические соотношения (формулы для этих функций приведены в статье [10]). То есть при использовании данной модели нужно решать всего лишь одно дополнительное дифференциальное уравнение (11).

Постановка задачи

Рассматривается задача об обтекании крыла турбулентным потоком вязкой несжимаемой жидкости. Течение считается двумерным и стационарным при условиях:

$$Re = 6 \cdot 10^6, \quad M = 0,15. \quad (12)$$

В условиях (12) величина $M = \frac{U_{\infty}}{U_s}$ — число Маха, равное отношению скорости свободного потока U_{∞} к скорости звука при нормальных условиях $U_s = 343,21 \left[\frac{м}{с} \right]$. Число Рейнольдса $Re = \frac{U_{\infty} c}{\nu}$ рассчитано через длину хорды крыла ($c = 1$) и кинематическую вязкость среды ν . При сделанных предположениях $\nu \equiv const$. Крыло с профилем NACA0012 имеет симметричную форму, как показано на рис. 1. Детальное описание этой задачи приведено в [3].



Рис. 1. Черный контур — это профиль крыла NACA0012, зеленый отрезок — это хорда крыла

Система уравнений

Расчеты выполняются в рамках RANS-подхода совместно с моделью Спаларта–Аллмараса. Усредненные уравнения Навье–Стокса для двумерного стационарного течения:

$$U_k \frac{\partial U_i}{\partial x^k} = - \frac{\partial \tilde{P}}{\partial x^i} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial}{\partial x^k} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x^i} + \frac{\partial U_i}{\partial x^k} \right), \quad i = 1, 2, \quad (13)$$

где $\tilde{P} = \frac{p}{\rho} + \frac{2}{3} k \delta_{ik}$ — модифицированное давление.

Усредненное уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial U_k}{\partial x^k} = 0. \quad (14)$$

Стационарное уравнение на величину $\tilde{\nu}$ из модели Спаларта–Аллмараса [10]:

$$U_k \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^k} = c_{b1} \tilde{S} \tilde{\nu} - \left[c_{\omega 1} f_{\omega} - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x^k} \left((\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^k} \right) + c_{b2} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^j} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x^j} \right]. \quad (15)$$

Турбулентная вязкость ν_t рассчитывается по формуле:

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}, \quad c_{v1}, \nu \equiv \text{const.} \quad (16)$$

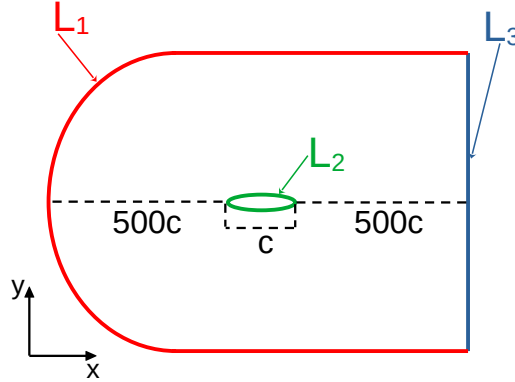


Рис. 2. Схема расчетной области, зеленый контур обозначает крыло, $c = 1$ (длина хорды)

Граничные условия

Расчетная область разбита на участки: L_1 , L_2 , L_3 , как показано на рис. 2. Граничные условия задаются для усредненной скорости течения $\mathbf{U}(\mathbf{x}) = (U_1(\mathbf{x}), U_2(\mathbf{x}))$ и вспомогательной величины $\tilde{\nu}(\mathbf{x})$, которая используется в модели Спаларта–Аллараса.

$$\left\{ \begin{array}{ll} L_1 : \mathbf{U} = (U_\infty \cos \alpha; U_\infty \sin \alpha), & U_\infty = 51,4815 \left[\frac{\text{М}}{\text{с}} \right], \quad \alpha - \text{угол атаки} \\ & \tilde{\nu} = 3\nu, \quad \nu = 8,5258 \cdot 10^{-6} \\ L_2 : \mathbf{U} = (0; 0), & \tilde{\nu} = 0 \\ L_3 : \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{n}} = 0, & \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad \mathbf{n} - \text{единичный вектор внешней нормали.} \end{array} \right. \quad (17)$$

Условия вида (17) используются в серии расчетов для углов атаки $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 15^\circ$. Угол атаки определяется между направлением скорости набегающего потока и хордой крыла.

Проведение численного решения

Расчеты проведены с использованием программной платформы OpenFOAM [2], разработанной для решения задач механики сплошных сред. В OpenFOAM численное решение выполняется методом контрольных объемов [11]. Согласно методу контрольных объемов для каждой ячейки сетки дифференциальное уравнение интегрируется, результат интегрирования аппроксимируется с помощью выбранных схем дискретизации. В итоге для каждой ячейки получается линейное уравнение, а совокупность таких уравнений вместе с условиями на граничных ячейках составляет систему линейных уравнений, после решения которой получается определить значения искомой величины в центрах ячеек расчетной сетки.

В качестве расчетной сетки используется одна из представленных авторами задачи [12]. Выбранная сетка имеет разрешение 449×129 . Сетка является структурированной и состоит из 57921 ячейки, размеры которых уменьшаются по мере приближения к поверхности крыла.

Использованные схемы дискретизации OpenFOAM [13], [14]:

- производная по времени — steadyState (исключение из уравнений);
- градиент — Gauss linear;
- лапласиан — Gauss linear corrected;
- дивергенция — bounded Gauss linearUpwind;
- производная по нормали — corrected;
- расстояние d до ближайшей стенки определялось методом exactDistance.

Уравнения гидродинамики (13) и (14) решались методом SIMPLE [11]. При решении систем линейных алгебраических уравнений для компонент скорости $\mathbf{U}$ и вспомогательной величины $\tilde{v}$ применен итерационный метод Гаусса–Зейделя. Система линейных алгебраических уравнений для давления $\tilde{P}$ решалась алгебраическим многосеточным алгоритмом GAMG [14], в котором в качестве «сглаживателя» выбран метод Гаусса–Зейделя.

Результаты вычислительных экспериментов

Исследуемые величины

В каждом расчете на основании полученных стационарных полей скорости и давления определялись безразмерные величины C_f, C_p, C_D, C_L :

- $C_f(\mathbf{x})$ — коэффициент поверхностного трения:

$$C_f(\mathbf{x}) = \frac{2\tau(\mathbf{x})}{\rho_\infty U_\infty}; \quad (18)$$

- $C_p(\mathbf{x})$ — коэффициент поверхностного давления:

$$C_p(\mathbf{x}) = \frac{2(p(\mathbf{x}) - p_\infty)}{\rho_\infty U_\infty}; \quad (19)$$

- $C_D(\alpha)$ — коэффициент силы сопротивления:

$$C_D(\alpha) = \frac{2D}{\rho_\infty U_\infty S}; \quad (20)$$

- $C_L(\alpha)$ — коэффициент подъемной силы:

$$C_L(\alpha) = \frac{2L}{\rho_\infty U_\infty S}. \quad (21)$$

В формулах (18), (19) величины $\rho_\infty = 1$, $U_\infty = 51,4815$, $p_\infty = 0$ — значения для невозмущенного потока (вдали от крыла). Положение точки $\mathbf{x}$ изменяется вдоль поверхности крыла. Величина $\tau(\mathbf{x})$ — модуль касательного напряжения [15]. В качестве давления $p(\mathbf{x})$ используется давление, рассчитанное из уравнения движения (13). В формулах (20), (21) величина D — модуль силы сопротивления, действующей на крыло со стороны обтекающего потока. Величина L — модуль подъемной силы, S — относительная площадь, для данной двумерной задачи $S = 1$. Более подробное описание параметров C_f, C_p, C_D, C_L приведено, например, в [15].

Коэффициенты C_D и C_L были рассчитаны с помощью функционального объекта `forceCoeffs` [13]. Расчет значений величин C_p и C_f вдоль поверхности крыла сделан с помощью утилиты `setExprBoundaryFields`, которая входит в состав OpenFOAM.

Визуализация результатов расчетов

Для углов атаки $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ распределение давления и линии тока векторного поля скорости вблизи крыла показаны на рис. 3–5 соответственно. Визуализация данных получена с помощью программы ParaView.

Профиль NACA0012 имеет симметричную форму, поэтому для угла атаки $\alpha = 0^\circ$ получилось одинаковое распределение давления и линий тока относительно обеих сторон крыла. Для других углов атаки отчетливо видно различие значений давления в областях под и над поверхностью крыла.

Результаты расчета величин C_f и C_p

На рис. 6, 7, 8 приведены графики для величин $C_f(x/c)$, $C_p(x/c)$, где x/c — нормализованная координата вдоль поверхности крыла ($0 \leq x/c \leq 1$) при углах атаки $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ соответственно.

Графики C_f построены только для верхней стороны крыла. Под каждым графиком записана величина $\Delta_{C_f}^{num}$ — максимальное абсолютное отклонение данных, полученных в этой работе с помощью платформы OpenFOAM, от результата численного эксперимента [4], выполненного в программе CFL3D.

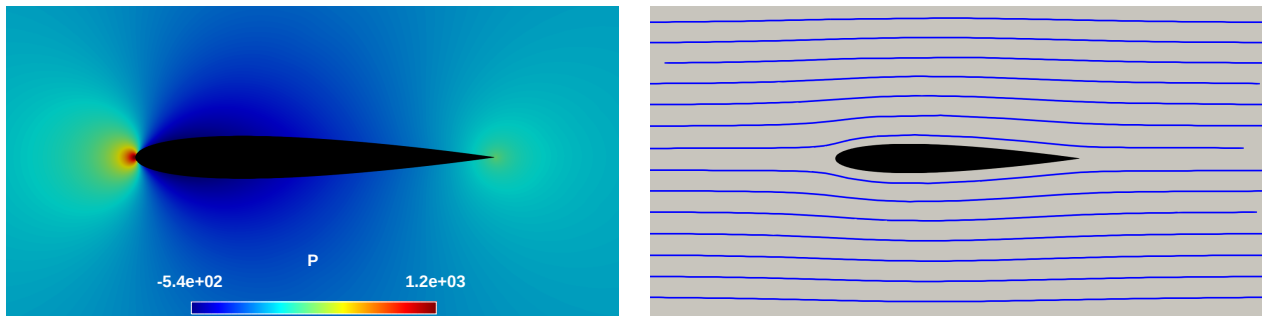


Рис. 3. Слева приведено распределение давления, справа показаны линии тока векторного поля скорости для угла атаки $\alpha = 0^\circ$

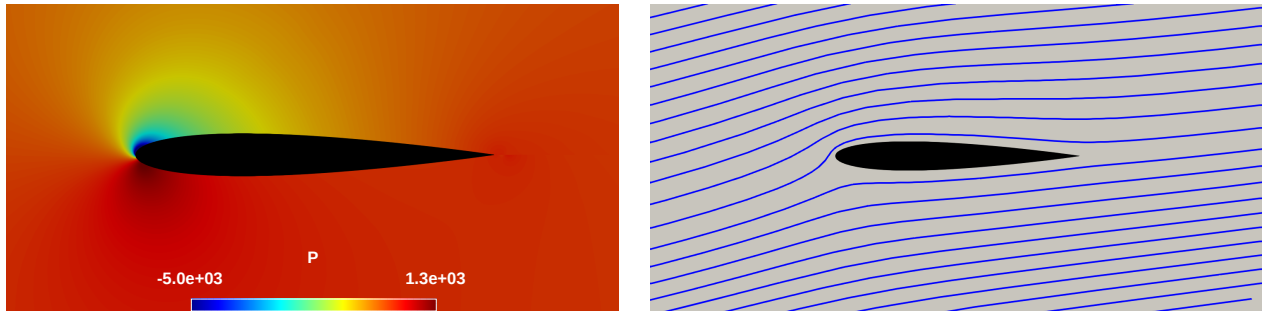


Рис. 4. Слева приведено распределение давления, справа показаны линии тока векторного поля скорости для угла атаки $\alpha = 10^\circ$

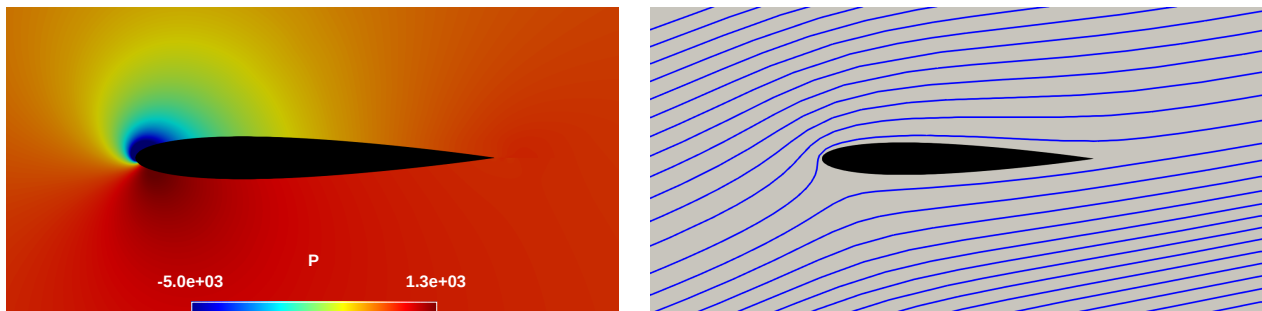


Рис. 5. Слева приведено распределение давления, справа показаны линии тока векторного поля скорости для угла атаки $\alpha = 15^\circ$

Графики C_p построены для обеих сторон крыла. Для каждого графика указана величина $\Delta_{C_p}^{lim}$ – **максимальное абсолютное отклонение** при сравнении с данными численного эксперимента [4]. Для величины C_p , кроме численных расчетов, приведены данные, полученные в натурном эксперименте [5].

Результаты расчета величин C_D и C_L

Значения коэффициентов аэродинамических сил C_D и C_L в зависимости от угла атаки показаны на рис. 9.

В таблице приведены относительные отклонения для значений коэффициентов C_D и C_L , полученных в этой работе с помощью OpenFOAM, и данных из численного эксперимента [4], проведенного в программе CFL3D.

Заключение

В данной работе кратко рассмотрен один из стандартных методов моделирования турбулентности, а именно решение уравнений, усредненных по Рейнольдсу (RANS подход), а также модель Спаларта–Аллмараса. Проведено численное решение задачи об обтекании крыла NACA0012 турбулентным потоком вязкой несжимаемой жидкости при различных углах атаки. Расчеты выполнены с

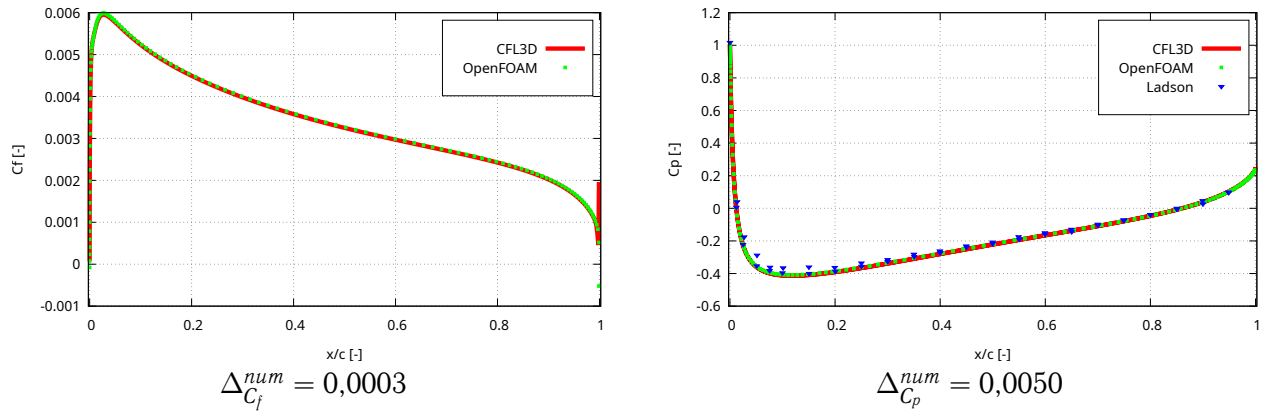


Рис. 6. Графики величин C_f (слева) и C_p (справа) для угла атаки $\alpha = 0^\circ$, зеленые точки — данные, полученные в этой работе с помощью OpenFOAM, красная кривая — результат численного эксперимента [4] в программе CFL3D, синие точки — измерения в натурном эксперименте [5]

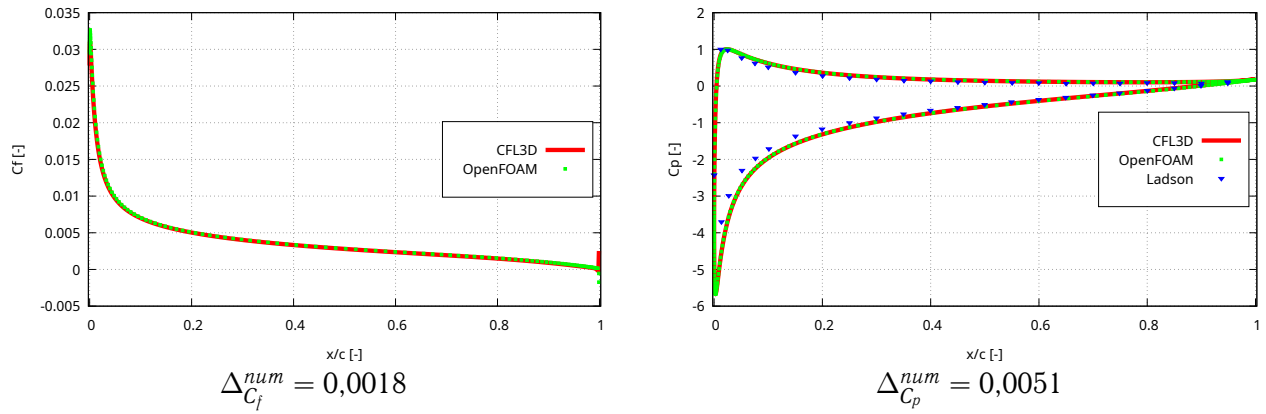


Рис. 7. Графики величин C_f (слева) и C_p (справа) для угла атаки $\alpha = 10^\circ$, зеленые точки — данные, полученные в этой работе с помощью OpenFOAM, красная кривая — результат численного эксперимента [4] в программе CFL3D, синие точки — измерения в натурном эксперименте [5]

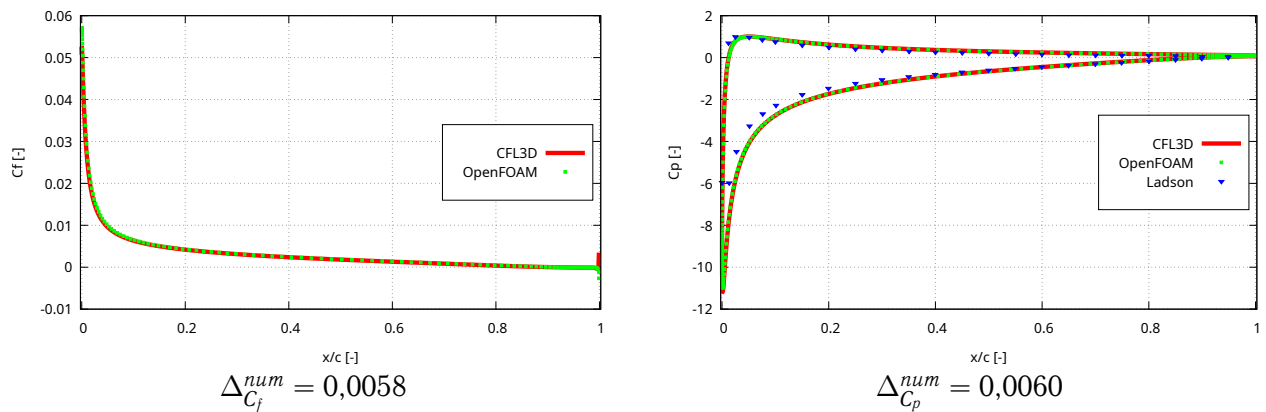


Рис. 8. Графики величин C_f (слева) и C_p (справа) для угла атаки $\alpha = 15^\circ$, зеленые точки — данные, полученные в этой работе с помощью OpenFOAM, красная кривая — результат численного эксперимента [4] в программе CFL3D, синие точки — измерения в натурном эксперименте [5]

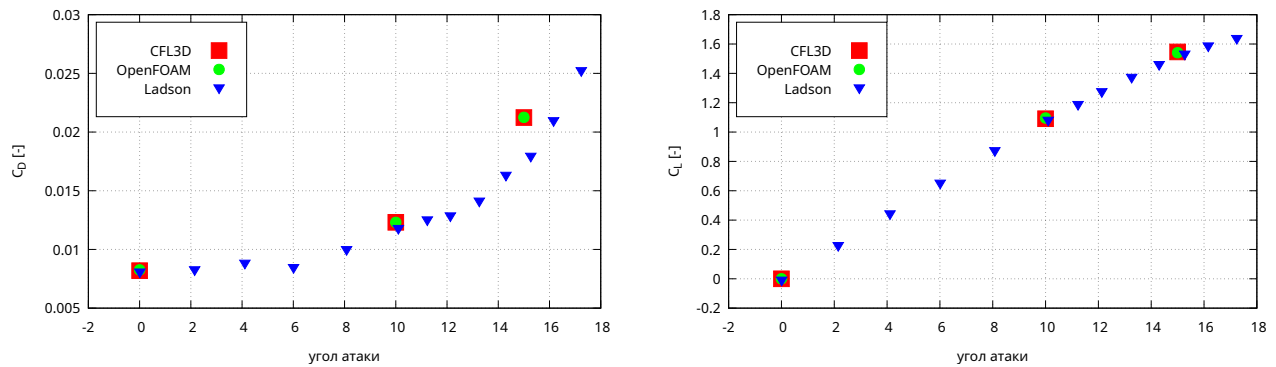


Рис. 9. Зеленые точки — результат численного расчета в данной работе, красные точки — результат численного эксперимента [4], синие точки — измерения в натурном эксперименте [6]

Таблица

Относительные отклонения для коэффициентов C_D и C_L

α	δ_{C_D} [%]	δ_{C_L} [%]
0°	0,85	1,28
10°	0,03	0,43
15°	0,08	0,35

использованием программного комплекса OpenFOAM. Получена визуализация давления и линий тока векторного поля скорости жидкости рядом с крылом. Выполнена обработка полученных данных, в ходе которой рассчитаны аэродинамические коэффициенты C_f , C_p , C_D , C_L . Для полученных значений проведено сравнение с данными численных и натурных экспериментов других авторов, которое показало качественную и количественную близость значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя*. М.: Наука; 1974.
2. OpenFOAM. Режим доступа: <https://www.openfoam.com/>.
3. 2D NACA 0012 Airfoil Validation Case. Режим доступа: https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012_val.html.
4. 2D NACA 0012 Airfoil Validation Case Spalart-Allmaras Model Results. Режим доступа: https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012_val_sa.html.
5. Ladson C. L., Hill A. S., Johnson W. G. *Pressure Distributions from High Reynolds Number Transonic Tests of an NACA 0012 Airfoil in the Langley 0.3-Meter Transonic Cryogenic Tunnel*. 1987. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19880009181>.
6. Ladson C. L. *Effects of Independent Variation of Mach and Reynolds Numbers on the Low-Speed Aerodynamic Characteristics of the NACA 0012 Airfoil Section*. 1988. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19880019495>.
7. Снегирёв А. Ю. *Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений*. Санкт-Петербург; 2009.
8. Pope S. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press; 2000.
9. Reynolds O. An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1883.
10. Spalart P. R., Allmaras S. R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. *AIAA*. 439. 10.2514/6.1992-439. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/236888804_A_One-Equation_Turbulence_Model_for_Aerodynamic_Flows.

11. Патанкар С. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости*. М.: Энергоатомиздат; 1984.
12. *Grids – NACA 0012 Airfoil Case*. Режим доступа: https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012_grids.html.
13. *OpenFOAM Documentation – Home*. Режим доступа: <https://doc.openfoam.com/2306/>.
14. Greenshields C., Weller H. *Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles*. CFD Direct Limited; 2022.
15. Anderson J. *Fundamentals of Aerodynamics*. 2017.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-08

СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**Т. В. Гавриленко^{1,2,a}, Д. В. Горбунов^{2,b}, В. А. Востров^{1,c}**¹ Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,

г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, ✉ taras.gavrilenko@gmail.com^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4420-9343>, gorbunov.dv@mail.ru^c ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1647-4416>, valeriy-v-mail@mail.ru

Аннотация: аддитивные технологии прочно вошли в современное информационное пространство. Значительному количеству людей понятны принципы функционирования данной технологии благодаря тому, что во многих учебных заведениях установлены несложные аддитивные системы (3D-принтеры), а простейшие приборы — 3D-ручки получили широкое распространение среди детей. Популяризаторы науки и техники информируют общество о безграничных перспективах аддитивных технологий и переходе на новый технологический уровень. Однако отрасль аддитивных технологий пока не демонстрирует удовлетворительных темпов развития. В настоящее время технология, имеющая огромный потенциал, не получает должного импульса для массового внедрения. Одной из причин такого состояния данной отрасли является отсутствие механизмов защиты интеллектуальной собственности 3D-моделей для печати.

Ключевые слова: аддитивные технологии, моделирование, 3D-печать, 3D-модель, искусственный интеллект, блокчейн, смарт-контракты для аддитивных технологий.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Для цитирования: Гавриленко Т. В., Горбунов Д. В., Востров В. А. Состояние и основные проблемы развития аддитивных технологий. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):75–83. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-08.

Поступила в редакцию: 21.04.2024.

В окончательном варианте: 02.06.2024.

ADDITIVE TECHNOLOGIES: CURRENT STATUS AND CHALLENGES**T. V. Gavrilenko^{1,2,a}, D. V. Gorbunov^{2,b}, V. A. Vostrov^{1,c}**¹ Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation² Surgut State University, Surgut, Russian Federation^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, ✉ taras.gavrilenko@gmail.com^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4420-9343>, gorbunov.dv@mail.ru^c ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1647-4416>, valeriy-v-mail@mail.ru

Abstract: additive technologies firmly occupy the modern information space. Many people understand the principles of this technology because educational institutions widely use simple devices like 3D pens, making the technology accessible even to children. Science and technology communicators inform society about the vast potential and transformative prospects of additive technologies. However, the additive technology industry has not yet shown a satisfactory pace of development. Currently, the technology, despite its immense potential, does not receive the proper impetus for mass adoption. One major reason for this stagnation is the absence of effective tools to protect the intellectual property of 3D printing models.

Keywords: additive technologies, modeling, 3D printing, 3D model, artificial intelligence, blockchain, smart contracts for additive technologies.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, project No. 1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Gavrilenko T. V., Gorbunov D. V., Vostrov V. A. Additive Technologies: Current Status and Challenges. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):75–83. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-08.

Original article submitted: 21.04.2024.

Revision submitted: 02.06.2024.

Введение

Необходимость развития аддитивных технологий обусловлена их способностью значительно сокращать время от разработки изделия до его выпуска, уменьшать потребление материалов и энергоресурсов, а также возможностью производства изделий с улучшенными свойствами и сложными конструкциями, которые ранее не могли быть произведены из-за технологических ограничений.

Ситуация с развитием аддитивных технологий напоминает эпоху становления автомобилестроения. До появления конвейера Генри Форда автомобили создавались большим количеством энтузиастов — гаражи, мелкие мастерские и даже мануфактуры выпускали автомобили всевозможных конструкций, но все они не могли удовлетворить даже минимальный спрос.

Появление конвейера полностью изменило ситуацию. За очень короткий период автомобиль превратился из диковинного механизма в рабочий инструмент последующей индустриализации. При этом Генри Форд не является изобретателем конвейера как такового, конвейеры существовали и ранее. И совершенно очевидно, что если бы Генри Форд не выстроил эффективное производство на базе конвейера, то это обязательно сделал бы кто-то другой.

Для появления и работы конвейера обязательным условием являлось наличие эффективной инфраструктуры, позволяющей поставлять необходимые энергоресурсы, детали, компоненты и технологии. Генри Форд создал необходимые условия и сумел выстроить первый эффективный конвейер для машиностроения.

Что должно измениться для того, чтобы аддитивные технологии переступили порог точечного развития? Что необходимо сделать, чтобы аддитивные технологии поставить на конвейер?

Массовое появление на рынке принтеров 3D-печати не привело к появлению малых производств деталей различного назначения, как это ожидалось изначально. Существует мнение, что, возможно, технологии пока недостаточно совершенны и для их развития необходимо время. Но, взглянув на информационные сообщения из разных уголков мира, можно увидеть, что технологии шагнули далеко вперед, но при этом пока не стали инструментом массового производства.

Проблемы развития аддитивных технологий

В настоящее время рынок аддитивных технологий сегментирован по направлениям, на нем присутствуют агрегаторы, предоставляющие следующие услуги: 3D-моделирование и последующая печать, продажи моделей на открытом рынке, оцифровка деталей (сканирование объектов в целях создания 3D-моделей).

Однако данный подход имеет ряд недостатков. Анализ баз данных таких агрегаторов показал, что представленные там модели в подавляющем большинстве случаев имеют непроизводственный характер, как правило, они относятся к категориям: игрушки, уменьшенные копии объектов реального мира (статуи, машины, самолеты и др.), бытовые инструменты (рис. 1). Общей чертой всех этих моделей является их самодостаточность, а та область моделей, которая связана с доработкой и совершенствованием станков или самих 3D-принтеров, имеет больше сходства с «клубом любителей», чем с профессиональным сообществом (рис. 1).

Совершенствования и доработки, предлагаемые на таких платформах, осуществляются без каких-либо стандартов, и при этом чрезвычайно высока их вариативность (существуют десятки, а иногда и сотни версий одного и того же модуля). В подавляющем большинстве представленные модели не являются частями какого-то рабочего механизма или системы. Резюмируя изложенное, можно констатировать, что существует множество открытых источников, где можно найти 3D-модели для различных целей, однако, в основном, они непроизводственного назначения, качество моделей может варьироваться, и многие из них являются неполными или содержат ошибки.

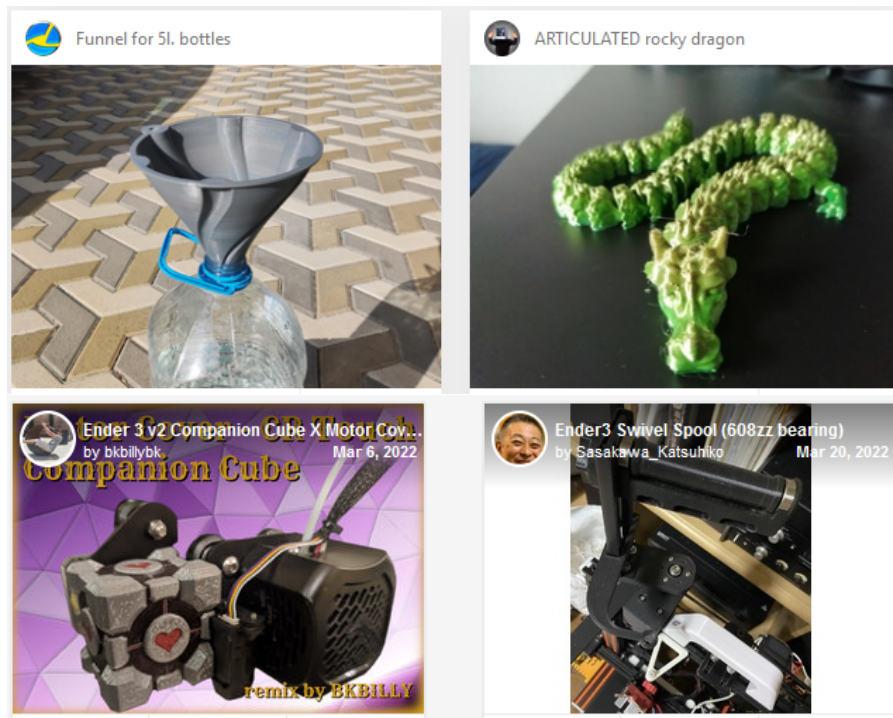


Рис. 1. Примеры моделей для 3D-печати с популярного ресурса *thingiverse.com*

В связи с этим аддитивные технологии преимущественно используются в целях развлечения и обучения, но не для решения промышленных задач, что наглядно демонстрируют данные в таблице.

Таблица

Российский парк 3D-принтеров в разрезе видов материалов, используемых для печати, и направлений применения, ноябрь 2021 года [9]

Вид материала	Подвид	Количество, шт.
Пластик	Промышленные	60
	НИОКР	950
	Учебные	65 990
	Персональные (за искл. 3D-ручек)	16 000
Металл	Промышленные	63
	НИОКР	10
Керамика	Промышленные	2
	НИОКР	5
	Прочие	2
Композиты	НИОКР	10
Цемент	НИОКР	5
Биоматериал	НИОКР	5
Пища	НИОКР	2
Итого		83 104

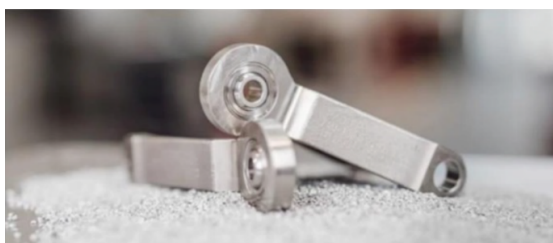
В России количество 3D-принтеров исчисляется десятками тысяч, однако большинство из них имеет непромышленное назначение.

Вместе с тем на протяжении многих лет ведется работа над созданием адекватных и высококачественных цифровых двойников реальных объектов — 3D-моделей, но они не попадают в массовое

пользование и доступны только узкому кругу специалистов.

Опыт последних лет показывает, что потенциал применения аддитивных технологий огромен.

Так, например, в июне 2022 года поставщик авиационных запчастей Premium AEROTEC разработал и изготовил металлический компонент для Lufthansa Technik. Деталь, выполненная из титана и называемая A-Link, используется в системе защиты от обледенения двигателя IAE-V2500. В 2022 году Агентство авиационной безопасности Европейского Союза официально сертифицировало деталь A-Link [11] (рис. 2).



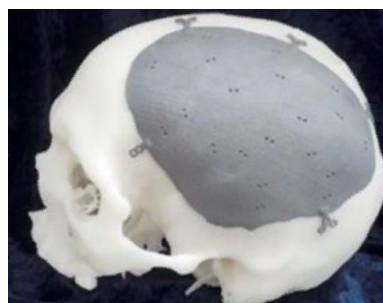
Титановый A-Link, напечатанный на 3D-принтере



Форсунка для авиадвигателя, напечатана на 3D-принтере



Подошва спортивной обуви популярного бренда, напечатана на 3D-принтере



Персонализированный титановый черепной имплантат, напечатанный на 3D-принтере

Рис. 2. Примеры изделий, изготовленных на основе аддитивных технологий [11–13]

В российской промышленности применение аддитивных технологий имеет следующее распределение (рис. 3).

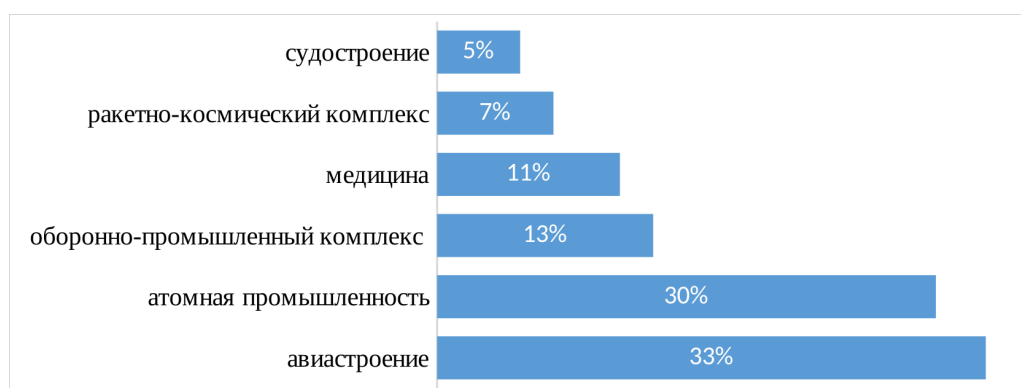


Рис. 3. Основные потребители аддитивного оборудования в РФ [10]

Распространение аддитивных технологий в мировой промышленности представлено на рисунке 4.

Представленные на рисунках 2, 3 и 4 сведения наглядно демонстрируют наличие широчайшего спектра сфер производства, где возможно применение аддитивных технологий, и высокий потенциал их развития в нашей стране при условии устранения сдерживающих факторов, одним из которых является ограниченность доступа к актуальным, потенциально востребованным и качественным



Рис. 4. Распространение аддитивного оборудования в мировой промышленности [11]

3D-моделям.

Необходимо отметить, что некоторые компании предлагают библиотеки 3D-моделей, которые можно использовать для аддитивных технологий. Например, GrabCAD предлагает библиотеку 3D-моделей для различных отраслей, включая автомобильную промышленность и медицину, однако использование этих библиотек является дорогостоящим. Также сдерживающим фактором являются санкционные ограничения, которые существенно осложняют приобретение как материалов и оборудования, так и объектов интеллектуальной собственности во многих зарубежных странах.

Одним из путей решения обозначенной проблемы является использование собственных моделей. В настоящее время накоплен большой опыт проектирования и адаптации объектов реального мира в цифровое пространство, но представители малого бизнеса и энтузиасты-одиночки не имеют доступа к базам данных 3D-моделей реальных объектов, деталей различного оборудования, автозапчастей, инструментов, и т. п. Также отсутствует организованный доступ к технологиям компоновки и сборки 3D-моделей, позволяющим подготовить и создать объекты в доступных им условиях по чертежам и инструкциям, предоставленным конструкторами, проектировщиками и производителями.

Таким образом, с одной стороны, существует множество компаний, обладающих аддитивным оборудованием, но не всегда имеющих возможность использовать это оборудование максимально эффективно. С другой стороны, существует огромное количество производителей различных товаров (от игрушек до автомобилей), которые имеют цифровые копии своей продукции. При этом одни производители не могут занять достойную долю рынка ввиду массы ограничений, а другие даже не думают о возможности извлечения прибыли из находящихся у них в наличии цифровых двойников — 3D-моделей. Проблема массового вывода на рынок цифровых двойников кроется в отсутствии механизма обеспечения взаимодействия вышеперечисленных участников рынка [1–3].

Другой немаловажной проблемой развития аддитивных технологий является сертификация оборудования [6–8]. Отсутствие соответствующих документов может привести к негативным последствиям. В соответствии с главой 14 КоАП РФ наказания предусмотрены и за отсутствие разрешительных документов, и за использование просроченных сертификатов. Также могут быть выписаны штрафы за незаконное использование маркировки ЕАС на упаковке товара и превышение объемов партии принтеров. Размер штрафа достигает 1 млн рублей, работа фирмы может быть приостановлена на срок до 90 дней, а товары — конфискованы. По разным источникам, стоимость сертификации 3D-принтеров варьируется в пределах 150 000 рублей. Ситуация с сертификацией осложнена и тем, что любое изменение в конструкции 3D-принтера может привести к необходимости проводить сертификацию повторно. В этой связи стоимость принтеров становится достаточно высокой для рядового пользователя технологии. Пример стоимости 3D-принтеров среднего класса представлен на рисунке 5.

Потенциал развития аддитивных технологий

Согласно целевому сценарию стратегии развития рынка аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 14 июля 2021 г. № 1913-р, объем рынка в предстоящие пять лет должен вырасти почти вдвое.



Рис. 5. Пример ценовой политики розничных продаж [14]

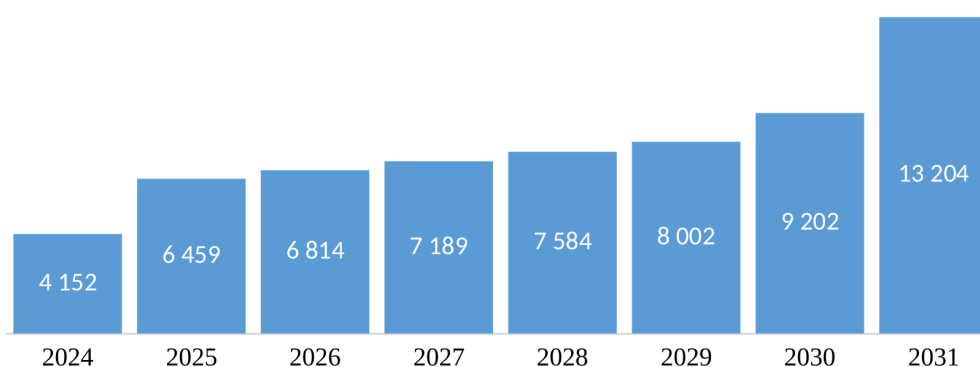


Рис. 6. Прогноз объема российского рынка аддитивных технологий до 2031 года, млрд руб. [10]

Указанные цифры, а также принятие правительством РФ стратегии развития аддитивных технологий на период до 2030 года являются дополнительным свидетельством наличия у данной технологии значительного потенциала развития.

Внедрение аддитивных технологий способствует снижению транспортных расходов, так как производство может быть размещено ближе к конечному потребителю, минимизируя необходимость в длинных логистических цепочках. Это не только ускоряет доставку, но и снижает углеродный след компании, повышая ее экологичность.

Кроме того, аддитивные технологии способствуют кастомизации продуктов без значительного увеличения стоимости. Это позволяет перейти на новый уровень персонализированных решений в сфере здравоохранения, моды, авиастроения и многих других отраслей, давая производителям возможность предлагать изделия, настроенные под конкретные потребности клиентов, по ценам, сравнимым с массовым производством. Такой подход повышает удовлетворенность клиентов, одновременно увеличивая потенциальную прибыль.

Аддитивные технологии также открывают новые возможности в области ремонта и восстановления изделий. Способность точно воссоздавать сложные части позволяет продлить жизнь изделий, что экономически выгоднее производства новых и способствует сокращению отходов и рациональному использованию ресурсов.

Также аддитивные технологии способствуют росту экономической эффективности бизнеса за счет возможности снижения затрат на ремонт. За счет расширения применения аддитивных технологий в сфере изготовления запасных частей и ремонта деталей силами малого бизнеса по лицензионным 3D-моделям и технологиям от производителя возможно снижение нагрузки на компанию производителя и направление высвободившегося производственного потенциала предприятия на совершенство-

вание и развитие компании. При этом потребитель может получить снижение расходов и сокращение сроков ожидания заказанной детали.

Таким образом, развитие рынка 3D-моделей с возможностью контроля количества распечатанных копий может повлечь за собой значительное расширение применения аддитивных технологий в экономике страны, а массовое распространение 3D-принтеров способно расширять потенциал данного направления [4, 5].

Также необходимо отметить, что 3D-принтеры существенно упрощают задачи прототипирования и проведения исследований. Доступ к большой базе данных 3D-моделей различного уровня, как от крупных компаний-производителей, так и от энтузиастов, формирует возможность не создавать новые промежуточные детали, а приобрести готовую 3D-модель с ограниченным числом копий.

Еще одним ключевым направлением развития аддитивных технологий является автоматизированный ремонт изделий, в том числе с применением технологий машинного зрения и обучения — искусственного интеллекта (ИИ) [10]. Использование ИИ возможно в ходе анализа свойств различных материалов для создания более прочных и долговечных изделий и определения, какие из материалов лучше всего подходят для изделия, обладающего конкретными потребительскими качествами.

ИИ может использоваться для автоматизации процесса создания 3D-моделей, а также для улучшения их качества и точности. Алгоритмы машинного обучения способны анализировать сложные наборы данных и эффективно оптимизировать проект с учетом расчета оптимальных конструктивных особенностей деталей.

Кроме того, ИИ может быть интегрирован в процесс управления качеством производства на базе аддитивных технологий. Системы компьютерного зрения, обученные распознавать дефекты печати, смогут непрерывно контролировать процесс 3D-печати и в режиме реального времени осуществлять корректировку. Это поможет повысить качество конечного продукта и снизить издержки, связанные с браком.

ИИ также может играть важную роль в ускорении исследований и разработок в области новых материалов для аддитивного производства. Использование алгоритмов машинного обучения для моделирования свойств материалов и прогнозирования их поведения в процессе печати может значительно сократить время и затраты, связанные с традиционными экспериментальными методами.

В целом, использование ИИ в аддитивных технологиях может привести к значительному улучшению качества продукции и повышению эффективности производства.

Варианты решения проблем 3D-моделирования и печати

Одной из основных проблем в данной сфере является дефицит доступа к 3D-моделям. Причиной сложившейся ситуации является отсутствие заинтересованности обладателей интеллектуальной собственности в предоставлении доступа к ней, так как не сформированы механизмы и инфраструктура рыночной оценки и продажи такого специфического товара, что не позволяет получить возмещение затрат, связанных с созданием 3D-моделей. Эта проблема актуальна не только для крупных производителей, но и для энтузиастов. Очевидно, что существует необходимость разработки механизмов обеспечения копирайта с возможностью контроля и ограничения количества создаваемых копий. В этой связи становится важным вопрос создания новых форматов хранения и распространения цифровых двойников и 3D-моделей, способных решать задачу контроля копирайта и количества воспроизведений.

Одним из вариантов решения указанной проблемы может являться внедрение в цифровые копии ключей, способных отслеживать авторство и количество распечатанных цифровых копий, что может позволить производителям извлечь дополнительную прибыль из имеющихся у них в наличии цифровых копий.

Такой подход окажет дополнительное стимулирующее воздействие для вывода на рынок большого количества оцифрованных «реальных» моделей, подготовленных энтузиастами. Создание эффективного рынка должно обеспечить переход к массовости аддитивных технологий.

В целях решения указанной проблемы возможна разработка комплексного решения, состоящего из хранилища цифровых двойников, 3D-моделей, нового защищенного формата хранения информации с наличием цифровой подписи и механизмов защиты копирайта, программного обеспечения печати и модификации моделей, базы данных авторов (производителей) цифровых копий и их покупателей. Кроме этого, система предполагает обеспечение взаимодействия авторов и покупателей, а также управления финансовыми операциями.

При реализации данного предложения представляется необходимым учесть следующие факторы:

1. Необходимо создать единое хранилище цифровых двойников в виде набора online-сервисов:
 - a) 3D-модели;
 - b) цифровые двойники;
 - c) выкройки.
2. Разрабатываемые сервисы должны быть оснащены компонентами создания, редактирования и просмотра моделей, включая механизмы сканирования.
3. Должны быть представлены платные и бесплатные услуги. Любое заинтересованное лицо, обладающее правами на модель, должно иметь возможность продажи модели и ее копий.
4. Должен быть разработан новый формат хранения и интерпретации 3D-моделей, позволяющий контролировать количество воспроизведений объектов интеллектуальной собственности.

Другим подходом к решению указанной проблемы может быть применение смарт-контрактов на основе технологии блокчейн. Необходимо отметить, что в настоящее время, в том числе в России, активно развиваются технологии блокчейн. На их базе созданы и успешно функционируют цифровые платформы для торговли цифровыми финансовыми активами.

Представляется целесообразным рассмотреть возможность применения блокчейн-технологии для организации удобного, регулируемого, прозрачного, позволяющего соблюсти права и интересы сторон рынка 3D-моделей и цифровых копий. Для представления 3D-моделей и цифровых копий на такой платформе могут быть использованы токены. Это позволит упростить процесс продажи и покупки моделей. Каждый токен может содержать такую информацию о модели, как ее характеристики, авторство и другие важные параметры.

При использовании блокчейн-технологии токены могут быть записаны в блокчейн, что обеспечит безопасность и прозрачность транзакций, а значит, и справедливость ценообразования. Кроме того, смарт-контракты могут автоматически выполнять условия договора между продавцом и покупателем, что способствует значительному упрощению процесса продажи и покупки 3D-моделей и снижению транзакционных издержек.

Блокчейн-технологии также могут обеспечить защиту интеллектуальной собственности.

В условиях ввода в оборот Банком России цифрового рубля, что является значительным шагом на пути формирования инфраструктуры цифровой экономики, и наличия в российской бизнес-среде успешного опыта запуска цифровых торговых систем на базе технологий блокчейн, организация подобной специализированной торговой системы представляется возможной. Такой подход не только позволит более эффективно использовать имеющиеся мощности, но и создаст дополнительный импульс для инвестиций в развитие аддитивных технологий в Российской Федерации.

Также толчком к развитию аддитивных технологий может послужить и государственное субсидирование сертификации для оказания поддержки производителям. Субсидирование сертификации даст возможность снизить затраты производителей, что может позитивно отразиться на повышении ценовой доступности 3D-принтеров и позволит расширить количество конечных пользователей технологии, в том числе и тех, кто занимается НИОКР.

Заключение

Аддитивные технологии в перспективе прочно войдут в повседневную деятельность человека, как в производственных, так и в бытовых целях. При анализе технологий 3D-печати выявлен ряд проблем дальнейшего их развития. Для развития 3D-печати необходимы комплексные решения на государственном уровне, в том числе и финансирование НИОКР в различных сферах (сами технологии 3D-печати и 3D-моделирования, центры прототипирования, промышленное производство, бытовое применение, информационные технологии в 3D-моделировании), а также развитие технологической конвергенции аддитивных технологий с ИИ и технологией блокчейн.

При условии формирования необходимой рыночной инфраструктуры продажа цифровых копий (например, вышедшей из строя шестеренки) для предприятия может оказаться экономически более эффективным шагом, чем выстраивание производственных цепочек промышленного масштаба (с расходами на производство детали, оформление документации, доставку, складирование и хранение).

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов С. С., Дарбеков А. Н. Аддитивные технологии. Преимущества и недостатки. *Научному прогрессу — творчество молодых*. 2018;2:25–27.
2. Лытнева И. И. Применение аддитивных технологий в высшем образовании. *Инновационные научные исследования*. 2021;3–2(5):184–190.
3. Муравлев С. П. Аддитивные технологии в авиакосмической индустрии. *Авиационные системы*. 2015;3:47–51.
4. Преображенский А. П. Особенности аддитивных технологий. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2016;4:85–88.
5. Преображенский А. П., Токарева Н. М. О возможностях внедрения аддитивных технологий. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2021;2:66–68.
6. *Технический регламент Таможенного союза 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования»*. Утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 16 августа 2011 г. № 768.
7. *Технический регламент Таможенного союза 010/2011 «О безопасности машин и оборудования»*. Утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 г. № 823.
8. *Технический регламент Таможенного союза 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств»*. Утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 879.
9. Овсепян А. Научные проблемы российских аддитивных технологий. *Коммерсантъ*. 2021. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/5089553>.
10. *Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года*. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 № 1913-р. Режим доступа: <http://actual.pravo.gov.ru/text.html#pnun=0001202107160042>.
11. Рекиччук В. М. *Обзор индустрий, использующих аддитивное производство, за 2023 год. Основанный на прогнозе Wohlers Report*. 2023. Режим доступа: <https://industry3d.ru/at-news/obzor-industriy-i-spolzuyuschie-additivnoe-proizvodstvo-za-2023-god-osnovanny-na-prognoze-wohlers-report/>.
12. Saunders S. *GE Aviation Announces 100,000th 3D Printed Fuel Nozzle Shipped from Auburn Plant*. Режим доступа: <https://3dprint.com/284243/ge-aviation-announces-100000th-3d-printed-fuel-nozzle-shipped-from-auburn-plant/>.
13. Официальный сайт компании Adidas с описанием характеристик обуви, изготовленной на основе технологии 3D. Режим доступа: <https://www.adidas.com/us/4dfwd-3-running-shoes/IG8987.html>.
14. Официальный сайт Интернет-магазина компании 3Dtool с описанием характеристик и ценовыми предложениями по 3D принтерам. Режим доступа: <https://3dtool.ru/category/3d-printery/>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-09

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА В СТРУКТУРАХ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

К. И. Бушмелева^а, К. П. Мягких^б*Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3038-6376>, bushmeleva_ki@surgu.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-1453-603X>, myagkih_kp@surgu.ru

Аннотация: в последние годы отмечается высокий и растущий уровень травматизма среди сотрудников МЧС России при исполнении ими служебных обязанностей. Это связано со спецификой работы спасателей, которые нередко подвергают свою жизнь и здоровье опасности, оказывая помощь пострадавшим в чрезвычайных ситуациях. Управление производственным травматизмом требует комплексного подхода и вовлечения всех заинтересованных сторон. Важно не только реагировать на произошедшие травмы, но и предупреждать их возникновение. На основе анализа причин происшествий необходимо разрабатывать и внедрять меры по предотвращению травматических ситуаций. Кроме того, обучение и повышение осведомленности персонала по вопросам охраны труда, пожарной безопасности и медицинской помощи при травмах также являются важными элементами управления производственным травматизмом. Высокий травматизм приводит к снижению боеготовности подразделений МЧС, а также к социальным и экономическим потерям из-за временной нетрудоспособности пострадавших. Поэтому проблема профилактики и снижения травматизма среди спасателей является чрезвычайно важной и требует детального изучения для выработки эффективных мер по обеспечению безопасности личного состава МЧС при выполнении поставленных задач. Для этого необходимо выявить основные причины травматизма среди сотрудников МЧС и разработать рекомендации по его снижению.

Ключевые слова: травматизм в структурах МЧС, методы анализа, статистический метод, монографический метод, несчастный случай, профилактические меры, факторы риска.

Для цитирования: Бушмелева К. И., Мягких К. П. Анализ существующих методов оценки производственного травматизма в структурах Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):84–89. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-09.

*Поступила в редакцию: 08.04.2024.**В окончательном варианте: 29.04.2024.*

ANALYSIS OF OCCUPATIONAL INJURY RATE ASSESSMENT PROCEDURES USED BY THE RUSSIAN EMERGENCY CONTROL MINISTRY

K. I. Bushmeleva^a, K. P. Myagkikh^b*Surgut State University, Surgut, Russian Federation*^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3038-6376>, bushmeleva_ki@surgu.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-1453-603X>, myagkih_kp@surgu.ru

Abstract: in recent years, the staff of the Russian Emergency Control Ministry have experienced a significant and rising number of occupational injuries. This high risk is inherent in rescue operations, where personnel frequently jeopardize their lives and health to assist victims. Managing occupational injuries needs a comprehensive approach involving all the stakeholders. It is crucial not only to address injuries when they occur but also to implement preventive measures. An analysis of the causes of these accidents reveals the need to develop and enforce strategies to avert hazardous situations. Additionally, training and raising awareness regarding occupational safety, health protocols, fire safety, and medical care are essential components of effective injury management. High injury rates diminish the readiness of the Ministry's units and result in social and economic losses due to temporary incapacities. Therefore, the prevention and reduction of injuries among rescuers is a critical issue that demands thorough investigation. This study aims

to devise effective measures to ensure the safety of the Ministry's personnel on their missions. Identifying the primary causes of injuries and developing targeted recommendations for their mitigation is paramount to enhancing the overall safety and effectiveness of the Emergency Control Ministry.

Keywords: EMERCOM personnel injuries, assessment methods, statistical methods, monographic method, accident, preventive measures, risk factors.

Cite this article: Bushmeleva K. I., Myagkikh K. P. Analysis of Occupational Injury Rate Assessment Procedures Used by the Russian Emergency Control Ministry. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):84–89. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-09.

Original article submitted: 08.04.2024.

Revision submitted: 29.04.2024.

Статистический анализ несчастных случаев на производстве является важным инструментом для структур МЧС в целях предотвращения и снижения травматизма. Сбор и анализ статистических данных о несчастных случаях позволяет выявить тенденции, определить наиболее травмоопасные виды работ и производств, разработать целевые профилактические меры.

В структурах МЧС ведется учет и анализ всех видов происшествий, в том числе несчастных случаев на производстве. Для этого используются методы описательной статистики: группировка данных по различным признакам (вид происшествия, отрасль, регион, время года и др.), вычисление относительных и средних величин. На основе полученных статистических распределений делаются аналитические выводы о причинах травматизма и намечаются профилактические меры.

Более глубокий анализ проводится с помощью методов аналитической статистики. Широко используется корреляционно-регрессионный анализ, позволяющий оценить тесноту связи между показателями травматизма и влияющими факторами, построить прогнозные модели. Применяются методы дисперсионного и факторного анализа, с помощью которых исследуется структура изменчивости признаков, выделяются факторы, оказывающие наибольшее влияние. Использование этих методов обеспечивает более глубокое понимание причин травматизма и позволяет разрабатывать адресные меры профилактики с учетом специфики регионов и видов экономической деятельности.

Особое внимание в структурах МЧС уделяется применению статистических методов для анализа причин и обстоятельств конкретных несчастных случаев. Широко используется метод «дерева причин», позволяющий визуально представить логические взаимосвязи различных факторов, приведших к несчастному случаю. На основе построенных деревьев причин разрабатываются корректирующие мероприятия для устранения наиболее опасных факторов риска [1, с. 61–67].

Для выявления причин и обстоятельств несчастных случаев также активно используются методы социологических исследований: опросы, интервьюирование, анкетирование. Полученные результаты обрабатываются с помощью методов математико-статистического анализа, позволяющих количественно оценить различные факторы риска.

В последние годы в практику структур МЧС стали активно внедряться интеллектуальные информационно-аналитические системы для статистического анализа причин и профилактики несчастных случаев на производстве. Такие системы позволяют автоматически собирать и обрабатывать большие объемы разнородной информации о травматизме, строить прогнозные модели с помощью методов искусственного интеллекта, оперативно выявлять новые закономерности и зависимости. Использование таких систем значительно расширяет аналитические возможности структур МЧС в данной сфере.

Далее перейдем к аналитическим данным в контексте статистического метода анализа несчастных случаев на производстве в структурах МЧС. На основе представленных статистических данных за 2023 год выполнен анализ производственного травматизма в структурах МЧС РФ с целью выявления ключевых проблем и факторов риска для разработки мероприятий по их минимизации [2].

Из таблицы 1, рисунка 1 следует, что наибольшее количество несчастных случаев зарегистрировано в Красноярском и Краснодарском краях, Ростовской области и Республике Крым. Необходимо провести анализ причин и разработать профилактические меры для снижения травматизма в этих регионах.

Из таблицы 2, рисунка 2 следует, что значительное количество травм (68%) происходит в опасных условиях выполнения оперативно-служебных задач. Необходим комплекс мер по повышению контроля соблюдения требований безопасности при их выполнении [2].

Таким образом, применение современного статистического инструментария позволяет структурам МЧС проводить системный анализ причин, факторов и обстоятельств несчастных случаев на

Таблица 1

Распределение несчастных случаев по территориальным органам МЧС [2]

Наименование	Кол-во несчастных случаев
Красноярский край	10
Краснодарский край	7
Ростовская область	7
Республика Крым	7
г. Москва	6

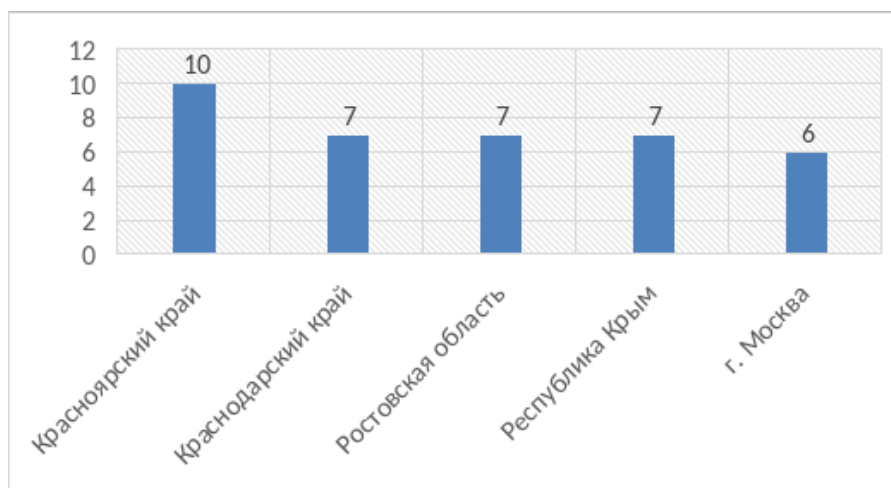
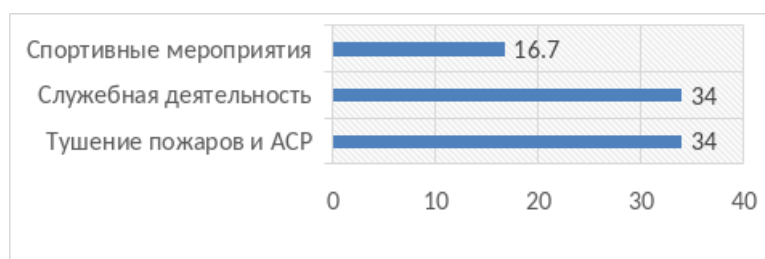
**Рис. 1.** *Распределение несчастных случаев по территориальным органам МЧС*

Таблица 2

Распределение несчастных случаев по обстоятельствам [2]

Обстоятельства	Доля, %
Тушение пожаров и АСР	34
Служебная деятельность	34
Спортивные мероприятия	16,7

**Рис. 2.** *Распределение несчастных случаев по обстоятельствам*

производстве. Комплексное использование статистических методов способствует повышению эффективности профилактических мероприятий, обеспечению более безопасных условий труда, снижению травматизма на производственных объектах. С развитием интеллектуальных информационных систем аналитические возможности МЧС в этой области будут только возрастать. Это позволит выработать научно обоснованную стратегию профилактики несчастных случаев и достичь значительного сокращения производственного травматизма.

Монографический метод является одним из наиболее эффективных методов анализа производственного травматизма. Он позволяет детально изучить каждый отдельный случай производственной травмы и выявить его причины и обстоятельства. Это особенно важно для структур МЧС, персонал которых работает в условиях повышенного риска [3, с. 430–434].

При монографическом анализе собирается максимально подробная информация о каждом несчастном случае на производстве. Она включает сведения о пострадавшем (возраст, стаж работы, состояние здоровья, уровень квалификации), данные об условиях труда на рабочем месте, подробное описание обстоятельств и причин травмы, информацию о тяжести травмы и количестве дней нетрудоспособности.

Собранные данные тщательно анализируются с применением статистических и аналитических методов. Выявляются наиболее характерные причины травматизма для каждого подразделения МЧС, типичные нарушения требований охраны труда. Определяются опасные участки и виды работ, при которых чаще всего происходит травмирование [4, с. 48–55].

На основании полученной информации разрабатывается комплекс мероприятий по снижению уровня производственного травматизма. Это могут быть организационно-технические мероприятия (модернизация оборудования, улучшение освещенности, вентиляции, сигнализации), рационализация рабочих мест и производственных процессов, совершенствование нормативно-правовой базы по охране труда, повышение квалификации и проведение инструктажей с сотрудниками и т. д.

Для внедрения разработанных мероприятий составляются планы с конкретными сроками реализации, ответственными лицами и объемами финансирования.

Важное место в монографическом методе занимает оценка эффективности проведенных мероприятий по их результатам. Для этого через определенные промежутки времени (месяц, квартал, год) повторно анализируются данные о состоянии производственного травматизма, количестве и тяжести несчастных случаев, затратах рабочего времени из-за травм. Сопоставляются показатели до и после внедрения мер безопасности. Определяется их результативность: какие показатели улучшились, какие остались без изменений или даже ухудшились.

На основании контрольной оценки корректируются планы мероприятий, уточняются наиболее эффективные из них, выделяются дополнительные ресурсы на реализацию первоочередных задач. Таким образом, осуществляется постоянный цикл совершенствования системы управления охраной труда в организации на основе обратной связи [5, с. 66–75].

Монографический метод обладает следующими основными преимуществами:

- позволяет определить истинные причины производственного травматизма с учетом специфики деятельности организации;
- на основе полученных данных помогает разработать адресные меры профилактики, учитывающие выявленные факторы риска;
- позволяет отслеживать динамику показателей травматизма и оценивать эффективность профилактических мероприятий;
- способствует выявлению как организационных, так и технических причин травматизма, что позволяет комплексно подойти к решению проблемы;
- активно использует современные средства анализа данных, позволяющие быстро обрабатывать большие массивы информации.

Однако монографический метод имеет и определенные недостатки:

- требует значительных временных и трудовых затрат на сбор и обработку информации, особенно при большом объеме данных;
- эффективность метода во многом зависит от качества собранных первичных данных;
- возможность применения статистических методов ограничена из-за относительно небольшого числа производственных травм в отдельно взятой организации за конкретный период.

Тем не менее, преимущества монографического подхода к анализу травматизма значительно перевешивают его недостатки. Особенно актуально его применение в МЧС и других структурах со специфическими условиями труда, которые не могут быть учтены общепромышленными методиками. Использование монографического метода в сочетании с внедрением передовых технологий, цифровизацией процессов сбора и обработки данных позволит МЧС России выйти на качественно новый уровень в области профилактики производственного травматизма и сохранения жизни и здоровья личного состава. Далее проводится монографический анализ производственного травматизма в структурах МЧС по предоставленным данным за 2023 год [2].

Из таблицы 3, рисунка 3 следует, что в 2023 году общее количество несчастных случаев на производстве в структурах МЧС составило 203, что на 2% больше, чем в предыдущем году (207 случаев).

Таблица 3

Общая статистика травматизма в МЧС России [2]

Показатель	2023 год	2022 год
Кол-во несчастных случаев	203	207
Кол-во погибших	8	14

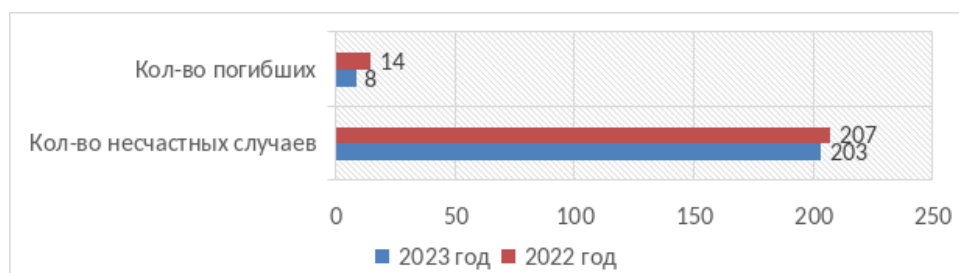


Рис. 3. Общая статистика травматизма в МЧС России

При этом количество погибших в несчастных случаях снизилось на 43% (с 14 до 8 человек) [2].

Можно сделать вывод о снижении тяжести травматизма при сохранении довольно высокого общего уровня производственного травматизма в структурах МЧС России [6, с. 366–370].

Таблица 4

Динамика группового травматизма в МЧС [2]

Показатель	2023 год	2022 год
Кол-во групповых несчастных случаев	16	8
Доля ДТП в структуре группового травматизма	75%	60%

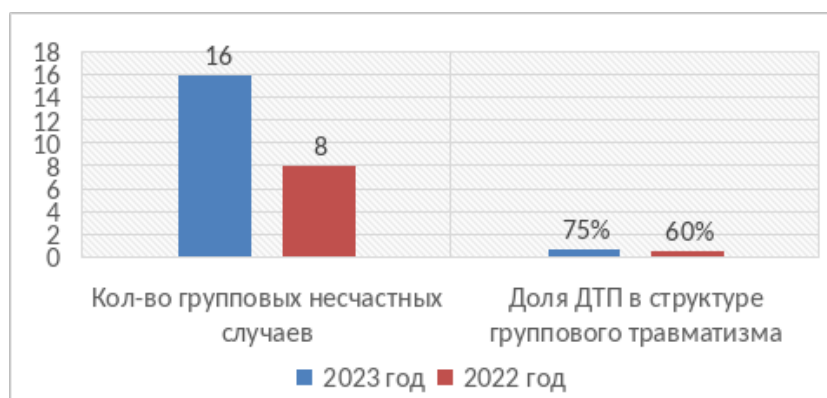


Рис. 4. Динамика группового травматизма в МЧС

Из таблицы 4, рисунка 4 следует, что в 2023 году произошло 16 групповых несчастных случаев, что в 2 раза больше, чем в 2022 году (8 случаев). Основную долю групповых происшествий составляют дорожно-транспортные происшествия. Это свидетельствует об имеющихся проблемах в организации перевозки личного состава, контроле технического состояния транспорта и подготовки водителей [2].

Наибольшее количество несчастных случаев в 2023 году зафиксировано:

- в Красноярском крае — 10 случаев;
- Краснодарском крае — 7 случаев;
- Ростовской области — 7 случаев.

Это свидетельствует о системных проблемах с организацией охраны труда и контролем за соблюдением требований безопасности в данных регионах.

Почти 70% всех зарегистрированных несчастных случаев произошло:

- при тушении пожаров и проведении АСР (34%);

- при выполнении иных служебных обязанностей (34%).

Это объясняется спецификой оперативно-служебной деятельности подразделений МЧС, связанной с высоким риском получения травм [7, с. 89–98]. Так, наиболее проблемными с точки зрения травматизма являются регионы Крайнего Севера и Юга России, а наибольший риск травмирования отмечается при выполнении подразделениями МЧС экстренных оперативных задач [2].

Таким образом, монографический метод направлен на детальное изучение обстоятельств каждой отдельной травмы. Собирается максимально подробная информация о каждом несчастном случае, которая затем анализируется для выявления типичных причин и разработки адресных мер безопасности. Преимуществом этого метода является возможность оценки эффективности профилактических мероприятий путем мониторинга динамики показателей травматизма. Однако метод трудоемок и зависит от качества собранных данных.

Выводы

В результате проведенного исследования были сделаны следующие выводы.

Проанализирована статистика травматизма в структурах МЧС России и подтверждена высокая актуальность проблемы для обеспечения безопасности личного состава при исполнении служебных обязанностей.

Изучены основные методы анализа производственного травматизма, применяемые в МЧС, — статистический и монографический. Показано, что каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

Обоснована целесообразность комплексного применения статистического и монографического подходов, что позволит учитывать как общие закономерности травматизма, так и индивидуальные особенности отдельных несчастных случаев.

Так, применение комбинации статистического и монографического подходов позволит МЧС России повысить эффективность деятельности по анализу и профилактике производственного травматизма с учетом как общих тенденций, так и специфики отдельных несчастных случаев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евдокимов В. И., Бобринев Е. В., Кондашов А. А. Возраст и риски производственного травматизма у категорий личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России. *Безопасность труда в промышленности*. 2024;1:61–67. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-1-61-67.
2. Анализ охраны труда, гибели и травматизма в МЧС за 2023 год. Режим доступа: <https://fireman.club/literature/analiz-sostoyaniya-ohrany-truda-gibeli-i-travmatizma-v-mchs-rossii-za-2023-god/>.
3. Жороев Э. Д., Абдухамидова Г. У. Актуальные вопросы спортивного травматизма: влияющие факторы и профилактика травматизма. *Alatoo Academic Studies*. 2022;4:430–434. DOI: 10.17015/aas.2022.224.54.
4. Зябиров А. И., Зябиров И. М. Обучение вопросам охраны труда как основной элемент снижения травматизма сотрудников МЧС. *Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности объектов различного назначения: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 15–16 сентября 2022 г.* Пенза: Пензенский государственный аграрный университет; 2022. С. 48–55.
5. Бобринев Е. В., Кондашов А. А., Удавцова Е. Ю., Путин В. С. Изучение травматизма и гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России в дорожно-транспортных происшествиях. *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2022;4:66–75. DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-4-66-75.
6. Ишмеева А. С., Тухбатуллин И. З. Производственный травматизм сотрудников МЧС при выполнении боевых задач. *Гражданская оборона и природно-технические системы: сборник статей по материалам XIX Международной научно-практической конференции, Воронеж, 23 марта 2023 года*. Воронеж: Воронежский государственный технический университет; 2023. С. 366–370.
7. Кондашов А. А., Бобринев Е. В., Удавцова Е. Ю. Специфика производственного травматизма личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России по причине «личная неосторожность». *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2023;2:89–98. DOI: 10.25016/2541-7487-2023-0-2-89-98.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-10

**ПРОВЕРКА ДАННЫХ НА МОДИФИКАЦИЮ В КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ ПРИ ПОМОЩИ
КОЭФФИЦИЕНТА ДОСТОВЕРНОСТИ****В. А. Жебель^{1,а}, А. И. Солдатов^{2,б}**¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,
Российская Федерация^а ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-9625-5250>, ✉ vladzhebel@yandex.ru^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1892-1644>, asoldatof@mail.ru

Аннотация: в статье представлены исследования в рамках защиты сетевого трафика от атак на целостность, также предложен метод определения достоверности передаваемых данных по компьютерной сети предприятия. Предложенный метод основан на использовании проверочных пакетов для анализа активности сети предприятия. В работе приведено детальное описание инструментов, используемых для реализации данного метода. Эти инструменты включают в себя программное обеспечение, разработанное на языке программирования Python 3 для серверной части с применением сетевых библиотек Scapy и Socket, а также клиентскую программу для рабочей станции. В статье также рассматриваются выявленные проблемы, возникшие в процессе исследования коэффициента достоверности данных. Предложен подход для их решения при расчете данного коэффициента. Кроме того, описаны основные аспекты качественных и количественных критериев для оценки коэффициента достоверности и рассмотрена методика их расчета. В заключении приведены обобщенные результаты исследования, оценка эффективности используемого программного обеспечения, а также представлены схемы и алгоритмы функционирования предложенного метода в сетевой среде.

Ключевые слова: анализ данных, сетевой трафик, коэффициент достоверности, компьютерная сеть, качественные и количественные критерии.

Для цитирования: Жебель В. А., Солдатов А. И. Проверка данных на модификацию в корпоративной сети при помощи коэффициента достоверности. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):90–96. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-10.

Поступила в редакцию: 06.04.2024.

В окончательном варианте: 09.06.2024.

**DETECTION OF DATA MODIFICATIONS IN CORPORATE NETWORKS USING A
CONFIDENCE COEFFICIENT****V. A. Zhebel^{1,а}, A. I. Soldatov^{2,б}**¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation^а ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-9625-5250>, ✉ vladzhebel@yandex.ru^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1892-1644>, asoldatof@mail.ru

Abstract: this article presents research focused on protecting network traffic from integrity attacks and introduces a method for determining the reliability of transmitted data within corporate networks. The proposed method utilizes verification packets to analyze network activity. A comprehensive description of the tools used to implement this method is provided, including the server side software developed in Python 3, leveraging the Scapy and Socket network libraries, and a workstation client. The article also addresses the challenges encountered during the study of the data reliability coefficient and suggests solutions for these issues. Additionally, the article outlines the main aspects of qualitative and quantitative criteria for assessing the reliability coefficient and details their estimation methods. The conclusion presents the overall results of the study, evaluates the performance of the software used, and describes possible applications of the proposed method in network environments.

Keywords: data analysis, network traffic, reliability coefficient, computer network, qualitative and quantitative criteria.

Cite this article: Zhebel V. A., Soldatov A. I. Detection of Data Modifications in Corporate Networks Using a Confidence Coefficient. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):90–96. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-10.

Original article submitted: 06.04.2024.

Revision submitted: 09.06.2024.

Введение

В настоящее время участились атаки на компании Российской Федерации, данные атаки направлены как на большие компании и их ресурсы, такие как vk.com, так и на государственные ресурсы, такие как www.gosuslugi.ru. Также более мелкие компании и их ресурсы периодически подвергаются атакам злоумышленников с целью наживы либо выявления конфиденциальной информации и нарушения основной деятельности.

Согласно статистике, представленной компанией Positive Technologies, в 2022 году распределение атак было следующим: госучреждения — 17%, медицинские учреждения — 9%, промышленность — 9%, наука и образование — 7%, IT-компании — 6%, сфера услуг — 5%, финансовые организации — 4%, другие отрасли — 22%, без привязки к отрасли — 21%.

Из представленной статистики видно, что 43% атак лишены четкой идентификации. Злоумышленники преследовали разнообразные цели, такие как утечка конфиденциальной информации, нарушение основной деятельности, причинение ущерба интересам государства, нанесение прямых финансовых потерь, использование ресурсов компаний или частных лиц для проведения атак, а также другие. Объекты атак включают компьютеры, серверы, сетевое оборудование, людей, веб-ресурсы, мобильные устройства и прочее. При осуществлении атак использовались различные методы, такие как вредоносное программное обеспечение, социальная инженерия, эксплуатация существующих уязвимостей, компрометация учетных данных и цепочек поставки данных, а также доверенных каналов связи. Для реализации этих методов злоумышленники прибегали к различным видам вредоносного программного обеспечения, включая шифровальщики, ПО для удаленного управления, загрузчики, шпионское ПО, майнеры, банковские трояны, ПО для удаления данных и рекламное ПО. Это программное обеспечение чаще всего распространялось через электронную почту, веб-сайты, социальные сети, мессенджеры, а также путем компрометации персональных компьютеров, серверов и сетевого оборудования [1, 2].

Для защиты передаваемых по компьютерной сети данных различные исследователи и компании предлагают разнообразные методы решения. Первым и наиболее очевидным подходом является применение шифрования [3]. Протоколы шифрования существенно усилили безопасность сетевого трафика и широко используются в течении длительного времени. Тем не менее, появление новых вычислительных устройств, способных расшифровывать трафик, а также разработка новых программ и нейронных сетей, которые могут также осуществлять расшифровку данных, приводят к необходимости постоянного совершенствования методов защиты. Следует отметить также создание квантовых компьютеров, обладающих способностью быстро расшифровывать сетевой трафик. Дальнейшее развитие систем шифрования связано с увеличением длины шифровальных ключей. Например, для протокола SSH безопасным считался ключ длиной 512 бит, затем — 1024 бит, затем — 2048 бит, и в настоящее время производители оборудования рекомендуют ключи длиной 4096 бит. Этот процесс свидетельствует о необходимости постоянного развития методов обеспечения безопасности данных. Вторым методом защиты данных являются сетевые брандмауэры [4, 5], также известные как межсетевые экраны. Эти устройства способны блокировать входящий трафик и разрешать только тот, который запрашивается пользователями. Брандмауэры могут быть аппаратными или программными, интегрированными в устройства маршрутизации. Однако они не обеспечивают защиту от подмененного трафика; злоумышленник, модифицируя передаваемый от сервера трафик, может обойти эту защиту. Кроме того, если злоумышленник находится между жертвой и сервером, он может перехватывать ответы от сервера, модифицировать трафик и направлять его к устройству жертвы [1, 6].

В связи с разнообразием целей и объектов атак мы предлагаем метод защиты, направленный на выявление атак или модификации сетевого трафика корпоративных клиентов. Метод заключается в пересылке проверочных пакетов в количестве 10 штук в рамках сетевого протокола IPv4 с одной рабочей станции на другую, где последняя осуществляет суммирование маячков для определения коэффициента достоверности данных (КДД), величина которого характеризует, был ли модифицирован или изменен трафик [7].

В предыдущих работах [7, 8] нами были отобраны следующие протоколы и характеристики

их полей: длина кадра (LF), длина пакета (LP), длина сегмента (LS), поле пакета DSCP (DSCP), поле пакета Flag (флаги) (F), поля пакета TTL для IPv4 и Hop Limit для IPv6 (Т и Н), поле сегмента Urgent протокол TCP (U), поле сегмента Control bits протокол TCP (CB), поле сегмента Options протокол TCP (O), поле сегмента Sequence Number протокол TCP (SN), поле сегмента Acknowledgement Number (AN) и информация с верхнего уровня (уровень приложения) — Data. После этого возник вопрос об установлении критериев, в частности, их качественных и количественных аспектов. В ходе исследования было установлено, что характеристики полей, такие как длина кадра (LF), длина пакета (LP) и длина сегмента (LS), будут выступать в роли количественных признаков. Поля пакета TTL для IPv4 и Hop Limit для IPv6 будут сочетать в себе как качественные, так и количественные признаки. КДД определяется из выражения:

$$КДД = LF + LP + LS + DSCP + F + T + U + CB + O + SN + AN + data, \quad (1)$$

где: LF — длина кадра, LP — общая длина пакета, LS — длина сегмента, $DSCP$ — поле пакета IPv4, F — поле пакета Flag, T — поле пакета TTL для IPv4, U — поле сегмента Urgent протокол TCP, CB — поле сегмента Control bits протокол TCP, O — поле сегмента Options протокол TCP, SN — поле сегмента Sequence Number протокол TCP, AN — поле сегмента Acknowledgement Number, $data$ — данные, $КДД$ — коэффициент достоверности данных [7, 9].

Материалы и методы

По результатам предыдущих исследований [7–9] было решено ограничиться вначале исследованиями локальной вычислительной сети предприятия. В предложенном методе используется централизованное управление данными рабочих станций (ПК) с помощью сервера. На рисунке 1 изображена примерная схема корпоративной сети, включающая два сервера, персональные компьютеры (PC1-PC5), два коммутатора второго уровня и один коммутатор третьего уровня, для выхода в глобальную сеть используются два роутера по технологии виртуального сетевого адреса.

На сервере устанавливается специализированное программное обеспечение для отправки сообщений и сбора данных от рабочих станций, после чего данную информацию можно будет проанализировать. На рабочих станциях устанавливается специализированное программное обеспечение, предназначенное для мониторинга и анализа передаваемых пакетов согласно заданному алгоритму. В его основе лежит алгоритм определения коэффициента достоверности передаваемых пакетов в соответствии с формулой (1). Разработанное программное обеспечение выполнено на языке программирования Python 3 с использованием библиотек Socket и Scapy. Эти библиотеки предоставляют возможность настройки пакетов, передаваемых по сети, а также управления сеансами связи.

Принцип функционирования метода заключается в передаче пакетов на рабочую станцию, на которой закодирован один из вариантов обмена данными (рис. 2).

Данные также подлежат хранению в защищенном виде на рабочих станциях. Согласно установленной процедуре, через определенный интервал времени сервер направит на рабочие станции проверочные пакеты (рис. 3). Эти пакеты будут содержать заполненные особым образом качественные и количественные критерии.

После проверки пакетов и вычисления коэффициента достоверности рабочие станции (ПК1, ПК2, ПК3) выводят информацию о значениях достоверности данных на панели задач рабочей станции и передают ее на сервер, где она записывается в журнал (рис. 4), после чего эти данные могут быть проанализированы для принятия соответствующих решений. Важно отметить, что данные, передаваемые между сервером и рабочими станциями по сети, кодируются и шифруются для обеспечения безопасности [11].

Итак, данный метод не только позволяет выявить модификацию или изменение сетевого трафика при помощи вычисления КДД, но и обеспечивает анализ передаваемых данных, что позволяет провести анализ сетевой структуры компании. В результате использования этого метода можно выявить местоположение и наличие специализированного программного обеспечения внутри организации.

Результаты

В результате проведенных исследований были разработаны два компонента программного обеспечения на языке программирования Python 3: серверная и клиентская части. Серверная часть осуществляет отправку пакетов, в то время как клиентская принимает эти пакеты, проводит расчет ко-

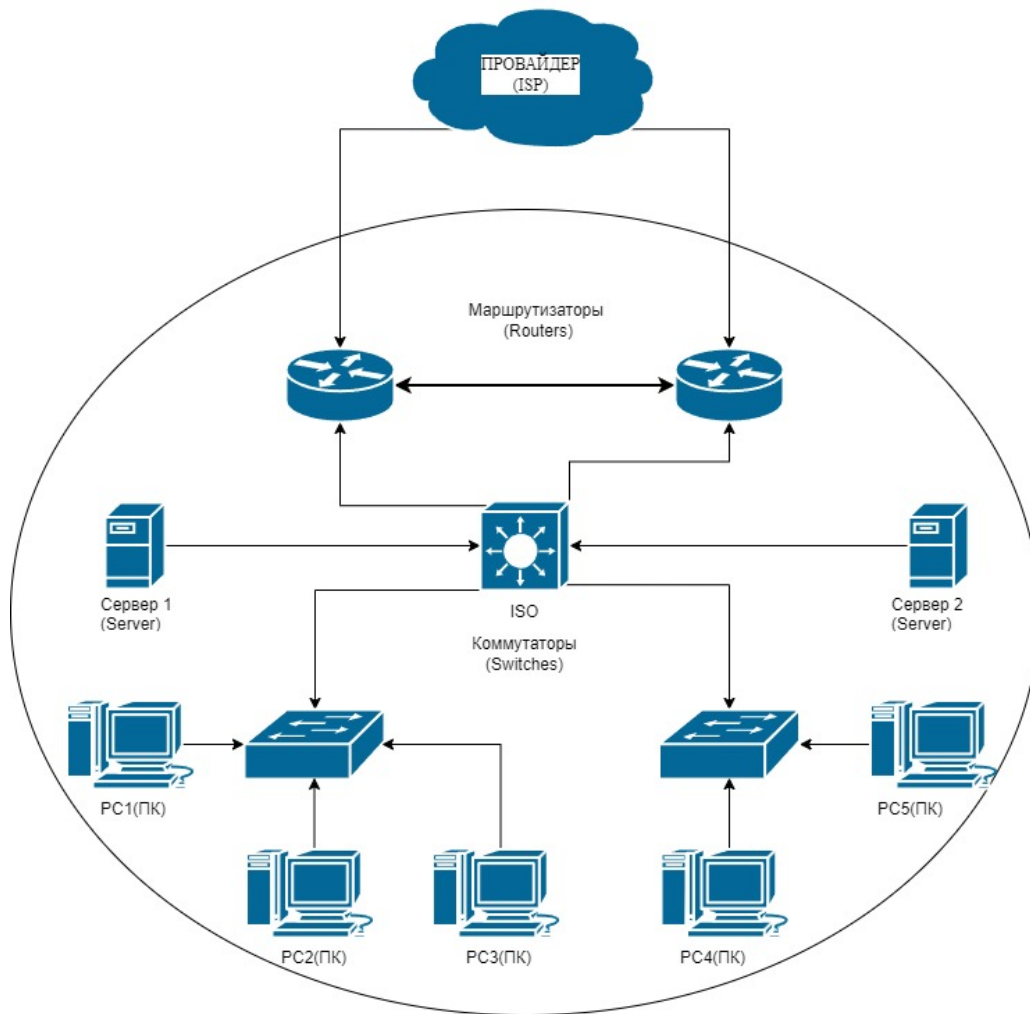


Рис. 1. Логическая схема компьютерной сети предприятия

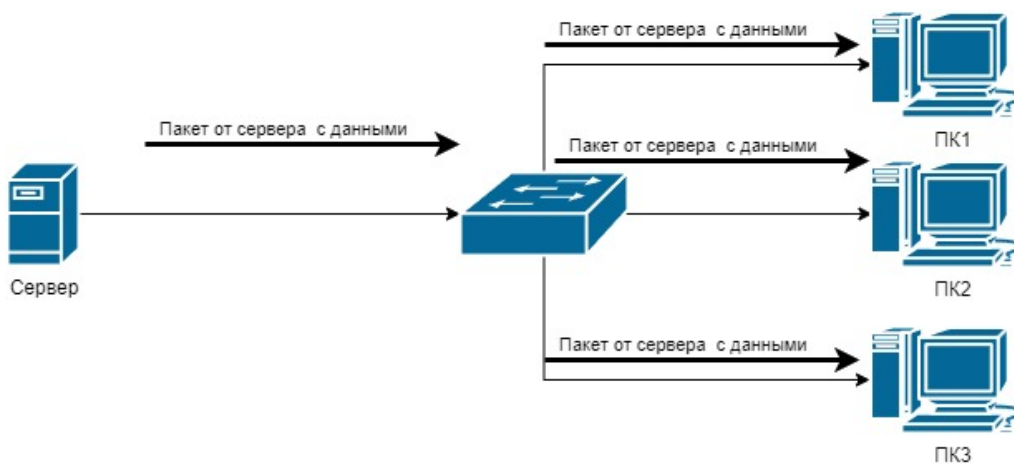


Рис. 2. Маршруты передачи пакетов от сервера к станциям

эфициента достоверности и передает данные обратно на сервер. При активации серверной машины проводится опрос рабочих станций в сети для установления информации о том, на каких машинах установлено клиентское программное обеспечение, и его доступности по определенному порту, например, по порту 48 888. В дальнейшем через определенные промежутки времени инициируется отправка проверочных пакетов в количестве десяти штук. В эти проверочные пакеты внедряются данные, содержащие как качественные, так и количественные признаки, закодированные в числовые значения.

Алгоритм создания проверочного пакета представлен на рисунке 5. После отправки провероч-

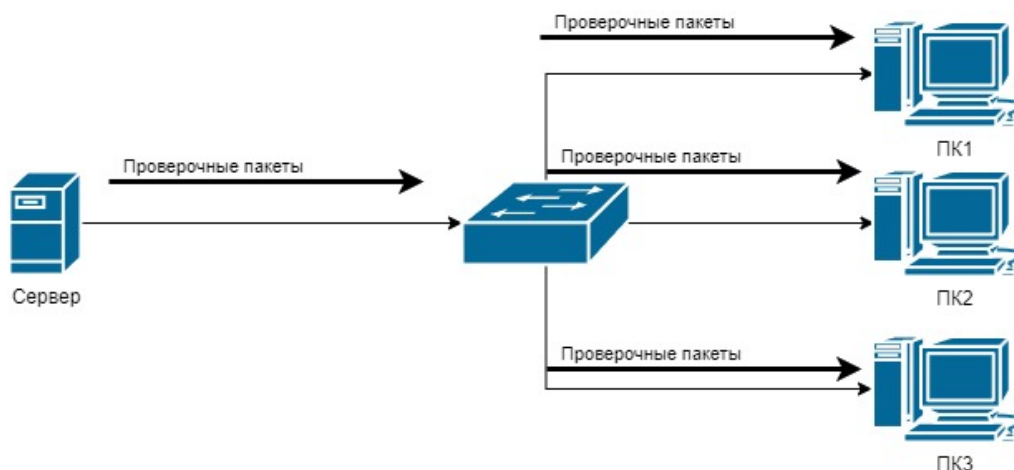


Рис. 3. Передача проверочных пакетов от сервера к рабочим станциям

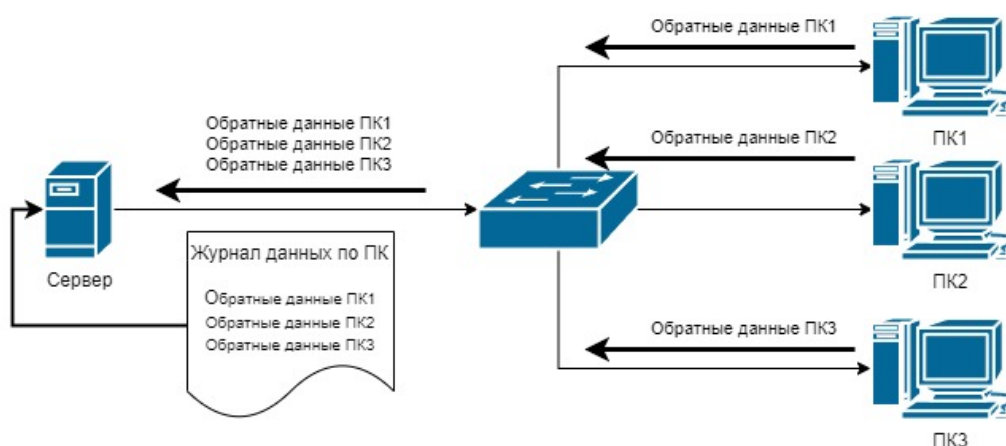


Рис. 4. Схема обмена данными от рабочих станций к серверу

ного пакета на рабочую станцию производится сравнение с текущим эталонным вариантом данных. Например, предположим, что у нас есть вариант данных № 7 из 1000 возможных, в котором длина сегмента составляет 70 байт, из которых 24 байта представляют заголовок, а 46 байт — сами данные. Длина пакета в этом варианте равна 90 байт, где 20 байт — это стандартный размер заголовка IPv4 пакета. Затем собирается кадр, который включает в себя 90 байт данных пакета и заголовок в 18 байт. Таким образом, общая длина кадра составляет 108 байт. Это значение больше минимального размера кадра (46 байт), но меньше максимального (1518 байт). После получения проверочных пакетов данных рабочая станция сравнивает их с ее текущим вариантом и осуществляет расчет КДД путем сравнения количественных и качественных критериев, т. е. пришедший пакет разбирается на составляющие по заголовкам протоколов IPv4, TCP и данных, после чего данные поля сравниваются с теми показаниями, что должны быть в эталонном варианте, в нашем случае № 7; если все поля соответствуют, мы ставим 1, если нет, то 0 [12, 13].

При проведении экспериментов выяснилось, что библиотека Scapy отправляет идентичные пакеты, что влияет на значения полей сегмента Sequence Number протокола TCP (SN) и Acknowledgement Number (AN). Таким образом, эти два поля заголовка сегмента можно также рассматривать как количественные критерии.

После выделения критериев качества и количества из десяти проверочных пакетов вычисляется суммарное значение каждого критерия. Пример вычисления критерия:

$$LP = \sum_{i=1}^n lp_n, \quad (2)$$

где LP — критерий длина пакета, n — количество отправленных пакетов ($n = 1..10$), lp_n — один зако-

дированный пакет данных, отправленный с сервера на рабочую станцию; если кадр дошел, величина равна 1, если нет, то 0.

Суммарный коэффициент достоверности определяется по формуле (3).

$$КДД = \frac{LP + LS + DSCP + F + T + U + CB + O + SN + AN}{100}. \quad (3)$$

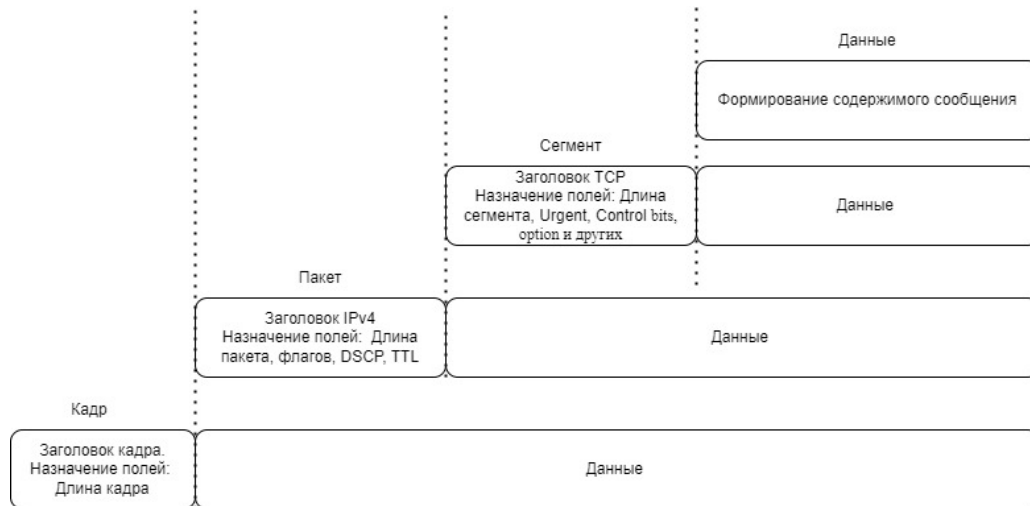


Рис. 5. Алгоритм сборки проверочного пакета

Минимальная величина КДД, при которой принятые пакеты считаются немодифицированными, составляет 0,9. Такая величина обусловлена возможной потерей пакетов по непредвиденному случаю. Как правило, при ответе на ICMP-запрос первый пакет не доходит, поэтому при отправке 10 пакетов получено будет 9.

В процессе исследования было принято решение убрать критерий LF — длина кадра (фрейма), так как библиотека Scapy не дает возможность напрямую считывать данный параметр (рис. 6) [14, 15].

```
>>> c=Ether(b)
>>> c
<Ether dst=00:02:15:37:a2:44 src=00:ae:f3:52:aa:d1 type=0x800 |<IP version=4L
```

Рис. 6. Фрагмент заголовка кадра Ethernet

Результаты расчета КДД отображаются в «tray» (область уведомлений) панели задач: зеленый цвет указывает на нормальное состояние, желтый — на возможные проблемы, а красный — на обнаруженные проблемы.

Заключение

В ходе проведенных исследований был предложен способ выявления аномалий сетевого трафика. Способ реализован в виде программы, которая состоит из нескольких ключевых компонентов. Первый компонент — серверное программное обеспечение, осуществляющее централизованное управление сетью компьютеров. Это программное обеспечение выполняет поиск рабочих станций, их синхронизацию с сервером и затем, в соответствии с определенным алгоритмом, инициирует отправку проверочных пакетов. Второй компонент устанавливается на рабочих станциях и осуществляет обмен данными по определенному порту. Он устанавливает соединение с сервером, ожидает получения проверочных пакетов, сравнивает их с назначенными вариантами от сервера, а затем проводит расчет КДД. Рабочая станция также отправляет сообщение на сервер о состоянии сети. Эти сообщения собираются в журнале, где они сортируются по рабочим станциям, а также делятся на файлы в хронологическом порядке.

Расчет коэффициента достоверности производится путем суммирования количественных и качественных критериев. Затем вычисляется основной коэффициент, который получается путем суммирования и деления на 100. Допустимое отклонение коэффициента достоверности может достигать 10% от максимального значения, при этом считается, что принятые данные не модифицированы. В настоящее время предложенный подход реализован для операционных систем семейства Windows, которые являются базой для проведения текущих и будущих исследований. Также были предприняты попытки работы с Linux-системами, но пока они находятся на начальных этапах разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Актуальные киберугрозы: итоги 2022 года*. Режим доступа: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2022>.
2. Багдасарян Р. Х. О современных проблемах проверки достоверности данных при передаче информации и компрометации канала связи. *IX Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 58-й годовщине полета Ю. А. Гагарина в космос: сборник научных статей*. Краснодар: Издательский Дом — Юг; 2019. С. 289–291.
3. Григорьев В. С. Проблемы распознавания зашифрованного трафика в канале связи. *Научные записки молодых исследователей*. 2017;3:43–51.
4. Сеидова И., Каратова Д. Брандмауэры: исследование методов безопасности и угроз. *Sciences of Europe*. 2022;107:137–139.
5. Коломойцев В. С. Эффективность поэтапного применения средств защиты с пересечением областей обнаружения угроз. *Программные продукты и системы*. 2018;3:557–564. DOI: 10.15827/0236-235X.031.3.557-564.
6. Буковшин В. А., Чуб П. А., Короченцев Д. А. Анализ зашифрованного сетевого трафика на основе вычисления энтропии и применения нейросетевых классификаторов. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2020;6:117–128. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-6-117-128.
7. Жебель В. А., Солдатов А. И. Использование коэффициента достоверности данных для определения достоверности передаваемых данных по сети. *Успехи кибернетики*. 2023;4(2):60–67. DOI: 10.51790/2712-9942-202.
8. Жебель В. А. Достоверность данных, переданных по компьютерной сети. *International Conference on Advances in Environment Research*. 2022;3:73–78.
9. Жебель В. А. Методы и алгоритмы анализа сетевого трафика для определения коэффициента достоверности данных. *Проблемы и решения автоматизации XXI века: материалы VI Национальной научно-практической студенческой конференции*. Сургут; 2023. С. 23–27.
10. Бабенко Л. К. *Криптографическая защита информации: симметричное шифрование: учебное пособие*. М.: Юрайт; 2019. 220 с.
11. Бухарин В. В. Метод обнаружения сетевого перехвата информационного трафика информационно-телекоммуникационной сети. *Электронный журнал «Труды МАИ»*. 2012;57:1–9.
12. Багдасарян Р. Х., Багдасарян В. О. О технологии распределенной передачи данных и проблемах проверки достоверности информации по каналу связи. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2021;56:48–57.
13. *Philippe BIONDI Network packet manipulation with Scapy*. Режим доступа: https://scapy.net/talks/scapy_hack.lu.pdf.
14. *Официальный сайт Scapy*. Режим доступа: <https://scapy.net/>.
15. Каяшев А. И., Рахман П. А., Шарипов М. И. Анализ показателей надежности локальных компьютерных сетей. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2013;5:140–149.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-11

НЕПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ СОЗДАЮТ РЕАЛЬНУЮ COMPLEXITY**Г. В. Газя^{1,2,a}, Н. Ф. Газя^{2,b}, В. В. Еськов^{2,c}, Е. А. Манина^{2,d}**¹ *Индустриальный институт (филиал) Югорского государственного университета, г. Нефтеюганск, Российская Федерация*² *Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*^a  *safety.ot86@gmail.com*, ^b *nata_stratan@mail.ru*, ^c *firing.squad@mail.ru*, ^d *maninaea@mail.ru*

Аннотация: в физике и во всех науках утвердилось мнение, что *Complexity* связано с описанием моделей в рамках нелинейных систем. Однако еще в 1948 году W. Weaver, а позже M. Gell-Mann связывали *Complexity* с *Unpredictability*. Эта позиция усилилась после получения нобелевской премии по физике за фундаментальную *Uncertainty* для будущего у квантовых объектов в ходе квантового эксперимента (будущее как бы «творится»). За последние 20 лет был доказан эффект Еськова–Зинченко для всех биосистем, в котором любая выборка любого параметра биосистем является уникальной и будущее для биосистемы реально заново «творится». В этом эффекте доказана полная *Uncertainty* и *Unpredictability* для всех биосистем. В итоге биосистемы каждый раз заново «творят» свои выборки, и это не динамический хаос Лоренца. Это новая неопределенность для всей науки, которая связана с *Unpredictability*.

Ключевые слова: неопределенность, биосистемы, эффект Еськова–Зинченко.

Для цитирования: Газя Г. В., Газя Н. Ф., Еськов В. В., Манина Е. А. Непредсказуемость и неопределенность создают реальную Complexity. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):97–102. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-11.

Поступила в редакцию: 09.05.2024.

В окончательном варианте: 02.06.2024.

UNPREDICTABILITY AND UNCERTAINTY CREATE REAL COMPLEXITY**G. V. Gazya^{1,2,a}, N. F. Gazya^{2,b}, V. V. Eskov^{2,c}, E. A. Manina^{2,d}**¹ *Industrial Institute, Ugra State University, Nefteyugansk, Russian Federation*² *Surgut State University, Surgut, Russian Federation*^a  *safety.ot86@gmail.com*, ^b *nata_stratan@mail.ru*, ^c *firing.squad@mail.ru*, ^d *maninaea@mail.ru*

Abstract: in physics and other sciences, it has long been believed that complexity is linked to the description of models within non-linear systems. However, as early as 1948, W. Weaver and later M. Gell-Mann associated complexity with unpredictability. This perspective gained traction following the Nobel Prize in Physics awarded for the fundamental uncertainty in predicting the future of quantum objects during experiments (where the future seems to be “happening”). Over the past 20 years, the Eskov-Zinchenko effect has been demonstrated across all biosystems. According to this effect, any sample of any biosystem parameter is unique, and the future of the biosystem is genuinely “happening” again. This finding has shown that complete uncertainty and unpredictability are inherent in all biosystems. Consequently, biosystems constantly “re-create” their samples, which differs from Lorentz’s dynamic chaos. This introduces a new form of uncertainty in all sciences, intrinsically linked to unpredictability.

Keywords: uncertainty, biosystems, Eskov-Zinchenko effect.

Cite this article: Gazya G. V., Gazya N. F., Eskov V. V., Manina E. A. Unpredictability and Uncertainty Create Real Complexity. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):97–102. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-11.

Original article submitted: 09.05.2024.

Revision submitted: 02.06.2024.

Введение

В физике и математике сложилось твердое мнение, что *Complexity* связана с нелинейным поведением исследуемой системы. При этом такие процессы вполне адекватно описываются в рамках теории динамических систем (ТДС). Считается, что модели ТДС качественно описывают процессы с биосистемами, но это является основной проблемой наук о жизни [1–5].

Если же точность моделей ТДС недостаточна для описания систем, то используют стохастические модели. В простейшем случае это расчет статистических функций распределения $f(x)$, их статистических характеристик, спектральных плотностей сигнала (СПС), автокорреляций (АК) и автокорреляционных функций (АКФ) и других моделей систем.

Однако 20 лет назад был доказан эффект Еськова–Зинченко (ЭЕЗ). В этом ЭЕЗ была показана уникальность любой выборки любого параметра $x_i(t)$ функций организма человека. Фактически речь идет об отсутствии статистической устойчивости выборок $x_i(t)$. Одновременно было доказано отсутствие однородности любой группы испытуемых [6–11].

Отметим, что в 2022 году тремя физиками была получена нобелевская премия в связи с открытием *Unpredictability* для квантового объекта (КО) в квантовом эксперименте. Фактически биосистемы в некотором смысле подобны КО, т. к. будущее для биосистем в рамках ТДС и стохастики невозможно прогнозировать (оно как бы «творится» в эксперименте) [11–14]. Подчеркнем, что ЭЕЗ пока не получил общего признания, хотя это полная аналогия с физикой.

Отсутствие прогноза будущего для КО и биосистем ставит особые проблемы перед всей наукой. Напомним, что Weaver вообще предлагал создать новую, третью (после ТДС и стохастики) науку для описания именно биосистем [15].

Современная трактовка *Complexity*

В современной науке сложилось твердое убеждение в том, что *Complexity* присуще только нелинейным системам. Такие нелинейные системы неплохо описываются нелинейными моделями в рамках ТДС. Более того, существуют журналы с таким названием (например, *Complexity*), где принимаются к публикации статьи при изучении различных исследуемых систем в рамках ТДС.

Если следовать этой логике, то одна из первых моделей популяций с насыщением (модель Ферхюльста–Пирла) тоже относится к *Complexity*. Это модель вида: $dx/dt = (a - bx)x(i)$. Иными словами, это пример нелинейной модели в рамках ТДС.

Здесь $x = x(t)$ описывает численность популяции с лимитированием (с обратной связью). Эта нелинейная модель имеет решение и четко прогнозирует численность популяции $x(t)$ для любого момента времени t . Здесь все определено и прогнозируемо, динамику такого процесса можно точно повторить.

Очевидно, что считать такую модель *Complexity* в рамках ТДС бессмысленно, т. к. в рамках детерминизма задание начального значения вектора $x(t_0)$ и динамических уравнений полностью описывает будущее состояние системы. В ТДС все точно определено. Говорить о *Complexity* в ТДС вряд ли уместно, но это публично продолжается почти 100 лет.

Именно об этом пытался сказать в 1948 году W. Weaver, когда говорил о системах 1-го типа, или СПТ. Для СПТ нет никакой неопределенности. Любая фазовая траектория (ФТ) в m -мерном фазовом пространстве состояний (ФПС) может быть многократно (и точно) повторена [2–11]. Будущее для СПТ точно прогнозируется, здесь нет *Complexity*!

Остается открытым вопрос, существуют ли реальные биосистемы, которые могут описываться такими моделями. Сейчас очевидно, что таких биосистем нет. Любая биосистема не может точно повторить ФТ в ФПС для любой модели в ТДС. Именно об этом пытался сказать I. R. Prigogine.

Действительно, в своей замечательной работе (труд его и его коллег за последние 20 лет его жизни, по его утверждению) «The End of Certainty...» Prigogine пытался сказать, что в живой природе нет процесса (точного) под модель Ферхюльста–Пирла, под модель Лотки–Вольтерра (хищник — жертва), под модель A. V. Hill и т. д.

Долгие годы считалось, что биосистемы — не объект ТДС, но в рамках стохастики мы можем что-то описывать; считалось, что с учетом разброса значений $x(t)$ можно найти какую-то ФТ для любых моделей биосистем в ТДС. Это было ошибкой [11–14].

За последние 20 лет мы доказали, что это не так. Стохастика не может описывать биосистемы, но об этом мы скажем ниже. Даже модель Ходжкина–Хаксли (на молекулярном уровне) — это только гипотетическая модель. Она описывает некий идеальный процесс, но не реальную биосистему.

Трактовка *Complexity* со стороны Weaver

Именно об этом пытался сказать I. R. Prigogine, но его проигнорировали. Однако задолго до этого W. Weaver уже пытался ввести *Complexity* для стохастических систем, или систем 2-го типа

(СВТ). Он ввел специальный термин «Disorganized Complexity» для СВТ, утверждая, что это еще не главная «Complexity».

Почему Weaver ввел термин *Complexity* для СВТ? За эти 70 лет никто даже не пытался это проанализировать. Но логика у Weaver была четкой. Если мы имеем непрерывную случайную величину (НСВ), то после 1-го проведения стохастического процесса мы никогда уже не попадем (точно) в конечную точку $x(t_f)$ при повторном проведении опыта.

Мы можем бесконечное число раз повторять процесс, но точка $x(t_f)$ никогда не будет достигнута в ФПС. В этом и есть *Complexity* у Weaver для СВТ. Нельзя дважды повторить процесс для стохастических систем (а все биосистемы — это НСВ). Любой параметр функций организма человека (ФСО) является НСВ, и его невозможно точно повторить. Его нельзя и точно прогнозировать.

Поэтому в стохастике повторяют процесс многократно и работают с выборками, т. е. с облаками точек $x(t_f)$ в ФПС. Все оценки для СВТ приближенные, нет точных повторений, и появляется некая *Complexity*, по Weaver. Это еще не *Complexity* для биосистем, но это уже некая *Uncertainty* и *Unpredictability*, чего нет в науках о биосистемах.

Подчеркнем, что Weaver вводил *Complexity* для биосистем сознательно [15]. Еще в самом названии он противопоставил всю современную науку (Science) некоторой «Complexity». Следовательно, *Complexity* должна иметь особые свойства, и это отрицает наличие нелинейных моделей в рамках ТДС (как это считает журнал *Complexity* и многие другие издания). *Complexity* невозможно точно прогнозировать, их вообще невозможно прогнозировать [1–9].

Complexity для Weaver тесно связана с двумя понятиями: *Uncertainty* и *Unpredictability*. Но это не *Uncertainty* у I. R. Prigogine! Нобелевский лауреат связывал *Uncertainty* с невозможностью описывать биосистемы в рамках ТДС (и только!).

У Weaver *Uncertainty* приобретало другой смысл. Он говорил об отсутствии прогноза для описания будущего у систем с *Complexity*. Именно об этом пытался сказать и второй нобелевский лауреат M. Gell-Mann, когда вводил *Unpredictability* уже для квантовых систем и квантового эксперимента. Gell-Mann вводил свою случайность и непредсказуемость в рамках реальных свойств КО, но он не относил это к биосистемам.

Именно за эти реальные свойства (*Unpredictability*) три физика в 2022 году получили нобелевскую премию. Напомним, что еще Гейзенберг вводил неопределенность (своим принципом), что выводило КО за пределы ТДС. Неопределенность для КО — это основа квантовой механики, это особая *Uncertainty*.

Сейчас мы можем уверенно говорить об отсутствии определенности и предсказуемости у КО. Поэтому физика сейчас будет очень сильно озадачена построением моделей в рамках ТДС и стохастики для описания квантовых экспериментов. Но еще более сложная ситуация возникла с биосистемами [1–11] после открытия ЭЭЗ [10–14].

Реальная *Complexity* для биосистем

Напомним, что W. Weaver вводил реальную (особую) *Complexity* для систем 3-го типа (СТТ), т. е. биосистем, но при этом у него отсутствовали научные факты для доказательства этой гипотезы. Эта гипотеза была доказана 20 лет назад сначала в биомеханике, а затем и для всех биосистем (организма человека) [1–11].

В рамках доказательства ЭЭЗ были получены научные факты отсутствия статистической устойчивости любых выборок любых параметров функций организма человека. Это означает, что статистика не работает при описании биосистем. Любая модель в рамках ТДС или стохастики для СТТ имеет исторический характер. Прогноз будущего для СТТ невозможен [1–11]. Это аналогично *Unpredictability* для всех КО.

Возникает ситуация, подобная с *Unpredictability* для КО (нет прогноза), но здесь все гораздо сложнее. Для СТТ уже вся статистика не работает, любая выборка уникальна. Более того, любая группа испытуемых будет неоднородной, т. к. выборка каждого человека из группы будет уникальной [9–14]. Это основа ЭЭЗ.

Потеря статистической устойчивости выборок СТТ (это мы обозначили как неопределенность 2-го типа — НВТ) и потеря однородности групп создает реальные *Uncertainty* и *Unpredictability*. Именно это и является реальной *Complexity* для всей современной науки. Эта *Complexity* более тяжелая, чем для КО, т. к. КО можно описывать стохастикой.

Очень жаль, что современная наука (научное сообщество) не обращает внимания на полученные научные факты и продолжает описывать биосистемы в рамках ТДС и стохастики. Сейчас очевидно, что дальше так продолжаться не может. *Complexity* биосистем требует особого внимания и создания новой науки.

Именно об этом говорил W. Weaver в 1948 году, и он прогнозировал, что человечество к этому подойдет через 50 лет (см. [15]), и это так и произошло. В самом начале XXI века был открыт ЭЭЗ, и началась эпоха детального изучения биосистем. Были открыты неопределенности 1-го и 2-го типов, псевдоаттракторы и т. д.

Сейчас совершенно очевидно, что ТДС и стохастика не могут описывать живые системы (СТТ). Сейчас мы создаем новую науку — теорию хаоса-самоорганизации (ТХС). В ТХС другие понятия и другие модели.

Основу ТХС создает ЭЭЗ, в котором будущее особой биосистемы не может быть прогнозируемым. Любая выборка кардиоинтервалов (КИ), треморограмм (ТМГ), электромиограмм (ЭМГ), электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и т. д. является уникальной, ее нельзя прогнозировать [1–14]. Это означает завершение ТДС и всей стохастики в изучении биосистем.

Для нас уже очевидно, что ЭЭЗ полностью завершает дальнейшее применение ТДС и стохастики для описания живых систем. Биосистемы обладают реальными свойствами *Uncertainty*, *Unpredictability* и *Complexity*. Эти три свойства у СТТ более сильные, чем у КО. Для КО мы можем еще дать некий статистический прогноз, но для СТТ этого уже нет. СТТ — не объект современной науки.

Для примера мы представляем типичную матрицу парных сравнений выборок КИ у одного испытуемого (регистрация подряд, 15 раз по 5 минут каждая). В таблице 1 мы видим единственную k пар выборок КИ, для которых критерий Вилкоксона $p_{ij} \geq 0,05$. В этом случае эта пара может иметь общую генеральную совокупность.

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок кардиоинтервалов (КИ) одного и того же человека (без нагрузки, число повторов регистрации КИ $n = 15$), использовался критерий Вилкоксона (критерий различий $p < 0,05$, число совпадений $k = 1$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00
4	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Напомним, что при $p_{ij} \geq 0,05$ такие две выборки могут статистически совпадать. В таблице 1 число k крайне мало (обычно $k \leq 15$). Это означает, что организм не может произвольно повторить выборки КИ. Работа сердца хаотична, но это не хаос Лоренца (не динамический хаос, который имеет странные аттракторы).

В рамках ЭЭЗ нами было доказано отсутствие однородности любой группы испытуемых. Это означает, что если взять 15 испытуемых (одинакового пола, возраста и т. д.) и объединить их в якобы однородную (биологически) группу, то их выборки параметров функций организма не будут совпадать. Таких людей нельзя объединять в группу (это неоднородная группа).

Очевидно, что последние 100–150 лет биология и медицина работали с неоднородными группами. Для примера мы представляем типичную матрицу парных сравнений выборок 15-ти разных людей (биологически они одинаковы). В таблице 2 число $k < 20$.

Таблица 2

Матрица парного сравнения 15-ти выборок кардиоинтервалов (КИ) группы женщин, использовался критерий Манна–Уитни (критерий различий $U < 0,05$, число совпадений $k_1 = 15$) [16]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00		0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
6	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00		0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00		0,19	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,19		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
13	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00	0,00
14	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Напомним, что число k показывает число пар выборок КИ, которые могут иметь одну (общую) генеральную совокупность. Таких людей нельзя объединять в якобы однородную группу. У них у всех разные генеральные совокупности [9–14]. Очевидно, что в биомедицине все группы неоднородны из-за ЭЭЗ.

Обсуждение

В современной науке сложилось неправильное представление о *Complexity*. Считается, что это понятие связано с нелинейной динамикой поведения исследуемой системы. Тогда такую *Complexity* можно описывать в рамках ТДС и стохастики. Нелинейные системы вполне прогнозируемы, и они не *Complexity*.

Однако еще в 1948 году W. Weaver доказал связь *Complexity* с отсутствием возможности прогноза будущего состояния системы. Позже Prigogine вывел все биосистемы за пределы ТДС, а Gell-Mann говорил об *Unpredictability* для КО. Однако все эти ученые не знали реальной *Complexity* для СТТ.

Сейчас совершенно очевидно, что нобелевская премия по физике за 2022 год была присуждена именно за *Unpredictability* квантовых систем. КО невозможно предсказать, его будущее как бы творится заново в квантовом эксперименте. В этом КО сходны с СТТ.

За последние 20 лет мы доказали аналогичные свойства у всех биосистем. СТТ невозможно прогнозировать из-за ЭЭЗ. Для СТТ нет будущего при знаниях о настоящем. Более того, любая группа неоднородна, и все это завершает дальнейшее применение ТДС и стохастики в описании СТТ. Пора уже громко и четко говорить: вся ТДС и стохастика не могут описывать СТТ — живые системы!

Выводы

Вся современная наука связывает *Complexity* с нелинейным поведением исследуемых систем. Поэтому *Complexity* описывают в рамках ТДС и стохастики. Однако это является ошибочным убеждением, и об этом говорил W. Weaver еще в 1948 году. В ТДС мы имеем прогноз будущего, для СТТ это невозможно.

Реальная *Complexity* связана с отсутствием возможности прогноза будущего у изучаемых систем. Именно такими свойствами обладают КО в квантовом эксперименте. Об этом говорил нобелевский лауреат M. Gell-Mann, и за это трое физиков получили нобелевскую премию в 2022 году.

Об этом пытался сказать и W. Weaver в описании биосистем. Но отсутствовали доказательства *Complexity* для биосистем. Эти доказательства появились через 50 лет после публикации Weaver [15].

За последние 20 лет мы доказали ЭЭЗ. В этом эффекте для СТТ нет прогноза будущего (будущее для биосистем как бы творится) и нет однородных групп. Это и есть реальная *Complexity* для СТТ, но пока современная наука не желает этого признавать. Сложилась странная ситуация: имеются научные факты, но они тривиально игнорируются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. *Конец определенности: хаос гомеостатических систем*. Тула: Изд-во Тульское производственное полиграфическое объединение; 2017. 596 с.
2. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. *Complexity: хаос гомеостатических систем*. Самара: Изд-во ООО «Порто-принт»; 2017. 388 с.
3. Еськов В. М., Галкин В. А., Пятин В. Ф., Филатов М. А. *Организация движений: стохастика или хаос?* Самара: Изд-во ООО «Порто-принт»; 2020. 144 с.
4. Filatova O. E., Bashkatova Yu. V., Shakirova L. S., Filatov M. A. Neural Network Technologies in System Synthesis. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1047:012099. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012099.
5. Grigorenko V. V., Nazina N. B., Filatov M. A., Chempalova L. S., Tretyakov S. A. New Information Technologies in the Estimation of the Third Type Systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1889:032003. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/3/032003.
6. Filatov M. A., Poluhin V. V., Shakirova L. S. Identifying Objective Differences Between Voluntary and Involuntary Motion in Biomechanics. *Human. Sport. Medicine*. 2021;21(1):145–149.
7. Eskov V. M., Filatov M. A., Grigorenko V. V., Pavlyk A. V. New Information Technologies in the Analysis of Electroencephalograms. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1679:032081. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032081.
8. Eskov V. M. Methods for Identifying Two Types of Uncertainty in BioCybernetics. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2402:050042. DOI: 10.1063/50.0072488.
9. Filatov M. A., Eskov V. M., Shamov K. A. The Problem of Ergodicity of Biosystems. *Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration, Proceedings of the International Conference*. Beijing; 2022. P. 77–84. DOI: 10.34660/INF.2022.48.77.121.
10. Шакирова Л. С., Еськов В. М., Кухарева А. Ю., Музиева М. И., Филатов М. А. Границы стохастики в медицинской кибернетике. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(4):125–128. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-4-125-128.
11. Коннов П. Е., Филатов М. А., Поросинин О. И., Юшкевич Д. П. Использование искусственных нейросетей в оценке актинического дерматита. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(2):109–112. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-2-109-112.
12. Коннов П. Е., Газя Г. В., Еськов В. В. Клинические показатели больных хроническим актиническим дерматитом. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;3:15–26. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-15-25.
13. Еськов В. М., Гавриленко Т. В., Музиева М. И., Самойленко И. А. Теория динамического хаоса не может описывать биосистемы. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;3:87–95. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-60-71.
14. Кухарева А. Ю., Мельникова Е. Г., Байтуев И. А., Филатов М. А. Существует ли связь между «many-worlds interpretation» и «many-minds interpretation» в биокибернетике? *Успехи кибернетики*. 2023;4(3):101–108. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-11.
15. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36:536–544.
16. Буданов В. Г., Асеева И. А., Зотов В. В. Моделирование социотехнической конвергенции в цифровых сетевых пространствах: возможности и риски. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;1:60–72. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-62-70.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-12

КЛАССИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ФИСТУЛЫ ПАЦИЕНТА, НАХОДЯЩЕГОСЯ НА ГЕМОДИАЛИЗЕ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ АУДИОСИГНАЛА

С. А. Сазонов^а, Д. В. Горбунов^б*Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*^а ✉ s.sazono23@gmail.com, ^б Gorbunov.dv@mail.ru

Аннотация: в современном мире пациентам, состоящим на гемодиализе, необходимо постоянно следить за состоянием своей фистулы либо самостоятельно, либо посещая специалиста. Это может вызывать определенные трудности у человека, так как у каждого может быть свое восприятие состояния артериовенозной фистулы. В статье представлена разработанная автором модель машинного обучения, позволяющего классифицировать фистулу. Также рассмотрены различные методы фильтрации признаков для использования этих обработанных данных в классификации состояния фистулы. Кроме этого, автором предложена новая методика с использованием спектральных признаков, позволяющих более точно определять состояние пациента, находящегося на гемодиализе.

Ключевые слова: артериовенозная фистула, классификация, гемодиализ, спектральный признак, аудиосигнал.

Для цитирования: Сазонов С. А., Горбунов Д. В. Классификация состояния фистулы пациента, находящегося на гемодиализе, с использованием спектральных признаков аудиосигнала. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):103–109. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-12.

*Поступила в редакцию: 10.03.2024.**В окончательном варианте: 31.03.2024.*

CATEGORIZATION OF FISTULA CONDITION IN HEMODIALYSIS PATIENTS USING SPECTRAL ANALYSIS OF AUDIO SIGNALS

S. A. Sazonov^a, D. V. Gorbunov^b*Surgut State University, Surgut, Russian Federation*^a ✉ s.sazono23@gmail.com, ^b Gorbunov.dv@mail.ru

Abstract: patients on hemodialysis need to constantly monitor the condition of their fistula, either independently or by visiting a doctor. This can be challenging, as each person may perceive the condition of their arteriovenous fistula differently. In this paper, we present a machine learning model to categorize fistula conditions. We considered various feature filtering methods to enhance the accuracy of the categorization. Additionally, we proposed a new method using spectral features, which allows for a more precise determination of the condition of patients undergoing hemodialysis.

Keywords: arteriovenous fistula, categorization, hemodialysis, spectral feature, audio signal.

Cite this article: Sazonov S. A., Gorbunov D. V. Categorization of Fistula Condition in Hemodialysis Patients Using Spectral Analysis of Audio Signals. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):103–109. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-12.

*Original article submitted: 10.03.2024.**Revision submitted: 31.03.2024.*

Введение

Одним из самых распространенных заболеваний в наше время является почечная недостаточность. Это прогрессирующее заболевание, которым страдает более 10% населения во всем мире, что составляет 800 миллионов человек [1]. При этой болезни пациенту назначается гемодиализ, в ходе которого ему в большинстве случаев проводят операцию по созданию артериовенозной фистулы. Артериовенозная фистула (АВФ) — это аномальная связь между артерией и веной, которая позволяет получить доступ к сосудистой системе.

На данный момент АВФ считается самым надежным видом сосудистого доступа для организации проведения периодического гемодиализа.

Преимущества АВФ заключаются в доступности, малом риске заболеваемости, связанной с ее созданием, низком уровне осложнений. Методика формирования подкожной АВФ на предплечье

была разработана и предложена в 1966 году М. J. Brescia и J. E. Cimino. Современная хирургическая техника создания АВФ предполагает различные виды сосудистого анастомоза артерии с веной: бок в конец; конец в конец; конец в бок. Предпочтительным является анастомозирование между веной и артерией по типу «конец вены в бок артерии». Фистула между лучевой артерией и головной веной в области запястья является сосудистым доступом первого выбора. При адекватном созревании она может функционировать годы с минимальным числом осложнений [2].

После успешной операции по формированию АВФ пациент наблюдает характерный шум потока. Так как от данной операции зависит успешность проведения диализной терапии, то важно поддерживать ее функциональность, учитывая возможные последствия. Все методы контроля, известные на текущее время, не позволяют пациенту находиться вне стационара. В настоящее время нет приборов, дающих больному возможность индивидуально проверять состояние фистулы, но идут активные попытки разработать устройство и алгоритмы для инвазионного мониторинга АВФ, которые будут рассмотрены в следующем разделе.

Одной из основных целей контроля состояния фистулы является наблюдение за развитием и прогрессированием стеноза, что увеличивает шанс возникновения тромбоза [3]. Это состояние возникает при травме, в ходе которой активизируется процесс свертывания крови (коагуляция). С помощью специальных клеток, тромбоцитов, организм формирует естественный защитный слой, препятствующий потере крови. Вследствие этого сгустки крови образуются внутри кровеносных сосудов, где они препятствуют нормальному току крови. Одним из способов проверить, достаточен ли кровоток через фистулу, является пальпация и аускультация фистулы, проще говоря, прослушивание так называемого «шума» [10].

Обзор литературы

Перед разработкой методики классификации состояния АВФ нами был проведен анализ различных исследований, которые так или иначе пытались решить данную проблему.

В работе Кейсуки Ота и других исследователей из Городской больницы Гамагори, Япония [4], использовалась CNN (сверточная нейронная сеть) — модель обучения для классификации состояния фистулы. В качестве входных данных были использованы звуки АВФ с частотой 192 кГц / 24 бита. Перед обучением в аудиофайлах был выделен звук фистулы в диапазоне частот 2–750 Гц для удаления посторонних шумов. Также для этих аудиосигналов были использованы сплайновые кривые, из которых извлекают несколько диапазонов выпуклых кривых длительностью 0,5–2 с, в течение которых звука фистулы не наблюдалось. В итоге был получен датасет из 4000 звуков, который классифицировали на 5 категорий (нормальный звук, резкий звук, высокий звук, прерывистый звук и свист). После обучения авторы отмечают, что точность обученной модели составляет 70–93%, и считают, что методы глубокого обучения с высокой точностью могут заменить аускультацию АВФ.

Исследователями из НИУ ВШЭ г. Москвы [5] используются два метода для определения «плохой» и «хорошей» фистулы. Первый метод включает в себя расчет позиции на плоскости «энтропия — сложность», в ходе которого вычисляются две характеристики (энтропии и сложности) для заданного временного ряда. Положение этих характеристик на соответствующей плоскости относительно верхних и нижних теоретических границ определяет тип ряда. Второй метод, предложенный авторами, строит граф понятий-объектов с использованием формального анализа понятий. Такие графы содержат вершины двух типов: соответствующие множеству объектов и содержащие подмножества атрибутов, характеризующих эти объекты. Для построения кластеров был использован алгоритм асинхронного распространения меток. Алгоритм кластеризации Wishart был применен для извлечения данных и успешно классифицирует обработанные данные на три категории: хорошее состояние фистулы, плохое и неопределенное. Также данные предварительно не обрабатывались, за исключением того, что запись проводилась в течение 20–30 секунд и в точке аускультации, расположенной на 2 сантиметра дистальнее артериовенозного анастомоза. Авторы считают, что оба эти подхода, как по отдельности, так и в сочетании, демонстрируют высокую диагностическую эффективность.

Авторы из Института инженеров по электротехнике и электронике, Аргентина [6], предлагают новый метод, который заключается в реализации линейно-фазового фильтра нижних частот с конечной импульсной характеристикой (частота среза фильтра 3 дБ при 200 Гц), который оценивают и вычитают дрейф базовой линии из звукового сигнала. Затем огибающая фильтруется с помощью фильтра нижних частот 5 Гц, и индекс максимального пика определяется для каждого импульса интервала

(сердцебиение), присутствующего в огибающей. Авторы предполагают, что максимальный пик каждого обнаруженного пульса во временной области соответствует первому систолическому пику пульсовой волны. Принимая это во внимание, максимальный пик используется в качестве контрольной точки, и считается, что фиксированная длительность 400 мс после максимального пика делает все обнаруженные импульсы одинаково длинными. В дальнейшем каждый обнаруженный импульс нормируется по энергии, и полученные данные обучаются в классификаторе SVM (метод опорных векторов). Данные предварительно, до обработки, дискретизируются до 2 кГц. В конце авторы утверждают, что при проведении межпациентного сравнения происходит падение точности классификации, и значимость результатов, и их влияние на медицину требуют дальнейшего изучения.

Марсин Грочовина из Университета Жешува, Польша [7], не предлагает принципиально нового метода, но выводит новые свойства, которые не были учтены в прошлых работах. Первое свойство — это свойство во временной области, основанное на разнице между максимальным и минимальным значениями огибающей сигнала. Чтобы получить сигнал огибающей, его выпрямляют и фильтруют с использованием фильтра нижних частот. После всех преобразований получают уравнение (1), где A_{max} — это максимальное значение огибающей сигнала и A_{min} — минимальное:

$$f_1 = \frac{A_{min}}{A_{max}}. \quad (1)$$

Из этого уравнения можно понять, что его значение для работоспособной фистулы будет выше, чем для суженной фистулы. Второе свойство получается из частотной области, для этого сигнал разделяют на фрагменты, которые соответствуют сердечному ритму. Затем преобразуют в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье. Для устранения утечки спектра использовано временное окно Хэмминга. Значения спектральной амплитуды в пределах этих делений суммируют и рассчитывают уравнение (2), где $FR1 = [125\text{Гц}, 175\text{Гц}]$ и $FR2 = [375\text{Гц}, 425\text{Гц}]$ — это временное окно Хэмминга для аудиосигнала:

$$f_2 = \frac{FR1}{FR2} = \frac{\sum_{f=125}^{175} f f t}{\sum_{f=375}^{425} f f t}. \quad (2)$$

Анализ сигналов, поступающих как от нормальных, так и от стенозированных фистул, показал, что в случае, когда фистулы стенозированы, значение фактора $FR2$ определено выше. Следовательно, значение свойства f_2 будет меньше, когда состояние фистулы будет лучше. После выведения новых свойств автором было проведено обучение при помощи метода k -ближайших соседей с точностью 81% и метода опорных векторов с точностью 85%. В конце исследователь отмечает, что данные методы могут применяться в задаче оценки состояния фистулы и позволяют получить относительно высокий коэффициент точности, но на основании полученных результатов нельзя сказать, какой из применяемых классификаторов будет лучшим.

По результатам анализа рассмотренных работ мы считаем перспективным проанализировать в качестве параметров модели спектральные признаки и Мел-кепстральные коэффициенты и применить модель машинного обучения при помощи метода случайного леса. Для решения этой задачи была выведена следующая схема классификации [10]:

1. Определение набора признаков.
2. Выделение признаков из аудиофайла.
3. Выделение наиболее важных признаков из всех.
4. Классификация обучающего набора.
5. Переобучение модели на выявленных ошибках при классификации на обучающем наборе.

Выделение признаков

В ходе работы было решено использовать различные спектральные признаки и коэффициенты, такие как:

- спектральный центроид — это мера, которая описывает «центр масс» спектра. Он используется для определения «яркости» или «тембра» звука;
- спектральный спад — это мера, которая описывает скорость уменьшения энергии в спектре после его пика. Это может быть полезно для определения характеристик звука, таких как его «грубость» или «мягкость»;

- спектральная ширина — это мера, которая описывает распределение энергии в спектре. Она может быть использована для определения «широты» или «узости» звука;
- Мел-кепстральные коэффициенты (MFCC). Они представляют собой набор коэффициентов, которые обобщают спектральную информацию звукового сигнала, преобразуя ее в более компактное и управляемое представление.

Данный выбор признаков обоснован тем, что они наиболее часто встречаются в решениях проблем классификации. Также, как известно, спектральные признаки являют собой список значений, поэтому данные были приведены к среднему арифметическому и определено стандартное отклонение к каждому признаку.

Обучение модели

Для обучения модели машинного обучения было решено использовать метод случайного леса.

В работах А. А. Турлая [10], О. С. Зайляповой [8] с соавторами были проверены различные подходы к классификации аудиосигналов. В исследовании А. А. Турлая с соавторами [10] были вычислены различные показатели, такие как среднее арифметическое значение элементов, средняя частота (медиана) и т. д. Впоследствии был выявлен явный волновой характер сигналов и, вычисляя количество пиков (волн) в каждом отдельном сигнале, можно было говорить о состоянии фистулы. В работе Д. А. Федорова с соавторами [9] применено обучение при помощи модели ANN (искусственная нейронная сеть), в котором используют несколько спектральных признаков, таких как спектральный центроид, спад спектра и т. п. По результатам обучения у данного автора была получена модель с точностью 84%. В исследовании О. С. Зайляповой с соавторами [8] были проведены сравнительный анализ различных методик обучения нейронных сетей и выявление самой точной из них. В данной работе сравнивались такие модели обучения, как метод случайного леса, метод опорных векторов, метод линейного дискриминантного анализа и т. д. В заключении автор исследования сообщает, что лучшим является метод случайного леса. Исходя из этой информации было решено использовать данный метод, так как он показал наилучший результат.

Выделение наиболее важных признаков

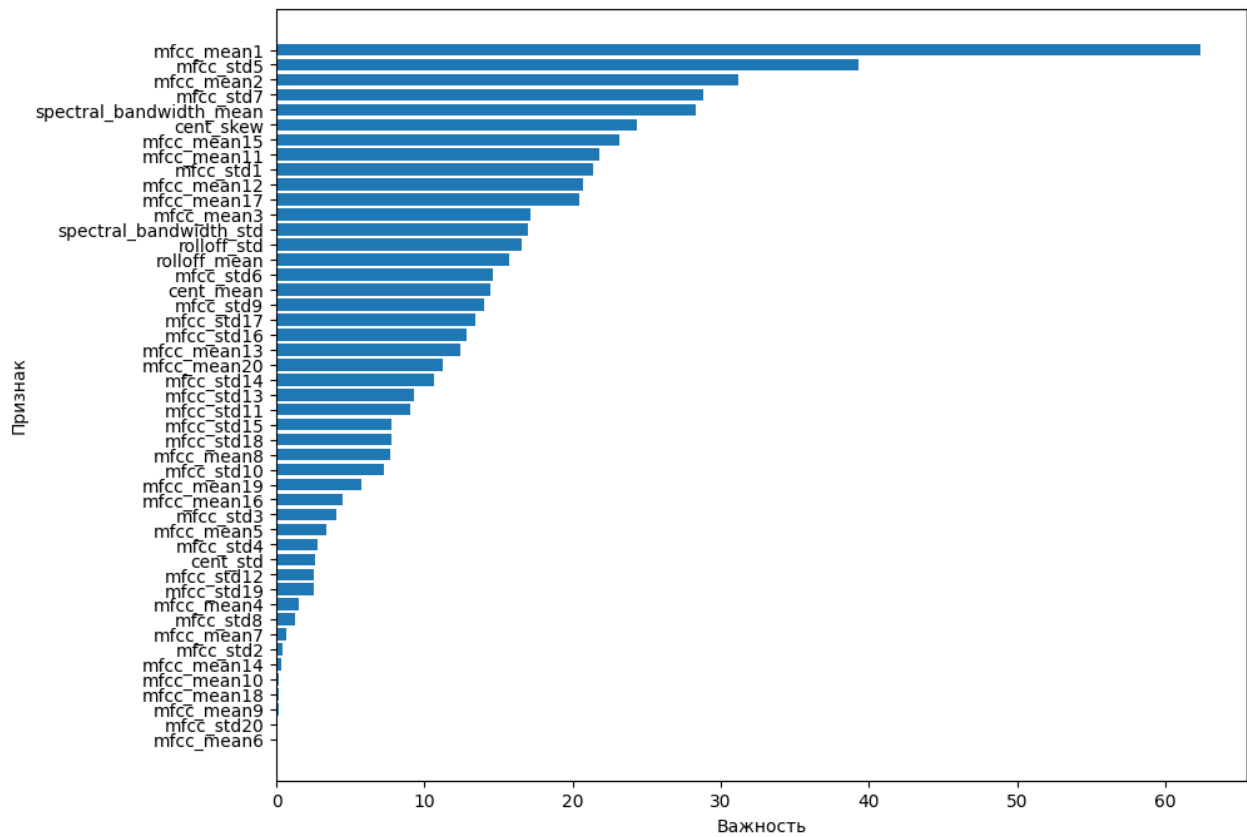
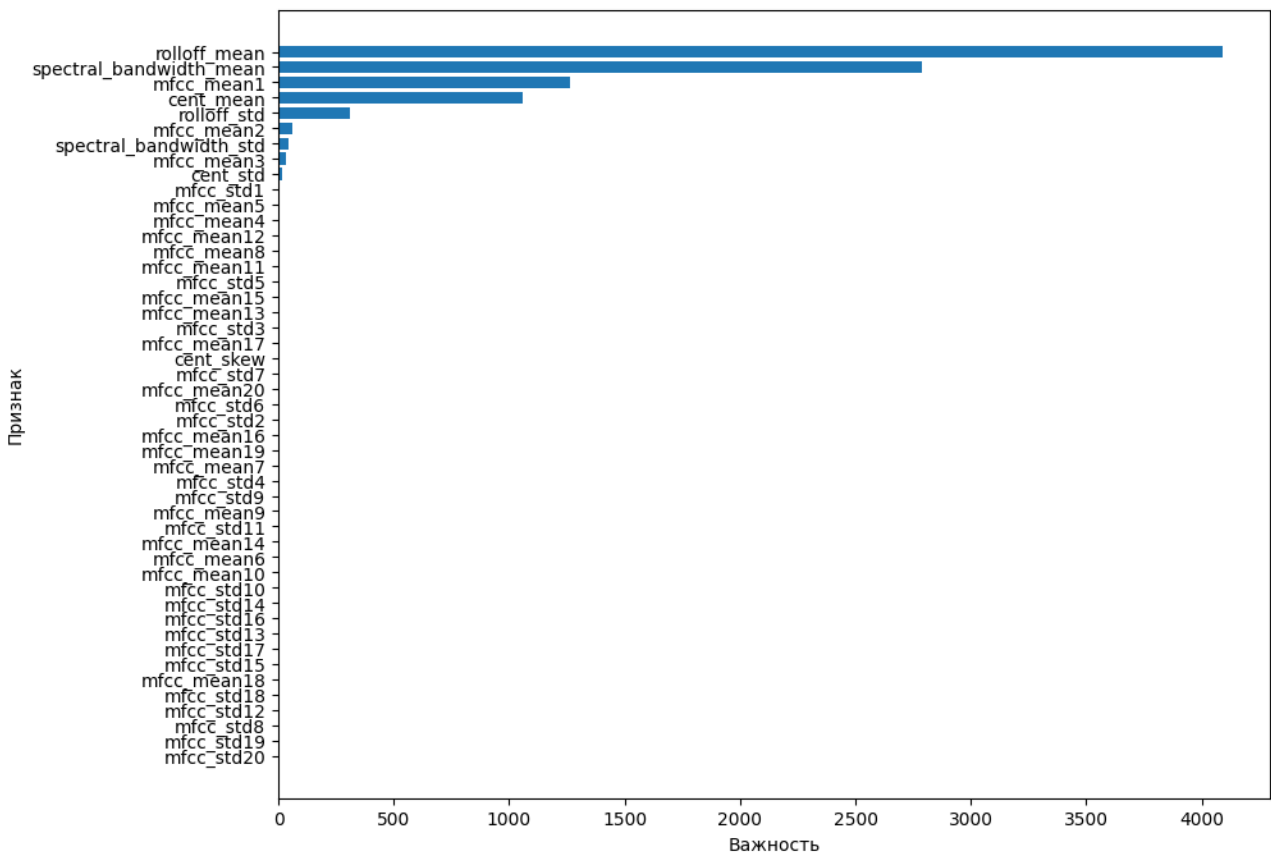
В ходе формирования признаков для модели машинного обучения было получено 47 позиций. Данное количество признаков вызывало переобучение у модели. Для решения этой проблемы было решено использовать 2 метода фильтрации и 1 встроенный метод. В качестве методов фильтрации был использован F-тест и хи-квадрат (χ^2), в качестве встроенного метода использовался включенный в алгоритм машинного обучения метод случайного леса.

F-тест — это статистический тест, который используется для определения того, являются ли две или более групп статистически значимыми или нет. Для вычисления этих признаков можно использовать библиотеку `sklearn`, в которой есть метод `SelectKBest` с атрибутом `f_classif`. После использования этого метода был получен график, представленный на рисунке 1, где отображаются признаки и оценка их значимости.

Рассматривая этот график, можно сделать вывод, что для будущей модели будут важны 45 признаков из 47.

χ^2 — это статистический тест, который используется для определения того, есть ли значимая связь между каждым неотрицательным признаком и целевой переменной. Чтобы вычислить данный тест, воспользуемся библиотекой `sklearn`, в которой есть метод `SelectKBest` с атрибутом `chi2`. Для визуализации полученных результатов был построен график, изображенный на рисунке 2. По сравнению с F-тестом, в данном методе было выделено 9 признаков, влияющих на обучение модели, из 47.

Также был использован встроенный в модель метод случайного леса. Важность признака в этом методе вычисляется следующим образом: во время обучения каждого дерева решений каждый раз, когда признак используется для разделения узла, учитывается улучшение качества разделения, которое этот признак обеспечивает. Это улучшение, среднее по всем деревьям леса, является мерой важности признака. В итоге формируется массив, элементы в котором суммируются до 1 и большие значения соответствуют более важным признакам. На рисунке 3 можно наблюдать визуализацию этого массива. Можно сделать вывод, что в целом все признаки могут влиять на обучение модели.

Рис. 1. Значимость признаков при использовании F -тестаРис. 2. Значимость признаков при использовании χ^2

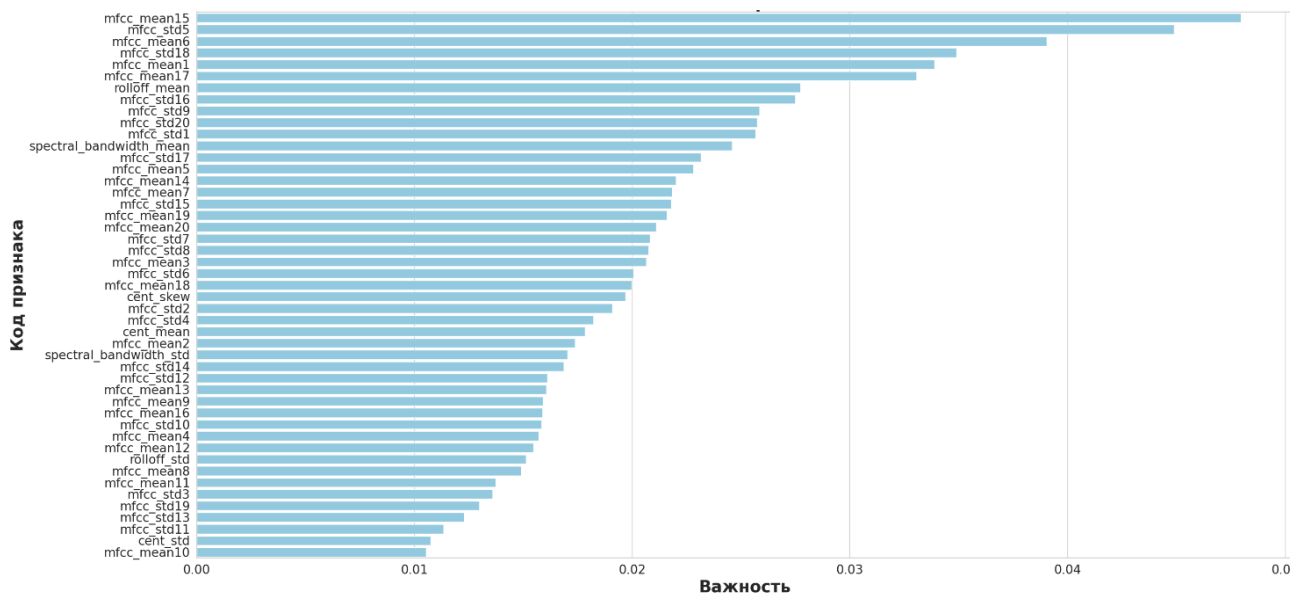


Рис. 3. Значимость признаков при использовании встроенного метода в *RandomForest*

Исходя из полученных выше результатов было решено провести серию экспериментов, которые могли бы выявить наиболее значимые признаки из всех методов, тем самым уменьшив количество признаков, необходимых для улучшения точности модели. Суть экспериментов следующая: перед каждым экспериментом нужно было в произвольном порядке перемешать значения признаков, далее обучать модель, добавляя по одному признаку из списка, и получать точность и количество признаков, которые использовались в обучении. Обучение продолжается до тех пор, пока не найдется самая высокая точность из всех. В итоге было проведено 3 серии экспериментов для каждого из методов. Исходя из полученных данных, были выделены результаты, которые обладали высокой точностью и меньшим количеством признаков. По итогам экспериментов была сформирована таблица, в которой отражаются результаты.

Таблица

Результаты экспериментов

Признаки	Random Forest	F-тест	χ^2	Итого
mfcc_mean1	1	1	1	3
mfcc_mean2	0	0	1	1
mfcc_mean6	1	0	0	1
mfcc_mean15	1	0	0	1
mfcc_mean17	1	0	0	1
mfcc_std5	1	1	1	3
mfcc_std18	1	0	0	1
cent_mean	0	0	1	1
rolloff_mean	1	0	1	2
rolloff_std	0	0	1	1
spectral_bandwidth_mean	0	0	1	1

По данной таблице были выбраны более часто встречающиеся признаки, и в итоге был сформирован список из 3 признаков. В ходе проверки этих признаков было выяснено, что один из признаков негативно влиял на обучение модели, в итоге этот признак был исключен.

Полученный набор признаков позволил повысить точность модели с 89% до 93.87%.

Заключение

Построенная модель на основе метода случайного леса позволила на обучающей выборке, состоящей из 490 записей, проводить классификацию с точностью 93.87%. Также была разработана методика, которая позволяет из большого количества признаков выделить наиболее важные из них, тем самым не вызывая переобучения модели.

Нами также продолжается работа по увеличению обучающей выборки посредством новых аудиозаписей АВФ. Также в дальнейшем планируется проверить разработанную методику на других методах машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kovesdy C. P. Epidemiology of Chronic Kidney Disease: an Update 2022. *Kidney International Supplements*. 2022;12(1):7–11. DOI: 10.1016/j.kisu.2021.11.003.
2. Коннер К. Сосудистый доступ для гемодиализа. *Нефрология*. 2009;13(4):9–17. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sosudistyuy-dostup-dlya-gemodializa>.
3. Николаев Е. Н., Мазайшвили К. В., Лобанов Д. С., Демина А. В., Блохина А. В. Современное состояние проблемы тромбоза сосудистого доступа у больных на гемодиализе. *Вестник СурГУ. Медицина*. 2019;3:8–14. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-problemy-tromboza-sosudistogo-dostupa-u-bolnyh-na-gemodialize>.
4. Ota K., Nishiura Y., Ishihara S., Adachi H., Yamamoto T., Hamano T. Evaluation of Hemodialysis Arteriovenous Bruit by Deep Learning. *Sensors*. 2020;20:4852. DOI: 10.3390/s20174852.
5. Gromov V. A., Zvorykina E. I., Beschastnov Y. N., Sohrab M. *Date-Driven Approach for Identifying State of Hemodialysis Fistulas: Entropy-Complexity and Formal Concept Analysis*. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2309.14399>.
6. Munguía M., Vázquez P., Mattsson E., Mandersson B. Acoustical Detection of Venous Stenosis in Hemodialysis Patients Using Principal Component Analysis. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology; 2010*. P. 3654–3657. DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5627439.
7. Grochowina M., Leniowska L. Comparison of SVM and k-NN Classifiers in the Estimation of the State of the Arteriovenous Fistula Problem. *Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 2015;5:249–254. DOI: 10.15439/2015F194.
8. Зайляпова О. С., Заикин П. В., Федоров Д. А. Модели исследования звуковых данных артериовенозной фистулы. *Наука, образование, инновации: актуальные вопросы и современные аспекты: сб. ст. XV Международ. научно-практич. конф. в 2 ч. Ч. 1*. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.); 2022. С. 55–57. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_50055026_53743111.pdf.
9. Федоров Д. А., Назина Н. Б., Кучин И. А. Преобразование и анализ сигнала АВ-фистулы в информационной системе мониторинга сосудистого доступа у больных на гемодиализе. *Современная наука и молодые ученые: Сб ст. XIII Международ. научно-практич. конф.* Пенза: МЦНС «Наука и просвещение»; 2023. С. 48–57. Режим доступа: <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2023/06/МК-1741.pdf>.
10. Турлай А. А., Заикин П. В., Назина Н. Б. Применение методов машинного обучения и анализа данных при оценке состояния фистулы. *Вестник кибернетики*. 2019;4:61–65. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42316208>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-13

ГОЛОСОВОЙ ПОМОЩНИК ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВЕН НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ПАЦИЕНТА

Н. Р. Урманцева^а, Р. А. Чирко^б*Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9163-6132>, nel-u@yandex.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7581-918X>, chirko-99@mail.ru

Аннотация: в статье описан голосовой помощник для интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента, который представляет собой инновационное решение, позволяющее сократить время приема пациента и/или улучшить качество медицинского обслуживания. Chat Helper (CH) управляет системой с помощью речевых команд и делает процесс взаимодействия с ней более естественным и удобным для врачей и пациентов. Таким образом, время, необходимое на опрос и запись анамнеза пациента, сокращается с 15 до 7 минут. Использование CH экономит более 20% времени врача на выполнении рутинных операций, в т. ч. на заполнении медицинской документации.

Ключевые слова: интеллектуальная система, технологии распознавания речи, PyAudio, Speech Recognition, голосовой помощник, CEAP.

Для цитирования: Урманцева Н. Р., Чирко Р. А. Голосовой помощник для интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента. *Успехи кибернетики*. 2024;5(2):110–117. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-13.

*Поступила в редакцию: 22.04.2024.**В окончательном варианте: 29.04.2024.*

VOICE ASSISTANT FOR INTELLIGENT COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF LOWER EXTREMITY VEIN HEALTH

N. R. Urmantseva^а, R. A. Chirko^б*Surgut State University, Surgut, Russian Federation*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9163-6132>, nel-u@yandex.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7581-918X>, chirko-99@mail.ru

Abstract: this article presents a voice assistant designed for an intelligent system that provides a comprehensive assessment of lower extremity vein conditions. This innovative solution aims to reduce patient admission times and enhance the quality of medical care. The Chat Helper (CH) voice assistant operates the system through voice commands, making interactions more natural and convenient for both doctors and patients. As a result, the time needed to interview patients and document their medical history is reduced from 15 to 7 minutes. By utilizing CH, doctors can save over 20% of their time on routine tasks, including completing medical documentation.

Keywords: intelligent system, speech recognition technologies, PyAudio, Speech Recognition, voice assistant, CEAP.

Cite this article: Urmantseva N. R., Chirko R. A. Voice Assistant for Intelligent Comprehensive Assessment of Lower Extremity Vein Health. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(2):110–117. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-2-13.

*Original article submitted: 22.04.2024.**Revision submitted: 29.04.2024.*

Введение

Современная медицина стремится к постоянному совершенствованию диагностики и лечения различных заболеваний, включая хронические заболевания вен нижних конечностей. Наряду с традиционными методами, такими как ультразвуковое исследование, МРТ-исследование, врачи все чаще используют системы искусственного интеллекта для более точной и комплексной оценки состояния пациента.

Одним из инновационных подходов в этой области является разработка голосового помощника Chat Helper (CH) для интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента. Преимущества использования голосового помощника при диагностике хронических заболеваний вен очевидны. Он обеспечивает более удобный и быстрый доступ к информации, позволяя врачам сосредоточиться на обследовании и лечении пациента и не тратить время на ввод команд и данных в компьютер, формулирование и написание стандартных рекомендаций для пациента.

По информации, опубликованной провайдером интеллектуальных решений для бизнеса АО «МТТ», 56% компаний среднего бизнеса в Российской Федерации заинтересованы в автоматизации взаимодействия с клиентом. Большая часть из них представляет собой медицинские центры [1].

В медицинских учреждениях голосовые помощники приходят на помощь врачам, администраторам, операторам. Задача технологии — разгрузить персонал, который осуществляет прием пациентов, обрабатывает входящие типовые запросы и сообщения. Это экономит рабочее время, снижает влияние человеческого фактора при ведении записей, помогает повысить качество обслуживания пациентов. Голосовой помощник способен выполнять до 90% рутинных операций [1].

По подсчетам Департамента здравоохранения Москвы, технологии распознавания речи экономят до 20% времени, необходимого на прием пациента. На данный момент врачи вынуждены тратить свои временные ресурсы на заполнение медицинской карты по итогам осмотра пациента, оформление протоколов по результатам обследований. Это приводит к тому, что время приема пациентов приходится сокращать ввиду заполнения различных документов [2].

Технологии распознавания речи позволяют автоматически заполнять необходимые документы с помощью голосовых команд. Программное обеспечение способно вносить данные в систему, анализируя и расшифровывая речь врача или пациента. После этого врачу остается только проверить корректность введенных данных. Таким образом, он сможет уделить значительно больше времени непосредственно осмотру пациентов, сократить время приема и принять больше посетителей в течение дня [3].

Описание голосового помощника для интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента

Голосовой помощник — это программа или устройство, которое может выполнять различные задачи, такие как ответы на вопросы, выполнение команд, поиск информации и т. д. Голосовые помощники могут быть использованы для автоматизации различных процессов, например, управления устройствами, напоминания о событиях и т. п.

Процесс распознавания голоса состоит из нескольких этапов и представлен на рисунке 1.

1. Запись голоса: микрофон записывает звук и преобразует его в электрический сигнал.
2. Обработка сигнала: сигнал обрабатывается для удаления шума и улучшения качества звука.
3. Анализ сигнала: алгоритм распознавания речи анализирует полученный сигнал, чтобы определить, какие слова были произнесены.
4. Распознавание слов: на основе анализа сигнала алгоритм определяет, какие слова были сказаны, и переводит их в текст.
5. Ответ пользователю: результаты распознавания передаются пользователю в виде текста или голоса.

Для создания CH был выбран язык программирования Python, который содержит все необходимые библиотеки для работы с аудиосигналами и аудиофайлами, а именно PyAudio и Speech Recognition.

PyAudio — это библиотека, которая позволяет программистам управлять аудиоустройствами и обрабатывать аудиосигналы. Она предоставляет интерфейс программирования приложений (API) для аудиоввода-вывода (I/O) и поддерживает различные аудиоформаты и частоты дискретизации. PyAudio может использоваться при создании приложений для распознавания речи, генерации звука, записи аудиофайлов и пр. [4].

Speech Recognition — это библиотека для распознавания речи на Python. Она позволяет конвертировать аудиофайлы в текст и выполнять другие задачи, связанные с обработкой речи [5].

В основные функции голосового помощника входят формирование протокола приема врача-флеболога, запись анамнеза пациента и рекомендаций по лечению в данный файл, выдача рекомендаций по лечению различных патологий вен СЕАР по запросу, поиск информации в интернете. Блок-схема голосового помощника представлена на рисунке 2.



Рис. 1. Блок-схема процедуры распознавания голоса

В дополнительные функции СН входит администрирование рабочего ПК врача (выключение, перезагрузка, вывод информации о загрузке системы, диска, создание папок и файлов), включение музыки, ведение заметок.

Функциональная модель системы и ее декомпозиция

Функциональная модель интеллектуальной системы составлена с использованием методологии функционального моделирования IDEF0, которая предназначена для формализации и описания бизнес-процессов. Отличительной особенностью IDEF0 является акцент на соподчиненность объектов. В IDEF0 рассматриваются логические отношения между работами, а не их временная последовательность [6].

Функциональная модель интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента содержит два вида диаграмм:

- 1) контекстная (обобщенная) диаграмма представлена на рисунке 3;
- 2) диаграмма декомпозиции (детализированная) представлена на рисунке 4.

Далее будут описаны входные, управляющие, выходные данные и механизмы контекстной диаграммы.

Входные данные:

- 1) снимок формата DICOM;
- 2) фотография ног;
- 3) данные о пациенте;
- 4) анамнез;
- 5) данные о враче.

Управляющие данные:

- 1) федеральный закон «О защите персональных данных» от 27.07.2006 N 152 — ФЗ;
- 2) классификация CEAP.

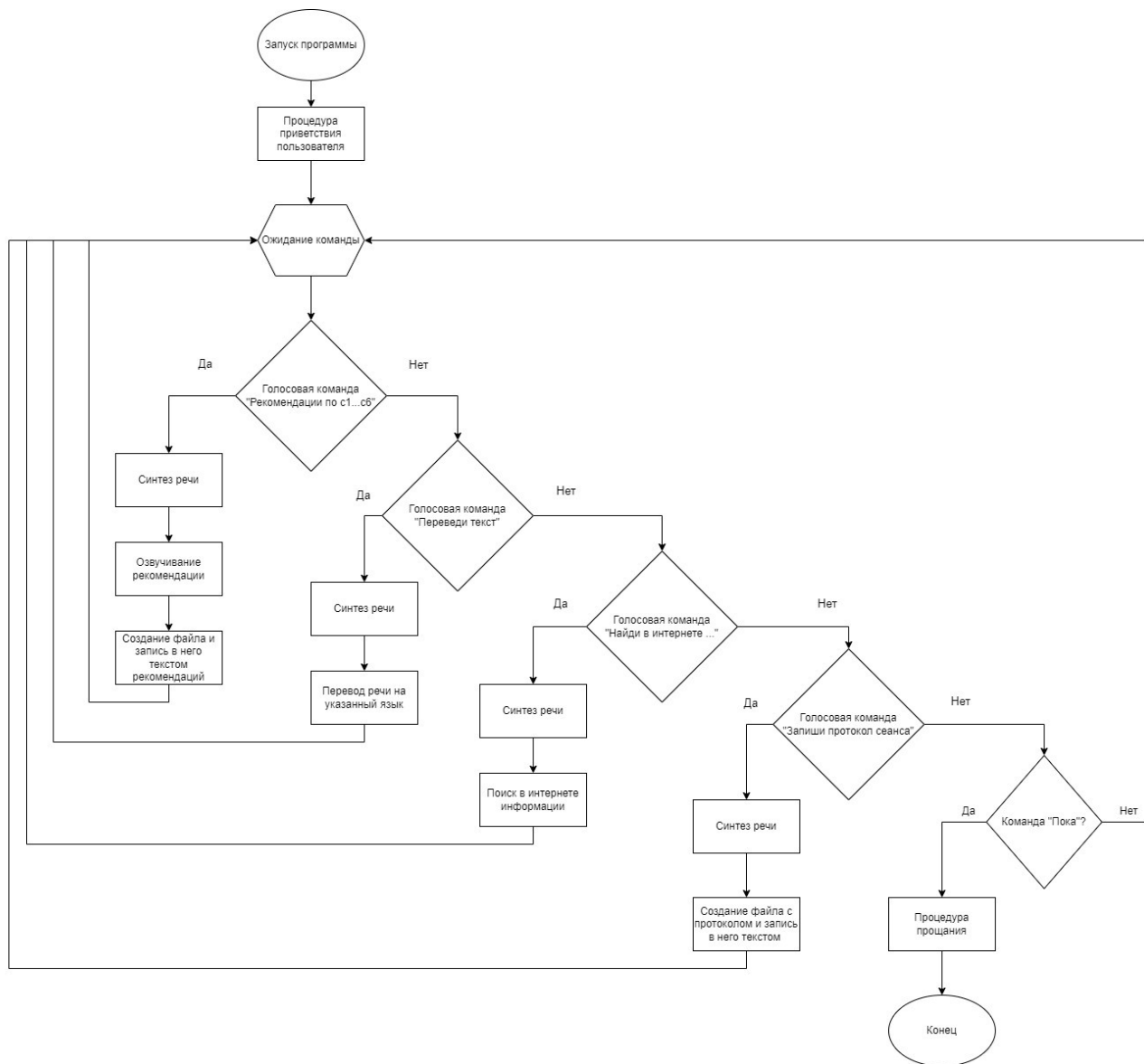


Рис. 2. Блок-схема голосового помощника Chat Helper

Механизм:

- 1) врач флеболог;
- 2) модель HC DICOM;
- 3) модель HC Photo_Legs;
- 4) модель HC Chat_Helper;
- 5) модель HC Silero;
- 6) ЭВМ.

Выходные данные — протокол осмотра врача-флеболога.

На рисунке 4 представлена детализированная диаграмма функциональной модели.

В ней выделено 6 блоков:

- 1) загрузка фотографии ног;
- 2) загрузка DICOM снимка;
- 3) обработка DICOM снимка;
- 4) обработка фотографии ног;
- 5) классификация загруженного материала;
- 6) формирование отчета.

Сначала врач загружает в систему DICOM-снимок или фотографию нижних конечностей пациента, далее загруженные данные обрабатываются по методу приведения изображения к черно-белому

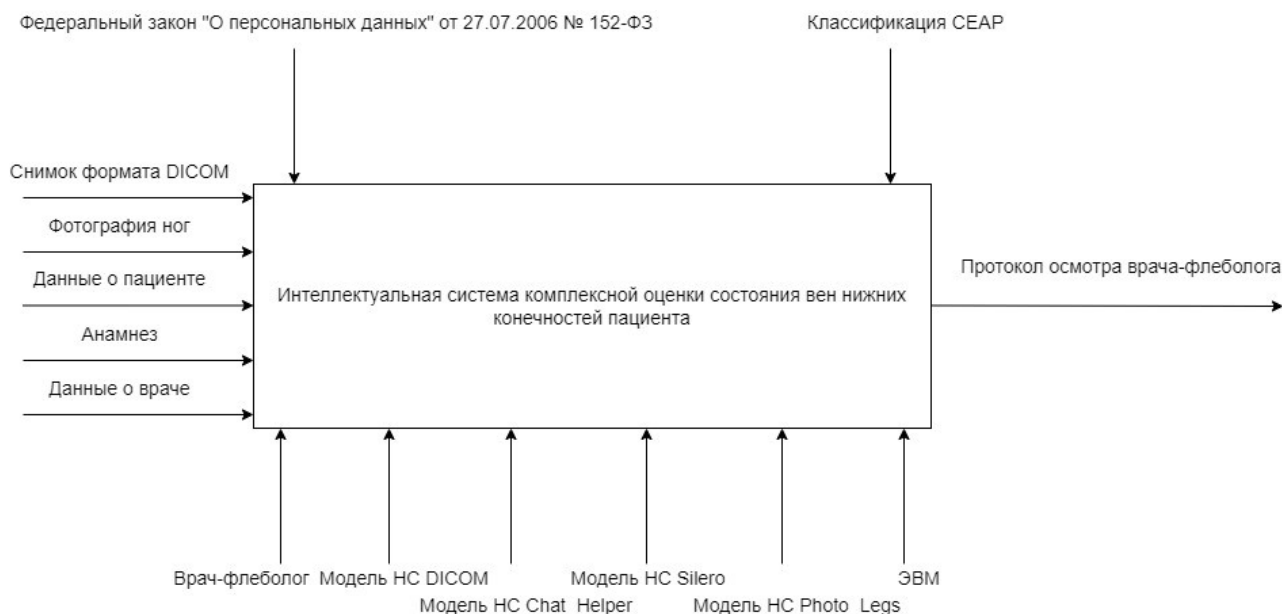


Рис. 3. Функциональная модель интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента в нотации IDEF0

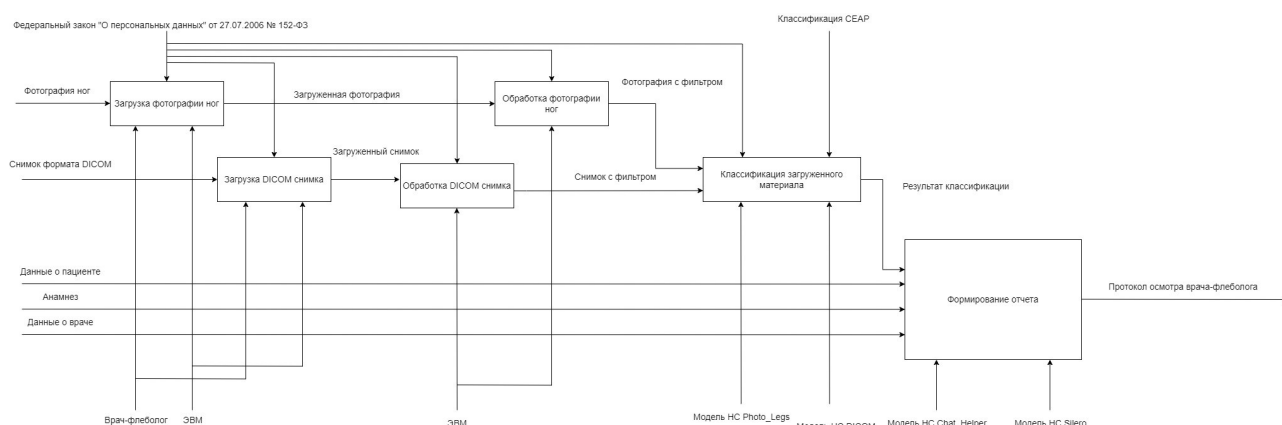


Рис. 4. Диаграмма декомпозиции функциональной модели интеллектуальной системы

формату в случае с фотографиями ног, по методу изменения контрастности в случае с загрузкой DICOM-снимка для повышения точности распознавания изображений обученными нейронными сетями Photo_Legs и DICOM. Затем происходит классификация загруженного снимка или фотографии — отнесение его к одному из классов патологии C0 – C6 — и вывод результата классификации на экран. Формирование и загрузка анамнеза в систему, выдача рекомендаций пациенту происходят непосредственно при общении с системой с помощью голосового помощника СН. Перед выдачей готового протокола осмотра врача-флеболога блоком «Формирование отчета» записанный в файл текст проходит через модель HC Silero для расстановки прописных букв и знаков препинания.

Результаты

Голосовой помощник озвучивает и записывает рекомендации в файл в среднем в течение 1 минуты (рис. 5). На заполнение аналогичного файла с рекомендациями вручную без ошибок и их озвучивание требуется порядка 6 минут.

Все показания пациента СН записывает с помощью микрофона, затем с помощью библиотеки Speech Recognition распознает устную речь и передает ее в HC Silero. HC Silero необходима для расстановки прописных букв и знаков препинания, так как в библиотеке Speech Recognition не заложены данные функции. Speech Recognition содержит в себе предварительно подготовленные модели для распознавания и синтеза речи. На текущий момент это самая масштабная обученная модель, в том числе

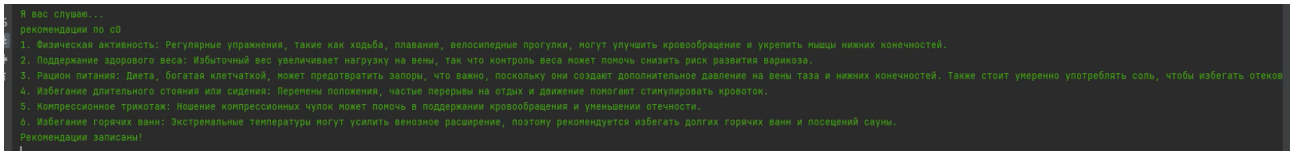


Рис. 5. Рекомендации, выданные голосовым помощником СН по классу патологии С0

на русском языке, предназначенная для озвучивания введенного текста разными голосами.

Таким образом, на выходе из интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента формируется протокол приема врача-флеболога, подготовленный для печати. На рисунке 6 изображен отрывок из протокола после опроса пациента с синтаксическими ошибками. На рисунке 7 изображен отформатированный отрывок из протокола после работы НС Silero.

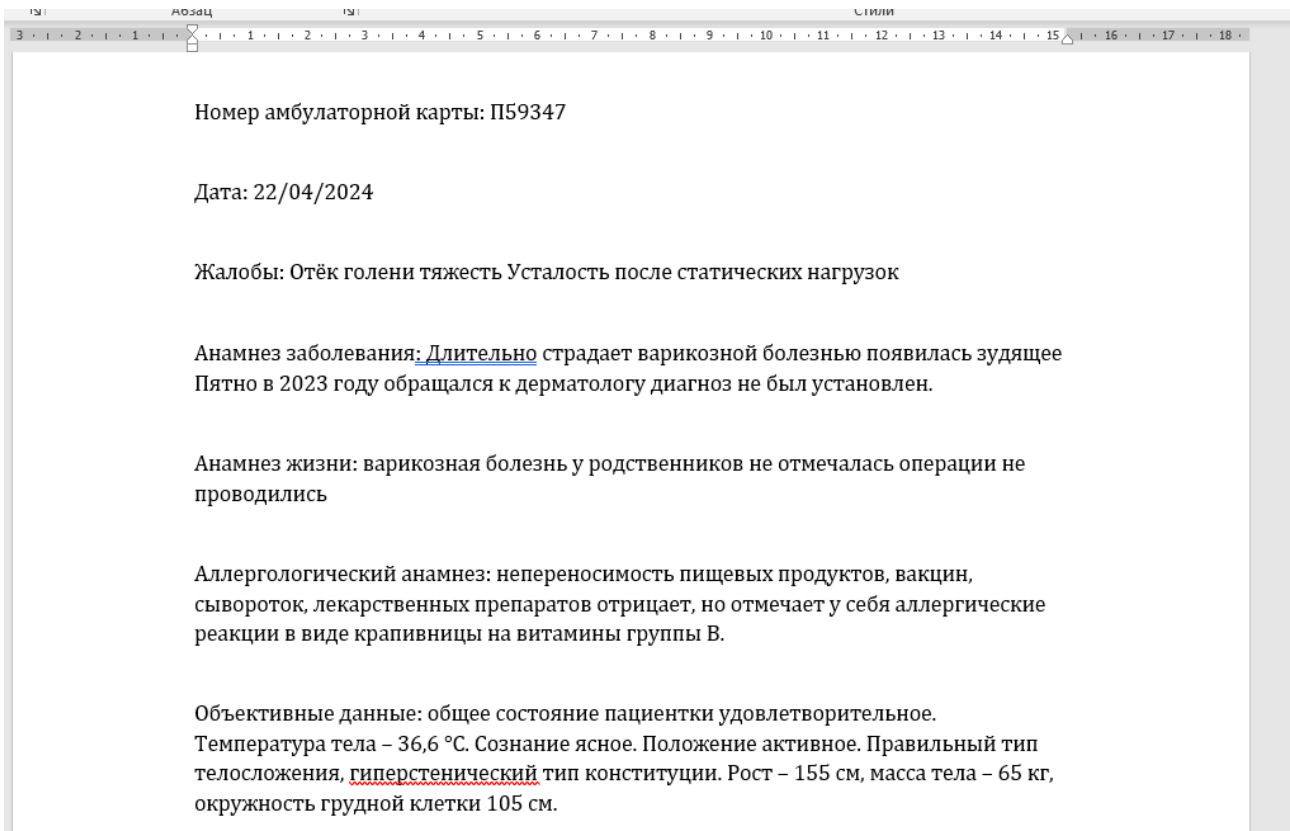


Рис. 6. Отрывок из протокола с синтаксическими ошибками до работы НС Silero

На рисунке 8 изображено начало протокола осмотра врача-флеболога, на рисунке 9 — его окончание.

Время, необходимое на опрос и запись показаний пациента, подготовку протокола осмотра, с помощью голосового помощника СН сократилось с 15 до 7 минут. Аналогичную интеграцию голосового помощника с МИС проводили в Иркутской городской больнице № 8 [7]. Врачи отмечают, что использование технологий распознавания речи экономит более 20% времени на выполнении рутинных операций, в т. ч. на заполнении медицинской документации.

Заключение

В данной статье была представлена пилотная версия голосового помощника для интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента.

Голосовой помощник позволяет оптимизировать процесс взаимодействия врача с интеллектуальной системой в аспектах записи анамнеза пациента, голосового вывода и/или записи рекомендаций в файл, подготовки итогового протокола осмотра пациента.

Абзац Стили

3 2 1 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Номер амбулаторной карты: П59347

Дата: 22/04/2024

Жалобы: отёк голени, тяжесть, усталость после статических нагрузок.

Анамнез заболевания: длительно страдает варикозной болезнью. Появилась зудящее пятно. В 2023 году обращался к дерматологу. Диагноз не был установлен.

Анамнез жизни: варикозная болезнь у родственников не отмечалась. Операции не проводились.

Аллергологический анамнез: непереносимость пищевых продуктов, вакцин, сывороток, лекарственных препаратов отрицает, но отмечает у себя аллергические реакции в виде крапивницы на витамины группы В.

Объективные данные: общее состояние пациентки удовлетворительное. Температура тела – 36,6 °С. Сознание ясное. Положение активное. Правильный тип телосложения, гиперстенический тип конституции. Рост – 155 см, масса тела – 65 кг, окружность грудной клетки 105 см.

Рис. 7. Отформатированный отрывок из протокола после работы HC Silero



Интеллектуальная система
диагностики вен

Контакты:

628408 г. Сургут,

ул. Энергетиков 22

тел. +79824722089

ISDV@mail.ru

Протокол осмотра врача – флеболога

ФИО пациента:

Номер амбулаторной карты: П59347

Дата: 22/04/2024

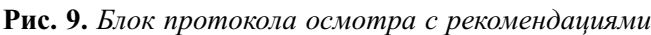
Жалобы: отёк голени, тяжесть, усталость после статических нагрузок.

Анамнез заболевания: длительно страдает варикозной болезнью. Появилась зудящее пятно. В 2023 году обращался к дерматологу. Диагноз не был установлен.

Анамнез жизни: варикозная болезнь у родственников не отмечалась. Операции не проводились.

Рис. 8. Начало протокола осмотра врача-флеболога

В перспективе планируется расширение функционала голосового помощника СН с его последующим внедрением в интеллектуальную систему комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента.



1. Цифровое здравоохранение: как голосовые роботы меняют сервис. 2022. Режим доступа: <https://telecomdaily.ru/news/2022/04/29/cifrovoye-zdravoohranenie-kak-golosovye-roboty-menyayut-servis>.
2. Гриценко А. А., Липатова Е. Г. Применение технологий искусственного интеллекта в сфере медицинской профилактики. *Цифровой регион: опыт, компетенции, проекты: Сборник трудов VII Юбилейной Международной научно-практической конференции*. Брянск: ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»; 2023:181–185.
3. Унгурян Е. Тренды цифровизации здравоохранения. Голосовые технологии. *СПАРМ*. 2022. Режим доступа: <https://sparm.com/publications/trendy-czifrovizaczii-zdravoohraneniya-golosovye-tehnologii%Ef%BF%BC>.
4. Устинов Е. Е., Бужинская Н. В. Разработка программы с голосовым управлением на языке Python. *Тенденции развития науки и образования*. 2023;99-7:90–93. DOI: 10.18411/trnio-07-2023-388.
5. Белицкий И. М. Создание голосового помощника на языке Python. *Перспективы развития и применения современных технологий: Сборник статей III Международной научно-практической конференции*. Петрозаводск; 2021. С. 76–79.
6. Приходько Н. А., Кулаченко А. К. Моделирование в нотации IDEF0. *Моя профессиональная карьера*. 2022;36(1):137–141.
7. Кручинский А., Воробьев А. Первый и пока единственный «голосовой ассистент» установили в Иркутской городской больнице № 8. *ГТРК «Иркутск»*. 2022. Режим доступа: <https://vestiirk.ru/news/pervyi-i-poka-edinstvennyi-golosovoi-assistent-ustanovili-v-irkutskoi-gorodskoi-bolnitse-no-8/>.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jsyb.ru.

Адрес учредителя и издателя:

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1. Телефон: +7 (495) 718-21-10.

Дата выхода в свет 28.06.2024.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 10,4.

Цена свободная.