ISSN 2712-9942

УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2022
Т. 3 № 3

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

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

Том 3
№ 3

Vol. 3
No. 3

Москва

2022

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 наноэлектроники, 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, председатель Совета, Российский фонд фундаментальных исследований; 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
Сойфер 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
Якобовский 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 Рашит Мирзагалиевич, д. ф.-м. н.
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 автоматики 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
Савченко Владимир Васильевич, PhD (Theoretical Mechanics), Университет Хосэй, Токио, Япония
Земпо 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.
Технический редактор
Моргун Дмитрий Алексеевич, к. ф.-м. н., доцент
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.

© ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН
© Авторы

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), Chairman of the Council, Russian Foundation for Basic Research, 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. Iakobovski*, 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*, Doctor of Science (Phys&Math)
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. *Vladimir V. Savchenko*, PhD (Theoretical Mechanics), Hosei University, Tokyo, Japan
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 Editor
Dmitry A. Morgun, Ph.D. (Phys&Math), Assoc. Prof.
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.

© SRISA
© Authors

СОДЕРЖАНИЕ

В. Б. Бетелин
Наш журнал включен в Перечень ВАК 6

75 лет Губайдуллину Амиру Анваровичу 7
В. А. Галкин, Д. А. Моргун
Моделирование и визуализация траекторий частиц, движущихся под действием несимметричного потенциала 8
Н. Н. Смирнов, В. Ф. Никитин, Е. И. Скрылева, Р. Р. Фахретдинова
Вычислительное моделирование процесса очистки трещины ГРП и процесса вытеснения нефти из области, содержащей трещину ГРП 14
В. Ф. Никитин, Е. И. Скрылева, М. Н. Макеева, А. Н. Манахова
Моделирование неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды с учетом химических взаимодействий между фазами 22
С. А. Максудова, А. В. Гавриленко
Моделирование эффективных траекторий движения беспилотного летательного аппарата для обнаружения утечек на газопроводах 33
Р. А. Чирко, Н. Р. Урманцева
Система анализа результатов неинвазивных исследований пациента для поддержки принятия решений сердечно-сосудистого хирурга-флеболога 42
Г. Е. Деев, С. В. Ермаков
Би-бесконечный вычислительный автомат 52
П. В. Михеев, С. В. Бухаров, А. К. Лебедев, С. В. Тащилов
Моделирование схем пространственного армирования многослойных волокнистых преформ углерод-углеродных композиционных материалов 63
Н. В. Замятин, Г. В. Смирнов, В. И. Маковкин
Нейросетевая калибровка датчиков для технологий микро- и наноэлектроники 74
Б. А. Богатых
Базовые принципы фрактально-голографической природы осцилляций живого вещества как новый взгляд на суть феномена жизни 83
К. А. Хадарцева, О. Е. Филатова
Новое понимание стационарных режимов биологических систем 92
М. И. Зимин, В. Ф. Пятин, М. А. Филатов, Л. С. Шакирова
Что общего между «Fuzziness» L. A. Zadeh И «Complexity» W. Weaver в кибернетике 102

CONTENTS

V. B. Betelin
Congratulations 6

75th Birthday of Prof. Amir A. Gubaidullin 7
V. A. Galkin, D. A. Morgun
Modeling and Visualization of Particle Trajectories Driven by an Asymmetric Potential 8
N. N. Smirnov, V. F. Nikitin, E. I. Skryleva, R. R. Fakhretdinova
Simulation of Fracking Fracture Cleaning as Oil Is Displaced from the Fracking Fracture Region . . . 14
V. F. Nikitin, E. I. Skryleva, M. N. Makeeva, A. N. Manahova
Simulation of Unstable Viscous Fluid Displacement from Porous Medium Considering Inter-Phase Chemical Interactions 22
S. A. Maksudova, A. V. Gavrilenko
Efficient Paths for UAV-Based Gas Pipeline Leak Detection 33
R. A. Chirko, N. R. Urmantseva
Noninvasive Examination Analysis System for Cardiovascular Surgeon / Phlebologist Decision-Making Support 42
G. E. Deev, S. V. Ermakov
Bi-Infinite Calculating Automaton 52
P. V. Mikheyev, S. V. Bukharov, A. K. Lebedev, S. V. Tashchilov
3D Reinforcement Arrangements for Carbon-Carbon Composite Multilayer Fiber Preforms 63
N. V. Zamyatin, G. V. Smirnov, V. I. Makovkin
Neural Network-Based Sensor Calibration for Micro and Nanoelectronics Applications 74
B. A. Bogatykh
Key Principles of Fractal-Holographic Nature of Living Matter Oscillations as New Approach to the Essence of Life 83
K. A. Khadartseva, O. E. Filatova
New Understanding of Steady States in Biological Systems 92
M. I. Zimin, V. F. Pyatin, M. A. Filatov, L. S. Shakirova
What do Zadeh's Fuzziness and Weaver's Complexity Have in Common in Cybernetics? 102

ПОЗДРАВЛЯЕМ!

Уважаемые члены редакционной коллегии журнала «Успехи кибернетики»!

Дорогие авторы и читатели нашего журнала!

Решением Высшей аттестационной комиссии с 27 июня 2022 года наш 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».

ПЕРЕЧЕНЬ

рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**по состоянию на 13.07.2022 года**)

№ п/п	Наименование издания	ISSN	Научные специальности и соответствующие им отрасли науки, по которым присуждаются ученые степени	Дата включения издания в Перечень
2430.	Успехи кибернетики	2712-9942	1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки), 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (технические науки), 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (физико-математические науки), 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки), 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (физико-математические науки)	с 27.06.2022

Ознакомиться с Перечнем можно на странице сайта Высшей аттестационной комиссии.

Сердечно поздравляю вас с этим знаменательным событием!

Главный редактор **академик В. Б. Бетелин**

75 лет Губайдуллину Амиру Анваровичу

4 августа 2022 года исполнилось 75 лет доктору физико-математических наук, руководителю научного направления Тюменского филиала ИТПМ СО РАН, профессору, члену редакционной коллегии журнала «Успехи кибернетики» Амиру Анваровичу Губайдуллину.

На заседании Совета по науке и технике при Президенте РФ 23 июня 2014 года подчеркивалось, что сегодня лидерами глобального развития становятся те страны, которые способны создавать прорывные технологии и на их основе формировать собственную мощную производственную базу, а качество инженерных кадров становится одним из ключевых факторов конкурентоспособности государства.

Хотим отметить огромный вклад юбиляра в решение таких фундаментальных проблем, как математическое моделирование динамики многофазных сред, волновая динамика паро- и газожидкостных систем, распространение линейных и нелинейных волн в гетерогенных средах. Работы пионерного характера в области волновой динамики пузырьковых жидкостей по описанию эволюции ударных волн и установлению определяющей роли межфазного теплообмена в этом процессе, исследованию явления усиления ударных волн определили развитие перспективного направления в механике многофазных сред, связанного с исследованием нестационарных ударно-волновых процессов.

Разработанные Амиром Анваровичем модели и вычислительные методики активно используются коллегами и последователями.

Активная работа в диссертационных советах, членство в редколлегиях журналов — например, в «Успехах кибернетики»; другая организационная, научная и образовательная деятельность — все это достойно всяческого уважения и признания!

Развитие образования, науки и инноваций — залог успешного решения задач, поставленных Президентом в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Редакционная коллегия желает Амиру Анваровичу доброго здоровья, удачи во всех начинаниях и больших творческих успехов!

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЧАСТИЦ, ДВИЖУЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСИММЕТРИЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА

В. А. Галкин[а], Д. А. Моргун[б]
Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация
[а] ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9721-4026, val-gal@yandex.ru
[б] ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0692-1583, morgun_da@office.niisi.tech

Аннотация: в работе моделируется движение частицы в поле с несимметричным потенциалом. Рассматриваются вопросы визуализации потенциала, способов наглядного отображения траектории частицы. Приводятся результаты визуализации, полученные с помощью библиотеки MathGL. Затрагиваемая тематика актуальна при математическом моделировании задач гидродинамики, фильтрации, задач о взаимодействии заряженных частиц с веществом.

Ключевые слова: визуализация траекторий частиц, гидродинамика, несимметричный потенциал.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-07-00236.

Для цитирования: Галкин В. А., Моргун Д. А. Моделирование и визуализация траекторий частиц, движущихся под действием несимметричного потенциала. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):8–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-1.

MODELING AND VISUALIZATION OF PARTICLE TRAJECTORIES DRIVEN BY AN ASYMMETRIC POTENTIAL

V. A. Galkin[a], D. A. Morgun[b]
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/0000-0002-9721-4026, val-gal@yandex.ru
[b] ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0692-1583, morgun_da@office.niisi.tech

Abstract: the study simulates the motion of a particle in an asymmetric potential field. We considered the potential visualization and approaches to the particle trajectory rendering. The visualizations with the MathGL library are presented. This study is relevant for the simulation problems in hydrodynamics, filtration, of and charged particles to matter interaction.

Keywords: visualization of particle trajectories, hydrodynamics, asymmetric potential.

Acknowledgements: this study is supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 20-07-00236.

Cite this article: Galkin V. A., Morgun D. A. Modeling and Visualization of Particle Trajectories Driven by an Asymmetric Potential. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):8–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-1.

Моделирование траекторий частиц, движущихся в поле сил с непрерывным потенциалом, широко применяется при решении задач взаимодействия пучков заряженных частиц с веществом. Известно, что при облучении кристаллов (кремний, германий, алмаз и др.) пучками быстрых заряженных частиц могут наблюдаться ориентационные эффекты: эффект каналирования, эффект теней [1]. Ориентационные эффекты известны и изучаются давно, см., например, обзор 1998 года [2] или работу 2003 года [3]. Интерес к ориентационным эффектам вызван различными возможностями их практического применения. Например, эффект каналирования применяется для отклонения пучков заряженных частиц изогнутыми кристаллами или для определения расположения примесных атомов в кристаллической решетке. Этот интерес не угасает и в настоящее время. Так, в работе 2008 года [4] экспериментально изучается отклонение пучка протонов изогнутым кристаллом кремния, а в работе 2012

года [5] приводятся результаты математического моделирования того же эксперимента. Для ряда практических задач эффект каналирования может играть отрицательную роль. Например, может вносить существенную погрешность в работу детекторов заряженных частиц, которые используются в установках, описанных в [6–9].

При каналировании налетающая на кристалл частица влетает в кристаллическую решетку под небольшим углом к кристаллографическим плоскостям[1] или осям[2], и в результате взаимодействия потенциала частицы с усреденным потенциалом атомной плоскости (оси) движение частицы ориентируется вдоль направления плоскостного (осевого) канала, и частица проходит в кристалле-мишени значительно большее расстояние, чем при других углах влета.

Следует упомянуть также возможное приложение исследуемых ориентационных эффектов к задачам электродинамики. При движении электронов по кристаллической решетке в присутствии ускоряющего электрического поля происходит постоянное рассеяние электронов на неоднородностях решетки, приводящее к потере ими импульса. Превращение энергии движения электронов в энергию колебания решетки приводит к ее нагреву и формирует электрическое сопротивление. Известно (с 1968 года), что в бездефектных кристаллах при низких температурах на первый план выходят электрон-электронные столкновения, в результате которых импульс не передается решетке, а поток электронов движется по гидродинамическим законам [10]. В перспективе это может стать одним из механизмов достижения сверхпроводимости. Исследования в данном направлении актуальны и публикуются до сих пор [11].

Рассмотрим несимметричный потенциал следующего вида:

$$\Phi(x_1, x_2, x_3) = -\frac{3}{2} + (\sin x_1 \cos x_2 + \sin x_2 \cos x_3 + \sin x_3 \cos x_1)\,. \tag{1}$$

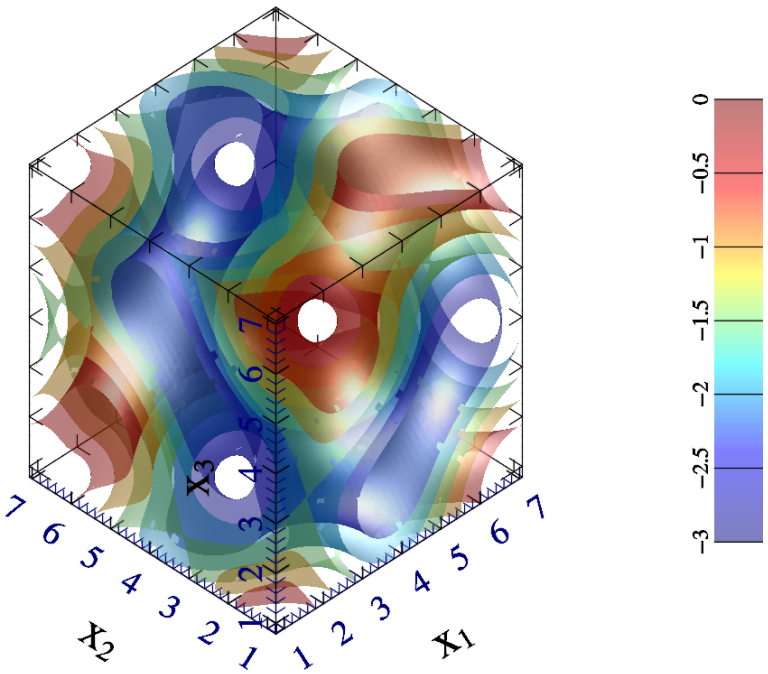


Рис. 1. *Визуализация эквипотенциалей для* $\Phi(x_1, x_2, x_3)$

Обозначим $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$, $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$,

$$v_1 = \sin x_2 - \cos x_3, \quad v_2 = \sin x_3 - \cos x_1, \quad v_3 = \sin x_1 - \cos x_2. \tag{2}$$

Поле скоростей (2) удовлетворяет стационарному уравнению Эйлера $(\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}) = -\nabla \Phi$ и уравнению неразрывности для несжимаемой жидкости $\nabla \cdot \vec{v} = 0$.

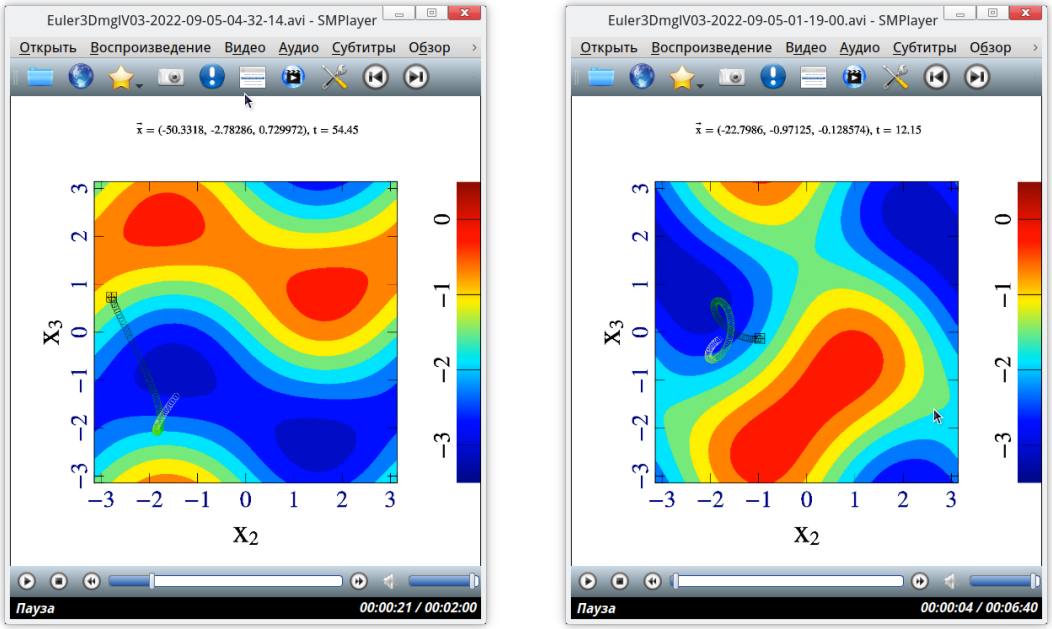
[1] Плоскостное каналирование.
[2] Осевое каналирование.

Будем численно решать задачу Коши:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v}, \tag{3}$$

используя метод Эйлера и задавая различные начальные условия $\vec{x}_0$.

Как видно из выражения (1) и рис. 1, потенциал меняется периодически по каждому из направлений координат x_1, x_2, x_3, с периодом 2π. Изображение эквипотенциалей на рис. 1 позволяет составить представление о структуре потенциала. Отметим, что потенциал (1) периодически меняется в любом направлении, за исключением отдельных прямых, вдоль которых значения потенциала постоянны, причем потенциал вдоль этих прямых принимает свои максимальные или минимальные значения. На рис. 1 можно видеть четыре «дыры» между поверхностями эквипотенциалей. Соответственно, прямые с максимальным значением потенциала окружены эквипотенциалями красного цвета, а с минимальным — синего.



$\vec{x}_0 = (\pi/2, \pi/6, 0)$ $\vec{x}_0 = (0, -3/2, 0)$

Рис. 2. *Скриншоты из видеороликов визуализации фрагмента траектории на фоне контуров потенциала* Φ *на срезе по координате, по которой происходит углубление траектории частицы (здесь — по* x_1*), для двух разных траекторий*

На рисунках 2–7 приведена визуализация результатов расчетов. Визуализация построена средствами библиотеки MathGL [12].

Как видно из рисунков, траектория частицы выглядит как некая геометрическая фигура, которая плавно вращается и одновременно удаляется от начальной точки $\vec{x}_0$ (или «углубляется» в расчетную область). При разных начальных значениях характер таких фигур разный: от остроугольных треугольников до округлых лепестков.

Хорошо показал себя следующий метод визуального анализа. Изображаются контуры потенциала в сечении, соответствующем текущей координате траектории по тому направлению, по которому происходит углубление траектории в расчетную область. На этом графике контуров изображается текущая точка траектории, а также «хвост» из нескольких предыдущих точек траектории. Из последовательности построенных таким образом изображений формируется видеоролик, который позволяет отследить траекторию на фоне потенциала в динамике, см. рис. 2.

Траектории, изображенные на рисунках 3 и 4 для $\vec{x}_0 = (\pi/6, \pi/6, 0)$ и $\vec{x}_0 = (\pi/2, \pi/6, 0)$ соответственно, имеют качественно схожий характер и отличаются тем, что углубление траектории в расчетную область происходит в первом случае в сторону отрицательных значений координаты x_2, а

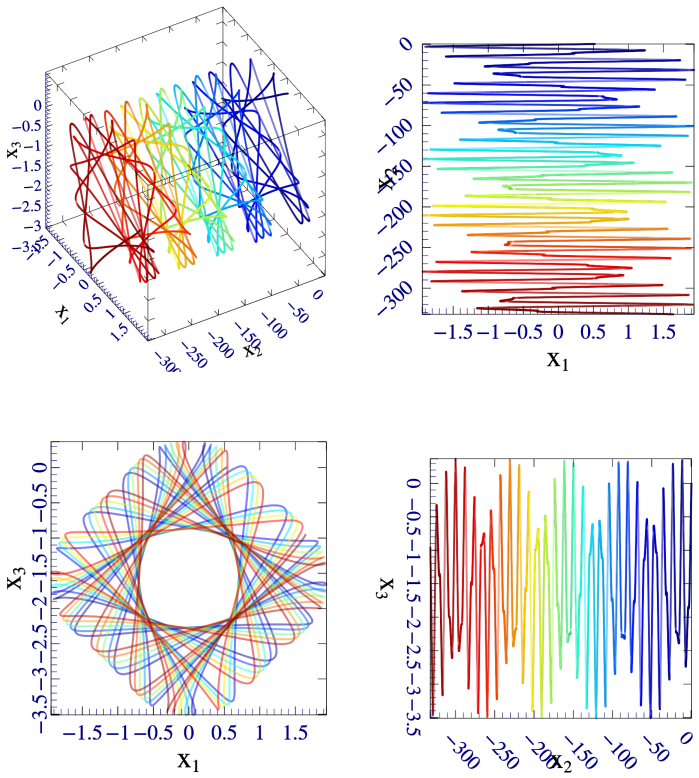


Рис. 3. *Решение задачи* (3) *для начальных условий* $\vec{x}_0 = (\pi/6, \pi/6, 0)$. $T_{max} = 300$, $dt = 10^{-5}$. *Цвет траектории меняется от темно-синего при* $t = 0$ *до темно-красного при* $t = T_{max}$

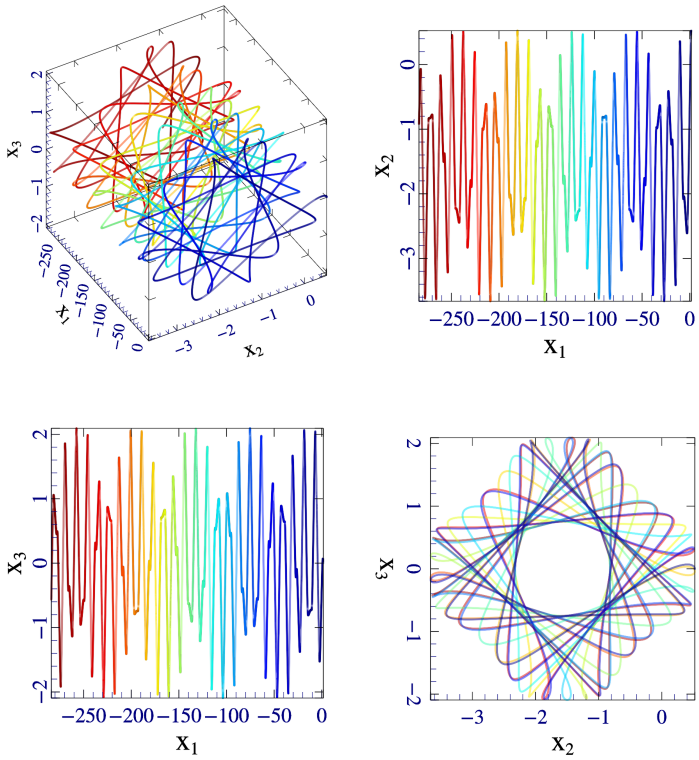


Рис. 4. *Решение задачи* (3) *для начальных условий* $\vec{x}_0 = (\pi/2, \pi/6, 0)$. $T_{max} = 300$, $dt = 10^{-5}$. *Цвет траектории меняется от темно-синего при* $t = 0$ *до темно-красного при* $t = T_{max}$

во втором случае — в отрицательные значения координаты x_1. Проекция траектории на плоскость, перпендикулярную к направлению углубления, в обоих случаях напоминает прецессирующий треугольник со слегка закругленными углами. Колебания координат в такой плоскости — поперечные колебания — не выходят за пределы некоторой области, размеры которой не превышают периодов потенциала (1). Кроме того, такие траектории не попадают в центральную область и, можно сказать, своим движением описывают своего рода «стенки трубы».

Для начальных условий $\vec{x}_0 = (0, -3/2, 0)$ характер поперечных колебаний меняется: они приобретают форму прецессирующих округлых лепестков. Поперечные колебания в этом случае имеют меньший размах, а траектория своим движением теперь описывает не «трубу», а скорее заполненный цилиндр, рис. 5.

Если траектория попадает в окрестность прямой, вдоль которой потенциал принимает максимальное или минимальное значение («дыры» на рис. 1), то характер траектории существенно отличается от рассмотренных выше случаев. Здесь не получается выделить «направление углубления» траектории и «поперечные колебания», здесь траектория может существенно выходить за границы периодов (1) по любому из направлений, см. рис. 6.

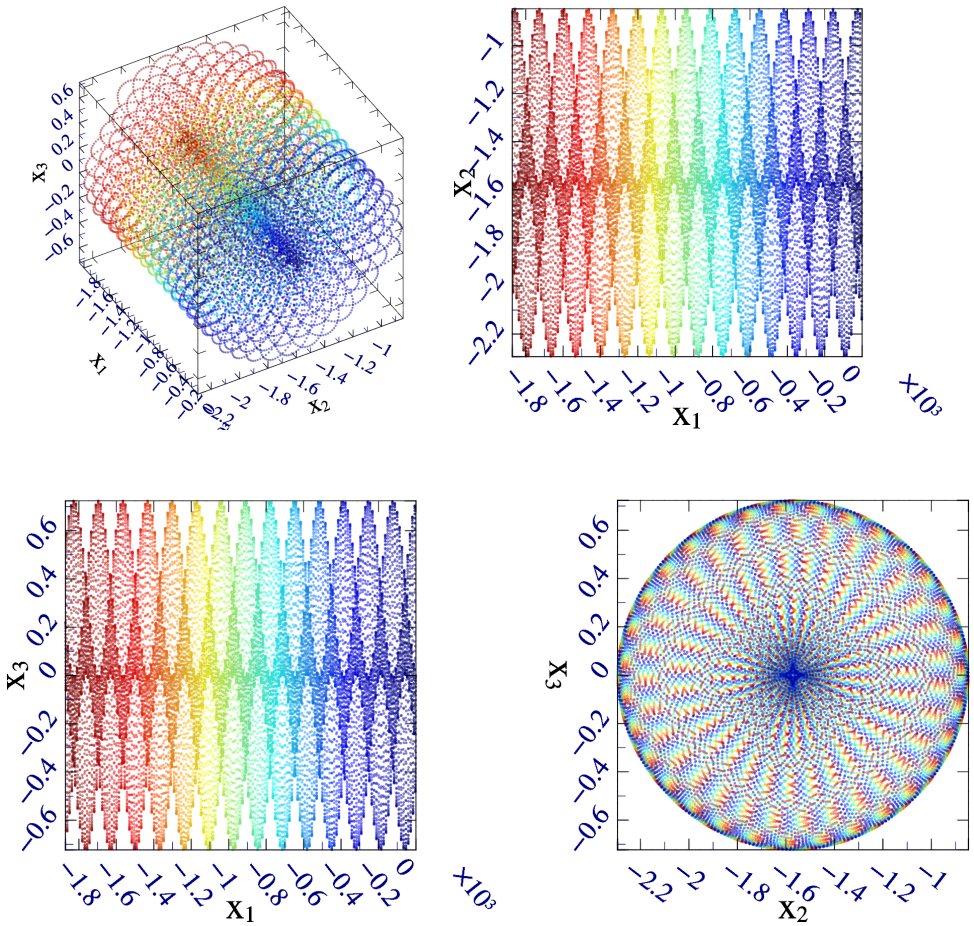


Рис. 5. *Решение задачи* (3) *для начальных условий* $\vec{x}_0 = (0, -3/2, 0)$. $T_{max} = 1000$, $dt = 10^{-5}$. *Цвет траектории меняется от темно-синего при* $t = 0$ *до темно-красного при* $t = T_{max}$

Заключение

Как показывают представленные в работе результаты моделирования, применение данного несимметричного потенциала позволяет получать эффекты, сходные с известными ориентационными эффектами взаимодействия пучков заряженных частиц с кристаллами. Возможность применения данного потенциала для моделирования как динамики частиц, так и гидродинамики делает рассматриваемую тему весьма интересной и актуальной. Структура потенциала, сложная для визуального анализа, требует дальнейших исследований в области визуализации решений для задач такого рода.

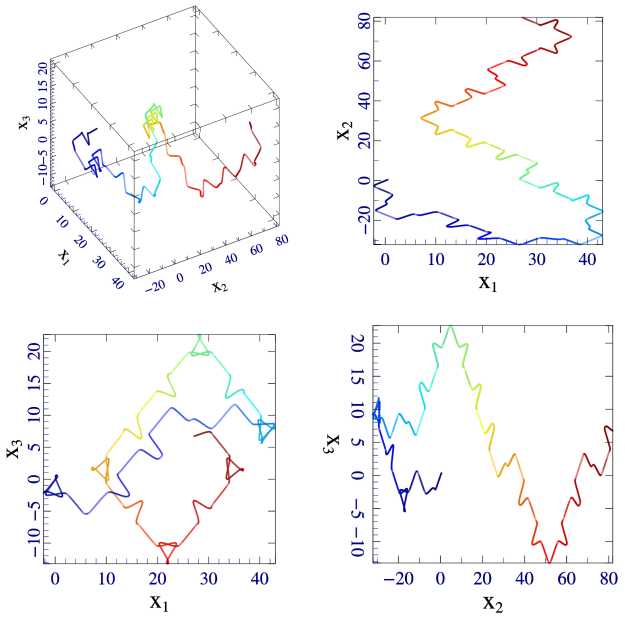


Рис. 6. *Решение задачи* (3) *для начальных условий* $\vec{x}_0 = (\pi/6, \pi/6, \pi/8)$. $T_{max} = 300$, $dt = 10^{-5}$. *Цвет траектории меняется от темно-синего при* $t = 0$ *до темно-красного при* $t = T_{max}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Кощеев В. П., Моргун Д. А., Панина Т. А., Штанов Ю. Н. *Компьютерное моделирование стохастической динамики эффекта каналирования*. Сургут: ООО «Печатный мир», 2017. 170 с. ISBN 978-5-6040248-5-0.
2. Таратин А. М. Каналирование частиц в изогнутом кристалле. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 1998;29(5):1062–1118. Режим доступа: http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/1998-v29/v-29-5/1.htm.
3. Кадменский А. Г., Самарин В. В., Тулинов А. Ф. Регулярное и стохастическое движение в кристалле при каналировании. Эволюция потока частиц в толстом кристалле. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2003;34(4):822–868. Режим доступа: http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/v-34-4/1.htm.
4. Scandale W., Vomiero A., Baricordi S. et al. High-Efficiency Deflection of High-Energy Protons through Axial Channeling in a Bent Crystal. *Phys. Rev. Lett*. 2008;101(16):164801. Режим доступа: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.101.164801.
5. Кощеев В. П., Моргун Д. А., Панина Т. А., Штанов Ю. Н. Влияние квантовых флуктуаций на движение релятивистских протонов в кристаллах. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2012;12:57–59.
6. Galkin V. A. et al. Emulsion Sheet Doublets as Interface Trackers for the OPERA Experiment. *Journal of Instrumentation*. 2008;3(7):P07005–P07005. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/07/p07005.
7. Galkin V. A. et al. The OPERA Experiment in the CERN to Gran Sasso Neutrino Beam. *Journal of Instrumentation*. 2009;4(4):P04018–P04018. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-0221/4/04/p04018.
8. *Introduction to Charged-Particle Detectors*. Режим доступа: https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/other/introduction-charged-particle-detectors.pdf?la=en.
9. *Charged Particle Detection*. Режим доступа: https://www.mirion.com/learning-center/nuclear-measurement-fundamental-principles/nuclear-measurement-fundamental-principle-charged-particle-detection.
10. Гуржи Р. Н. Гидродинамические эффекты в твердых телах при низких температурах. *Успехи физических наук*. 1968;94(4):689–718. Режим доступа: https://ufn.ru/ru/articles/1968/4/d/.
11. Aharon-Steinberg A., Völkl T., Kaplan A. et al. Direct Observation of Vortices in an Electron Fluid. *Nature*. 2022;607:74–80. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-022-04794-y.
12. *MathGL*. Режим доступа: http://mathgl.sourceforge.net/doc_ru/index.html.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-2

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ТРЕЩИНЫ ГРП И ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ ОБЛАСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ТРЕЩИНУ ГРП

Н. Н. Смирнов[1], **В. Ф. Никитин**[1,2], **Е. И. Скрылева**[1,2,а], **Р. Р. Фахретдинова**[1,б]

[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

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

[а] *jennyne@yandex.ru*, [б] *reginafakhretdinova@gmail.com*

Аннотация: в работе рассматривается процесс вытеснения нефти водой из пористого пласта. При этом около добывающей скважины содержится трещина гидроразрыва пласта. Известно, что, когда вязкая жидкость вытесняется менее вязкой, на фронте вытеснения развивается неустойчивость Саффмана–Тейлора: вытесняющая жидкость стремится прорваться сквозь слой вытесняемой, образуя в ней каналы — «вязкие пальцы». После прорыва такого канала к добывающей скважине или трещине гидроразрыва качество добываемой нефти (т.е. процентное содержание углеводорода в выкачиваемой жидкости) резко падает. В работе описаны особенности математического и численного моделирования процесса неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды. Вытеснение моделируется на основе закона Дарси с учётом капиллярных эффектов. Для построения относительных фазовых проницаемостей используется модель Брукса–Кори. Трещина гидроразрыва моделируется как область повышенной пористости и проницаемости. Рассматривается задача очистки трещины гидроразрыва пласта от жидкости гидроразыва: вокруг трещины моделируется область резервуара, заполненная жидкостью гидроразрыва, которая затем вытесняется нефтью, имеющей меньшую вязкость. Таким образом, процесс неустойчив и вытеснение происходит неравномерно, часть жидкости гидроразрыва может остаться внутри пласта.

Ключевые слова: фильтрация, трещина гидроразрыва пласта, многофазные течения, неустойчивость вытеснения.

Благодарности: работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на выполнение государственного задания по теме № 0580-2021-0021 «Разработка алгоритмической компоновки и программ для расчета многомасштабных процессов горения».

Для цитирования: Смирнов Н. Н., Никитин В. Ф., Скрылева Е. И., Фахретдинова Р. Р. Вычислительное моделирование процесса очистки трещины ГРП и процесса вытеснения нефти из области, содержащей трещину ГРП. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):14–21. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-2.

SIMULATION OF FRACKING FRACTURE CLEANING AS OIL IS DISPLACED FROM THE FRACKING FRACTURE REGION

N. N. Smirnov[1], **V. F. Nikitin**[1,2], **E. I. Skryleva**[1,2,a], **R. R. Fakhretdinova**[1,b]

[1] *Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[2] *Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation*

[a] *jennyne@yandex.ru*, [b]*reginafakhretdinova@gmail.com*

Abstract: this paper studies oil displacement from a porous reservoir with water. It is assumed there is a fracking fracture near the production well. It is known that as a viscous fluid is displaced by a less viscous fluid, the Saffman–Taylor instability occurs: the less viscous fluid breaks through the layer of the fluid being displaced, forming so-called "viscous fingers" (channels). After such a channel is ruptured and connected to a production well, the oil quality (i.e., the fraction of hydrocarbons in the production fluid) deteriorates dramatically. The paper describes the simulation and numerical modeling of viscous fluid unstable displacement from a porous medium. The displacement is modeled with Darcy's law also considering capillary effects. The Brooks–Corey model is used to estimate the relative phase permeabilities.

A fracking fracture is modeled as an area with elevated porosity and permeability. We consider the fracking fracture cleaning from the fracking fluid: a reservoir area filled with fracking fluid around the fracture is modeled; then the fluid is displaced with lower viscosity oil. The process is unstable and the displacement is uneven, so some of the fracturing fluid may remain inside the reservoir.

Keywords: filtration, fracturing fracture, multiphase flows, displacement instability.

Acknowledgements: this study is financially supported through a government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, project No. 0580-2021-0021 Development of Algorithms and Software for the Simulation of Multiscale Combustion Processes.

Cite this article: Smirnov N. N., Nikitin V. F., Skryleva E. I., Fakhretdinova R. R. Simulation of Fracking Fracture Cleaning as Oil Is Displaced from the Fracking Fracture Region. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):14–21. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-2.

Введение

Одним из наиболее действенных методов интенсификации работы нефтяных и газовых месторождений в условиях низкой проницаемости и пористости является метод гидроразрыва пласта (ГРП). Идея заключается в формировании у скважины высокопроводимой трещины, которая в случае успешного проведения позволяет перераспределить фильтрационные потоки. Метод предполагает несколько этапов. На первом этапе происходит закачка жидкости ГРП в скважину со скоростью, превосходящей утечку жидкости ГРП в породу. За счет этого увеличивается давление внутри скважины и, если в некоторой области в скважине давление со стороны жидкости превзойдет внутрипластовое давление, произойдет разрыв породы с образованием зародышевой трещины. На следующем этапе жидкость гидроразрыва начнет утекать в образовавшуюся трещину, при этом в случае поддержания достаточного давления закачки трещина начнет продвигаться. Направление распространения трещины зависит от угла перфорирования и соотношения между минимальным и максимальным главными напряжениями в породе. Чтобы трещина не закрылась, в жидкость гидроразрыва спустя некоторое время начинают добавлять пропант. После прекращения закачки и утечки жидкости в породу пропант не даст трещине закрыться. В наиболее оптимальном случае в конце проведения ГРП имеем трещину нужной длины с запланированной концентрацией наполнителя.

Последним, однако не менее значительным этапом всей процедуры ГРП в случае его проведения на добывающей скважине является процесс очистки трещины от жидкости гидроразрыва: жидкость гидроразрыва начинает постепенно вытесняться добываемой жидкостью. Известно, что вытеснение более вязкой жидкости менее вязкой из пористой среды является неустойчивым процессом [1–3, 6, 7]. Возникающая неустойчивость приводит к нарушению формы поверхности раздела фаз и переходу от фронтального вытеснения к прорыву отдельных языков вытесняющей жидкости и захвату вытесняемой внутри пористой среды. Это приводит к не вполне качественной очистке трещины гидроразрыва, в результате которой в качестве коллектора для нефти работает не вся скважина, а только незначительная ее часть. Так как жидкость гидроразрыва изначально делается более вязкой, чем нефть, чтобы избежать утечек в пласт, вытеснение её нефтью носит неустойчивый характер с возможностью создания застойных зон невытесненной жидкости гидроразрыва, блокирующих поступление нефти в трещину и дальнейший переток в добывающую скважину. Учитывая, что производство трещины — дорогостоящая операция, необходимо заранее при ее проектировании иметь надежный прогноз ее полной очистки и введения в эксплуатацию. Итак, целью данной работы является исследование влияния параметров трещины гидроразрыва и жидкости гидроразрыва на процесс очистки.

Математическая модель

Предположения:

- все жидкости несжимаемые;
- вязкость вытесняемой жидкости больше вязкости вытесняющей жидкости;
- капиллярные эффекты не учитываются;
- проницаемость и пористость зависят от местоположения;
- тепловые и гравитационные эффекты не учитываются;
- внешняя граница непроницаема;
- фильтрация моделируется законом Дарси, с учетом относительных проницаемостей фаз;
- трещина гидроразрыва моделируется областью повышенной проницаемости и пористости;

- проницаемость во всей области имеет небольшую случайную «рябь», провоцирующую возникновение неустойчивости вытеснения.

Решается следующая система уравнений. Для каждой жидкой фазы уравнение баланса массы:

$$\frac{\partial \varphi s_k \varrho_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\varrho_k u_{k,j}\right) = 0. \tag{1}$$

Здесь φ — пористость, ϱ_k — истинная плотность фазы, s_k — насыщенность фазы, $u_{k,j}$ — j-я компонента скорости фильтрации k-й фазы.

Закон Дарси [1–3] для каждой фазы:

$$u_{k,j} = -\frac{K K_k^R}{\mu_k}\frac{\partial p_k}{\partial x_j}, \tag{2}$$

где μ_k — динамическая вязкость фазы, K — абсолютная проницаемость, K_k^R — относительная проницаемость фазы, p_k — давление в порах. Суммирование уравнений (2) приводит к

$$u_j = -K\sum_k m_k \frac{\partial p}{\partial x_j}.$$

Относительные проницаемости K_k^R рассчитываются при помощи модели Брукса–Кори [4, 5]:

$$K_k^R = \begin{cases} k_k^0 S_k^{n_k^0}, & s_k \geq s_k^{res} \\ 0, & s_k < s_k^{res} \end{cases}, \qquad S_k = \frac{s_k - s_k^{res}}{1 - s_1^{res} - s_2^{res}}.$$

Здесь $k_k^0 > 0$ и $n_k^0 > 0$ — параметры модели Брукса–Кори, а приведенная насыщенность фазы S_k ограничивает совместное течение фаз диапазоном, определенным остаточными насыщенностями фаз s_k^{res}.

Трещина гидроразрыва моделируется как пористая среда большей проницаемости K_f и пористости φ_f [8]. Абсолютная проницаемость:

$$K(x,y) = \begin{cases} K_f, (x,y) \in F \\ K_0, (x,y) \notin F \end{cases}.$$

Пористость:

$$\varphi(x,y) = \begin{cases} \varphi_f, (x,y) \in F \\ \varphi_0, (x,y) \notin F \end{cases}.$$

F — множество точек, принадлежащих трещине.

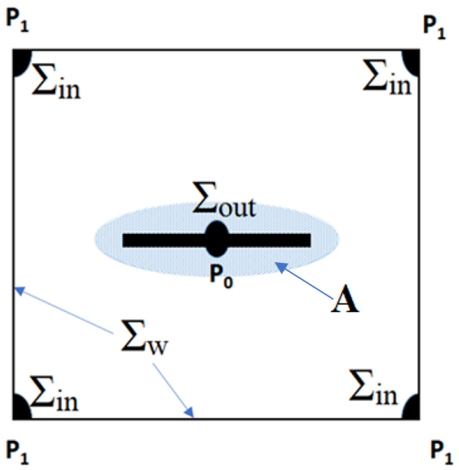


Рис. 1. *Расчетная область при моделировании очистки трещины ГРП*

В начальный момент времени резервуар насыщен поровой жидкостью (нефтью). По углам расчетной области расположены 4 нагнетательные скважины под постоянным давлением (рис. 1). В

центре области находится добывающая скважина и трещина гидроразрыва, заполненная пропантом и жидкостью гидроразрыва. Предполагается, что часть жидкости гидроразрыва просочилась в окружающий коллектор, а область, пропитанная данной жидкостью, моделируется эллипсом (область A). Под действием перепада давления жидкость в порах движется в область меньшего давления — к добывающей скважине и наружу. Вязкость жидкости ГРП больше вязкости нефти. В таком случае процесс неустойчив. Внешняя граница непроницаема.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \Sigma_{in}: &\quad s = 0,\ P = P_{in} \\ \Sigma_{out}: &\quad P = P_{out} < P_{in} \\ \Sigma_{w}: &\quad u_n = 0 \to \left.\frac{\partial p}{\partial n}\right|_{\Gamma} = 0. \end{aligned}$$

Начальные условия:

$$\begin{cases} s = 1, & (x,y) \in A \\ s = 0, & (x,y) \notin A \end{cases}.$$

Результаты численного моделирования

Исследование влияния формы заводненной области на динамику вытеснения

В ходе первого численного эксперимента необходимо было выяснить, влияет ли форма заводненной области на динамику вытеснения. Наиболее физичной является эллиптическая форма заводненной области. Однако разбиение всей расчетной области на прямоугольные ячейки и приближение эллиптической области этими ячейками само может провоцировать неустойчивость. Были проведены два расчета для разных форм заводненной области с одинаковой площадью. В ходе первого численного эксперимента был взят эллипс, в ходе второго — прямоугольник, для которого граничные условия выполнены точно.

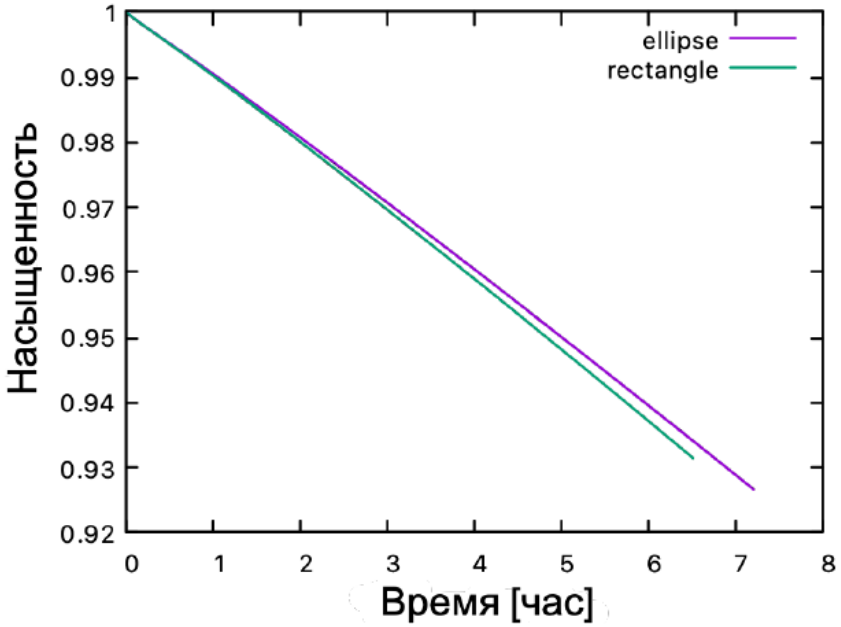


Рис. 2. *Зависимость насыщенности жидкостью ГРП в эллиптической и прямоугольной областях от времени*

Через шесть часов с начала вытеснения разница между двумя графиками (рис. 2) составила менее 0,2 %. Следовательно, на самом начальном этапе процесса очистки характер вытеснения не зависит от формы заводненной области.

Для эллиптической области наблюдается образование неустойчивости вытеснения, вызванной граничными условиями (рис. 3). В случае прямоугольной области граничные условия выполнены точно, поэтому такой неустойчивости не возникает.

Таблица

Параметры расчетов

Число ячеек в каждом из направлений	$N_x = 3000, N_y = 3000$
Размеры рабочей области:	$L_x = 100$ м, $L_y = 100$ м
Координаты нагнетающих скважин	$X_{in} = 0.05$ м, $Y_{in} = 0.05$ м; $X_{in} = 0.05$ м, $Y_{in} = 99.95$ м; $X_{in} = 99.95$ м, $Y_{in} = 99.95$ м; $X_{in} = 99.95$ м, $Y_{in} = 0.05$ м;
Координаты добывающей скважины	$X_{out} = 50$ м, $Y_{out} = 50$ м
Абсолютная проницаемость пласта	$K_0 = 0.5$ Дарси
Пористость пласта	$\varphi_0 = 0.2$
Вязкость нефтяной фазы	$\mu_1 = 0.01$ Па*с
Вязкость фазы жидкости гидроразрыва	$\mu_2 = 0.1$ Па*с
Коэффициенты относительных проницаемостей фаз	$k_1^r = 0.2, k_2^r = 0.2$
Степени в формулах для относительных проницаемостей	$n_1^0 = 2, n_2^0 = 2$
Давление на нагнетающих скважинах на уровне пласта	$P_{in} = 500$ атм
Давление на добывающей скважине на уровне пласта	$P_{out} = 5$ атм
Общая длина трещины (разреза), которая располагается по обе стороны от добывающей скважины	$L_f = 40$ м
Ширина заводненной области W_L	$W_L = 4$ м
Абсолютная проницаемость ячеек, приходящихся на трещину	$K_f = 50$ Дарси
Пористость ячеек, приходящихся на трещину	$\varphi_0 = 0.4$

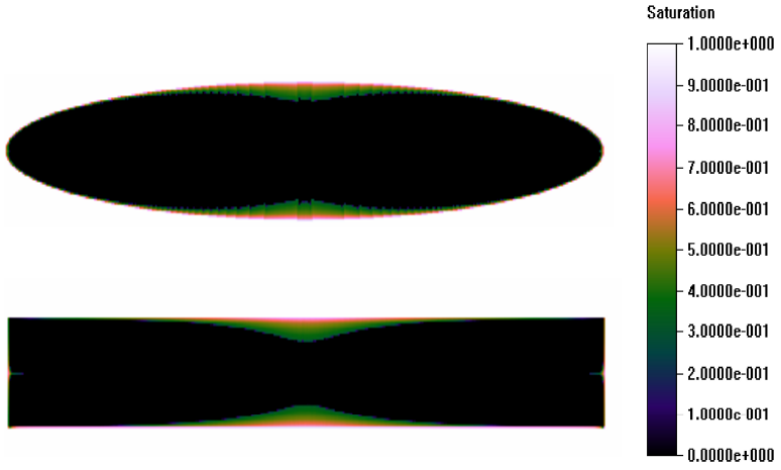


Рис. 3. *Насыщенность нефтью через 5 часов после начала вытеснения*

Исследование влияния ширины W_L заводненной области на динамику вытеснения

Для следующего исследования ширины заводненной области была выбрана форма в виде прямоугольника и две ширины: два и четыре метра.

Для области шириной 2 м в начале вытеснения насыщенность падает очень быстро (рис. 4), после прорыва (который происходит уже через час) падение насыщенности замедляется. Всего лишь за три дня, если принять во внимание длину изучаемой области (40 м), насыщенность жидкостью гидроразрыва падает на 50 % (для области шириной 2 м) и на 35 % (для области шириной 4 м). Через 14 дней разница между графиками составила 10 %. Если считать, что очистка завершена, когда насыщенность достигла 35 %, то более широкая область очищается в два раза медленнее.

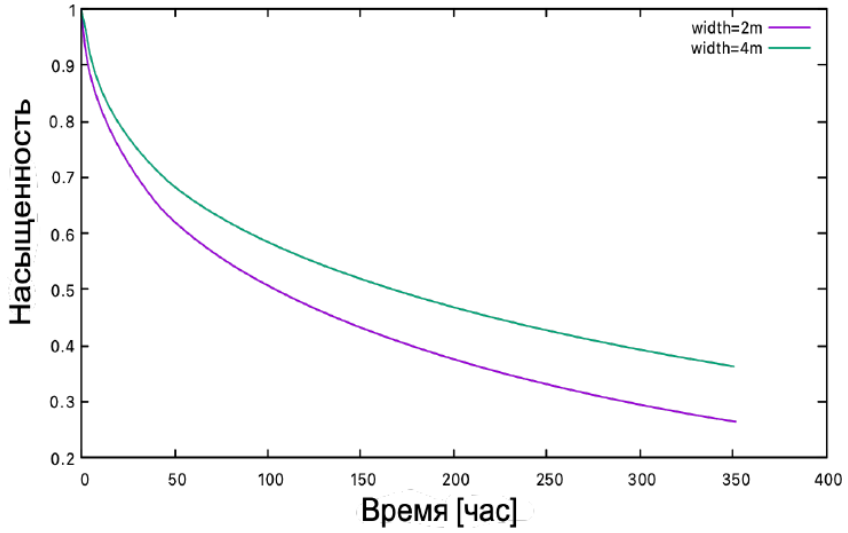


Рис. 4. *Зависимость насыщенности жидкостью ГРП в прямоугольной области от времени*

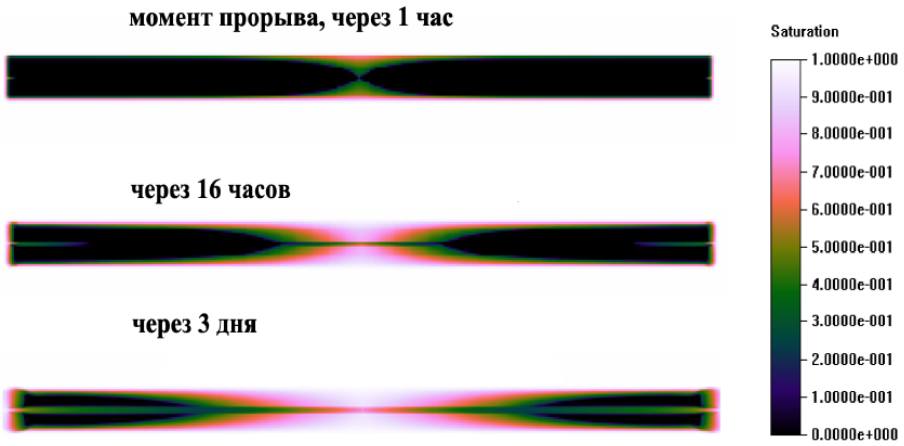


Рис. 5. *Изменение насыщенности нефтью (ширина обводненной зоны $W_L = 2$ м)*

С помощью данных изображений (рис. 5) можно определить области, в которых падение насыщенности происходит наиболее эффективно. Во-первых, это область у скважины, что очевидно, потому что заводненный регион очень узкий по сравнению с длиной трещины. Во-вторых, сама трещина подключается к фильтрации достаточно быстро и уже в пределах трех дней становится полноценным каналом для фильтрации нефти.

Для области шириной 4 м видно (рис. 6), что характер вытеснения остался тот же, как и в предыдущем случае: трещина подключается к фильтрации, но немного менее активно, чем в предыдущем случае.

Исследование влияния длины трещины L_f на динамику вытеснения

Все дальнейшие результаты выполнены для эллиптической области. Первым было проведено исследование влияния длины трещины на очистку. Были взяты три длины: 10 м, 50 м и 100 м.

Для наименьшей области очистка происходит значительно быстрее (рис. 7). Если считать, что процесс очистки завершен при насыщенности, равной 0.3, то более длинная трещина очищается примерно в девятнадцать раз медленнее, чем наименьшая.

Для трещины длиной 10 м прорыв произошел через область повышенной пористости и проницаемости, а не через область вокруг скважины (рис. 8). Также дальнейшая очистка будет происходить более равномерно.

Для самой длинной трещины (рис. 9) прорыв произошел через 6 часов 27 минут через область вокруг скважины. Через 14 дней разрез так и не подключается полностью к фильтрации. Остаются области, в которых вытеснение идет медленно.

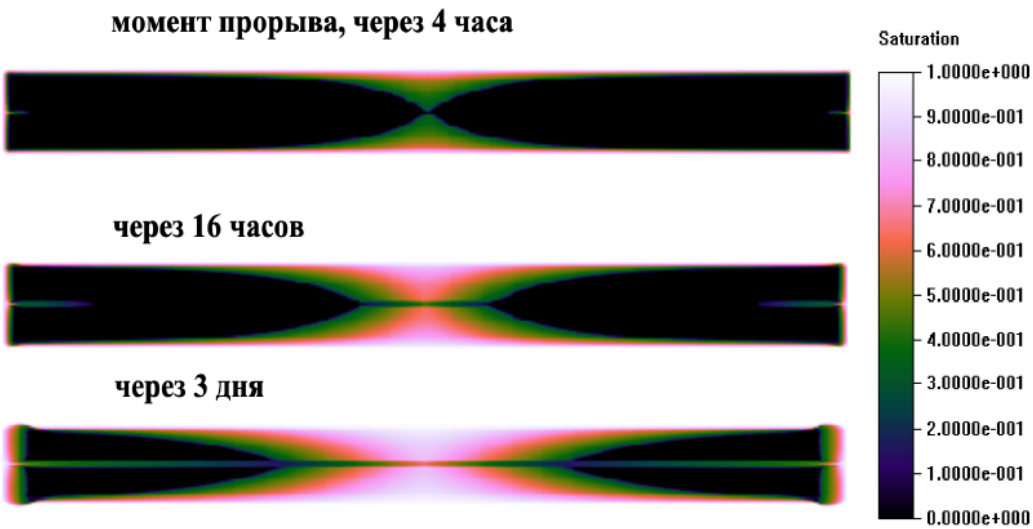


Рис. 6. *Изменение насыщенности нефтью (ширина обводненной зоны $W_L = 4$ м)*

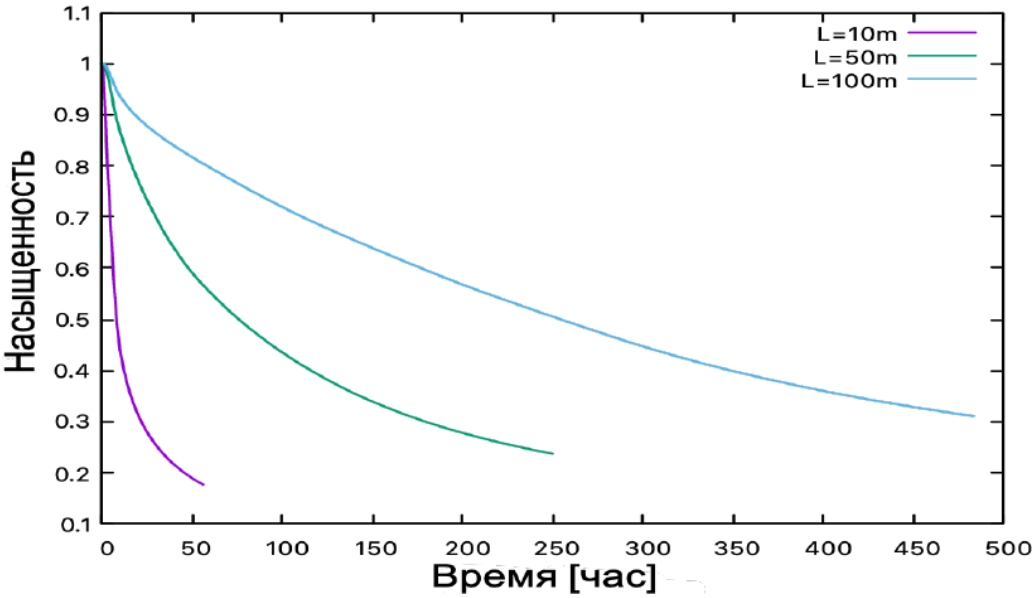


Рис. 7. *Зависимость насыщенности жидкостью ГРП в эллиптической области от времени*

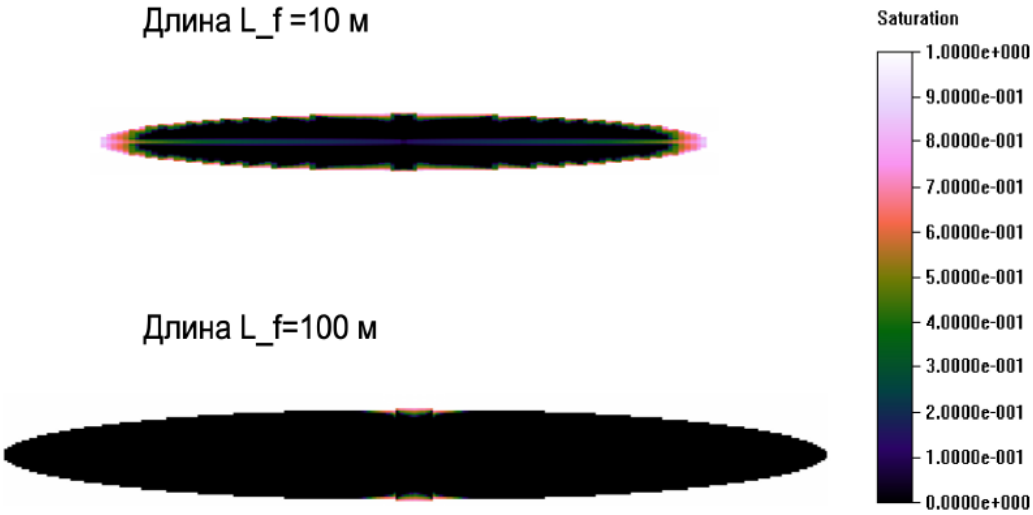


Рис. 8. *Насыщенность жидкостью гидроразрыва через 2 часа 40 минут*

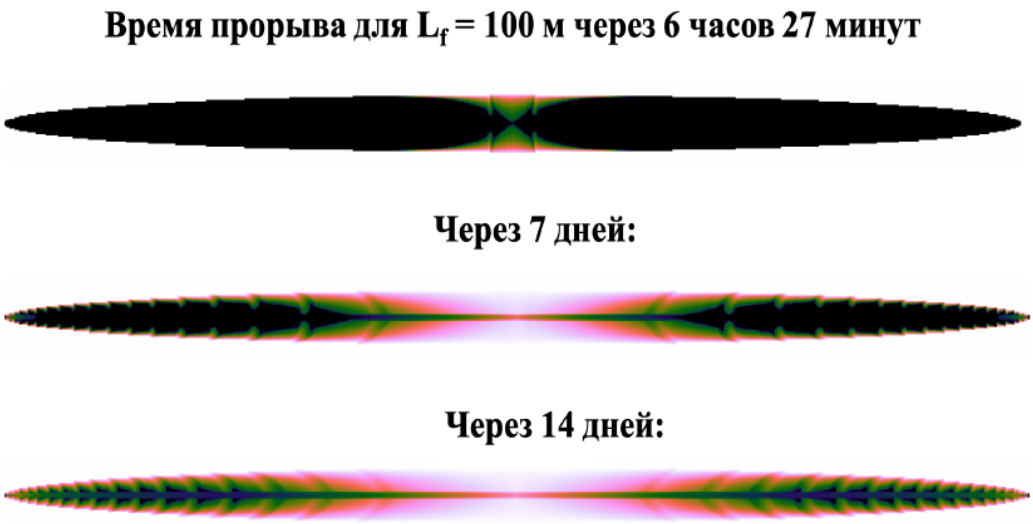


Рис. 9. *Насыщенность жидкостью гидроразрыва для случая трещины* $L_f = 100$ *м в различные моменты времени*

Заключение

При вытеснении жидкости большей вязкости жидкостью меньшей вязкости образуется неустойчивость, проявляющая себя в формирующихся «пальцах» в области фильтрации обеих жидкостей.

Геометрия зоны обводненности на начальном этапе не влияет на характер вытеснения.

Для малых трещин процесс очистки идет быстрее и процесс фильтрации к добывающей скважине происходит более равномерно, как по трещине, так и по области рядом с добывающей скважиной. Несмотря на то что трещина обладает высокой проницаемостью, вследствие высокой вязкости жидкости гидроразрыва процесс очистки идет очень сложно. В связи с этим вопрос о подборе жидкости гидроразрыва имеет важное значение для достижения цели очистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Darcy H. The Public Fountains of the City of Dijon. Experience and Application. Paris, 1856.
2. Buckley S. E., Leverett M. S. Mechanism of Fluid Displacement in Sands. *Journ. Petr. Technology*. 1941.
3. Saffman P. G., Taylor G. J. The Penetration of a Fluid into a Porous Medium of Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Fluid. *Proc. R. Foc. Zond*. 1958, A 245, 312.
4. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Skryleva E. I. Microgravity Investigation of Seepage Flows in Porous Media. Microgravity Science and Technology. 2019:31(5):629–639.
5. Dushin V. R., Skryleva E. I., Nikitin V. F. Microgravity Investigation of Capillary Forces in Imbibition of Fluid into Porous Media. Proceedings of 69th International Astronautical Congress, 2018, Bremen, Germany.
6. Logvinov O. A. Skryleva E. I. Displacement of a Viscous Fluid from a Hele-Shaw Cell with a Sink. Moscow University Mechanics Bulletin. 2016;71(4):77–81.
7. Козлов И. В., Скрылева Е. И. Математическое моделирование и обработка эксперимента по вытеснению нефти водой из неокомских песчаников. Вестник кибернетики. 2016;2:139–146.
8. Душин В. Р., Никитин В. Ф., Скрылева Е. И. Вычислительное моделирование вытеснения флюида из пористой среды. Вестник кибернетики. 2017;4:62–82.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО ВЫТЕСНЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ

В. Ф. Никитин[1,2,а], **Е. И. Скрылева**[1,2,б], **М. Н. Макеева**[1,2,в], **А. Н. Манахова**[1,г]
[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*
[2] *Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*
[а] *vfnikster@gmail.com*, [б] *jennyne@yandex.ru*, [в] *margarita_makeeva99@mail.ru*, [г] *nastyamanahova@yandex.ru*

Аннотация: работа посвящена особенностям неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды с учетом химических взаимодействий между фазами. Когда вязкая жидкость вытесняется менее вязкой жидкостью или газом, на фронте вытеснения развивается неустойчивость Саффмана–Тейлора: менее вязкая жидкость прорывается сквозь слой более вязкой вытесняемой жидкости, образуя в ней каналы «вязкие пальцы». В результате развития неустойчивости изначально плоская граница раздела фаз искривляется и площадь контакта между фазами увеличивается. Это явление особенно важно учитывать при моделировании процесса вытеснения с учетом химических реакций между фазами, так как за счет увеличения контакта между реагирующими фазами увеличивается скорость протекания химической реакции. В статье приводится математическая модель для описания процесса вытеснения нефти термогазовым методом, когда нефть вытесняется смесью нагретых воды и газа, который вступает с нефтью в экзотермическую химическую реакцию, в результате чего вязкость нефти падает, что приводит к более качественному вытеснению. Математическая модель подразумевает возможность учета эффектов, связанных с неустойчивостью, при моделировании скорости реакции. Также в данной работе описан метод подсчета площади межфазной границы при трехмерном моделировании неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из порового пространства.

Ключевые слова: фильтрация, термогазовый метод, неустойчивость вытеснения.

Благодарности: работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 22-21-00236).

Для цитирования: Никитин В. Ф., Скрылева Е. И., Макеева М. Н., Манахова А. Н. Моделирование неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды с учетом химических взаимодействий между фазами. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):22–32. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-3.

SIMULATION OF UNSTABLE VISCOUS FLUID DISPLACEMENT FROM POROUS MEDIUM CONSIDERING INTER-PHASE CHEMICAL INTERACTIONS

V. F. Nikitin[1,2,a], **E. I. Skryleva**[1,2,b], **M. N. Makeeva**[1,2,c], **A. N. Manahova**[1,d]
[1] *Moscow State University, Moscow, Russian Federation*
[2] *Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation*
[a] *vfnikster@gmail.com*, [b] *jennyne@yandex.ru*, [c] *margarita_makeeva99@mail.ru*, [d] *nastyamanahova@yandex.ru*

Abstract: the paper studies the unstable displacement of a viscous fluid from a porous medium while taking into account the inter-phase chemical interactions. As a viscous fluid is displaced by a less viscous fluid, the Saffman-Taylor instability occurs at the interface: the less viscous fluid breaks through the layer of the more viscous fluid being displaced, forming so-called "viscous fingers" (channels). The instability leads to the bending of the initially flat interface and the contact area between the phases increases. This phenomenon should be considered when modeling the displacement process taking into account the inter-phase chemical reactions because as the interface area between the phases grows, the chemical reaction rate also increases. This paper presents a simulation model describing the thermal gas oil displacement process when oil is displaced by a mixture of hot water and gas. The gas and oil produce an exothermic chemical

reaction resulting in the oil viscosity decrease, which leads to a better displacement. The reaction rate simulation model can consider the instability effects. The paper also presents a method for estimating the phase-to-phase boundary area used for 3D modeling of unstable viscous fluid displacement from a porous substance.

Keywords: filtration, thermal gas displacement, displacement instability.

Acknowledgements: this study is supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-21-00236).

Cite this article: Nikitin V. F., Skryleva E. I., Makeeva M. N., Manahova A. N. Simulation of Unstable Viscous Fluid Displacement from Porous Medium Considering Inter-Phase Chemical Interactions. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):22–32. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-3.

Введение

Фильтрационные течения вязких жидкостей в пористых средах – основа добычи жидких полезных ископаемых, таких как нефть, газовый конденсат и пр., поскольку извлечение жидких полезных ископаемых осуществляется методом их вытеснения из пористой среды водой или другими реагентами. Повышение нефтеотдачи пластов связано с качеством вытеснения нефти, насыщающей подземные резервуары, с помощью воды или мицеллярно-полимерных растворов. Для повышения эффективности вытеснения углеводородов применяются также механические, термические и химические методы [1–9].

Задача вытеснения углеводородов осложняется тем, что в практических случаях ее приходится решать на значительном пространственном масштабе. В то же время из-за использования менее вязкой воды для вытеснения более вязкой смеси углеводородов (пластовой нефти) этот процесс является неустойчивым [10–16]: фронт вытеснения, даже если он был вначале плоским, искажается за счет пальцеобразных выступов, по которым менее вязкая вода прорывается к добывающей скважине, оставляя позади себя невытесненную нефть (рис. 1). После достижения одним из таких выступов добывающей скважины картина вытеснения резко меняется: большая часть подаваемой воды будет направляться в канал, созданный лидирующим пальцем. В скважину начинает закачиваться уже не нефть, а ее смесь с вытесняющей водой, причем процент воды будет быстро увеличиваться. Оставшаяся же в пласте нефть после такого прорыва будет практически неподвижна.

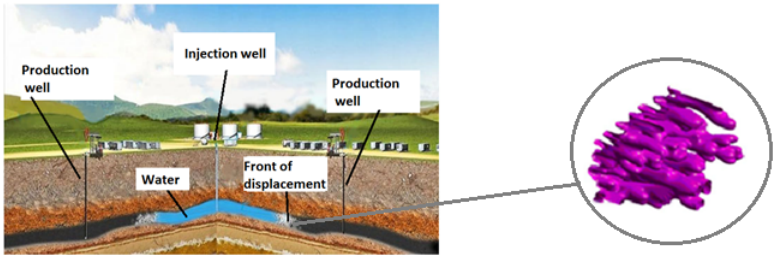


Рис. 1. *Неустойчивость вытеснения*

Еще одна сложность заключается в том, что такая неустойчивость многомасштабна и дело ее моделирования осложняется тем, что наиболее быстро растут мелкомасштабные пальцы. Основная проблема прямого моделирования неустойчивости в том, что разрешение мелкомасштабных потоков на практической сетке нереально даже с использованием современной вычислительной техники [17–18]. Например, при обработке малого участка месторождения размером $10\times10\times1$ км с ячейками размером $1\times1\times1$ м потребуется 100 млрд ячеек. Такая крупная задача находится на пределе возможности современных вычислительных комплексов. Но разрешить неустойчивости размером по ширине менее 3 ячеек численная схема неспособна. Тем самым пальцеобразные выступы вытесняющего агента шириной менее 3 м, проникающие в вытесняемую нефть, на такой сетке не только не будут обнаружены, но решение вообще не будет учитывать их влияние, хотя бы и скрытое, на процесс вытеснения. Уменьшение же линейного размера ячейки в 10 раз увеличивает число ячеек двумерной сетки в 100, а трехмерной — в 1000 раз. В то же время опыт показывает, что значение имеет пальцеобразная неустойчивость фронта вытеснения для размеров порядка 1 см и менее. Весьма важно и то, что реальный фронт вытеснения имеет трехмерную структуру, прорыв маловязкой жидкости в случае неустойчивости фронта вытеснения проходит по каналам, имеющим форму, близкую к цилиндрической, и тем

самым объем невытесненной жидкости при трехмерном моделировании выше, чем при двумерном. Это говорит о том, что для решения задачи, позволяющей учитывать мелкую структуру вытеснения, требуется именно трехмерное моделирование с мелким разрешением. Измельчение исходной сетки до такого масштаба делает решение задачи вытеснения если и не невозможным, то неприменимым на практике. В то же время учесть влияние мелкомасштабной, или подсеточной, неустойчивости при решении глобальной задачи на грубой сетке возможно. Поэтому крайне актуальна разработка алгоритмов для многомасштабного моделирования нелинейных процессов подземной гидродинамики.

Одни из самых перспективных методов увеличения нефтеотдачи пласта — термохимические (рис. 2), которые характеризуются закачкой в пласт нагретого вытесняющего агента (например, смесь газа и воды). Нагретый кислород или воздух вступает в реакцию с углеводородом, в результате чего происходит его окисление с выделением тепла; в качестве продуктов химической реакции образуются углекислый газ и водяной пар [19, 20]. Реакция эта экзотермическая, и в результате ее температура флюида повышается, а вязкость падает, в итоге ускоряется процесс вытеснения нефти из пласта. В случае, когда между вытесняющей и вытесняемой фазами происходят химические реакции, большое влияние на процесс начинает оказывать неустойчивость вытеснения, так как увеличивается площадь контактной поверхности между реагирующими веществами [21]. Поэтому крайне актуальным является учет неустойчивости, в том числе мелкомасштабной, при моделировании таких процессов. Таким образом, роль фундаментальных исследований неустойчивого вытеснения вязких жидкостей из пористой среды с учетом термохимических реакций между фазами путем многомасштабного моделирования трудно переоценить.

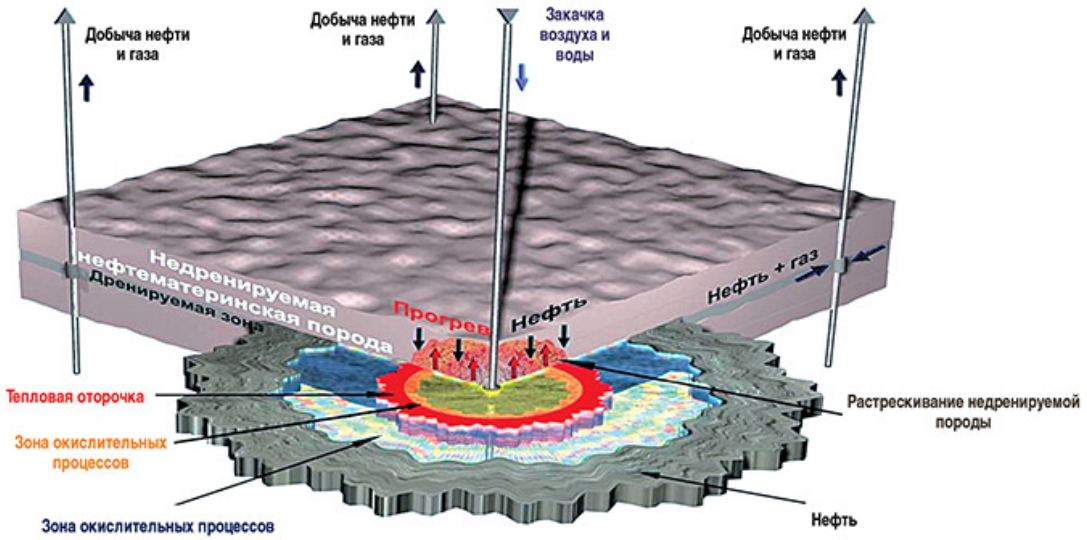


Рис. 2. *Термохимические методы нефтедобычи*

Математическая модель для описания термогазового метода нефтедобычи

Рассматривается трехфазный поток (рис. 3) сквозь пористую среду. Пористость и проницаемость среды будем считать постоянными, капиллярным давлением пренебрежем. Запишем уравнения баланса массы для каждой фазы:

$$\frac{\partial \rho_k s_k \phi}{\partial t} + \nabla(\rho_k w_k) = \dot{m}_k\left(T, Y_{O_2}, s_i\right), \qquad k = w, o, g.$$

Здесь: ρ_k — плотность фазы, s_k — насыщенность фазы, ϕ — пористость среды, w_k — скорость фильтрации фазы, $\dot{m}_k$ — скорость рождения массы, Y_i — концентрация i-го компонента газовой фазы. Индексы соответствуют воде (w), нефти (o), газовой смеси (g).

Запишем уравнения баланса массы для каждого компонента газовой фазы:

$$\frac{\partial Y_i \rho_g\left(p, T, Y_j\right) s_g \phi}{\partial t} + \nabla\left(Y_i \rho_g w_g\right) = \dot{m}_i\left(T, Y_{O_2}, s_i\right), \; i = N_2, O_2, CO_2, H_2O\,(g).$$

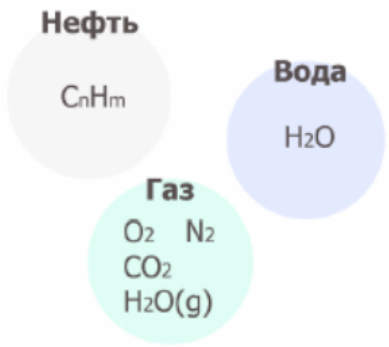


Рис. 3. *Трехфазный поток*

А также уравнения баланса импульса в форме закона Дарси:

$$\vec{w_i} = -\frac{kk_{ri}}{\mu_i}\nabla p,$$

где k_{ri} — относительная проницаемость i-ой фазы.

Введем массовый поток для каждой фазы $f_i = \rho_i w_i$ и суммарный массовый поток $f = \sum \rho_i w_i$.

Обозначим $M_i = \frac{\rho_i kk_{ri}}{\mu_i}$ — мобильность фазы.

После домножения на плотность и суммирования из закона Дарси для трех фаз получим:

$$f = -\nabla p \sum \frac{\rho_i kk_{ri}}{\mu_i} = -M\nabla p,$$

где

$$M = \sum \frac{\rho_i kk_{ri}}{\mu_i}.$$

Тогда

$$f_i = \frac{M_i}{M} f.$$

Перепишем уравнения баланса массы:

$$\frac{\partial \rho_k s_k \phi}{\partial t} + \nabla\left(\frac{M_k}{M} f\right) = \dot{m}_k\left(T, Y_{O_2}, s_i\right), \qquad k = w, o, g;$$

$$\frac{\partial Y_i \rho_g\left(p, T, Y_j\right) s_g \phi}{\partial t} + \nabla\left(Y_i \frac{M_g}{M} f\right) = \dot{m}_i\left(T, Y_{O_2}, s_i\right), \qquad i = N_2, O_2, CO_2, H_2O\,(g).$$

После суммирования уравнений баланса массы для трех фаз, с учетом $\rho = \rho_w s_w + \rho_o s_o + \rho_g s_g$, получим:

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(f) = 0.$$

С учетом закона Дарси имеем уравнение для давления:

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial t} - \nabla(M\nabla p) = 0.$$

Уравнения притока тепла для скелета и потока:

$$\frac{\partial(1-\phi)\rho_s E_s(T_s)}{\partial t} = -\nabla q_s(T_s) - \Delta Q(T, T_s); \quad i = w, o, g, \quad j = N_2, O_2, CO_2, H_2O\,(g);$$

$$\frac{\partial \phi \rho E\left(p, T, s_i, Y_j\right)}{\partial t} + \nabla\left(\sum_{k=w,o,g} \rho_k w_k s_k e_k(T)\right) = -\nabla q(T) + \Delta Q(T, T_s) + \Delta Q_r\left(T, Y_{O_2}, s_i\right);$$

где

$E_s(T_s)$, $E\left(p, T, s_i, Y_j\right)$ — внутренняя энергия скелета и флюида соответственно,

$q\,(s_i,\,T)\,,q_s(T)$ — вектор притока тепла через поверхность к потоку и скелету соответственно,
$\Delta Q(T,T_s)$ — теплообмен между скелетом пористой среды и флюидом,
$\Delta Q_r(T,s_i,Y_j)$ — поток тепла за счет химической реакции,
$e_i\left(T,Y_j\right)$ — внутренние энергии фаз.

В скважину закачивается смесь азота и кислорода. Предполагается следующая сборка реакций:

$$C_nH_m+v(3.55N_2+O_2)\rightarrow 3.55vN_2+v_1CO_2+v_2H_2O\,(g)+v_3H_2O.$$

Баланс устанавливается при следующих предположениях:

$$v=n+0.25m,\qquad v_1=n,\qquad v_2=v_3=0.25m.$$

Скорость реакции: $\dot{\omega}=\text{к}(T)Y_{O_2}\left(s_g s_o\right)(1+eF)$.

Здесь eF — фактор, связанный с неустойчивостью вытеснения, $\text{к}\,(T)$ — коэффициент скорости реакции по закону Аррениуса:

$$\text{к}\,(T)=\begin{cases}0, & T<T_r\\ \Lambda e^{-\frac{T_a}{T}}, & T\geq T_r\end{cases},$$

где Λ — предэкспоненциальный множитель, T_a — температура активации, T_r — пороговая температура (см. константы).

Получаем следующие выражения для скорости зарождения массы для фаз и компонент:

$$\begin{aligned}&\dot{m}_w=\dot{m}_{H_2O}=\dot{\omega}v_2W_{H_2O}, && \dot{m}_{N_2}=0\\ &\dot{m}_g=\dot{m}_{N_2}+\dot{m}_{O_2}+\dot{m}_{CO_2}+\dot{m}_{H_2O(g)}, && \dot{m}_{O_2}=-\dot{\omega}vW_{O_2}\\ &\dot{m}_o=-\dot{m}_w-\dot{m}_g, && \dot{m}_{CO_2}=\dot{\omega}v_1W_{CO_2}\\ & && \dot{m}_{H_2O(g)}=\dot{\omega}v_2W_{H_2O(g)}\end{aligned}$$

где W_i — молярные массы соответствующих веществ.

Начальные условия:

$$p=p_1$$

$$s_w=s_{w0},\ s_o=s_{o0},\ s_g=0$$

$$Y_{N_2}=0,Y_{O_2}=0,\ Y_{CO_2}=0,\ Y_{H_2O(g)}=1$$

$$T=T_s=T_0=const$$

$$u_w=u_o=u_g=0$$

Граничные условия:

$$p\,(0)=p_2$$

$$p\,(L)=p_3$$

$$s_w(0)=s_{wb},\ s_o(0)=s_{ob},\ s_g\,(0)=s_{gb}$$

$$Y_{N_2}(0)=Y_{N_2b},Y_{O_2}(0)=Y_{O_2b},\ Y_{CO_2}(0)=0,\ Y_{H_2O(g)}(0)=0$$

Результаты численного моделирования

На рис. 4–6 представлены результаты численного моделирования на основании описанной выше математической модели. Графики показывают распределение различных параметров в зависимости от координаты в последовательные моменты. Из результатов видно, что нефть постепенно вытесняется из расчетной области смесью газа и воды, при этом температура флюида повышается, что приводит к снижению вязкости нефти.

На рис. 7 представлено сравнение расчетов с учетом химических реакций и без учета химических реакций. Графики показывают зависимость от времени суммарного содержания нефти в расчетной области. Видно, что без учета химической реакции график всегда находится значительно выше, т. е. вытеснение существенно медленнее. В итоге количество оставшейся в пласте нефти примерно в

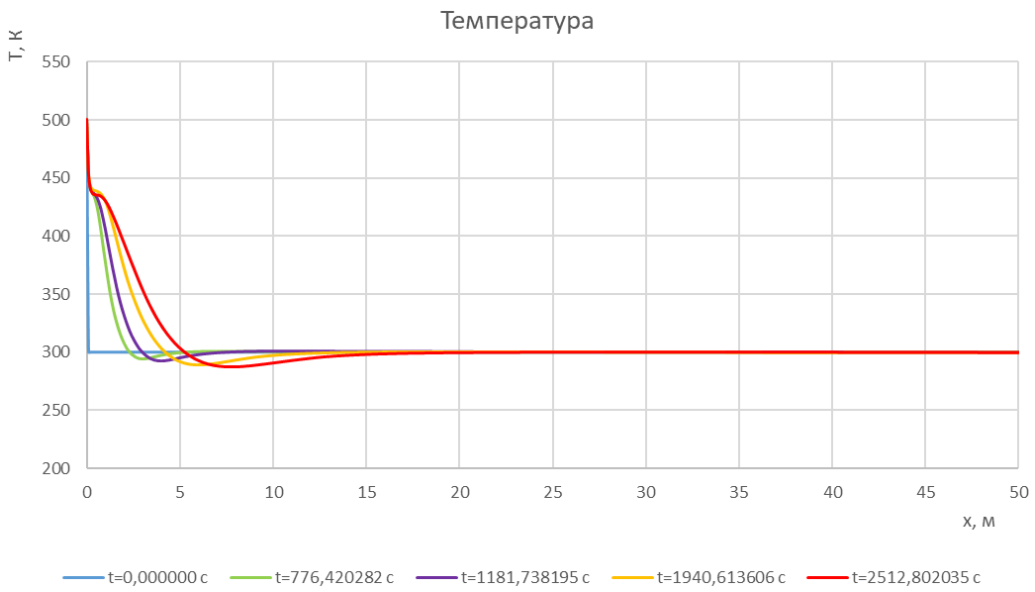


Рис. 4. *Зависимость температуры флюида от координаты*

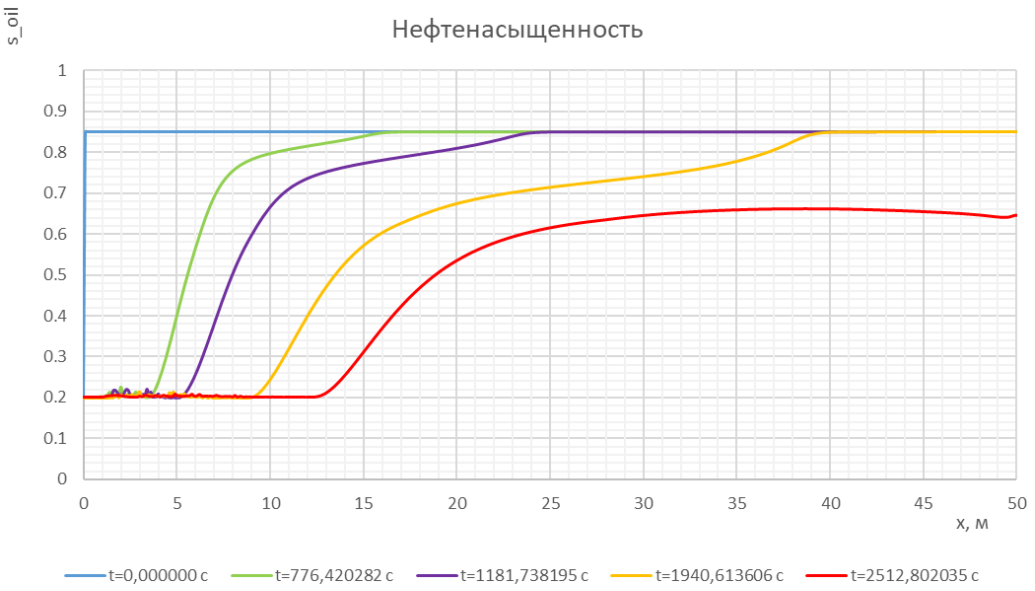


Рис. 5. *Зависимость нефтенасыщенности от координаты*

1,5 раза больше для случая, когда химические реакции не происходят. Это говорит об эффективности применения термогазового метода увеличения нефтеотдачи.

Расчет площади поверхности раздела жидкостей

В случае проведения трехмерного численного моделирования вытеснения есть возможность наблюдать за эволюцией развития неустойчивости на мелком масштабе (рис. 8). При таких расчетах граница раздела между двумя фазами не выделяется явно в процессе расчета [22]. Значение насыщенности вытесняемой жидкости вычисляется в каждом вычислительном узле (центре ячейки); поэтому мы принимаем за границу раздела такую поверхность, с одной стороны от которой значение насыщенности больше некоторого заданного s^*, а на другой стороне меньше. Ниже приведен способ расчета площади такой поверхности [23].

Требуется найти площадь поверхности (рис. 8), разделяющей область данных $s(\vec{x})$, при помощи уравнения:

$$\Sigma = \{\vec{x} : s(\vec{x}) = s^*\}, \qquad \Sigma^+ = \{\vec{x} : s(\vec{x}) \geq s^*\}.$$

Здесь Σ – поверхность, площадь которой мы хотим определить, Σ^+ – одна из областей, отделя-

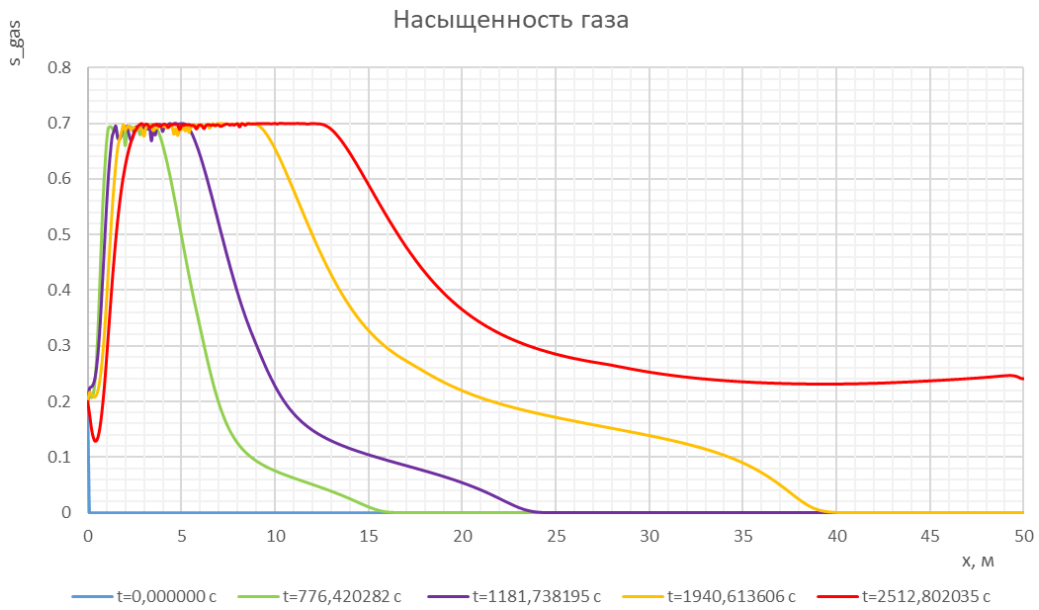


Рис. 6. *Зависимость насыщенности газа от координаты*

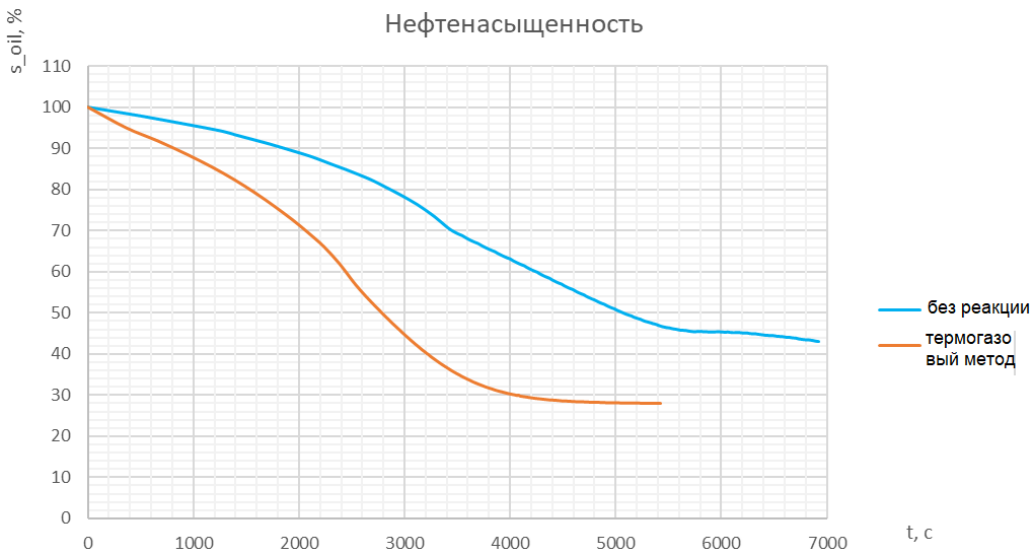


Рис. 7. *Сравнение расчетов с химической реакцией и без химической реакции*

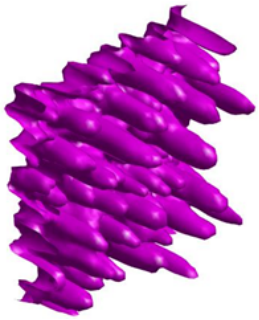


Рис. 8. *Тип поверхности, площадь которой вычисляется*

емая этой поверхностью.

Исходим из того, что данные $s(\vec{x})$ определены в центрах кубических ячеек так, что известны их целочисленные координаты:

$$s_m = s\left(\vec{x}\right), \quad m = M\left(\vec{n}\right),$$

где m — номер ячейки, $M\left(\overrightarrow{n}\right)$ – взаимно-однозначный перевод целочисленных координат в целое число.

Каждая кубическая ячейка m имеет 8 вершин; в каждой из этих вершин данные можно определить интерполяцией. В ином варианте распределения данных они изначально заданы в вершинах ячеек, ячейки же определенным образом группируют данные. Поскольку сетка кубическая, связь между координатами центров ячеек и целочисленными координатами данных в этих центрах такова:

$$\overrightarrow{x_m}=\left(\overrightarrow{n_m}+\frac{1}{2}\right)h-\overrightarrow{x_c}.$$

Здесь h — размер ячейки, а $\overrightarrow{x_c}$ – смещение системы координат.

Инициализируем площадь поверхности $|\Sigma|$ нулем. Обходим все ячейки домена и для каждой ячейки m определяем число t_m выполнений условия:

$$\overrightarrow{x_{mj}}\in\Sigma^+,\ j=0,..,7,$$

где j — индекс вершины ячейки. Для расчета этого условия либо требуется интерполировать данные в вершину, либо напрямую использовать сами данные, если они заданы в вершинах. При расчете интерполяции удобно воспользоваться соотношением:

$$x_{mji}=\begin{cases} x_{mi}+\dfrac{h}{2}, & j_i=1,\\ x_{mi}-\dfrac{h}{2}, & j_i=0.\end{cases}$$

Здесь j_i — i-ая двоичная цифра индекса j, i = 0,1,2.

Сама площадь определяется формулой:

$$|\Sigma|=\sum_m W\left(t_m\right)h^2,$$

где $W\left(t\right)$ — весовая функция, зависящая от целого числа t = 0,1, . . . ,7,8. Физический смысл весовой функции — среднее значение площади поверхности, отсекающей t вершин кубической ячейки, деленная на площадь грани ячейки. Функция безразмерна.

Функцию $W\left(t\right)$ можно определить калибровкой на известных фигурах. Одно из свойств ее — симметрия, а также нулевые значения при t = 0 и t=8. Симметрия проявляется в том, что:

$$W\left(8-t\right)=W\left(t\right).$$

Кроме того, логично, чтобы от t = 1 до t = 4 функция была положительной и возрастающей. Вследствие симметрии и нулевых значений W(t) на краях диапазона можно ограничиться набором независимых величин w_k, $k=0,1,2,3$, таких что:

$$W\left(t\right)=\begin{cases} w_{t-1}, & 1\le t\le 4,\\ w_{8-t-1}, & 4\le t\le 7,\\ 0, & t=0,\ t=8.\end{cases}$$

На основе случайных параметров строится N_t калибровочных тел, поверхность которых вложена в заданный домен, разбитый на кубы. По параметрам тел определяются истинные площади их поверхности A_n, $n=0,\ldots,N_t-1$. Далее для каждого теста n рассчитываются параметры:

$$a_{nj}=\sum_{m:\ t_m=j} t_m h^2.$$

Пользуясь симметрией W(t) и игнорируя ее крайние значения, переходим к 4 независимым параметрам b_{nj}:

$$b_{n,j-1}=a_{n,j}+a_{n,8-j},\qquad j=1,\ldots,3;\qquad b_{n,3}=a_{n,4}.$$

Требуется решить систему линейных уравнений:

$$\sum_{j=0}^{3} b_{nj} w_j = A_n,$$

но при достаточно большом числе тестов это будет переопределенная система, решений не имеющая. Ее можно решить в смысле минимально возможного приближения по норме L2 (то есть методом минимальных квадратов), для чего левую и правую части системы умножают на транспозицию матрицы b_{nj}:

$$\sum_{j=0}^{3} B_{ij} w_j = C_i, \quad i = 0, \ldots, 3; \qquad B_{ij} = \sum_{n=0}^{N_t-1} b_{ni} b_{nj}, \qquad C_i = \sum_{n=0}^{N_t-1} b_{ni} A_n.$$

Линейная система имеет положительно определенную симметричную матрицу, если только число тестов было не меньше 4 и не было набора одинаковых матричных коэффициентов b_{nj} в двух или более различных тестах. Ее решение (например, методом Холецкого) дает систему весовых коэффициентов, минимизирующую отклонение расчетной площади поверхности от истинной для указанных тестов в смысле нормы L2.

Используя описанный выше метод подсчета площади, возможно сравнить степень развития неустойчивости для расчетов с различными параметрами, например, на рис. 9 представлено сравнение эволюции безразмерной площади поверхности раздела фаз для различных значений отношения вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей. Таким образом, с увеличением отношения вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей неустойчивость фронта вытеснения развивается сильнее, в то время как скорость фронта уменьшается, а время полного вытеснения увеличивается.

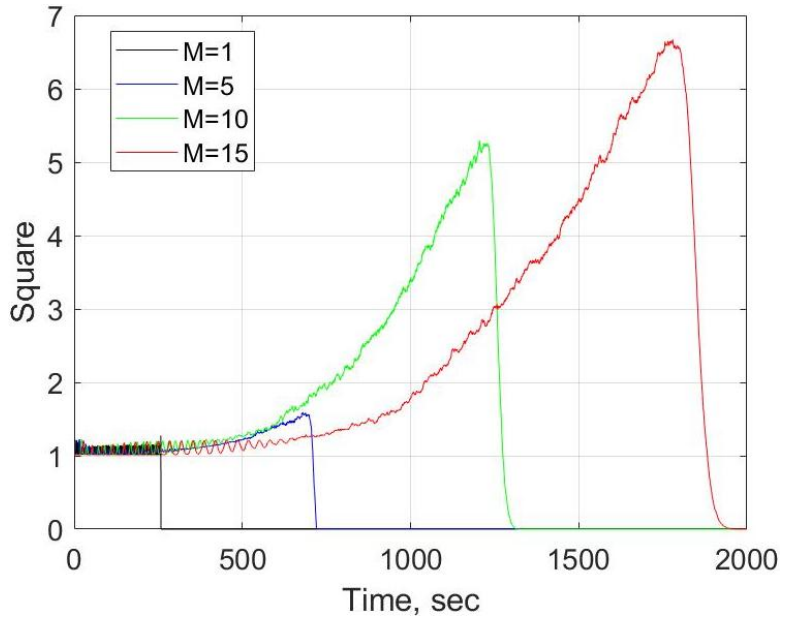


Рис. 9. *Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для расчетов с различными значениями отношения вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей* ($M = \mu_2/\mu_1$)

На рис. 10 представлена зависимость результатов подсчета площади поверхности раздела фаз от количества расчетных ячеек. Как видно, начиная с некоторого количества ячеек (≈90*90*90), результат не зависит от разбиения расчетной области.

Заключение:

- разработана математическая модель для предсказательного моделирования процесса вытеснения нефти с применением термогазового метода увеличения нефтеотдачи. Модель основана на законе Дарси; модель учитывает относительные фазовые проницаемости, капиллярные эффекты, эффект

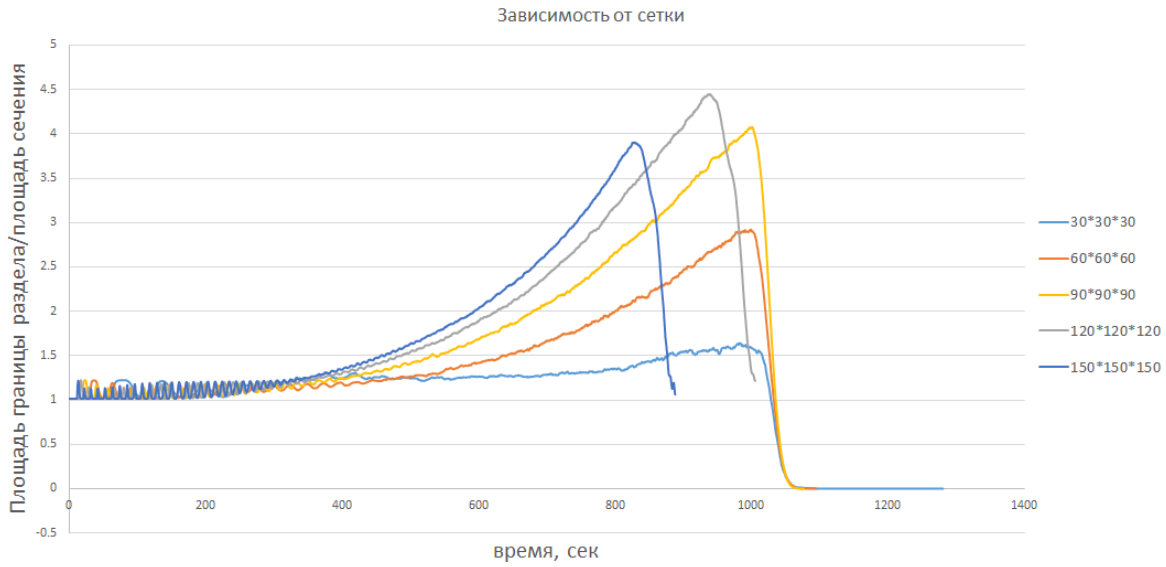


Рис. 10. *Эволюция безразмерной площади поверхности раздела фаз для расчетов с различным количеством ячеек в расчетной области*

уменьшения вязкости нефти за счет экзотермических химических реакций, сжимаемость флюида. Для описания используется трехфазная модель флюида в пористой среде. Фазы считаются несмешивающимися, скелет – неподвижным. На основе полученной математической модели проведены численные эксперименты;

- показано, что за одинаковое время (5 000 с) с использованием термогазового метода из нефтеносного пласта было вытеснено около 70 % углеводорода, при этом без химических реакций было вытеснено около 50 % углеводорода. Это доказывает эффективность применения термогазового метода для увеличения нефтеотдачи пласта;
- в результате сравнительного анализа данных экспериментальных исследований были получены уникальные возможности для определения неизвестных параметров модели, а именно капиллярных характеристик горных пород и насыщающих жидкостей. На основании экспериментальных данных определены коэффициенты в математических моделях и исследовано развитие фронта вытеснения для различных параметров [20];
- предложен новый метод для подсчета площади изоповерхностей. Данный метод можно применять для расчета площади нерегулярных межфазовых поверхностей при моделировании неустойчивого вытеснения из пористой среды. Проведен анализ эволюции поверхности раздела фаз для расчетов с различными определяющими параметрами, в том числе для расчетов, соответствующих экспериментам [20];
- показано, что чем выше значение отношения вязкостей, тем большего значения достигает площадь раздела фаз [20];
- показано, что, начиная с некоторого значения (90*90*90 ячеек), количество ячеек не оказывает существенного влияния на результат расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Abdul Mujeebu, M. Zulkifly Abdullah, A. A. Mohamad, M. Z. Abu Bakar. Trends in modeling of porous media combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010;36:627–650.
2. Вольпин С. Г., Смирнов Н. Н., Кравченко М. Н., Диева Н. Н. Моделирование импульсно-волновой обработки нефтяных пластов методом термогазохимического воздействия. *Сборник научных трудов ОАО «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт им. акад. А.П. Крылова»*. 2013;149:127–137.
3. Вольпин С. Г., Саитгареев А. Р., Смирнов Н. Н., Кравченко М. Н., Корнаева Д. А., Диева Н. Н. Перспективы применения волновой технологии термогазохимического воздействия для повышения нефтеотдачи пластов. *Нефтяное хозяйство*. 2014;1:62–66.

4. Kravchenko M. N., Dieva N. N., Lishchuk A. N., Muradov A. V., Vershinin V. E. Hydrodynamic Modeling of Thermochemical Treatment of Low Permeable Kerogen-Containing Reservoirs. *Georesources*. 2018;20(3),Part 1:178–185. DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.178-185.
5. Боронин С. А., Осипцов А. А. Влияние миграции частиц на течение суспензии в трещине гидроразрыва. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2014;2:80–94.
6. Боронин С. А., Осипцов А. А., Толмачева К. И. Многоконтинуальная модель фильтрации суспензии в пористой среде. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2015;6:50–62.
7. Dushin V. R., Smirnov N. N., Nikitin V. F., Skryleva E. I., Weisman Yu. G. Multiple Capillary-Driven Imbibition of a Porous Medium under Microgravity Conditions: Experimental Investigation and Mathematical Modeling. *Acta Astronautica*. 2022;193:572-578. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.06.054.
8. Bing Bai, Dengyu Rao, Tao Chang, Zhiguang Guo. A Nonlinear Attachment-Detachment Model with Adsorption Hysteresis for Suspension-Colloidal Transport in Porous Media. *Journal of Hydrology*. 2019:124080.
9. Junhua Wu, Haishan Li, Fuchang Wang. Experimental Study of Seawater Seepage and Heat Transfer in a Laboratory Vertical Beach Well. *Applied Thermal Engineering*. 2018;129:403–409.
10. Romanova D. I., Dushin V. R., Nikitin V. F. Oil Displacement by Water-Gas Mixtures with Heat Release. Moscow University Mechanics Bulletin. 2019;74:147–152.
11. Dushin V. R., Nikitin V. F., Phylippov Yu. G., Legros J. C. Two-Component Fluid Convective Flow in Thin Gaps. *Acta Astronautica*. 2010;66:742–747.
12. Логвинов О. А., Скрылева Е. И. Вытеснение вязкой жидкости из кольцеобразной ячейки Хеле-Шоу со стоком. *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*. 2016;4:39–43.
13. Meijuan Yun, Boming Yu, Jianchao Cai. Analysis of Seepage Characters in Fractal Porous Media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(13–14).
14. Xu Yang, Yingjie Liang, Wen Chen. A Spatial Fractional Seepage Model for the Flow of Non-Newtonian Fluid in Fractal Porous Medium. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2018;65:70–78.
15. Yibin Huang, Yanjun Zhang, Ziwang Yu, Yueqiang Ma, Chi Zhang. Experimental Investigation of Seepage and Heat Transfer in Rough Fractures for Enhanced Geothermal Systems. *Renewable Energy*. 2019;135:846–855.
16. Dongxing Du, Dexi Wang, Ninghong Jia, Weifeng Lyu, Jishun Qin, Chengcheng Wang, Shengbin Sun, Yingge Li. Experiments on CO2 Foam Seepage Characteristics in Porous Media. *Petroleum Exploration and Development*. 2016;43(3):499–505.
17. Бетелин В. Б., Боксерман А. А., Костюков В. Е., Савельев В. А. Проблемы управления процессами повышения нефтеотдачи на основе моделирования на супер-ЭВМ. *НефтеГазоПромысловый инжиниринг*. 2010;3:20–24.
18. Бетелин В. Б., Кушниренко А. Г., Смирнов Н. Н. Технологии супервычислений эксафлопного класса и обеспечение конкурентоспособности энергетики России. *НефтеГазоПромысловый инжиниринг*. 2011;3:10–13.
19. Романова Д. И., Душин В. Р., Никитин В. Ф. Вытеснение нефти смесью газов и воды с тепловыделением. Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2019;6:38–44.
20. Душин В. Р., Логвинов О. А., Скрылева Е. И., Шамина А. А. Моделирование неустойчивого вытеснения жидкостей из пористых сред с учетом внешних воздействий, направленных на повышение нефтеотдачи. НИР № 20-07-00378. Режим доступа: https://istina.msu.ru/projects/341406269/.
21. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Maximenko A., Thiercelin M., Legros J. C. Instability and Mixing Flux in Frontal Displacement of Viscous Fluids from Porous Media. *Physics of Fluids*. 2005;17:84–102.
22. Козлов И. В., Скрылева Е. И. Математическое моделирование и обработка эксперимента по вытеснению нефти водой из неокомских песчаников. *Вестник кибернетики*. 2016;2:139–146.
23. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Kolenkina E. I., Gazizova D. R. Evolution of a Phase Interface in the Displacement of Viscous Fluids from a Porous Medium. *Fluid Dynamics*. 2021;56(1):79–92. DOI: http://dx.doi.org/10.1134/S0015462821010122.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК НА ГАЗОПРОВОДАХ

С. А. Максудова[а], А. В. Гавриленко[б]
Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
[а] ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3139-3770, maksofal20@mail.ru
[б] ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1837-5698, gavrilenko.anna.v@gmail.com

Аннотация: в статье описан подход к созданию расчета траектории полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для обнаружения утечек из магистралей. Основой нового подхода предлагается сделать систему симуляционного моделирования полета беспилотного летательного аппарата при решении задачи эффективного поиска утечки метана из магистрального трубопровода. Ключевой задачей является поиск оптимальных траекторий движения беспилотного летательного аппарата, решение которой существенно повысит вероятность обнаружения утечек с учетом ряда климатических факторов.

Текущие результаты симуляционного моделирования показывают существенное различие вероятности обнаружения утечки с последующей локализацией облака утечки при использовании разработанного подхода от вероятности обнаружения утечки при подходе с параллельным облетом газопровода. Можно отметить, что для метеоусловий с силой ветра 0-2 балла параллельное движение БПЛА относительно трубопровода показывает достаточную эффективность, но плохо работает при силе ветра от 4 баллов. В таком случае применение разработанного подхода обладает более высокой эффективностью.

В результате исследования получена симуляционная модель поиска эффективных траекторий движения БПЛА. По результатам вычислительных экспериментов можно сделать вывод о достаточной эффективности выбранной модели, подхода и алгоритмов. Естественно, оператор БПЛА не может точно указать или даже предсказать место утечки метана, но предварительный анализ и ситуационное моделирование позволит использовать ресурс БПЛА с большей эффективностью. Количество учитываемых параметров по определению траектории движения может как увеличиться, так и уменьшиться по результатам масштабных симуляций и в последующем — натурных экспериментов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, траектория движения, лазерный локатор утечек газа, симуляционная модель.

Для цитирования: Максудова А. В., Гавриленко А. В. Моделирование эффективных траекторий движения беспилотного летательного аппарата для обнаружения утечек на газопроводах. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):33–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-4.

EFFICIENT PATHS FOR UAV-BASED GAS PIPELINE LEAK DETECTION

S. A. Maksudova[a], A. V. Gavrilenko[b]
Surgut State University, Surgut, Russian Federation
[a] ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3139-3770, maksofal20@mail.ru
[b] ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1837-5698, gavrilenko.anna.v@gmail.com

Abstract: the study proposes an approach to generating unmanned aerial vehicle (UAV) paths for gas pipeline leak detection applications. The new approach uses a UAV simulation tool to optimize the search for methane leaks in pipelines. The goal is to find optimal UAV paths that maximize the probability of leak detection in the given climatic conditions.

The simulation results show a significant difference in leak detection and gas cloud localization probabilities achieved with the proposed flight path and a pipeline-parallel UAV flight path. Under 0...2 force wind, the UAV path parallel to the pipeline gives sufficient efficiency, but it is a poor strategy in wind forces of 4 points or more. In this case, the proposed approach is more efficient.

We created a simulation model for finding efficient UAV flight paths. The computational experiments confirmed the proposed model, approach and algorithms are sufficiently efficient. The UAV operator is

unable to provide or even guess the exact location of a methane leak. Still, preliminary analysis and situation modeling improve UAV utilization. The number of variables considered when generating a flight path can either increase or decrease based on the results of large-scale simulations and field experiments.

Keywords: unmanned aerial vehicle, flight path, laser gas leakage detector, simulation model.

Cite this article: Maksudova S. A., Gavrilenko A. V. Efficient Paths for UAV-Based Gas Pipeline Leak Detection. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):33–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-4.

Введение

Природный газ метан является одним из основных видов топлива. При этом ключевым методом доставки к потребителю является газопровод. Любой газопровод должен обеспечивать надежную работу при транспортировке газа. Внештатные ситуации на линейных объектах могут нанести серьезный ущерб экологии из-за загрязнения окружающей среды, экономике — из-за потерь продукта, серьезные аварии могут привести к людским потерям.

В статье [1] представлен ряд методов обнаружения мест утечек газа на магистральных трубопроводах. Рассмотренные методы имеют ряд недостатков, которые связаны с временными затратами на обнаружение и невозможностью использования в отдаленных и труднодоступных местах. Применение беспилотных летательных аппаратов для обнаружения утечек метана на линейных газопроводах с использованием лазерных локаторов утечек газов может решить данную проблему.

Автор в статье [2] рассматривает вопрос применения БПЛА для оперативного получения информации о состоянии магистральных трубопроводов. В результате исследования делается вывод, что использование БПЛА даст возможность сэкономить время для обнаружения утечек. Рабочие службы смогут своевременно локализовать место аварии и предотвратить потенциальную техногенную катастрофу.

Эффективность применения БПЛА не вызывает сомнения, но при этом построение траектории полета БПЛА и возможность совершения им облета зависит от метеорологических показателей. Построение эффективной траектории полета — нетривиальная задача, которая может быть разбита на два этапа:

1. Построение траектории для первичного обнаружения утечки.
2. Локализация утечки с целью определения потенциально опасной зоны и предположительного центра области утечки.

В работе рассматривается БПЛА, содержащий в схеме управляющей системы лазерный локатор. Фазовый детектор в системе считывает, как луч отклоняется и рассеивается, и выдает значения в зависимости от результатов. Сделаем предположения, что лазерный локатор полностью повторяет траекторию движения летательного аппарата, частотная модуляция детектора 7 кГц [3]. Для возможности оценивания эффективности разработанного подхода для поиска траекторий движения БПЛА при решении задачи обнаружения утечек на линейных газопроводах создана симуляционная модель.

Построение траектории для первичного обнаружения утечки метана

В результате изучения задачи выяснилось, что выбирать среди различных вариантов траекторий одну не совсем оптимально, так как вероятность обнаружения утечки будет невысокой из-за сложного поведения метана при изменении метеоусловий. Следовательно, необходимо расставить точки маршрута в пространстве так, чтобы при построении траектории выстраивался наиболее оптимальный маршрут движения БПЛА с учетом направления и скорости ветра в текущий момент времени.

Одной из самых известных задач, заключающейся в поиске оптимального маршрута, является ***задача коммивояжера*** (рис. 1). В классической постановке задачи коммивояжеру необходимо найти кратчайший маршрут, начинающийся в стартовом городе и заканчивающийся в нем.

В связи с тем, что газопровод имеет большую протяженность и, как следствие, потенциально большое количество точек облета, в качестве метода решения задачи коммивояжера был выбран поисковый метод — генетический алгоритм (ГА). В результате тестирования методов, представленных в [4] на произвольных наборах исходных данных, выяснилось, что наиболее эффективен ГА и эвристический метод ближайшего соседа. При этом эвристические методы — бесспорные лидеры по быстродействию, но поисковые обеспечивают более высокое качество решений [5]. Обобщенная схема работы генетического алгоритма приведена на рис. 2. Данный алгоритм был применен при построении

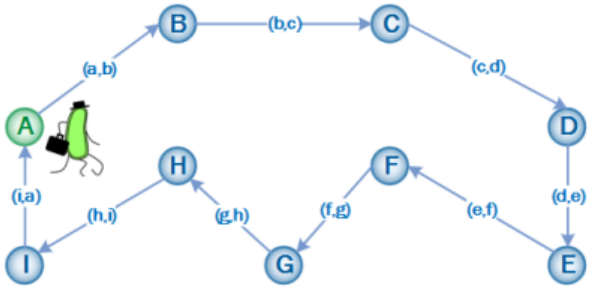


Рис. 1. *Пример представления задачи коммивояжера*

траектории для первичного облета БПЛА. Работа алгоритма начинается с генерации случайной начальной популяции — набор координат $\{x,y\}$. В нашем подходе в зависимости от направления и скорости ветра диапазон координат существенно меняется.

На втором этапе — селекция популяции. Происходит выбор тех комбинаций особей (траекторий), состоящий из набора координат, которые удовлетворяют решаемой задаче и будут учувствовать в создании потомков (траекторий). Каждая особь в популяции сортируется по возрастанию, от самого короткого пути до самого длинного. Традиционно проводится селекция половины особей. Вторая половина отсеивается, и на место «отбракованных» особей добавляются новые [6].

Третий этап — скрещивание двух или более индивидов (траекторий) с целью воспроизведения потомства и поиска новых решений [7].

Далее процесс мутации. Представляет собой небольшое случайное изменение в генотипе решения (в траектории).

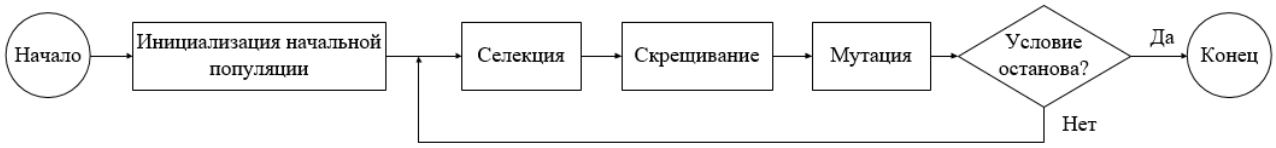


Рис. 2. *Обобщенная схема работы генетического алгоритма*

Процесс построения траектории пользователь может отслеживать в реальном времени и останавливать в любой момент. Сам алгоритм работает бесконечно или заданное время t. Пример работы алгоритма представлен на рисунке 3.

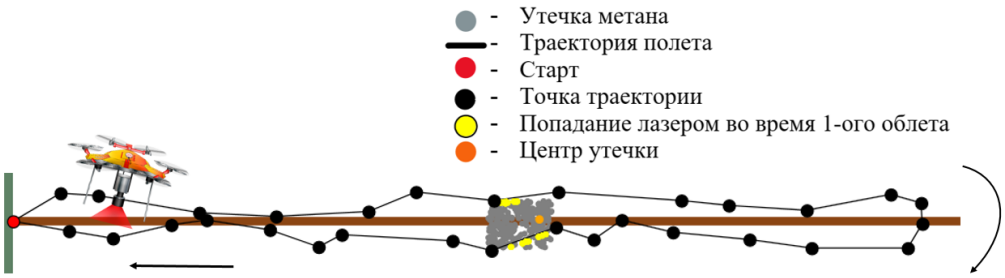


Рис. 3. *Пример построения траектории БПЛА с обнаружением утечки локатором*

В характеристиках БПЛА есть важный параметр — длина пути, которую может пролететь БПЛА при максимальной зарядке аккумулятора. Следовательно, необходимо учитывать длину пути БПЛА при облете территорий для своевременного возвращения БПЛА на базу для зарядки. Подход для расчета оценочной длины траектории представлен ниже.

Рассчитываться общее расстояние каждой особи из популяции будет с помощью евклидовой метрики. Евклидова метрика (евклидово расстояние) — расстояние между двумя точками евклидова пространства, вычисляемое по теореме Пифагора (рис. 4).

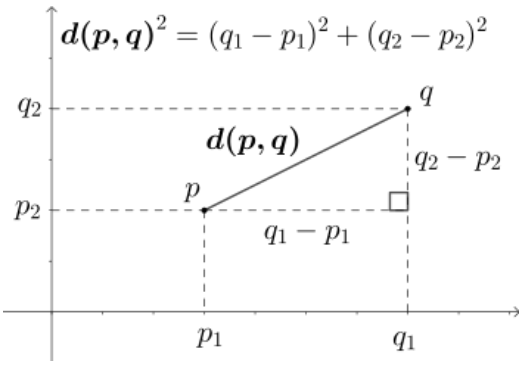


Рис. 4. *Использование теоремы Пифагора для вычисления евклидова расстояния на плоскости*

Для точек $p = (p_1, \ldots, p_n)$ и $q = (q_1, \ldots, q_n)$ евклидово расстояние определяется следующим образом:

$$d\,(p,q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \cdots + (p_n - q_n)^2} = \sqrt{\sum_{k-1}^{n} (p_k - q_k)^2}, \qquad (1)$$

где $d\,(p,q)$ — евклидово расстояние; $p = (p_1, \ldots, p_n)$ и $q = (q_1, \ldots, q_n)$ — координаты точек.

Локализация утечки с целью определения потенциально опасной зоны и предположительного центра области утечки

В симуляционной модели, кроме координат обнаружения метана при облете трубопровода, формируется предполагаемое облако утечки метана. Задача БПЛА — это не просто облет трубопровода, а фактически обнаружение утечки. Источник утечки может быть задан вручную или случайным образом. В зависимости от заданных параметров интенсивности утечки (в условных единицах) в модели создается облако метана, которое меняет форму в зависимости от силы и направления ветра. После облета местности по траектории, заданной с помощью алгоритма коммивояжера (первый облет местности), необходимо определить данную область, в которой образовалась утечка. Для этого необходимо изучить зону утечки подробнее, запустить вторую разведку.

В первом облете была выполнена начальная разведка пространства (местности) с целью определения наиболее перспективных точек. Для данной задачи перспективные точки — это координаты траектории движения БПЛА, вблизи которых была зафиксирована утечка после первого облета местности. В окрестностях выбранных точек производится локальная разведка в пределах заданного радиуса R с целью уточнения решения и локализации утечки (рис. 5).

В качестве наиболее перспективного метода локализации утечки применен роевой алгоритм, в частности, пчелиный. Общая стратегия представлена на рис. 5.

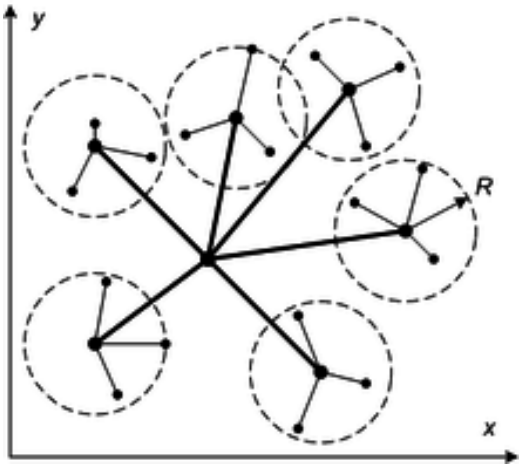


Рис. 5. *Стратегия разведки*

Наиболее перспективными точками для локализации утечки на втором этапе выбираются точки траектории, предшествующие обнаружению утечки и следующие за обнаруженными точками утечки. Величины радиусов (рис. 5) зависят от силы ветра. Графически пример результата работы алгоритма представлен на рис. 7.

После второго облета местности с помощью алгоритма пчелиной колонии становятся известны уточненные координаты задымления метаном. С помощью найденных координат можно определить приблизительный центр утечки. Центр утечки может не находиться на самом трубопроводе, так как ветер может значительно перемещать облако метана, но это позволяет оценить масштаб аварии. Будем использовать следующую упрощенную схему, достаточную для оценки центра утечки. Для этого из множества координат утечки можно найти минимальные и максимальные координаты по оси абсцисс и ординат: X_{min}, X_{max}, Y_{min}, Y_{max}.

На рис. 6 показано пересечение двух прямых на плоскости, где прямая L_1 определена двумя точками $(x_1 = X_{min}, y_1 = Y_{min})$ и $(x_2 = X_{max}, y_2 = Y_{max})$, а прямая L_2 – $(x_3 = X_{max}, y_3 = Y_{min})$ и $(x_4 = X_{min}, y_4 = Y_{max})$.

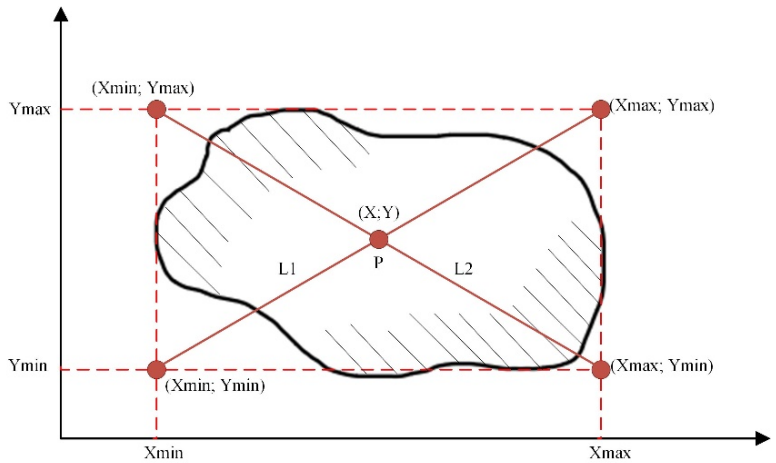


Рис. 6. *Облако утечки с зафиксированными координатами*

Пересечение P прямых L_1 и L_2 можно вычислить следующим образом:

$$\left(P_x, P_y\right) = \left(\begin{array}{c} \frac{(x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2)\cdot(x_3 - x_4) - (x_1 - x_2)\cdot(x_3 \cdot y_4 - y_3 \cdot x_4)}{(x_1 - x_2)\cdot(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)\cdot(x_3 - x_4)}, \\ \frac{(x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2)\cdot(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)\cdot(x_3 \cdot y_4 - y_3 \cdot x_4)}{(x_1 - x_2)\cdot(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)\cdot(x_3 - x_4)} \end{array} \right), \tag{2}$$

где x, y — координаты точек прямой, P_x, P_y — координата пересечения прямых.

Далее, для того чтобы определить область (радиус) задымления, необходимо найти евклидово расстояние с помощью уравнения (1) по оси абсцисс S_x и ординат S_y:

$$S_x = \frac{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}}{2}, \tag{3}$$

$$S_y = \frac{\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}}{2}. \tag{4}$$

После второго облета местности и последующего анализа данных получаем центр с координатами $\left(P_x, P_y\right)$ и радиус области исследования S_x и S_y.

Пример работы пчелиного алгоритма и последующих вычислений представлен на рисунке 7.

По итогам исследования с применением симуляционного моделирования были получены следующие результаты статистики первого (рис. 8, 9) и второго (рис. 11, 12) облетов.

На диаграмме (рис. 8) синим цветом обозначено среднее количество срабатываний лазерного локатора за один облет, всего облетов — оранжевым цветом, количество облетов, в которых утечка была обнаружена, — серым цветом. На диаграмме можно видеть изменение количества удачных облетов в зависимости от силы ветра.

Рис. 7. *Результат построения зоны облета БПЛА и выделения области утечки*

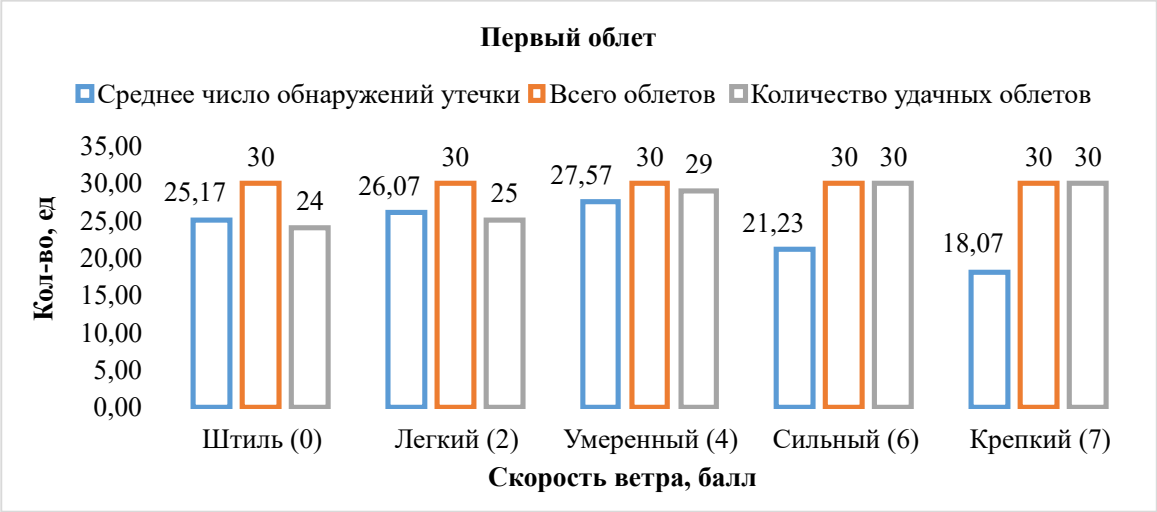


Рис. 8. *Диаграмма результатов первого облета на основе разработанного подхода*

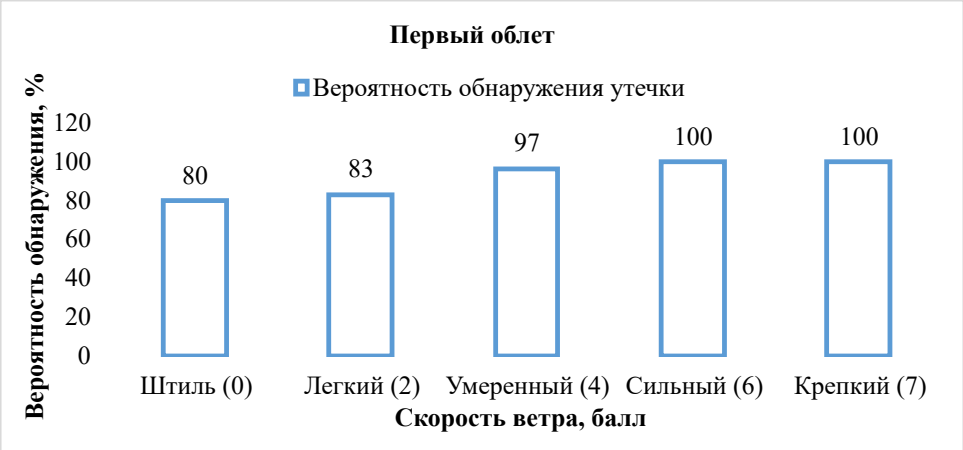


Рис. 9. *Диаграмма вероятности обнаружения утечек при первом облете на основе разработанного подхода*

По результатам симуляции первого облета можно отметить, что при показателе скорости ветра от 4 до 7 балов вероятность обнаружения утечки газа повышается в связи с увеличением площади распространения метана, в отличие от скорости ветра от 0 до 2 баллов.

Для сравнения рассмотрим вариант, при котором БПЛА двигается строго параллельно трубопроводу.

Таблица

Результаты первого облета при силе ветра 0 баллов, от 0 до 2 баллов и 6 баллов (движение параллельно трубопроводу)

Скорость ветра	Среднее число обнаружений утечки	Всего облетов	Количество удачных облетов	Вероятность обнаружения утечки
Штиль (0)	30,03	30	30	100
Легкий (2)	19,33	30	30	100
Сильный (6)	5,06	30	14	46,7

В таблице представлены показатели для описанной выше модели. Первые три показателя (среднее число обнаружений утечки, всего облетов, количество удачных облетов) аналогичны показателям рисунка 8, а последний — рисунка 9.

Рис. 10. *Диаграмма вероятности обнаружения утечек при первом облете при движении БПЛА параллельно трубопроводу*

Из приведенной статистики можно сделать вывод, что вероятность попадания лазером в облако утечки при отсутствии ветра либо при малой скорости ветра (до 2 баллов), если траектория полета БПЛА строится строго над траекторией расположения линейного газопровода, является более высокой в отличие от случая, когда используем рассмотренный в работе подход к определению эффективных траекторий для БПЛА в целях обнаружения утечек на газопроводах. Но для случая с достаточно сильным ветром (6 баллов) разработанный подход показывает большую эффективность, что следует из полученной вероятности 46,7 % при облете параллельно газопроводу (рис. 10) и вероятности 100 % при использовании разработанного подхода (рис. 9).

Рисунок 11 показывает, что использование пчелиного алгоритма при втором облете значительно повышает количество срабатываний лазерного детектора БПЛА. И это приводит к закономерному итогу (рис. 12).

Использование пчелиного алгоритма, который применяется на этапе локализации утечки, дало лучшие результаты по среднему числу обнаружений концентрации метана. С повышением скорости ветра увеличивается и расстояние от центра образования утечки на газопроводе до центра облака метана. Вероятность того, что центр области утечки метана, рассчитанный с помощью представленного

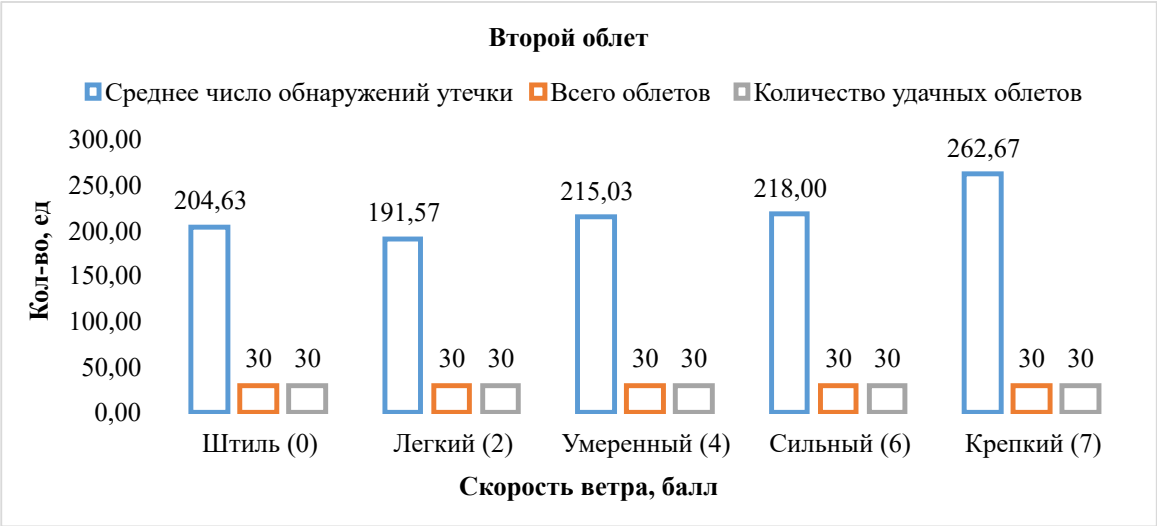


Рис. 11. *Диаграмма результатов облета при локализации области утечки с использованием пчелиного алгоритма*

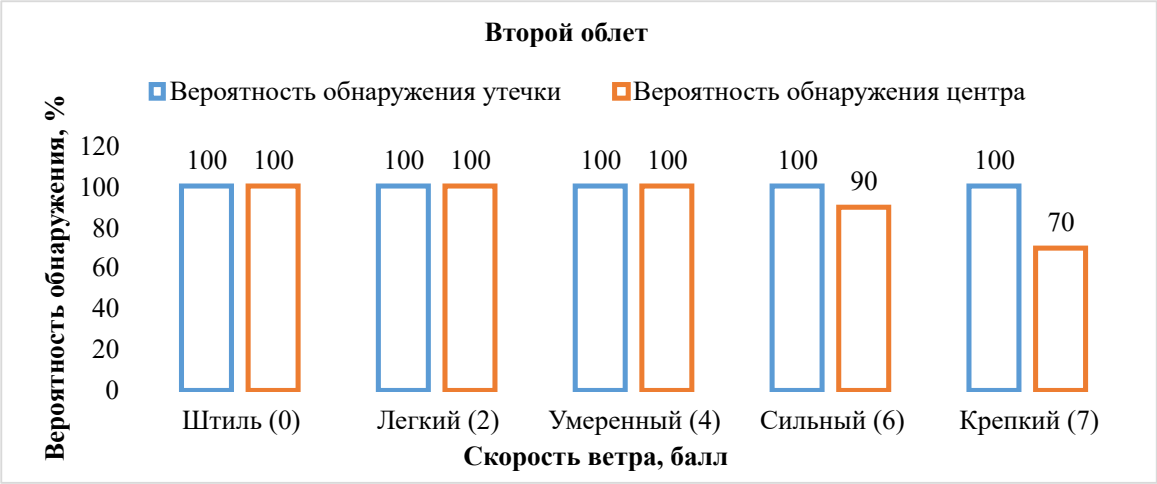


Рис. 12. *Диаграмма вероятности обнаружения области утечки и центра утечки*

подхода, попадет в фактический центр ее образования, начинает понижаться при скорости ветра от 6 и более баллов, хотя и остается приемлемой.

Текущие результаты симуляционного моделирования показывают существенное различие вероятности обнаружения утечки с последующей локализацией облака утечки при использовании разработанного подхода от вероятности обнаружения утечки при подходе с параллельным облетом газопровода. Можно отметить, что для метеоусловий с силой ветра 0–2 балла параллельное движение БПЛА относительно трубопровода показывает достаточную эффективность, но плохо работает при силе ветра от 4 баллов. В таком случае применение разработанного подхода обладает более высокой эффективностью.

В результате получена симуляционная модель поиска эффективных траекторий движения БПЛА. По результатам вычислительных экспериментов можно сделать вывод о достаточной эффективности выбранной модели, подхода и алгоритмов. Естественно, оператор БПЛА не может точно указать или даже предсказать место утечки метана, но предварительный анализ и ситуационное моделирование позволит использовать ресурс БПЛА с большей эффективностью. Количество учитываемых параметров по определению траектории движения может как увеличиться, так и уменьшиться по результатам масштабных симуляций и в последующем — натурных экспериментов [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Чупин В. Р., Гаськов Е. В., Майзель Д. И. Методы обнаружения утечек газа из магистральных трубопроводов. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость.* 2012;2:123–127. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-obnaruzheniya-utechek-gaza-iz-magistralnyh-truboprovodov/viewer.
2. Айроян З. А., Коркишко О. А., Сухарев Г. В. Мониторинг магистральных нефтепроводов с помощью беспилотных летательных аппаратов. *Инженерный вестник Дона*. 2016;4. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-magistralnyh-nefteprovodov-s-pomoschyu-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov/viewer.
3. Плюснин И. И., Бушмелева К. И., Майер И. В. Система диагностирования дефектов магистральных газопроводов с использованием ГИС-технологий. *Современные наукоемкие технологии*. 2005;8:46–48.
4. Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В., Румовская С. Б., Доманицкий А. А. *Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем* / Под ред. А. В. Колесникова. М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с. Режим доступа: http://www.raai.org/library/books/kolesnikov/kommivoyazher-2011_kolesnikov.pdf.
5. Борознов В. О. Исследование решения задачи коммивояжера. *Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика.* 2009;2. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-resheniya-zadachi-kommivoyazhera/viewer.
6. Долженко А. М. Уточнение решений задачи коммивояжера генетическими мутациями. *Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика.* 2013;2:9–15. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/utochnenie-resheniy-zadachi-kommivoyazhera-geneticheskimi-mutatsiyami/viewer.
7. Рудова И. Ш. Исследование влияния сильных мутаций при решении задачи коммивояжера модифицированной моделью Голдберга. *Известия ЮФУ. Технические науки.* 2017;3:140–148. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-silnyh-mutatsiy-pri-reshenii-zadachi-kommivoyazhera-modifitsirovannoy-modelyu-goldberga/viewer.
8. Gavrilenko A. V., Bushmeleva K. I., Gavrilenko M. T. A New Approach to Aircraft Flight Technology for Detecting Gas Leakage from Pipelines. *Information Innovative Technologies: Materials of the International Scientific-Practical Conference* / Ed. Uvaysov S. U., Ivanov I. A. M. Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022. P. 286–292.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-5

СИСТЕМА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ НЕИНВАЗИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАЦИЕНТА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОГО ХИРУРГА-ФЛЕБОЛОГА

Р. А. Чирко[а], Н. Р. Урманцева[б]
Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
[а] https://orcid.org/0000-0002-7581-918X, chirko-99@mail.ru
[б] https://orcid.org/0000-0001-9163-6132, nel-u@yandex.ru

Аннотация: в статье рассматривается система анализа результатов неинвазивных исследований пациента для поддержки принятия решений сердечно-сосудистого хирурга-флеболога. Программа будет помогать в принятии решений врачу-флебологу для определения кода классификации CEAP в спорных и сложных случаях путем распознавания загруженного в программу снимка формата DICOM сверточной нейронной сетью.

В процессе обучения нейронной сети использовался метод увеличения контрастности черно-белого DICOM-снимка. За счет этого метода нейронная сеть лучше обрабатывает снимок и выводит более точные результаты распознавания. Таким образом, среднее значение процента распознавания варьируется от 86,1 до 97,4 %.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, сверточная нейронная сеть, флебология, неинвазивные исследования, искусственный интеллект, DICOM-снимки.

Для цитирования: Чирко Р. А., Урманцева Н. Р. Система анализа результатов неинвазивных исследований пациента для поддержки принятия решений сердечно-сосудистого хирурга-флеболога. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):42–51. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-5.

NONINVASIVE EXAMINATION ANALYSIS SYSTEM FOR CARDIOVASCULAR SURGEON / PHLEBOLOGIST DECISION-MAKING SUPPORT

R. A. Chirko[a], N. R. Urmantseva[b]
Surgut State University, Surgut, Russian Federation
[a] https://orcid.org/0000-0002-7581-918X, chirko-99@mail.ru
[b] https://orcid.org/0000-0001-9163-6132, nel-u@yandex.ru

Abstract: this study discusses a system for analyzing noninvasive examination results to support the decision-making by a cardiovascular surgeon/phlebologist. The software helps the phlebologist in making decisions to determine the CEAP classification code in controversial and complicated cases. The system recognizes uploaded DICOM format images with a convolutional neural network.

Contrast enhancement of b/w DICOM images was applied for the neural network training. It improves the image handling and increases the recognition accuracy. The average recognition rate is from 86.1 to 97.4 %.

Keywords: decision support system, convolutional neural network, phlebology, noninvasive examination, artificial intelligence, DICOM images.

Cite this article: Chirko R. A., Urmantseva N. R. Noninvasive Examination Analysis System for Cardiovascular Surgeon / Phlebologist Decision-Making Support. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):42–51. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-5.

Введение

Отличительной особенностью нашего времени считаются интенсивные процессы информатизации почти во всех областях человеческой деятельности. С каждым годом объемы данных возрастают. В результате появляется необходимость в информационных системах, способных обрабатывать и хранить информацию в удобном для работы формате. К подобным системам, в первую очередь, следует отнести системы поддержки принятия решений, которые обеспечивают объективный анализ данных.

На текущий момент искусственный интеллект, а именно нейронные сети, широко используется в подобных системах в области медицины. СППР будет построена на базе сверточной нейронной сети, которая будет анализировать снимки формата DICOM и присваивать код классификации CEAP.

Значимость работы обусловлена тем, что в данный период времени отсутствуют системы, способные с помощью искусственного интеллекта анализировать и выдавать результат к DICOM-снимкам нижней полой вены, а неправильная классификация заболевания приводит к оперативному вмешательству в тех случаях, когда необходимость в нем отсутствует. Система поможет в процессе принятия решений и снизит загруженность врача.

Описание алгоритма

Для создания интеллектуального алгоритма были выбраны язык программирования Python, так как он содержит все необходимые для работы библиотеки, и сверточная нейронная сеть [1].

На вход в СППР подается снимок DICOM, задача интеллектуального алгоритма — распознать классификацию ХЗВ по CEAP и выдать на экран пользователю, в том числе врачу-флебологу, результат. Анализ осуществляется с помощью сверточной нейронной сети. Именно сверточная нейронная сеть способна дать более точный результат распознавания, нежели другие нейронные сети.

Сверточные нейронные сети обеспечивают частичную устойчивость к изменениям масштаба, смещениям, поворотам, смене ракурса и прочим искажениям. Сверточные нейронные сети объединяют три архитектурные идеи для обеспечения инвариантности к изменению масштаба, повороту, сдвигу и пространственным искажениям:

- локальные рецепторные поля (обеспечивают локальную двумерную связность нейронов);
- общие синаптические коэффициенты (обеспечивают детектирование некоторых черт в любом месте изображения и уменьшают общее число весовых коэффициентов);
- иерархическая организация с пространственными подвыборками.

На данный момент сверточная нейронная сеть и ее модификации считаются лучшими по точности и скорости алгоритмами распознавания образов. Начиная с 2012 года нейросети занимают первые места на известном международном конкурсе по распознаванию образов ImageNet [2].

CNN обычно имеет три уровня: сверточный слой, слой объединения и полностью связанный слой (рис. 1).

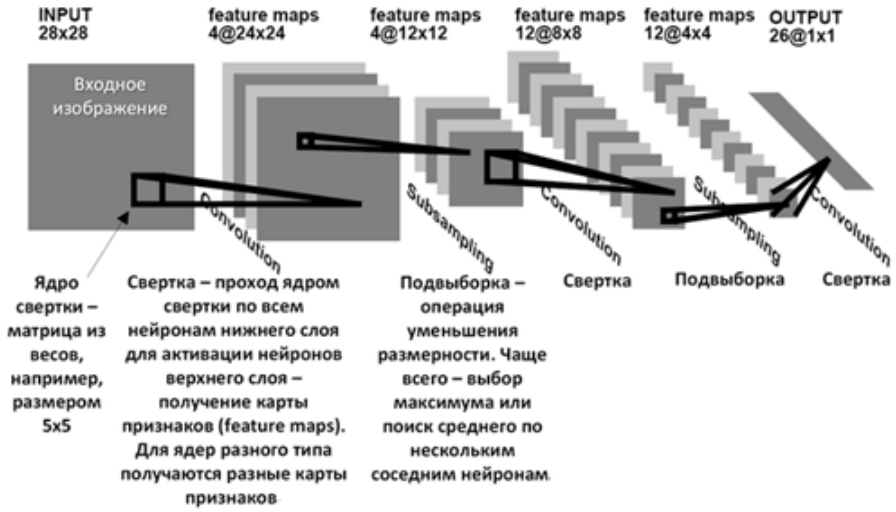


Рис. 1. *Архитектура CNN*

Сверточный слой является основным строительным блоком CNN. Он несет основную часть вычислительной нагрузки сети.

Этот уровень выполняет скалярное произведение между двумя матрицами, где одна матрица представляет собой набор обучаемых параметров, иначе называемых ядром, а другая матрица является ограниченной частью воспринимающего поля. Ядро пространственно меньше изображения, но имеет большую глубину. Это означает, что если изображение состоит из трех RGB-каналов, высота и ширина ядра будут пространственно малы, но глубина распространяется на все три канала.

Во время прямого прохода ядро скользит по высоте и ширине изображения, создавая представление изображения этой рецептивной области. Это формирует двумерное представление изображения, известное как карта активации (Activation), которая дает реакцию ядра в каждой пространственной позиции изображения. Скользящий размер ядра называется шагом.Если у нас есть входные данные размером WxWxD и количество ядер с пространственным размером F с шагом S и количеством отступов P, то размер выходного слоя можно определить по следующей формуле:

$$W_{out} = W - F + 2PS, \tag{1}$$

где W_{out} — размер выходного слоя, W — размер входного слоя, F — пространственный размер, P — число отступов, S — шаг.

Мы получим выходное разрешение $W_{out} * \ W_{out} * \ D_{out}$ (рис. 2).

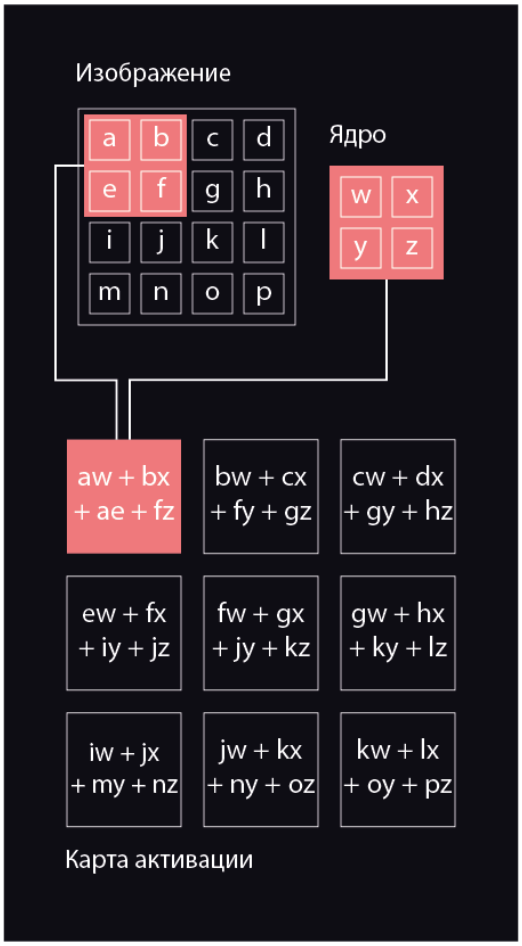


Рис. 2. *Свертка*

Свертка использует три важные идеи, которые мотивировали исследователей компьютерного зрения: разреженное взаимодействие, совместное использование параметров и эквивариантное (равноценное) представление.

Тривиальные слои нейронной сети используют результат перемножения матрицы на матрицу параметров, описывающих взаимодействие между входом и выходом. Это означает, что каждый блок вывода взаимодействует с каждым блоком ввода. Однако сверточные нейронные сети взаимодействуют разреженно. Это достигается за счет уменьшения размера ядра по сравнению с входными данными, например, изображение может иметь миллионы или тысячи пикселей, но при его обработке с использованием ядра мы можем обнаружить значимую информацию, состоящую из десятков или сотен пикселей. Это означает, что нам нужно хранить меньше параметров, что не только снижает потребность модели в памяти, но и повышает ее статистическую эффективность.

Слой пулинга (объединения) заменяет выходные данные сети в определенных местах, получая сводную статистику ближайших выходов. Это помогает уменьшить пространственный размер пред-

ставления, что уменьшает необходимое количество вычислений и весов. Операция объединения обрабатывается отдельно для каждого фрагмента представления [3].

Рис. 3. *Алгоритм работы программы*

Рис. 4. *Блок-схема алгоритма обучения нейронной сети*

CNN удобно использовать с помощью фреймворка от компании Google «TensorFlow», загружая в него датасет с изображениями DICOM-снимков [4].

Приведем алгоритм работы программы (рис. 3).

На вход в программу подается снимок, далее идет обработка и распознавание изображения.

Блок-схема алгоритма обучения нейронной сети представлена на рисунке 4.

Был собран DICOM-архив изображений нескольких пациентов для обучения нейронной сети. Следующий шаг – обработка снимков – их контрастирование для улучшения результата. Затем сним-

ки были отсортированы по классификации CEAP и загружены в нейронную сеть. На выходе была получена обученная модель нейронной сети.

Метод обработки DICOM-снимков

Основным препятствием в создании данной системы является отсутствие достаточного набора снимков для обучения модели. Но появилась идея сделать снимки более контрастными, т. к. основная проблема МРТ-снимков для нейронной сети заключается в том, что в них недостаточно контраста, и именно на получившихся снимках обучить нейронную сеть распознавать загруженный врачом в нее снимок (рис. 5–6). Таким образом, можно попытаться достичь более точного результата распознавания. Параметры контрастирования подбирались опытным путем, после чего нейронная сеть обучалась на получившихся снимках и выявлялись более удачные параметры.

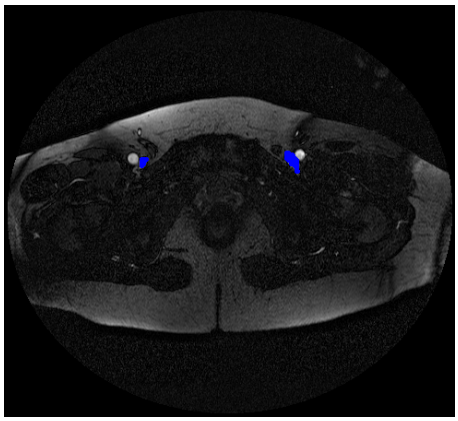


Рис. 5. *Исходный МРТ-снимок*

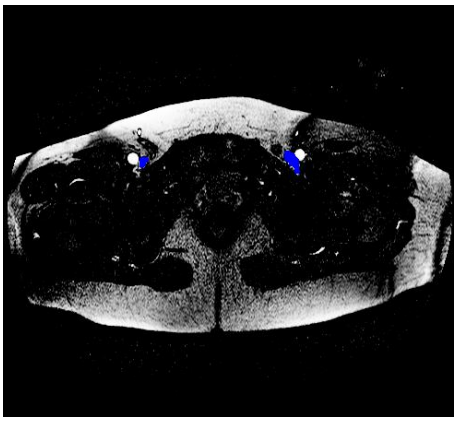


Рис. 6. *Увеличение контрастности МРТ-снимка*

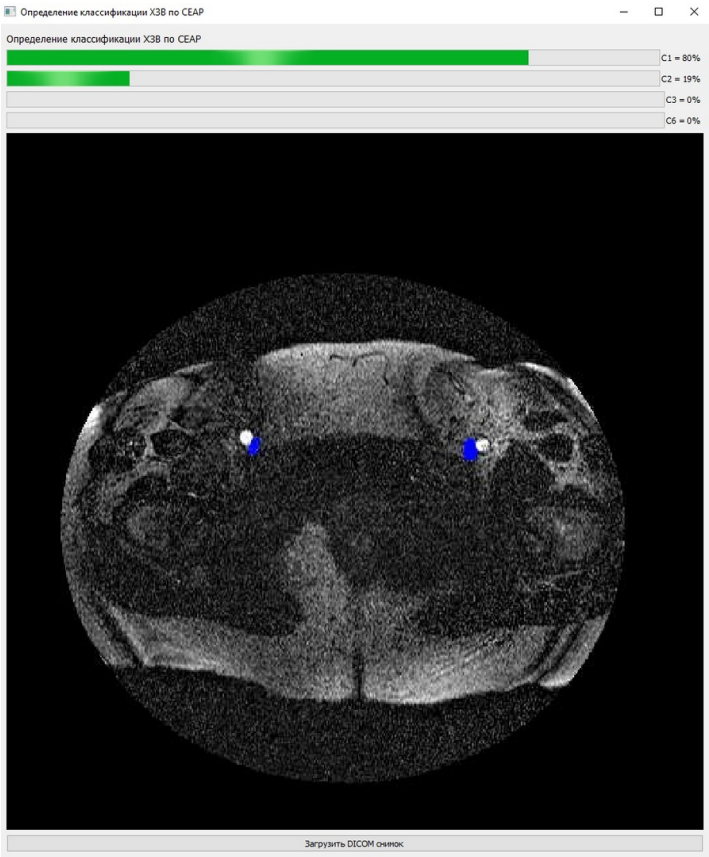


Рис. 7. *Результат работы программы*

Интерфейс системы

После запуска программы перед пользователем появляется главный рабочий экран.

Далее пользователю необходимо нажать на кнопку «Загрузить DICOM-снимок». После нажатия на кнопку откроется проводник, где пользователь может выбрать снимок, который необходимо проанализировать.

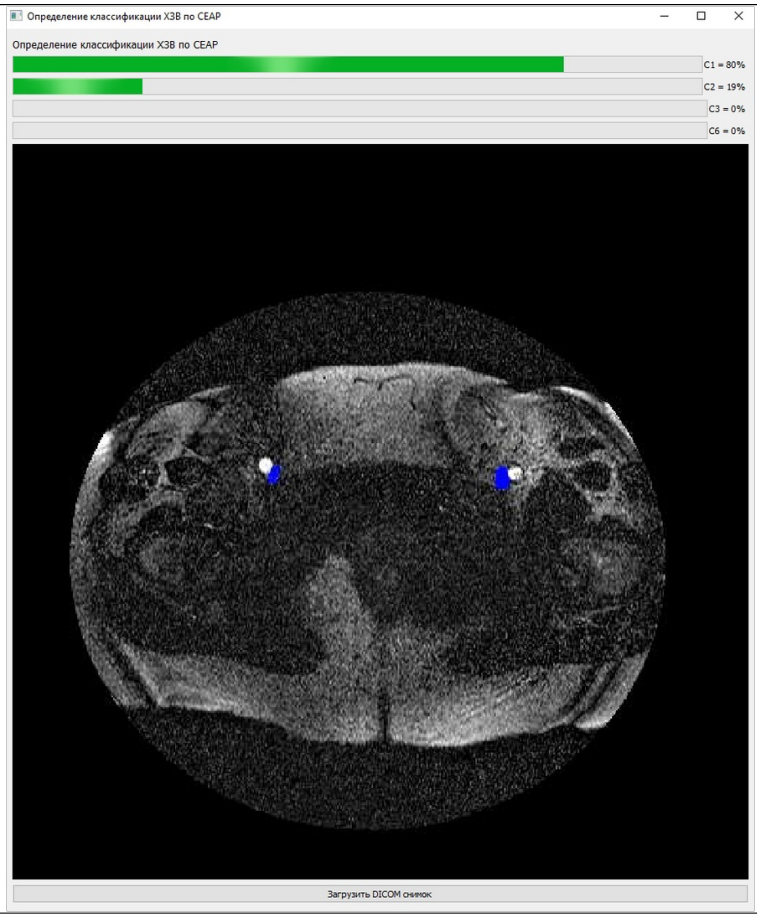
Затем, когда пользователь выберет снимок, программа автоматически применит фильтр к снимку, обрежет его и загрузит в обученную модель. Преобразования существенно влияют на результат распознавания. Затем перед пользователем открывается главный экран, где он наглядно видит результаты работы программы (рис. 7).

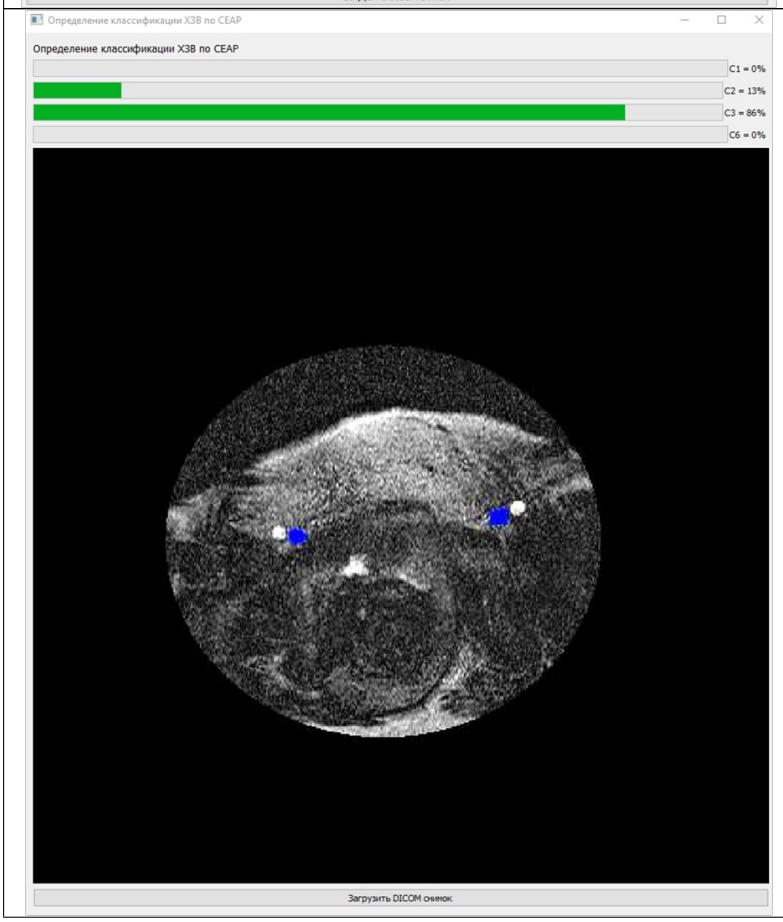
На экран выводится отконтрастированный снимок, который пользователь загрузил в программу, и результаты анализа снимка. Для большей визуализации были добавлены элементы progressbar, классификации и процент точности к каждой классификации. В данном случае программа выдала результат C1 = 80 %, C2 = 19 %, C3 = 0 %, C6 = 0 %. Это говорит о том, что у пациента случай C1 по классификации CEAP, и это верный результат.

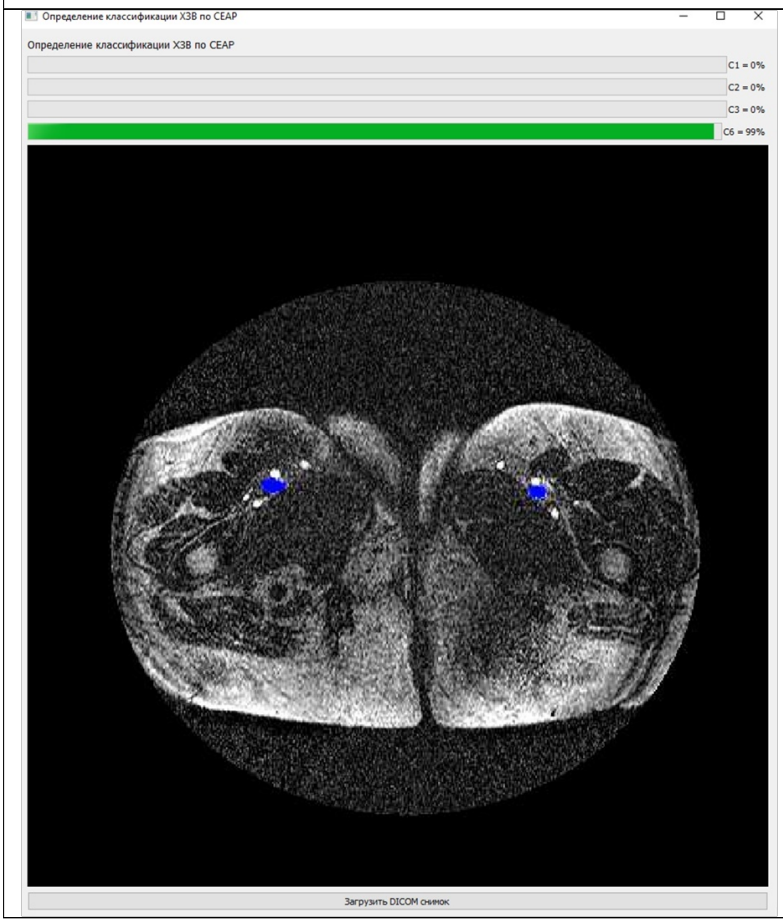
Для обучения модели было использовано порядка 1287 снимков разных пациентов. Для C1 — 180 снимков, для C2 — 930 снимков, для C3 — 81 снимок, для C6 — 96 снимков. Метод увеличения контрастности помог заметно улучшить результаты распознавания программой. Для тестирования работоспособности было выделено по 20 снимков для каждого случая, не использованных в обучении модели. Программа точно определяет каждый случай. Результаты работы программы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Демонстрация работы программы

Скриншот	Результат распознавания
	C1 = 80 % C2 = 19 % C3 = 0 % C6 = 0 %

Скриншот	Результат распознавания
	C1 = 3 % C2 = 96 % C3 = 0 % C6 = 0 %
	C1 = 0 % C2 = 13 % C3 = 86 % C6 = 0 %

Скриншот	Результат распознавания
	C1 = 0 % C2 = 0 % C3 = 0 % C6 = 99 %

Результат распознавания сохраняется в файл Microsoft Excel, где содержится информация о враче, пациенте и непосредственно о результате (рис. 8).

	A	B	C	D
1	Врач:	Пономарев	Александр	Георгиевич
2	Табельный номер:	3456		
3	Пациент:	Абрамов	Константин	Макарович
4	Код пациента:	53		
5	C1:	0%		
6	C2:	13%		
7	C3:	86%		
8	C6:	0%		
9	Дата:	23.06.2022		

Рис. 8. *Отчет о результате распознавания*

Программа была протестирована на оригинальных снимках, без разметки вен, результаты оказались также верными.

Тестирование и оценка эффективности программы

Для тестирования программы было выделено по 10 снимков на каждый случай, не участвовавших в обучении нейронной сети. Результаты тестирования представлены в таблицах 2–5.

Для оценки эффективности распознавания каждого класса СЕАР усредним вероятности, полученные в результате проведения десяти экспериментов.

Таким образом, можно сделать вывод, что программа достаточно корректно классифицирует каждый случай. Минимальное среднее значение получилось равным 86,1 %, что на данном этапе говорит о высокой эффективности распознавания нейронной сетью.

Таблица 2

Результаты тестирования снимков С1

Классификация по CEAP	Снимок 1, %	Снимок 2, %	Снимок 3, %	Снимок 4, %	Снимок 5, %	Снимок 6, %	Снимок 7, %	Снимок 8, %	Снимок 9, %	Снимок 10, %
С1	80	82	81	85	99	70	99	99	84	82
С2	19	17	18	14	0	30	0	0	15	17
С3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
С6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$P_{\text{ср.с1}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{i_{c1}}}{n} = 86{,}1\ \%$$

Таблица 3

Результаты тестирования снимков С2

Классификация по CEAP	Снимок 1, %	Снимок 2, %	Снимок 3, %	Снимок 4, %	Снимок 5, %	Снимок 6, %	Снимок 7, %	Снимок 8, %	Снимок 9, %	Снимок 10, %
С1	12	13	16	3	15	0	0	0	0	0
С2	78	86	83	96	84	78	99	99	99	99
С3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
С6	8	0	0	0	0	20	0	0	0	0

$$P_{\text{ср.с2}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{i_{c2}}}{n} = 90{,}1\ \%$$

Таблица 4

Результаты тестирования снимков С3

Классификация по CEAP	Снимок 1, %	Снимок 2, %	Снимок 3, %	Снимок 4, %	Снимок 5, %	Снимок 6, %	Снимок 7, %	Снимок 8, %	Снимок 9, %	Снимок 10, %
С1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
С2	13	0	1	0	0	0	0	0	1	0
С3	86	99	98	99	99	99	99	99	98	98
С6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$P_{\text{ср.с3}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{i_{c3}}}{n} = 97{,}4\ \%$$

Таблица 5

Результаты тестирования С6

Классификация по CEAP	Снимок 1, %	Снимок 2, %	Снимок 3, %	Снимок 4, %	Снимок 5, %	Снимок 6, %	Снимок 7, %	Снимок 8, %	Снимок 9, %	Снимок 10, %
С1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
С2	0	0	0	1	0	3	13	4	1	0
С3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
С6	99	99	99	98	99	96	86	95	98	99

$$P_{\text{ср.с6}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{i_{c6}}}{n} = 96{,}8\ \%$$

Заключение

В данной статье была представлена система поддержки принятия решений на базе сверточной нейронной сети для врача-флеболога. Новизна и актуальность этой разработки заключается в том, что в данный период времени отсутствуют системы, способные с помощью искусственного интеллекта анализировать DICOM-снимки нижней полой вены, а неправильная классификация заболевания при-

водит к оперативному вмешательству в тех случаях, когда необходимость в нем отсутствует.

С помощью метода увеличения контрастности DICOM-снимков удалось улучшить результаты распознавания и классификации изображений нейронной сетью.

В дальнейшем планируется продолжить разработку программы, расширение функционала, переход на web-приложение в связи с тем, что для вычислений результатов нейронной сетью требуются ресурсы ПК. Переход на web-приложение поможет существенно снизить нагрузку на рабочий ПК врача-флеболога.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таршхоева Ж. Т. Язык программирования Python. Библиотеки Python. *Молодой ученый*. 2021;5:20–21. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=44667958.
2. Ле Мань Ха. Сверточная нейронная сеть для решения задачи классификации. *Труды МФТИ.*2016;8(3):91–97.
3. Mayank Mishra. *Сверточная нейронная сеть (CNN)*. Режим доступа: https://www.helenkapatsa.ru/sviortochnaia-nieironnaia-siet/.
4. *TensorFlow.* Режим доступа: https://www.tensorflow.org/.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-6

БИ-БЕСКОНЕЧНЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АВТОМАТ

Г. Е. Деев[а], С. В. Ермаков[б]
Обнинский институт атомной энергетики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация,
[а] georgdeo@mail.ru, [б] ermakov@iate.obninsk.ru

Аннотация: на основе свойства экстравертности построен и рассмотрен абстрактный автомат, осуществляющий умножение на $3_{(4)}$ в четверичной системе счисления; помимо этого, он вычисляет бесконечное число родственных операций. Умножитель на $3_{(4)}$ взят для примера из-за его простоты. Устройство бесконечно, отчего оно является, в первую очередь, объектом теоретического исследования. Тем не менее оно имеет и практическую ценность, поскольку с его помощью обнаруживаются возможности реальных вычислительных процессов. В частности, решается вопрос о максимально быстрых вычислениях. Устройство по своей конструкции необычно, т.к. представляет собой Т-образный крест двух бесконечностей: бесконечности по состояниям («горизонтальная» бесконечность) и бесконечности по входному алфавиту («вертикальная» бесконечность), откуда и проистекает название: би-бесконечный. Аналогичные би-бесконечные устройства порождаются многими другими важнейшими вычислительными устройствами. Поэтому переход к би-бесконечности позволяет осуществить углубленное проникновение в суть вычислительных процессов. Конечные срезы всех би-бесконечных устройств реализуемы в В-технологии.

Ключевые слова: числоид, экстравертность по состояниям, экстравертность по входному алфавиту, ядро автомата, основная вычисляемая функция, сопутствующие функции, корневая часть буквы, префикс, алфавитные секции.

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-07-00862.

Для цитирования: Деев Г. Е., Ермаков С. В. Би-бесконечный вычислительный автомат. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):52–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-6.

BI-INFINITE CALCULATING AUTOMATON

G. E. Deev[a], S. V. Ermakov[b]
Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University MEPhI, Obninsk, Russian Federation
[a] georgdeo@mail.ru, [b] ermakov@iate.obninsk.ru

Abstract: using the concept of extroversion, we designed and studied an abstract automaton that performs multiplication by $3_{(4)}$ in the quadratic number system; besides, it computes an infinite number of related operations. The multiplier by $3_{(4)}$ is used as an example for simplicity. The device is infinite, so the research is mostly theoretical. Nevertheless, it also has some practical value because it reveals the capabilities of real-life computational processes. In particular, it helps find the fastest possible calculations. The device design is unusual. It is a T-shaped cross of two infinities: the infinity of the states (“horizontal”) and the infinity of the input alphabet (“vertical”). That is why the name: bi-infinity automation. Similar bi-infinite devices are generated by many other critical computing devices. Therefore, the transition to bi-infinity helps better understand the essence of computational processes. B-technology can implement some finite slices of each bi-infinite device.

Keywords: numberid, extroversion by states, extroversion by input alphabet, automaton kernel, main computable function, associated functions, the root part of letter, prefix, alphabetic sections.

Acknowledgements: this work is as supported by the Russian Fund for Basic Research grant 20-07-00862.

Cite this article: Deev G. E., Ermakov S. V. Bi-Infinite Calculating Automaton. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):52–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-6.

Умножитель на $3_{(4)}$

Без ограничения общности изложение ведется в четверичной системе счисления. Для произвольного вычислительного устройства используется общее обозначение $f(\bar{x})|\bar{q}_{(k)}$, где $f(\bar{x})$ — основная вычисляемая функция, $\bar{x}$ — операнд, $\bar{x} = \overleftarrow{\tau} x_r \ldots x_1 x_0$, $\tau = 0 \vee k-1$, $\bar{q}$ — состояние, $\bar{q} \in Q$, Q — множество состояний, $x \in Z_{(k)} = \{0,1,\ldots,k-1\}$ — множество цифр, k — основание системы счисления. Если $Q = \emptyset$, то вычислительное устройство называется *комбинационной схемой*; если $Q \neq \emptyset$, то *автоматом*. Вычисление, выполняемое автоматом в каждый момент времени, может быть изображено схемой $\bar{q},x \to \bar{q}',y$, где $\bar{q}$ — состояние, в котором находится автомат в данный момент времени, x — входной сигнал, поступивший в тот же момент времени, $\bar{q}'$ — состояние, в которое переходит автомат в следующий момент времени, y — выходной сигнал, появившийся на выходе автомата в данный момент времени. Этой схеме соответствует диаграмма, используемая далее в развертках:

$$\begin{array}{ccc} & & x \\ & & | \\ \bar{q}' & \leftarrow & \bar{q} \\ & & \downarrow \\ & & y \end{array}$$

Схема и диаграмма соответствуют одной из возможных трактовок автомата Миля. Удобство данного подхода состоит в разрядном соответствии цифр входа и выхода.

Умножитель на три обозначается $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, где $3 \cdot \bar{x}$ — основная вычисляемая функция; остальные вычисляемые функции (сопутствующие функции) связаны с основной и зависят от состояния. Способы задания умножителя: формульный, табличный и с помощью B-схемы.

Формульное задание умножителя

$$\begin{cases} \theta\bar{q}x = \rangle 3 \cdot x + \bar{q} \langle, \\ \sigma\bar{q}x = \langle 3 \cdot x + \bar{q} \rangle, \end{cases} \tag{1}$$

θ — функция переходов, σ — функция выходов, $x \in Z_{(4)} = \{0,1,2,3\}$ — множество цифр, $\bar{q} \in Q_3 = \left\{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2\right\}$ — множество состояний, $3 = \overleftarrow{0}3 \in N_0 = \left\{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2, \overleftarrow{0}3, \ldots\right\}$, $\left\langle \overleftarrow{0} x_n \ldots x_1 x_0 \right\rangle = x_0$, $\rangle \overleftarrow{0} x_n \ldots x_1 x_0 \langle = \overleftarrow{0} x_n \ldots x_1$ — функции отрыва.

Вычисление основной функции происходит при постановке умножителя в начальное состояние $\bar{q} = \overleftarrow{0}$ (см. пример далее) и выполняется по схеме: $\bar{q},x \to \bar{q}' = \theta\bar{q}x, y = \sigma\bar{q},x$.

Табличное задание умножителя

Таблица 1

Автомат $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, $Q_3 = \left\{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2\right\}$

x \ q	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}2$
0	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$
1	$\overleftarrow{0},3$	$\overleftarrow{0}1,0$	$\overleftarrow{0}1,1$
2	$\overleftarrow{0}1,2$	$\overleftarrow{0}1,3$	$\overleftarrow{0}2,0$
3	$\overleftarrow{0}2,1$	$\overleftarrow{0}2,2$	$\overleftarrow{0}2,3$

Задание умножителя с помощью B-схемы см. на рисунке 1.

У автомата три состояния. На схеме состояния изображены горизонтальными коробочками из четырех элементов &. Автомат умножает на три. Убедимся в этом на примере. Пусть $\bar{x} = \overleftarrow{0}32103$. Тогда развертка, отражающая вычисление, имеет вид:

0	$t > 5$	5	4	3	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	3	2	1	0	3	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}2$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}2$	$\overleftarrow{0}$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{0}$	2	2	2	3	2	1	y

Пишем результат: $3 \cdot \overleftarrow{0}32103|\overleftarrow{0} = \overleftarrow{0}222321$.

Правильность выполненного вычисления подтверждается «школьным» умножением:

$$\begin{array}{cccccccc}
 & & {}^{2} & {}^{1} & {}^{0} & {}^{0} & {}^{2} & \\
 & \overleftarrow{0} & 0 & 3 & 2 & 1 & 0 & 3 \\
\times & & & & & & & \\
 & & & & & & & 3 \\
\hline
 & \overleftarrow{0} & 2 & 2 & 2 & 3 & 2 & 1 \quad ,
\end{array}$$

где маленькие цифры наверху — цифры переноса.

Экстравертность по состояниям

Экстравертность — это способность устройства производить действия, иные по отношению к действиям, которые являются основными, целевыми. Дополнительные действия можно назвать сопутствующими. По-видимому, эта способность присуща большинству функционирующих объектов.

В связи с умножителем $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$ она проявляется в том, что *любой* процесс синтеза, имеющий целью построить вычислительное устройство, осуществляющее умножение $3 \cdot \bar{x}$, приводит нас к единственному минимальному устройству, заданному таблицей 1, которое имеет три состояния, и лишь при постановке его в состояние $\bar{q} = \overleftarrow{0}$ в качестве начального оно вычисляет основную функцию $f(x) = 3 \cdot \bar{x}$, ради которой оно и создавалось. При постановке же в другие состояния устройство выполняет другие действия, которые не имелись в виду при его проектировании. При постановке в

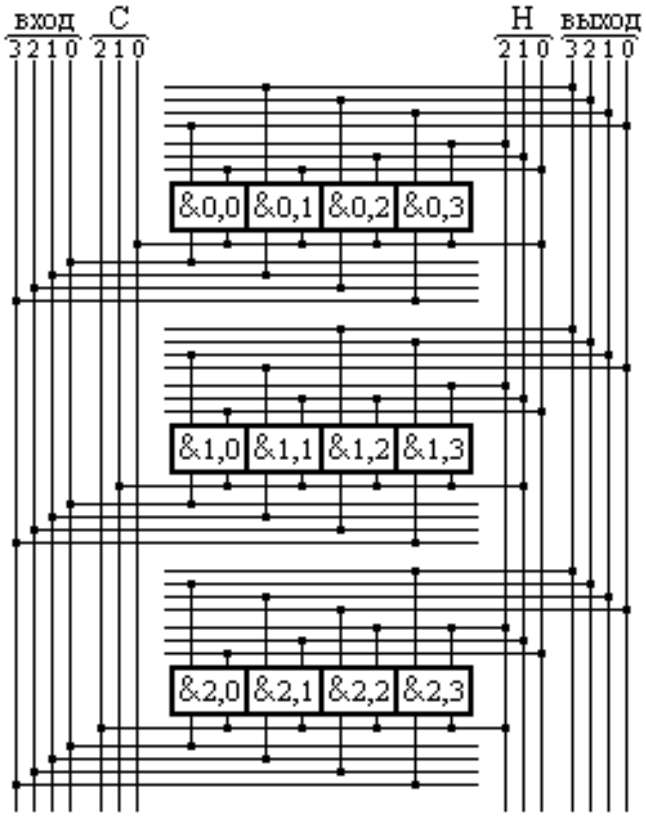


Рис. 1. *B-схема умножителя* $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$

состояние $\bar{q} = \overleftarrow{0}\,1$ устройство вычисляет функцию $f_1(x) = 3 \cdot \bar{x} + 1$, а при постановке в состояние $\bar{q} = \overleftarrow{0}\,2$ устройство вычисляет функцию $f_2(x) = 3 \cdot \bar{x} + 2$. Функции $f_1(x) = 3 \cdot \bar{x} + 1$ и $f_2(x) = 3 \cdot \bar{x} + 2$ не имелись в виду при проектировании устройства $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$. По-видимому, есть нечто глубинное, что скрывается от нашего внимания при решении задачи синтеза и что проявляет себя в появлении сопутствующих функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$. Заметим, что устройство минимально, т. к. удаление любого из состояний приводит к невозможности вычислять основную функцию. *Экстравертность устройства* $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$ *проявляется в способности вычислять две новые функции.*

Но оказывается, что экстравертность, проявляющая себя в минимальном устройстве $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, является лишь «затравочной» экстравертностью, ибо, если обратиться к формульному заданию (1) устройства $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, то выясняется, что формульное задание имеет смысл и определяет вычислительное устройство при $\bar{q}$, входящих не только в первоначально порожденное множество $Q_3 = \left\{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}\,1, \overleftarrow{0}\,2\right\}$, но и во множество натуральных чисел $Q = N_0 = \left\{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}\,1, \overleftarrow{0}\,2, \ldots\right\}$. Тем самым автомат $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, первоначально определенный лишь для состояний из множества $Q_3 = \left\{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}\,1, \overleftarrow{0}\,2\right\}$, порождает новый автомат, способный вести вычисления при любом начальном состоянии из множества $Q = N_0 = \left\{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}\,1, \overleftarrow{0}\,2, \ldots\right\}$. Это бесконечный автомат, вычисляющий из состояний $\bar{q} \in Q = N_0 = \left\{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}\,1, \overleftarrow{0}\,2, \ldots\right\}$ новую функцию $f_{\bar{q}}(x) = 3 \cdot \bar{x} + \bar{q}$. Более того, формульное задание (1) устройства $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$ работает и в том случае, когда величине $\bar{q}$ придаются значения не только из множества натуральных чисел, но и из множества всех целых чисел $Q = Z = \left\{\ldots, \overleftarrow{3}\,1, \overleftarrow{3}\,2, \overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}\,1, \overleftarrow{0}\,2, \ldots\right\}$. Получающийся при этом бесконечный автомат имеет табличное задание, представленное таблицей 2. В таблице выделено так называемое *ядро автомата.* Ядро обладает большой «притягивающей силой». Это означает, что если автомат поставить в начальное состояние, не совпадающее с состояниями ядра, то автомат довольно быстро попадет в одно из состояний ядра и больше никогда из ядра не выйдет. Отсюда понятно, что в процессе вычислений основная вычислительная нагрузка приходится на ядро, в основном «греется» ядро. Очевидно, что ядро бесконечного автомата совпадает с исходным автоматом, заданным таблицей 1.

Таблица 2

Автомат $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, $\bar{q} \in Q = Z = \left\{\ldots, \overleftarrow{3}\,1, \overleftarrow{3}\,2, \overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}\,1, \overleftarrow{0}\,2, \ldots\right\}$

x \ $\bar{q}$	…	$\overleftarrow{3}\,23$	$\overleftarrow{3}\,0$	$\overleftarrow{3}\,1$	$\overleftarrow{3}\,2$	$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}\,1$	$\overleftarrow{0}\,2$	$\overleftarrow{0}\,3$	$\overleftarrow{0}\,10$	$\overleftarrow{0}\,11$	…
0	…	$\overleftarrow{3}\,2{,}3$	$\overleftarrow{3}\,{,}0$	$\overleftarrow{3}\,{,}1$	$\overleftarrow{3}\,{,}2$	$\overleftarrow{3}\,{,}3$	$\overleftarrow{0}\,{,}0$	$\overleftarrow{0}\,{,}1$	$\overleftarrow{0}\,{,}2$	$\overleftarrow{0}\,{,}3$	$\overleftarrow{0}\,1{,}0$	$\overleftarrow{0}\,1{,}1$	…
1	…	$\overleftarrow{3}\,{,}2$	$\overleftarrow{3}\,{,}3$	$\overleftarrow{0}\,{,}0$	$\overleftarrow{0}\,{,}1$	$\overleftarrow{0}\,{,}2$	$\overleftarrow{0}\,{,}3$	$\overleftarrow{0}\,1{,}0$	$\overleftarrow{0}\,1{,}1$	$\overleftarrow{0}\,1{,}2$	$\overleftarrow{0}\,1{,}3$	$\overleftarrow{0}\,2{,}0$	…
2	…	$\overleftarrow{0}\,{,}1$	$\overleftarrow{0}\,{,}2$	$\overleftarrow{0}\,{,}3$	$\overleftarrow{0}\,1{,}0$	$\overleftarrow{0}\,1{,}1$	$\overleftarrow{0}\,1{,}2$	$\overleftarrow{0}\,1{,}3$	$\overleftarrow{0}\,2{,}0$	$\overleftarrow{0}\,2{,}1$	$\overleftarrow{0}\,2{,}2$	$\overleftarrow{0}\,2{,}3$	…
3	…	$\overleftarrow{0}\,1{,}0$	$\overleftarrow{0}\,1{,}1$	$\overleftarrow{0}\,1{,}2$	$\overleftarrow{0}\,1{,}3$	$\overleftarrow{0}\,2{,}0$	$\overleftarrow{0}\,2{,}1$	$\overleftarrow{0}\,2{,}2$	$\overleftarrow{0}\,2{,}3$	$\overleftarrow{0}\,3{,}0$	$\overleftarrow{0}\,3{,}1$	$\overleftarrow{0}\,3{,}2$	…

Проиллюстрируем сказанное на примерах.

Пример 1. Пусть $\bar{x} = \overleftarrow{0}\,32123$, $\bar{q} = \overleftarrow{0}\,32$.

Выбранное начальное состояние $\bar{q} = \overleftarrow{0}\,32$ находится за пределами таблицы 2, поэтому фигурирующие в последующей развертке состояния, если они не находятся в таблице, вычисляются по формульному заданию (1) автомата. Развертка, следящая за вычислением, такова.

0	$t > 5$	5	4	3	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	3	2	1	2	3	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}\,2$	$\overleftarrow{0}\,1$	$\overleftarrow{0}\,1$	$\overleftarrow{0}\,2$	$\overleftarrow{0}\,11$	$\overleftarrow{0}\,32$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{0}$	2	2	3	1	3	3	y

Видно, что уже при $t = 2$ автомат попадает в ядро и больше из него не выходит. Пишем результат:

$$3 \cdot \overleftarrow{0}\,32123|\overleftarrow{0}\,32 = \overleftarrow{0}\,223133 = \overleftarrow{0}\,223101 + \overleftarrow{0}\,32 = 3 \cdot \overleftarrow{0}\,32123|\overleftarrow{0} + \overleftarrow{0}\,32.$$

Заметив, что $3 \cdot \overleftarrow{0}\,32123|\overleftarrow{0} = \overleftarrow{0}\,223101$, приходим к выводу, что подтверждается закон $3 \cdot \bar{x}|\bar{q} = 3 \cdot \bar{x}|\overleftarrow{0} + \bar{q}$, представляющий собой *экстравертность по состояниям.*

Пример 2. Пусть $\bar{x} = \overleftarrow{0}\,32123$, $\bar{q}' = \overleftarrow{3}\,02$.

Выбранное в качестве начального состояние $\bar{q}' = \overleftarrow{3}\,02$ является отрицательным состоянием и находится в бесконечной таблице за пределами слева от изображенной части таблицы 2. Отметим, что числа $\bar{q} = \overleftarrow{0}\,32$ и $\bar{q}' = \overleftarrow{3}\,02$ противоположны: $\bar{q} + \bar{q}' = \overleftarrow{0}$.

Развертка для начального состояния $\bar{q}' = \overleftarrow{3}\,02$ такова.

0	$t > 5$	5	4	3	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	3	2	1	2	3	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}\,2$	$\overleftarrow{0}\,1$	$\overleftarrow{0}\,1$	$\overleftarrow{0}\,1$	$\overleftarrow{3}\,2$	$\overleftarrow{3}\,02$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{0}$	2	2	3	0	0	3	y

И здесь видно, что при $t = 2$ автомат попадает в ядро и больше из него не выходит. Пишем результат:

$$3 \cdot \overleftarrow{0}\,32123|\overleftarrow{3}\,02 = \overleftarrow{0}\,223003 = \overleftarrow{0}\,223101 + \overleftarrow{3}\,02 = 3 \cdot \overleftarrow{0}\,32123|\overleftarrow{0} + \overleftarrow{3}\,02,$$

т. е. еще раз подтверждается закон $3 \cdot \bar{x}|\bar{q} = 3 \cdot \bar{x}|\overleftarrow{0} + \bar{q}$, представляющий собой *экстравертность по состояниям.*

Найдем сумму $3 \cdot \bar{x}|\bar{q} + 3 \cdot \bar{x}|\bar{q}'$. В силу противоположности чисел $\bar{q}$ и $\bar{q}'$ она должна быть равна удвоенной величине $3 \cdot \bar{x}|\bar{0}$. И действительно,

$$3 \cdot \bar{x}|\bar{q} + 3 \cdot \bar{x}|\bar{q}' = \overleftarrow{0}\,223133 + \overleftarrow{0}\,223003 = \overleftarrow{0}\,1112202 = \overleftarrow{0}\,223101 + \overleftarrow{0}\,223101 = 3 \cdot \bar{x}|\overleftarrow{0} + 3 \cdot \bar{x}|\overleftarrow{0}.$$

Таким образом, *экстравертность по состояниям*, потенциально содержащаяся в минимальном автомате $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}$, проявлена *в полном объеме* и привела нас к *бесконечному* автомату с основной вычисляемой функцией $f(x) = 3 \cdot \bar{x}$.

Экстравертность по входному алфавиту

В скрытом виде экстравертность по входному алфавиту содержится во всех трех видах задания автоматов, но при задании с помощью формул или с помощью B-схем требуется слишком большая прозорливость, чтобы ее обнаружить. Наиболее удобным инструментом для обнаружения экстравертности по алфавиту является табличный способ задания автоматов. Обращаясь конкретно к автомату $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, мы находим закономерности, присущие его табличному заданию, с помощью таблицы 3.

Первая секция этой таблицы (секция $s = 1$), по определению, соответствует цифрам входного алфавита $x \in Z_{(4)} = \{0,1,2,3\}$ и отделена от последующих секций жирной горизонтальной чертой сразу после цифры 3.

Следующая — *вторая секция* ($s = 2$) соответствует наборам пар цифр $x_2x_1 \in Z^2_{(4)}$ входного алфавита $Z^2_{(4)} = \{00,01,02,03,10,11,...,22,23,30,31,32,33\}$ — декартова произведения $Z^2_{(4)}$. Эта секция также отделяется от последующих жирной горизонтальной чертой. Первая (верхняя) строка этой секции совпадает, по существу, со строкой состояний, в состояниях которой отделены две младшие цифры. Вычислительная особенность второй секции состоит в том, что она описывает вычисления, когда на вход устройства цифры поступают парами и вычисление в любой момент времени происходит согласно следующей далее схеме, в которой x_1 — младшая цифра пары входа, x_2 — старшая; $\langle 3 \cdot x_1 + \bar{q}\rangle$ — младшая цифра пары цифр результата, $\langle 3 \cdot x_2 + \rangle 3 \cdot x_1 + \bar{q}\langle\rangle$ — старшая цифра пары цифр результата, а $\rangle 3 \cdot x_2 + \rangle 3 \cdot x_1 + \bar{q}\langle\langle$ — новое состояние, в которое переходит би-бесконечный автомат.

$$
\begin{array}{ccc|c}
t{+}1 & t & & t \\
\hline
 & x_2x_1 & & x \\
 & | & & \\
\rangle 3\cdot x_2 + \rangle 3\cdot x_1 + \bar{q}\langle\langle & \leftarrow \bar{q} & & \bar{q} \\
 & \downarrow & & \\
 & \langle 3\cdot x_2 + \rangle 3\cdot x_1 + \bar{q}\langle\rangle & \langle 3\cdot x_1 + \bar{q}\rangle & y
\end{array}
\qquad (2)
$$

Таблица 3

Би-бесконечный автомат $3\cdot\bar{x}|\bar{q}_{(4)}$

x \ $\bar{q}$	…	$\overleftarrow{3}$23	$\overleftarrow{3}$0	$\overleftarrow{3}$1	$\overleftarrow{3}$2	$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$1	$\overleftarrow{0}$2	$\overleftarrow{0}$3	$\overleftarrow{0}$10	…
0	…	$\overleftarrow{3}$2,3	$\overleftarrow{3}$,0	$\overleftarrow{3}$,1	$\overleftarrow{3}$,2	$\overleftarrow{3}$,3	$\overleftarrow{0}$,0	$\overleftarrow{0}$,1	$\overleftarrow{0}$,2	$\overleftarrow{0}$,3	$\overleftarrow{0}$1,0	…
1	…	$\overleftarrow{3}$,2	$\overleftarrow{3}$,3	$\overleftarrow{0}$,0	$\overleftarrow{0}$,1	$\overleftarrow{0}$,2	$\overleftarrow{0}$,3	$\overleftarrow{0}$1,0	$\overleftarrow{0}$1,1	$\overleftarrow{0}$1,2	$\overleftarrow{0}$1,3	…
2	…	$\overleftarrow{0}$,1	$\overleftarrow{0}$,2	$\overleftarrow{0}$,3	$\overleftarrow{0}$1,0	$\overleftarrow{0}$1,1	$\overleftarrow{0}$1,2	$\overleftarrow{0}$1,3	$\overleftarrow{0}$2,0	$\overleftarrow{0}$2,1	$\overleftarrow{0}$2,2	…
3	…	$\overleftarrow{0}$1,0	$\overleftarrow{0}$1,1	$\overleftarrow{0}$1,2	$\overleftarrow{0}$1,3	$\overleftarrow{0}$2,0	$\overleftarrow{0}$2,1	$\overleftarrow{0}$2,2	$\overleftarrow{0}$2,3	$\overleftarrow{0}$3,0	$\overleftarrow{0}$3,1	…
00	…	$\overleftarrow{3}$,23	$\overleftarrow{3}$,30	$\overleftarrow{3}$,31	$\overleftarrow{3}$,32	$\overleftarrow{3}$,33	$\overleftarrow{0}$,00	$\overleftarrow{0}$,01	$\overleftarrow{0}$,02	$\overleftarrow{0}$,03	$\overleftarrow{0}$,10	…
01	…	$\overleftarrow{3}$,32	$\overleftarrow{3}$,33	$\overleftarrow{0}$,00	$\overleftarrow{0}$,01	$\overleftarrow{0}$,02	$\overleftarrow{0}$,03	$\overleftarrow{0}$,10	$\overleftarrow{0}$,11	$\overleftarrow{0}$,12	$\overleftarrow{0}$,13	…
02	…	$\overleftarrow{0}$,01	$\overleftarrow{0}$,02	$\overleftarrow{0}$,03	$\overleftarrow{0}$,10	$\overleftarrow{0}$,11	$\overleftarrow{0}$,12	$\overleftarrow{0}$,13	$\overleftarrow{0}$,20	$\overleftarrow{0}$,21	$\overleftarrow{0}$,22	…
03	…	$\overleftarrow{0}$,10	$\overleftarrow{0}$,11	$\overleftarrow{0}$,12	$\overleftarrow{0}$,13	$\overleftarrow{0}$,20	$\overleftarrow{0}$,21	$\overleftarrow{0}$,22	$\overleftarrow{0}$,23	$\overleftarrow{0}$,30	$\overleftarrow{0}$,31	…
10	…	$\overleftarrow{0}$,13	$\overleftarrow{0}$,20	$\overleftarrow{0}$,21	$\overleftarrow{0}$,22	$\overleftarrow{0}$,23	$\overleftarrow{0}$,30	$\overleftarrow{0}$,31	$\overleftarrow{0}$,32	$\overleftarrow{0}$,33	$\overleftarrow{0}$1,00	…
11	…	$\overleftarrow{0}$,22	$\overleftarrow{0}$,23	$\overleftarrow{0}$,30	$\overleftarrow{0}$,31	$\overleftarrow{0}$,32	$\overleftarrow{0}$,33	$\overleftarrow{0}$1,00	$\overleftarrow{0}$1,01	$\overleftarrow{0}$,102	$\overleftarrow{0}$,103	…
12	…	$\overleftarrow{0}$,31	$\overleftarrow{0}$,32	$\overleftarrow{0}$,33	$\overleftarrow{0}$1,00	$\overleftarrow{0}$1,01	$\overleftarrow{0}$1,02	$\overleftarrow{0}$1,03	$\overleftarrow{0}$1,10	$\overleftarrow{0}$1,11	$\overleftarrow{0}$1,12	…
13	…	$\overleftarrow{0}$1,00	$\overleftarrow{0}$1,01	$\overleftarrow{0}$1,02	$\overleftarrow{0}$1,03	$\overleftarrow{0}$1,10	$\overleftarrow{0}$1,11	$\overleftarrow{0}$1,12	$\overleftarrow{0}$1,13	$\overleftarrow{0}$1,20	$\overleftarrow{0}$1,21	…
20	…	$\overleftarrow{0}$1,03	$\overleftarrow{0}$1,10	$\overleftarrow{0}$1,11	$\overleftarrow{0}$1,12	$\overleftarrow{0}$1,13	$\overleftarrow{0}$1,20	$\overleftarrow{0}$1,21	$\overleftarrow{0}$1,22	$\overleftarrow{0}$1,23	$\overleftarrow{0}$1,30	…
21	…	$\overleftarrow{0}$1,12	$\overleftarrow{0}$1,13	$\overleftarrow{0}$1,20	$\overleftarrow{0}$1,21	$\overleftarrow{0}$1,22	$\overleftarrow{0}$1,23	$\overleftarrow{0}$1,30	$\overleftarrow{0}$1,31	$\overleftarrow{0}$1,32	$\overleftarrow{0}$1,33	…
22	…	$\overleftarrow{0}$1,21	$\overleftarrow{0}$1,22	$\overleftarrow{0}$1,23	$\overleftarrow{0}$1,30	$\overleftarrow{0}$1,31	$\overleftarrow{0}$1,32	$\overleftarrow{0}$1,33	$\overleftarrow{0}$2,00	$\overleftarrow{0}$2,01	$\overleftarrow{0}$2,02	…
23	…	$\overleftarrow{0}$1,30	$\overleftarrow{0}$1,31	$\overleftarrow{0}$1,32	$\overleftarrow{0}$1,33	$\overleftarrow{0}$2,00	$\overleftarrow{0}$2,01	$\overleftarrow{0}$2,02	$\overleftarrow{0}$2,03	$\overleftarrow{0}$2,10	$\overleftarrow{0}$2,11	…
30		$\overleftarrow{0}$1,33	$\overleftarrow{0}$2,00	$\overleftarrow{0}$2,01	$\overleftarrow{0}$2,02	$\overleftarrow{0}$2,03	$\overleftarrow{0}$2,10	$\overleftarrow{0}$2,11	$\overleftarrow{0}$2,12	$\overleftarrow{0}$2,13	$\overleftarrow{0}$2,20	
31		$\overleftarrow{0}$2,02	$\overleftarrow{0}$2,03	$\overleftarrow{0}$2,10	$\overleftarrow{0}$2,11	$\overleftarrow{0}$2,12	$\overleftarrow{0}$2,13	$\overleftarrow{0}$2,20	$\overleftarrow{0}$2,21	$\overleftarrow{0}$2,22	$\overleftarrow{0}$2,23	
32		$\overleftarrow{0}$2,11	$\overleftarrow{0}$2,12	$\overleftarrow{0}$2,13	$\overleftarrow{0}$2,20	$\overleftarrow{0}$2,21	$\overleftarrow{0}$2,22	$\overleftarrow{0}$2,23	$\overleftarrow{0}$2,30	$\overleftarrow{0}$2,31	$\overleftarrow{0}$2,32	
33		$\overleftarrow{0}$2,20	$\overleftarrow{0}$2,21	$\overleftarrow{0}$2,22	$\overleftarrow{0}$2,23	$\overleftarrow{0}$2,30	$\overleftarrow{0}$2,31	$\overleftarrow{0}$2,32	$\overleftarrow{0}$2,33	$\overleftarrow{0}$3,00	$\overleftarrow{0}$3,01	
000												

Схема (2) следует из формульного задания (1) автомата $3\cdot\bar{x}|\bar{q}$. Она обосновывает закономерность, используемую при табличном построении. Упомянутая закономерность обнаруживается уже в самом начале использования схемы. Действительно, найдем с помощью схемы, *какой должна быть самая первая строка второй секции*. Для этого подадим на вход второй секции пару $x_2x_1 = 00$. В результате для любого состояния $\bar{q} = \overleftarrow{0}\,q_r\ldots q_2q_1q_0$ будет иметь место переход:

t+1	t	t
	00	x
	$\vert$	
$\rangle\rangle\bar{q}\langle\langle$	$\leftarrow \bar{q}$	$\bar{q}$
	$\downarrow$	
	$\langle\rangle\bar{q}\langle\rangle$ $\langle\bar{q}\rangle$	y

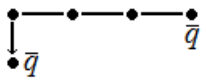
Но что такое $\langle\rangle\bar{q}\langle\rangle$ $\langle\bar{q}\rangle$? Это две младшие цифры состояния $\bar{q}$. А $\rangle\rangle\bar{q}\langle\langle$? Это все старшие цифры числа $\bar{q}$, начиная со второй. Таким образом, первая строка второй секции описывает переходы типа $00, \overleftarrow{0}\, q_r \ldots q_2 q_1 q_0 \to \overleftarrow{0}\, q_r \ldots q_2, q_1 q_0$, т. е. для построения 00-ой строки второй секции, соответствующей входному сигналу 00, нужно просто опустить *строку* состояний и отделить две младшие цифры, что и сделано в таблице 3. Заметим, что при реализации устройства в B-технологии пара $x_2 x_1$ определяется как отдельный сигнал (одна линия), в частности, отдельным сигналом является пара 00.

А теперь найдем *вторую строку второй секции*, т. е. строку, соответствующую входному сигналу $x_2 x_1 = 01$. Для этого снова обращаемся к схеме и подставляем в нее $x_2 x_1 = 01$. Получаем переход:

t+1	t	t
	01	x
	$\vert$	
$\rangle\rangle 3+\bar{q}\langle\langle$	$\leftarrow \bar{q}$	$\bar{q}$
	$\downarrow$	
	$\langle\rangle 3+\bar{q}\langle\rangle$ $\langle 3+\bar{q}\rangle$	y

Что такое $\rangle\rangle 3+\bar{q}\langle\langle$? Это все цифры числа $3+\bar{q}$, начиная со второй цифры. А $\langle\rangle 3+\bar{q}\langle\rangle$ $\langle 3+\bar{q}\rangle$ — это первые две цифры того же числа. Значит, чтобы написать содержимое клетки таблицы, находящейся под $\bar{q}$, надо содержимое клетки $3+\bar{q}$ переместить налево под $\bar{q}$ и отделить запятой первые две цифры, что и сделано в таблице 3. Таково обоснование закономерности, используемой в таблице 3 при построении второй строки во второй секции. Аналогично обосновывается правило построения третьей строки во второй секции для сигнала $x_2 x_1 = 02$: надо *строку*, соответствующую предшествующему входному сигналу $x_2 x_1 = 01$, переместить влево на три клетки и опустить на уровень строки $x_2 x_1 = 02$, как это сделано в таблице 3. И так далее. Вторая секция построена.

Мнемонический алгоритм построения строк этой секции можно изобразить графом:



или, словами, «три шага влево и один шаг вниз». Такой же алгоритм работает и в пределах первой секции, а также в пределах всех остальных секций, которые могут быть построены.

Третья секция ($s = 3$) начинается с буквы $x_3 x_2 x_1 = 000$ алфавита:

$$x_3 x_2 x_1 \in Z^3_{(4)} = \{000,001,002,003,010,011,\ldots,330,331,332,333\}\,.$$

В пределах третьей секции переходы происходят по схеме:

t+1	t	t
	$x_3 x_2 x_1$	x
	$\vert$	
$\rangle 3\cdot x_3 + \rangle 3\cdot x_2 + \rangle 3\cdot x_1 + \bar{q}\langle\langle\langle$	$\leftarrow \bar{q}$	$\bar{q}$
	$\downarrow$	
	$\langle 3\cdot x_3 + \rangle 3\cdot x_2 + \rangle 3\cdot x_1 + \bar{q}\langle\rangle\langle 3\cdot x_2 + \rangle 3\cdot x_1 + \bar{q}\langle\rangle$ $\langle 3\cdot x_1 + \bar{q}\rangle$	y

В частности, для первой строки этой секции, соответствующей входному сигналу $x_3 x_2 x_1 = 000$, переходы происходят по схеме:

t+1	t	t
	000	xx
	$\downarrow$	
$\rangle\rangle\rangle\bar{q}\langle\langle\langle$	$\leftarrow \bar{q}$	$\bar{q}$
	$\downarrow$	
	$\langle\rangle\rangle\bar{q}\langle\langle\rangle\ \langle\rangle\bar{q}\langle\rangle\ \langle\bar{q}\rangle$	y

Это означает, что в первой строке третьей секции, соответствующей сигналу $x_3x_2x_1 = 000$, заполнение клеток происходит по правилу: в клетке под состоянием $\bar{q} = \overleftarrow{0}\,q_r...q_3q_2q_1q_0$ находится пара $\overleftarrow{0}\,q_r...q_3$, $q_2q_1q_0$, т. е., по существу, само состояние $\bar{q}$, в котором отделены три младших цифры. Аналогичное правило работало и в двух предыдущих секциях. Тогда таблица 3 может быть продолжена — см. табл. 4.

Таблица 3 (продолжение)

q / x	...	$\overleftarrow{3}$ 23	$\overleftarrow{3}$ 0	$\overleftarrow{3}$ 1	$\overleftarrow{3}$ 2	$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$ 1	$\overleftarrow{0}$ 2	$\overleftarrow{0}$ 3	$\overleftarrow{0}$ 10	
000	...	$\overleftarrow{3}$,323	$\overleftarrow{3}$,330	$\overleftarrow{3}$,331	$\overleftarrow{3}$,332	$\overleftarrow{3}$,333	$\overleftarrow{0}$,000	$\overleftarrow{0}$,001	$\overleftarrow{0}$,002	$\overleftarrow{0}$,003	$\overleftarrow{0}$,010	...
001	...	$\overleftarrow{3}$,332	$\overleftarrow{3}$,333	$\overleftarrow{0}$,000	$\overleftarrow{0}$,001	$\overleftarrow{0}$,002	$\overleftarrow{0}$,003	$\overleftarrow{0}$,010	$\overleftarrow{0}$,011	$\overleftarrow{0}$,012	$\overleftarrow{0}$,013	...
002	...	$\overleftarrow{0}$,001	$\overleftarrow{0}$,002	$\overleftarrow{0}$,003	$\overleftarrow{0}$,010	$\overleftarrow{0}$,011	$\overleftarrow{0}$,012	$\overleftarrow{0}$,013	$\overleftarrow{0}$,020	$\overleftarrow{0}$,021	$\overleftarrow{0}$,022	...
003	...	$\overleftarrow{0}$,010	$\overleftarrow{0}$,011	$\overleftarrow{0}$,012	$\overleftarrow{0}$,013	$\overleftarrow{0}$,020	$\overleftarrow{0}$,021	$\overleftarrow{0}$,022	$\overleftarrow{0}$,023	$\overleftarrow{0}$,030	$\overleftarrow{0}$,031	...
010		$\overleftarrow{0}$,013	$\overleftarrow{0}$,020	$\overleftarrow{0}$,021	$\overleftarrow{0}$,022	$\overleftarrow{0}$,023	$\overleftarrow{0}$,030	$\overleftarrow{0}$,031	$\overleftarrow{0}$,032	$\overleftarrow{0}$,033	$\overleftarrow{0}$,100	
011												

Первой строки достаточно, чтобы продолжить построение таблицы, потому что правило «три шага влево и один шаг вниз» продолжает работать в пределах секции, что видно из схемы переходов для сигнала $x_3x_2x_1 = 001$, которая приведена ниже:

t+1	t	t
	001	xxx
	$\downarrow$	
$\rangle\rangle\rangle 3{+}\bar{q}\langle\langle\langle$	$\leftarrow \bar{q}$	$\bar{q}$
	$\downarrow$	
	$\langle\rangle\rangle 3{+}\bar{q}\langle\langle\rangle\ \langle\rangle 3{+}\bar{q}\langle\rangle\ \langle 3{+}\bar{q}\rangle$	y

Полностью заполнение третьей секции, конечно, проводить не будем (64 строки), но начальное заполнение выполним. Это сделано в таблице 3 (продолжение). Последующее заполнение происходит по сформулированному правилу, которое работает не только в пределах третьей секции, но и распространяется на все последующие секции, количество которых бесконечно. После проведения всех этих действий можно сказать, что «положительная» часть (нижняя) би-бесконечного автомата построена. Эта часть би-бесконечного автомата названа положительной по той причине, что строится для цифр вида $x_s...x_2x_1x_0 \in Z^s_{(4)}$, имеющих также истолкование в виде положительных чисел. Чтобы подчеркнуть их положительность, можно использовать префикс $\overleftarrow{0}$ и писать эти цифры в виде $\overleftarrow{0}\,x_s...x_2x_1x_0 \in Z^s_{(4)}$, т. к. последняя запись используется для любого натурального числа.

При построении положительной части автомата мы использовали в *пределах s-ой секции* ($s \geq 1$) алгоритм, состоящий из двух пунктов:

1. Нулевая строка s-ой секции получается из строки состояний автомата путем опускания числа $\bar{q} = \overleftarrow{0}\,q_r...q_3q_2q_1q_0$ в строку, соответствующую сигналу 0...00 (s нулей) и последующего отделения s начальных цифр числа $\bar{q}$, изображающего состояние; в результате клетка под $\bar{q}$заполняется парой: $\overleftarrow{0}\,q_r...q_{s+1}q_s$, $q_{s-1}...q_1q_0$.

2. Каждая последующая строка получалась из предыдущей сдвигом на три клетки влево и последующего опускания на одну клетку вниз. Это правило действует вплоть до заполнения последней строки s-ой секции. После чего переходим в заполнению следующей секции, начиная с пункта 1.

Итак, заполнение положительной части бесконечной таблицы происходило «движением вниз». После построения таблицы в пределах любой s-ой секции возможно также движение снизу вверх. При построении *предыдущих* строк в пределах s-ой секции *положительной* части таблицы нам нужно совершить действия по правилу: «три шага вправо и один шаг вверх». Соответствующий мнемонический граф таков:

Это правило действует всегда, в *пределах секций* всей таблицы би-бесконечного автомата. При построении таблицы движением снизу вверх после попадания в новую, s-ую, секцию (пересекли жирную черту снизу вверх) в качестве «затравочной» первой *вычисляется* строка, соответствующая входному сигналу $x_{s-1}...x_2x_1x_0 = 3...333$. (Для сравнения: при построении таблицы движением сверху вниз первой в пределах секции вычислялась строка, соответствующая сигналу $x_{s-1}...x_2x_1x_0 = 0...000$.) После ее вычисления с использованием правила «три шага вправо, один вверх» заполняется вся секция. В справедливости этих утверждений нетрудно убедиться, выполнив проверочные вычисления и сравнив их с уже имеющимися данными в таблице 3.

Замечание. Наряду с положительными цифрами $x \in Z_{(4)} = \{0,1,2,3\}$, которые можно записать с префиксом $\overleftarrow{0}: Z_{(4)} = \left\{\overleftarrow{0}\,0, \overleftarrow{0}\,1, \overleftarrow{0}\,2, \overleftarrow{0}\,3\right\}$, существуют и отрицательные цифры, записываемые с префиксом $\overleftarrow{3}: Z'_{(4)} = \left\{\overleftarrow{3}\,0, \overleftarrow{3}\,1, \overleftarrow{3}\,2, \overleftarrow{3}\,3\right\}$, и, казалось бы, возможно продолжение построения таблицы 3 вверх, в сторону отрицательных цифр. Но здесь возникает препятствие, состоящее в асимметрии представления чисел с помощью положительных и отрицательных цифр, заключающейся в том, с помощью положительных цифр можно представить числа как положительные, так и отрицательные, в то время как с помощью отрицательных цифр можно представить только отрицательные числа. Это не позволяет пользоваться вычислительными формулами, определяющими переходы в вычислительных автоматах, формулами типа: $\bar{q},x \to \bar{q}' = \theta\bar{q}x, y = \sigma\bar{q},x$, поскольку в этих формулах $\bar{q}$, $\bar{q}'$ могут быть положительными и потому непредставимыми с помощью отрицательных цифр.

Примеры вычислений би-бесконечным умножителем

Приведем примеры вычислений би-бесконечным умножителем, демонстрирующие его возможности. Каждая секция би-бесконечного автомата представляет собой отдельное вычислительное устройство, способное полностью функционировать в пределах секции, не будучи связанным с другими секциями. Односекционное вычисление – это максимально упрощенный вариант вычисления. Помимо этого варианта би-бесконечный автомат допускает смешанный вариант вычислений, когда в вычисление вовлечены сразу несколько секций и в процессе вычисления происходит перескок из одной секции в другую. Этот вариант позволяет создавать различные «стратегии» вычислений, сравнивать их и находить среди них наилучшую.

Пример 1. Вычисление секцией $s = 1$. Входной алфавит однобуквенный. В таблице 3 эта секция отделена от остального массива жирной горизонтальной чертой.

Пусть $\bar{x} = \overleftarrow{0}\,3102010$, $\bar{q} = \overleftarrow{0}$. Разверткa, следящая за вычислением, имеет вид:

0	$t \geq 8$	7	6	5	4	3	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	3	1	0	2	0	1	0	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}\,2$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}\,1$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{0}$	2	1	3	1	2	0	3	0	y

Результат: $3\cdot\overleftarrow{0}\,3102010|\overleftarrow{0} = \overleftarrow{0}\,21312030$. Время вычисления $T = 9\cdot\tau$ при подаче на вход слова длиной в 8 разрядов, где τ — длительность одного такта. Но в действительности, т. е. при вычислениях

В-схемами, время вычисления $T_B = 7 \cdot \tau_{\&}$, где $\tau = \tau_{\&}$ — длительность такта в В-схеме, которая равна задержке в элементе &. Это объясняется тем, что в момент времени $t = 6$ вырабатывается не только цифра 1 из 6-го разряда, но и *вся группа цифр* $\overleftarrow{0}2$ *из старших разрядов, следующих за разрядом* 6, причем эта группа цифр физически однотипно реализуема наряду со всеми цифрами В-схемы. Вследствие этого она может быть считана одновременно с цифрой 6-го разряда. Этот эффект имеет место для всех В-схем.

Пример 2. То же $\bar{x} = \overleftarrow{0}3102010$, $\bar{q} = \overleftarrow{0}$, но секция $s = 2$, секция двухбуквенного алфавита. Для вычислений в этой секции слово $\bar{x}$ представляется в виде двухбуквенного слова: $\bar{x} = \overleftarrow{0}3102010 = \overleftarrow{0}\ 03\ 10\ 20\ 10$. В алфавите $Z^2_{(4)} = \{00,01,...,33\}$ слово $\bar{x}$ имеет длину, равную 4. Вычисление протоколируется разверткой:

0	$t \geq 5$	4	3	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	03	10	20	10	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	21	31	20	30	y

Результат $3 \cdot \overleftarrow{0}\ 03\ 10\ 20\ 10|\overleftarrow{0} = \overleftarrow{0}\ 21\ 31\ 20\ 30$ совпадает с предыдущим. Чтобы подчеркнуть, что вычисление проводилось второй секцией, и входное слово, и результат разбиты на двухбуквенные компоненты. Время вычисления секцией $s = 2$ при подаче на вход секции слова длиной 5 равно $T = 5 \cdot \tau$, т. е. сократилось почти вдвое. При вычислениях В-схемой для секции $s = 2$ время вычисления еще меньше и равно $T_B = 4 \cdot \tau_{\&}$, т. к. в В-схемах, как уже было сказано, имеет место эффект ускорения вычислений, связанный с ускоренной обработкой группы цифр старших разрядов.

Этого примера достаточно, чтобы понять, что при переходе к многобуквенному алфавиту (т.е. при переходе к вычислениям в секции s) имеет место эффект ускорения вычислений, причем время вычислений уменьшается в s раз. В би-бесконечном вычислительном устройстве такой переход принципиально всегда осуществим, причем регулярным образом. В пределах возможностей существующей технологии он реализуем в В-схемах.

Замечательной особенностью би-бесконечного автомата является тот факт, что столбец любого состояния $\bar{q}$ пронизывает все секции таблицы 3. Следствием этого является то, что в любой момент времени, если автомат оказался в состоянии $\bar{q}$, можно подавать входной сигнал, принадлежащий любой секции. Это означает, что можно вести смешанные вычисления, т. е. вычисления, когда в любой момент времени можно подавать сигнал из любой секции, никак не ориентируясь на сигналы-предшественники.

Пример 3. То же $\bar{x} = \overleftarrow{0}3102010$, $\bar{q} = \overleftarrow{0}$. Слово $\bar{x}$ разобьем на буквенные компоненты разного размера: $\bar{x} = \overleftarrow{0}\ 3\ 10\ 2\ 010$. Вначале подается буква 010 для ведения

0	$t > 5$	5	4	3	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	3	10	2	010	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}2$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	2	1	31	2	030	y

вычисления в пределах секции $s = 3$, затем буква 2 для секции $s = 1$ и т. д.

Результат $3 \cdot \overleftarrow{0}\ 3\ 10\ 2\ 010|\overleftarrow{0} = \overleftarrow{0}\ 2\ 1\ 31\ 2\ 030$ совпадает с предыдущими, как и должно быть. И входное слово, и результат согласованы разбиением.

Понятно, что время вычисления можно варьировать от максимального, равного длине слова (вычисление секцией $s = 1$), до минимального, равного единице (вычисление секцией $s =$ длине входного слова). Это, конечно, теоретические результаты, но в В-технологии к ним можно приблизиться достаточно близко.

Заключение

1. Показано, как из сравнительно маленького *ядра* путем использования скрытого в нем потенциала, состоящего из экстравертности по состояниям и экстравертности по входному алфавиту, создается би-бесконечное вычислительное устройство для любой системы счисления.

2. Примечателен сам факт существования такого устройства.

3. Би-бесконечный автомат позволяет раскрыть вычислительные возможности, связанные с первоначальным ядром.

4. Оказывается возможным вести вычисления в алфавитах, являющихся декартовыми произведениями исходного алфавита $Z_{(k)} = \{0,1,...,k-1\}$, а также в их объединении:

$$Z_{(k)},\ Z^2_{(k)},...,\ Z_{(k)} \bigcup Z^2_{(k)} \bigcup ....$$

5. Время вычисления зависит от номера секции, уменьшаясь с ростом ее номера, и может быть доведено до единицы, т. е. до длительности одного такта.

6. Использованный в статье для примера умножитель $3 \cdot \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$ может быть заменен другим устройством. Таких устройств бесконечно много, и каждое из них может быть компонентой В-компьютера.

7. Каждая секция би-автомата представляет собой отдельное вычислительное устройство, ведущее вычисления в s-буквенном алфавите. Всякое такое устройство бесконечно по состояниям. Но методом свертки [1] оно может быть трансформировано в конечное устройство, способное, в частности, вести все вычисления этой секции.

8. Таким образом, имеет место своеобразный вычислительный симбиоз конечных и бесконечных устройств, представленный последовательностью:

$$\text{КУ} \xrightarrow{\textit{экстравертность}} \text{БКУ} \xrightarrow{\textit{свертка}} \text{КУ} \xrightarrow{\textit{экстравертность}} \text{БКУ} \xrightarrow{\textit{свертка}} \ldots,$$

где КУ — конечное устройство, БКУ — бесконечное устройство. Все КУ и БКУ различны. При этом надо заметить, что при перемещении по стрелкам получаются все более совершенные устройства, как конечные, так и бесконечные

ЛИТЕРАТУРА

1. Деев Г. Е. *Теория вычислительных устройств*. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 452 с.
2. Богомягкова А. С. *Построение массива умножителей для 5-ричной системы счисления и их обращений (делителей). Исследование би-бесконечного умножителя*: Магистерская диссертация, 2022.
3. Деев Г. Е. Свертка бесконечного автомата в конечный. *Вестник кибернетики*. 2016;1:9–24
4. Кальнова П. В. *Абстрактные вычислительные устройства. Параллельные вычисления по входу в семействе умножителей на константу*: Бакалаврская работа, 2017.
5. Летников А. *Теория дифференцирования с произвольным указателем*. М.: Типография А. И. Мамонтова, 1868.
6. Новиков А. В. *Построение массива умножителей для 6-ричной системы счисления и их обращений (делителей). Исследование би-бесконечного умножителя* $4 * x|q_{(6)}$: Магистерская диссертация, 2022.
7. Эйлер Л. *Дифференциальное исчисление*. М.-Л.: ГИТТЛ, 1949.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-7

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ПРЕФОРМ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

П. В. Михеев[1], С. В. Бухаров[2], А. К. Лебедев[3], С. В. Тащилов[4]
[1] *ООО «Аквифер», г. Электросталь, Московская область, Российская Федерация*
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8146-8753, mipv@yandex.ru
[2] *Московский авиационный институт, г. Москва, Российская Федерация*
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3205-1190, bukharovsv@mail.ru
[3] *АО «НИИграфит», г. Москва, Российская Федерация*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0629-4575, alebedev.job@gmail.com
[4] *АО «Композит», г. Королев, Московская область, Российская Федерация, Khrom64@mail.ru*

Аннотация: для повышения эффективности работы энергетических установок нового поколения требуется совершенствование современных многослойных композиционных материалов с регулируемой схемой, плотностью армирования и межслоевой прочностью, гарантирующих устойчивость конструкций к действию высоких уровней термических и эрозионных нагрузок. Для эффективной разработки таких материалов требуется проводить моделирование их структуры с целью прогнозирования характеристик целевого изделия. В данной статье исследовано влияние параметров структуры материала и технологического процесса односторонней прошивки (тафтинга) многослойного пакета заготовки из углеродной ткани УТ-900 жгутом УКН-М-3К-ЭД на свойства композиционных материалов. В статье проводится моделирование технологии изготовления волокнистых преформ прошивкой тканого пакета углеродных тканей толщиной до 100 мм. Такой пакет является заготовкой для изготовления углерод-углеродного композита с требуемым уровнем теплофизических и конструкционных свойств.

Опытным путем проведено моделирование структуры прошивки волокнистой заготовки для получения преформ армированного композиционного материала. Свойства материала «Тафтинг», необходимые для моделирования работоспособности конструкций, определены экспериментально и с учетом анизотропии свойств. Полученные результаты сравниваются с материалами КИМФ, Ипресскон, АРМИР-П и МКУ4М-7.

Ключевые слова: пространственно-армированный композит, преформа, прошивка, моделирование, углеродные материалы.

Для цитирования: Михеев П. В., Бухаров С. В., Лебедев А. К., Тащилов С. В. Моделирование схем пространственного армирования многослойных волокнистых преформ углерод-углеродных композиционных материалов. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):63–73. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-7.

3D REINFORCEMENT ARRANGEMENTS FOR CARBON-CARBON COMPOSITE MULTILAYER FIBER PREFORMS

P. V. Mikheyev[1], S. V. Bukharov[2], A. K. Lebedev[3], S. V. Tashchilov[4]
[1] *Aquifer OOO, Electrosatal, Moscow region, Russian Federation*
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8146-8753, mipv@yandex.ru
[2] *Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation*
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3205-1190, bukharovsv@mail.ru
[3] *JSC "NIIgrafit", Moscow, Russian Federation*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0629-4575, alebedev.job@gmail.com
[4] *JSC "Kompozit", Korolev, Moscow region, Russian Federation, Khrom64@mail.ru*

Abstract: to improve the efficiency of advanced powerplants, we need new multilayer composite materials with adjustable layup patterns, reinforcement density, and interlayer strength. They will ensure structural stability under high thermal loads and erosion. The structure of such materials should be modeled to forecast the properties of the final product. This paper studies the effects of composite structure and tufting (inserting a thread through a layered dry fabric with a needle that, after insertion, moves back along

the same trajectory) of a multilayer UT-900 carbon fabric composite with the UKN-M-3K-ED thread on the properties of the composite. We simulated the tufting of layered carbon fabrics preforms up to 100 mm thick. These preforms are workpieces for making carbon-carbon composites with the required thermal, physical, and structural properties.

We experimentally modeled the tufting of a layered reinforced composite preform structure. The anisotropic tufting process variables required to assess the structural properties were estimated experimentally. The results were compared with the properties of KIMF, Ipresscon, ARMIR-P, and MKU4M-7 composites.

Keywords: 3D reinforced composite, preform, tufting, simulation, carbon materials.

Cite this article: Mikheyev P. V., Bukharov S. V., Lebedev A. K., Tashchilov S. V. 3D Reinforcement Arrangements for Carbon-Carbon Composite Multilayer Fiber Preforms. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):63–73. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-7.

Безавтоклавные методы формования на современном этапе развития технологий авиационных конструкций являются наиболее эффективными способами производства деталей сложной формы из ПКМ. При реализации таких методов используется пропитка жидким связующим пакета из нескольких слоев армирующей углеродной ткани. Этот пакет называется преформой [1].

На этапе пропитки волокнистой преформы разница в свойствах между термопластичным и термореактивным связующим незначительна. Традиционными недостатками слоистых композитов являются: низкая прочность при сдвиге, низкий модуль сдвига, малые прочность и модуль упругости в трансверсальном направлении. Отдельной проблемой являются межслоевые дефекты или расслоения, которые могут привести к потере сплошности материала.

Вышеуказанные проблемы могут быть в значительной мере решены формированием трансверсальных связей структуры между армирующими слоями. И в случае безавтоклавных технологий такие связи осуществить проще. В настоящее время используются два основных подхода к улучшению межслоевых свойств армированных ПКМ. К первому подходу относятся использование различных типов армирующих волокон и тканей и их сочетаний [2], а также модификация существующих и разработка новых типов термореактивных, термопластичных связующих [3] или их сочетания [4], имеющих высокую исходную технологичность и обеспечивающих требуемую функциональность матриц на их основе и требуемый уровень межфазного взаимодействия с волокнами армирующей системы композиционного материала.

Другим, более простым и эффективным подходом является объемное армирование материала, или трансверсальная прошивка волокнистой слоистой преформы, обеспечивающая требуемый уровень упруго-прочностных свойств композитов [5]. При этом прошивка может не только повышать межслоевую прочность ПКМ, но и аналогично клеевым соединениям [6] обеспечивать фиксацию слоев преформы и соединять отдельные элементы в единую структуру на стадии формирования, повышая интегральность будущей конструкции. Однако прошивка (тафтинг) осложняет пропитку пакета связующим. Пространственно-армированные каркасы, использующиеся в конструкциях на основе углеродных материалов, обеспечивают возможность производства многофункциональных изделий большой толщины и разнообразной формы. На примере полимерных композиционных материалов с пространственной схемой армирования экспериментально установлен рост сопротивления динамическим и ударным нагрузкам, повышение выносливости и трещиностойкости, теплопроводности и прочности в зонах отверстий [7–11].

Различают два вида технологий получения волокнистых пространственно-армированных заготовок композиционных материалов:

- текстильное армирование с помощью технологий 3D-ткачества, прошивки и иглопробивных методов. При этом достигается доля трансверсальной составляющей до 25%;
- пространственное армирование путем внедрения стержней и нитей в поперечном направлении, объемного плетения и объемного трикотажа.

Разнообразные технологии армирования пространственно-армированных композитов имеют свои ограничения, связанные со схемой армирования, применяемыми материалами, геометрией и толщиной заготовки. Так, технологии пространственных каркасов не позволяют достичь сопоставимой со слоистыми материалами плотности преформы, что ограничивает возможность их применения. Кроме

того, появляется отдельная технологическая стадия подготовки стержней и часто используется ручной труд.

Основные параметры, характеризующие технический уровень различных способов производства объемных пространственно-армированных каркасов:

- максимальная плотность преформы;
- относительная доля пространственного армирования;
- шаг (плотность) армирования;
- прочность в плоскости слоя.

Ниже представлен краткий анализ отличительных особенностей существующих методов формирования пространственно-армированных композиционных материалов.

1. Иглопробивная технология позволяет получать преформы с достаточной для обеспечения требуемого уровня механических свойств частотой межслоевых связей. Однако недостатком данной технологии является тот факт, что эти связи имеют существенное ограничение по глубине, что отрицательно сказывается на теплопроводности материала при большой толщине. Также при иглопробивании может повреждаться армирующая ткань, что приводит к снижению прочностных характеристик в плоскости слоя [12].

2. В процессе создания волокнистых заготовок методом объемного ткачества армирующие нити многократно изгибаются и перетираются, снижая значения модуля упругости заготовки. Высокая степень истирания углеродной нити в процессе формирования трансверсальных связей этим методом обусловливает физическое ограничение по толщине заготовки [13].

3. Типовой процесс прошивки при помощи иглы в форме крючка или при помощи двух нитей имеет ограничение как по толщине заготовки, так и по используемым нитям по причине сложной траектории движения иглы, большого количества сложений нити с малым радиусом кривизны. Для снижения этого эффекта возможно применение только крученых углеродных нитей на основе полиакрилонитрила с большим количеством аппрета или нитей, полученных пиролизом из вискозного волокна.

4. Прошивка, известная как метод «тафтинг» (иногда KSL-tufting, по названию разработчика оборудования) (рис. 1), характеризуется созданием пространственно-армированной структуры путем введения с помощью специальных игл пучка армирующих волокон в виде жгутов или нитей, что позволяет реализовать заданную схему армирования с шагом от 3 мм для заготовок толщиной до 35 мм, а также обеспечивает возможность прошивки под углом до 45° [14].

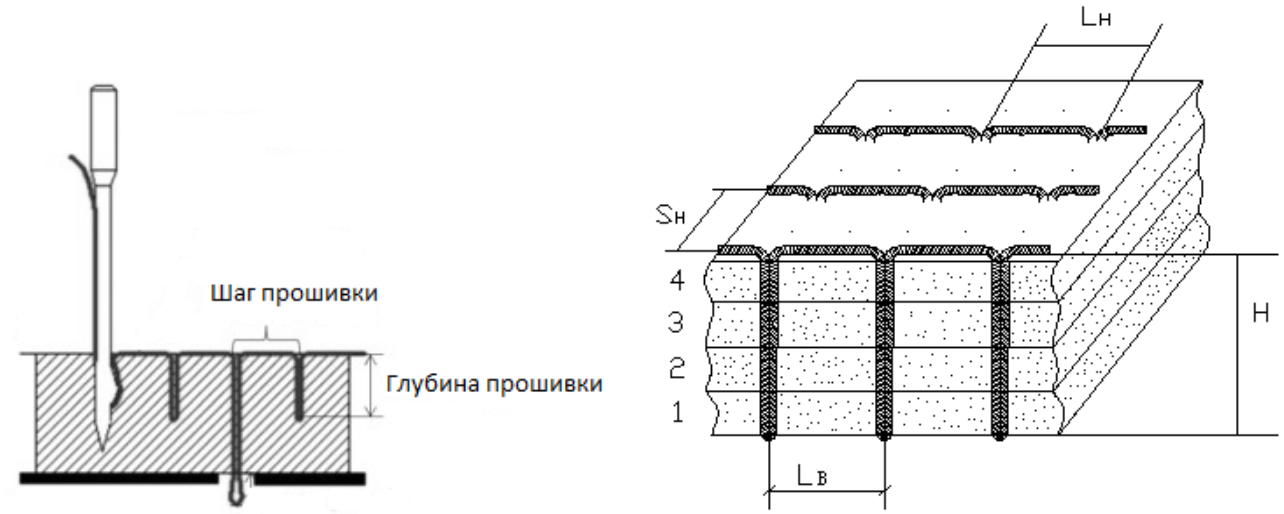


Рис. 1. *Схема реализации метода тафтинга*

Основные преимущества организации межслоевых связей методом тафтинга:

- нить фиксируется в натянутом виде, отсутствуют петли и перегибы;
- реализуется пространственная связь, проходящая через весь пакет, что не реализуется в межслоевых связях иглопробивных преформ;
- существует возможность создания сложной пространственной ориентации (прошивка одного

пакета с разным шагом под различными углами);

- возможно использование разнородных армирующих материалов [14].

По результатам исследований [15–18] отмечаются проблемы реализации технологии прошивки, связанные с истиранием как волокон прошивающей нити (жгута), так и волокна основы в процессе армирования. Истирание волокон при движении иглы является основной причиной снижения физико-механических характеристик и образования дефектов в виде структурных неоднородностей и концентраторов напряжений типа карманов [19, 20].

Целью данной работы является оценка эффективности использования способа прошивки жгутом из углеродных ПАН-волокон для создания пространственно-армированных заготовок углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) толщиной до 50 мм с использованием модифицированной технологии тафтинг. Условное название материала — УУКМ «Тафтинг».

В работе рассмотрено моделирование схемы пространственного армирования с шагом 3 и 5 мм (рис. 2).

В качестве объекта исследований изучена технология тафтинга, модифицированная для получения толстостенных высокоплотных заготовок УУКМ с массовой долей пространственной армирующей компоненты из углеродных ПАН-волокон УКН-М не менее 2 %.

Для выполнения программы исследования изготовлено три преформы размером 200x100 мм и толщиной 50 мм для последующего совмещения по технологии многократной пропитки расплавом каменноугольных пеков по технологии АО «Композит» с дальнейшей термообработкой при высокой температуре до получения УУКМ. Слоистый пакет сформирован из 150 слоев ткани УТ-900-3К-240-ЭД с поверхностной плотностью 240 г/м^2. Масса слоистого пакета составила 765 г с учетом припуска. Шаг прошивки 5 мм.

Такой шаг был выбран по результатам моделирования, целью которого было сбалансировать трудоемкость процесса, уменьшить потери прочности нити при истирании, а также улучшить механические и теплофизические свойства.

Введение армирующих нитей осуществлялось по модифицированной технологии, обеспечивающей их минимальное истирание. Отличие этой технологии от известной KSL-Tufting заключается в особой кинематике установки и оригинальной форме иглы [14]. Эти изменения позволяют сохранить прочность волокна в преформе после тафтинга.

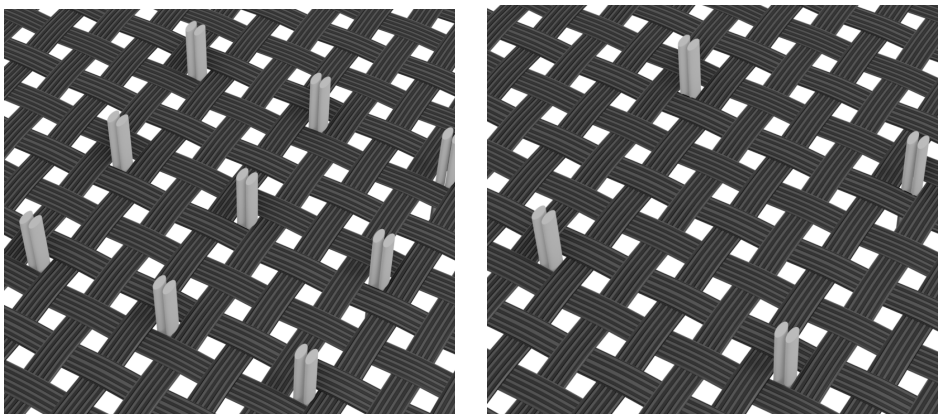


Рис. 2. *Схема армирования УУКМ «Тафтинг» с разным шагом*

Была разработана методика, по которой разрезали прошитый пакет, испытывали жгуты из него на растяжение. После прошивки по модифицированной технологии разрезали прошитую заготовку, испытывали жгуты из него на растяжение. Экспериментально установлено (рис. 3), что разрывная прочность жгута УКН-М-3К-ЭД из ПАН-волокна, изъятого из преформы, составляет в среднем 83 % от исходного, что является хорошим результатом для заготовки толщиной 50 мм. Этот результат лучше известного из литературных данных, так как анализ российской и зарубежной литературы показал, что использование традиционных методов прошивки преформы в трансверсальном направлении может приводить к снижению деформационно-прочностных свойств композиционного материала в плоскости слоя при растяжении и сжатии [17–19] более чем на 75%.

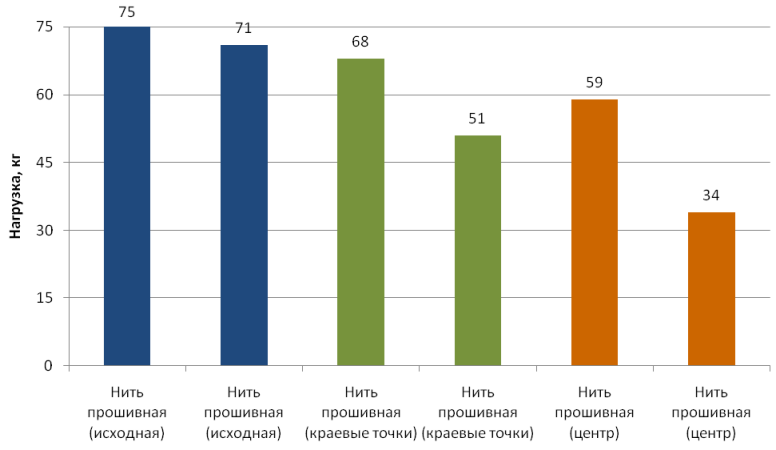


Рис. 3. *Определение влияния истирания прошивной нити на разрывную нагрузку*

Предлагаемая модифицированная технология тафтинга дает уникальную возможность увеличить плотность волокнистых заготовок композиционных материалов, обеспечивая допустимый уровень повреждения волокон при прошивке. Для этого при введении трансверсальных армирующих элементов слоистый пакет фиксируется в закрытой жесткой оснастке [14]. Для увеличения плотности материала важно было сохранить его объем при прошивке, так как имеется тенденция к увеличению толщины пакета в процессе тафтинга. Для решения этой проблемы армирующие нити вводятся через жесткую сетку-направляющую в закрытой жесткой оснастке. Такая конструкция не позволяет заготовке увеличиваться в объеме в дальнейшем, при пропитке расплавом пеков (матрицей) и многократной термообработке. Увеличение плотности подтверждается результатами взвешивания пакет-заготовки вместе с оснасткой.

При отработке и оптимизации параметров процесса показано, что возможно осуществлять прошивку слоистого пакета из углеродной ткани толщиной до 180 мм под углом 60° с минимальным истиранием армирующей нити.

Срез материала после термообработки показан на рис. 4, на рис. 5 представлен увеличенный образец материала после карбонизации с армирующей нитью.

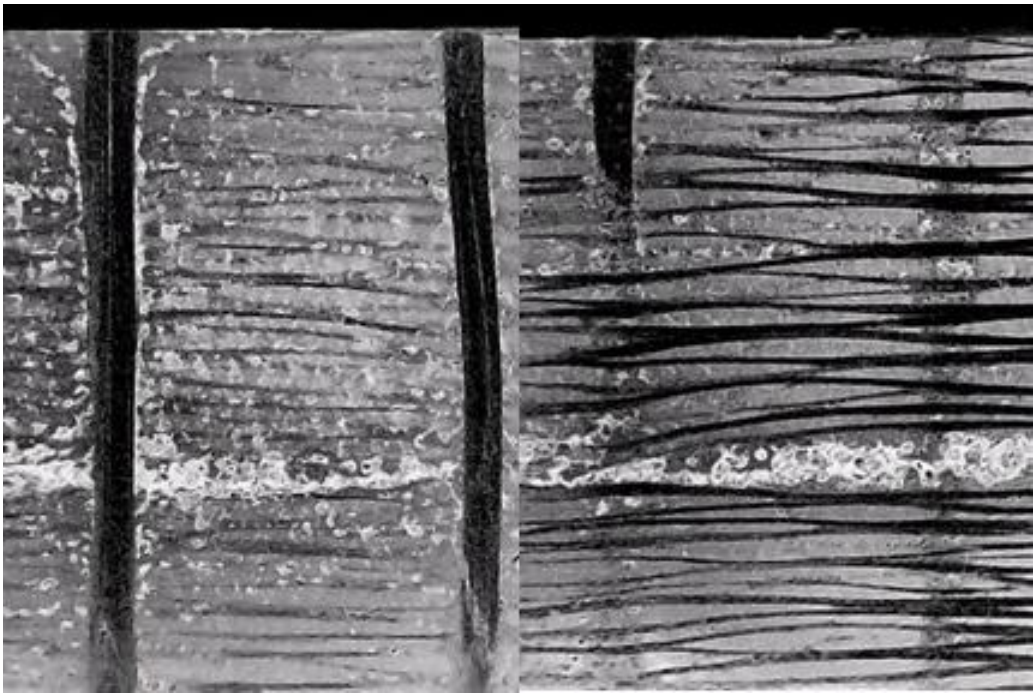


Рис. 4. *Микрофотографии образцов материала «Тафтинг» с армирующей нитью в направлении Z*

Массовые характеристики прошитых волокнистых заготовок, определенные взвешиванием оснастки с преформой, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры волокнистых заготовок вариантов материала «Тафтинг» [14]

	Материал	Масса, г	Плотность, г/см^3	Массовое содержание армирующего жгута, г	Относительное массовое содержание армирующего жгута, %
1	Исходный слоистый пакет	765	0,765	-	-
2	Армирование жгутом 3К, сложенным вдвое	779	0,779	14	1,8
3	Армирование жгутом 6К, сложенным вдвое	793	0,793	28	3,5

Пространственно-армированный каркас оснастки для прошивки изготавливался и в дальнейшем использовался для многократной пропитки матрицеобразующим расплавом пека и термообработки с целью получения УУКМ требуемой плотности.

Образцы углерод-углеродного композиционного материала были изготовлены АО «Композит» по отработанной технологии изготовления конструкционных материалов.

Образцы для проведения испытаний с целью определения физико-механических свойств были получены механической обработкой заготовки.

Для измерения теплопроводности «λ» (Вт/(м.К)) образцов использовался стационарный «метод пластины», вариант с симметричным расположением двух одинаковых пластин относительно плоского малоинерционного нагревателя из тонкой (0,12÷0,15 мм) нержавеющей стали. Этот вариант позволяет наиболее просто и точно определять проходящий через образец тепловой поток — по электрической мощности нагревателя:

$$q = \frac{\Delta UI}{2bl},$$

где U — падение напряжения на «рабочем» участке нагревателя (между потенциальными отводами — проволочками, приваренными к боковой кромке нагревателя); I — электрический ток в цепи нагревателя; l — расстояние между потенциальными отводами.

Коэффициент теплопроводности образца-пластины определяется по обычной для стационарного теплового режима формуле:

$$\lambda = \frac{q\delta}{\Delta T},$$

где δ — толщина пластины (расстояние между спаями термопар по нормали к поверхности); ΔT — перепад температур на толщине δ образца-пластины.

Печь расположена в специальном вытяжном шкафу и питается от промышленной сети переменного тока напряжением 220 В через автотрансформатор и понижающий трансформатор.

Между нагревателем и образцами-пластинами помещают по одному слою кварцевой ткани (электроизоляция). Ток в цепи нагревателя измеряют с помощью трансформатора тока и амперметра класса 0,2. Падение напряжения на потенциальных отводах измеряется цифровым вольтметром переменного тока.

Температуры измеряют с помощью термопар (ХА $d = 0{,}2$ мм), «горячие» спаи которых приваривают к пятачку из стальной фольги толщиной 0,05 ÷ 0,07 мм. ЭДС термопар измеряется цифровым милливольтметром постоянного тока с точностью до 0,001 мВ.

Удобством метода, кроме простоты измерения теплового потока, является то, что одновременно испытываются два образца.

Погрешность измерения «λ» данным методом не превышает 15 % в районе 100°С и 7 % в районе 1 000°С.

Значения плотности, теплопроводности, КЛТР (коэффициента линейного термического расширения) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Теплофизические свойства материала «Тафтинг»

	Характеристика	УУКМ «Тафтинг»	МКУ 4М-7	КИМФ	Ипресс-кон	FS240 [AC200] BAR (Япония)	FS320 (Япония)	Novolnex (SEP) Франция	Sepcarb 500 (США)
1	Средний коэффициент линейного температурного расширения в плоскости слоя $\alpha \cdot 10^6$ (1/К) 25–1500°С	1,76	2,5	2,7	2,0	0.7–8.6	1.4–8.5	0,9–1,15	
2	Плотность, кг/м^3	1,74	1,97	1,7	1,75			1,75	1,80
3	Теплопроводность трансверсальная, Вт/(м.К)	12,63±0,9	50	5,4	8				-
4	Теплопроводность в плоскости слоя, Вт/(м.К)	18,4	65	8,6	16	34–15	27–21		50

Результаты механических испытаний приведены в табл. 3. Испытания были проведены силами Института неметаллических материалов АО «Композит». Определены:

- прочность и модуль упругости при растяжении в плоскости слоя;
- растяжение в направлении Z на образцах в виде лопатки, размер 30х20х10 мм;
- прочность и модуль упругости при сжатии в плоскости слоя;
- прочность при сдвиге на образцах с надрезом;
- ударная вязкость с помощью копра КМ-5 (ГОСТ 9454-78) (типа Шарпи) вдоль X, сечение 10х10 мм.

Фотографии некоторых образцов после проведения испытаний представлены на рис. 6.

Результаты механических испытаний показали, что пространственно-армированный композиционный материал, изготовленный с использованием модифицированной технологии прошивки-тафтинга, превосходит по своим физико-механическим свойствам аналоги – конструкционные углерод-углеродные материалы:

- в 2 раза по показателю межслоевой сдвиговой прочности;
- на 50 % по теплопроводности в трансверсальном направлении;
- на 12 % по коэффициенту линейного температурного расширения в диапазоне 25-1500°С;
- в 4 раза по показателю ударной вязкости [14].

Наиболее важной характеристикой эксплуатационных свойств пространственно-армированных материалов является межслоевая сдвиговая прочность, увеличение которой чаще всего является целью создания межслоевых связей прошивкой [14]. Значения разрушающего напряжения $\tau_{сд}$ при межслоевом сдвиге УУКМ «Тафтинг» определялись по ОСТ 92-1472-78 «Пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Метод испытания на сдвиг по слою». В таблице 4 приведены значения разрушающего напряжения $\tau_{сд}$ при межслоевом сдвиге для разработанного материала и некоторых известных углерод-углеродных материалов, классифицируемых как конструкционные.

Значения прочности межслоевого сдвига ТЕРМАР-АДФ, ТЕРМАР-ДФ, Графикит-2000, Графикит-2400 были определены по методике АО «НИИграфит». Испытания на сжатие проводили на образцах размером 18 × 10 × 10 мм с надрезами на противоположных гранях. Скорость движения подвижной опоры в процессе испытания — 2 мм/мин. [21].

Таким образом, моделирование структуры композиционного материала путем выбора шага прошивки дало возможность изготовить композиционный материал с необходимыми свойствами.

Таблица 3

Сравнительные физико-механические свойства пространственно-армированных композиционных материалов

	Характеристика	Направление	Новый материал «Тафтинг»	МКУ 4М-7	КИМФ	Ипресскон	FS240 [AC200] BAR (Япония)	FS320 (Япония)	Novolnex (SEP) Франция	Sepcarb 500 (США)
1	Предел прочности при растяжении в продольном направлении в плоскости слоя, МПа	X	133	67	49	20	98,00	110,00	60–70	100
2	Модуль упругости при растяжении в продольном направлении в плоскости слоя, ГПа	X	65,3	34,0	-	-	52,00	30,00	20–25	-
3	Предел прочности при сжатии в продольном направлении в плоскости слоя, МПа	X	188±75	135	215	240	95,00	115,00	-	70–120
4	Модуль упругости при сжатии в поперечном направлении в плоскости слоя, ГПа	Z	33,9	49,6	-	-	-	-	-	-
5	Модуль упругости при сжатии в продольном направлении в плоскости слоя, ГПа	X	8.9±3.8	19,1	-	-	-	-	-	-
6	Предел прочности при растяжении в поперечном направлении в плоскости слоя, МПа	X	102	103	74	140	-	-	-	-
7	Модуль упругости при растяжении в поперечном направлении в плоскости слоя, ГПа	Z	55,7	51,9	-	-	-	-	10	-
8	Предел прочности при сжатии в поперечном направлении в плоскости слоя, МПа	Z	115	96	180	180	-	-	-	-
9	Ударная вязкость, КДж/м^2	X	44±7	-	10	-	-	-	-	-

Сравнение с аналогами показывает преимущество материала по сдвиговой прочности и теплопроводности. Полученный материал «Тафтинг» сопоставим с материалом «Ипресскон» по трансверсальной прочности, прочнее при сдвиге в плоскости слоев [20], что позволяет отметить преимущество предлагаемого материала в области теплофизических свойств, обеспечиваемое повышенной плотностью преформы и наличием пространственных связей в виде натянутых жгутов. Пространственные каркасы существующих толстостенных пространственно-армированных материалов формируются на основе регулярных систем из пултрузионных высокоплотных стержней (МКУ4М-7) или из натянутых нитей (КИМФ), не позволяющих реализовать высокую плотность каркаса, что обусловливает заниженные теплофизические характеристики и повышенное значение коэффициента линейного температурного расширения. Материал «Ипресскон», основой которого служит преформа, изготовленная по модифицированной иглопробивной технологии, обладает достаточным для обеспечения высокой жесткости количеством трансверсальных связей, однако существенно теряет при этом в прочности в плоскости слоя. Предлагаемый новый материал лишен этих недостатков [14].

Моделирование свойств подтверждено экспериментом. Модифицированная технология прошивки дает возможности для увеличения плотности преформы путем увеличения линейной плотности

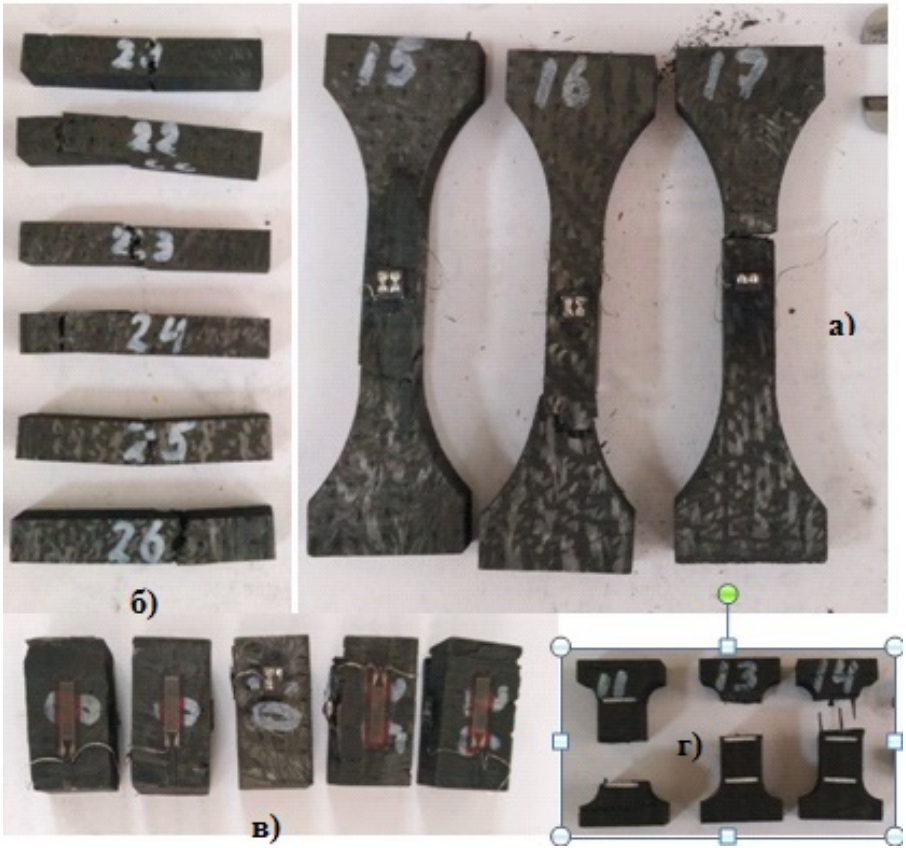


Рис. 5. *Фотографии некоторых образцов после проведения испытаний: а) растяжение в плоскости слоя, б) ударная вязкость по Шарпи, в) сжатие в плоскости слоя, г) растяжение в трансверсальном направлении*

Таблица 4

Характеристики сопротивления межслойному сдвигу разработанного материала УУКМ «Тафтинг» и аналогичных УУКМ

	Материал	Межслоевая сдвиговая прочность $\tau_{сд}$, МПа
1	УУКМ «Тафтинг»	17,4 ±0,7
2	ТЕРМАР-АДФ [20]	9,95±1,96
3	УУКМ [20] Yan, K.F.	30
4	ГРАФИКИТ-2000 [20]	6,58±0,71
5	ГРАФИКИТ-2400 [20]	5,72±2,56
6	Гравимол [22]	36-39
7	УУКМ на основе ткани ВГМ-4 и связующего ФН [22]	18
8	Novolnex (SEP, Франция) [23]	20
9	АРМИР-П [24]	9, 5±0,5

прошивной нити и уменьшения шага прошивки. Анизотропия свойств материала, т. е. различные свойства в разных направлениях, легко управляется подбором плотности исходного пакета и содержания пространственной составляющей в объемной преформе.

Полученные результаты прогноза свойств и варианты структуры материала могут быть использованы в расчете теплоэрозионного и прочностного состояния конструкций энергетических установок из УУКМ в трехмерной постановке.

Подход к созданию УУКМ большой толщины с помощью автоматизированного оборудования для модифицированной прошивки хорошо укладывается в передовую концепцию безотходного адди-

тивного производства. При этом за счет снижения влияния человеческого фактора растет качество УУКМ, а формы изделий могут быть разными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смотрова С. А., Наумов С. М., Смотров А. В. *Технологии изготовления силовых агрегатов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов*. М.: Техносфера, 2015. 216 с.
2. Перепелкин К. Е. *Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты*. СПб.: НОТ, 2009. 380 с.
3. Михайлин Ю. А. *Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы*. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
4. *Полимерные смеси* / Под ред. Д. Р. Пола и К. Б. Бакнелла / Пер. с англ. / Под ред. В. Н. Кулезнева. СПб., 2011. Том I. Систематика. 618 с. Том II. Функциональные свойства. 606 с.
5. Жернакова В. С., Первушина Ю. С., Соловьева П. В. Исследование упругих характеристик углепластика с 3D структурой. *Письма о материалах*. 2019;9(2)185–190.
6. Поциус А. Клеи, адгезия, технологии склеивания: пер. с нем. 3 изд. / Под ред. Г. В. Комарова. СПб.: ЦОП «Профессия», 216. 384 с.
7. Karuppannan D., Sivaraman V., Gaddikeri K. M., Sundaram R., Ramesh A. Effect of Tufting on Mechanical Properties of Laminated Composites. *ISAMPE National Conference on Composite Materials*. Conference Paper. November 2012. Pp. 2–3.
8. Masters John E. Improved Impact and Delamination Resistance through Interleafing. *Key Engineering Materials*. 1991;37:317-0. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.37.317.
9. Kinloch A. J., Masania K., Taylor A. C. et al. The Fracture of Glass-Fibre-Reinforced Epoxy Composites Using Nanoparticle-Modified Matrices. *J Mater Sci*. 2008;43:1151–1154. DOI: https://doi.org/10.1007/s10853-007-2390-3.
10. Hongyu Wang, Dongmei Zhu, Feng Wan, Wancheng Zhou, Fa Luo. Influence of the C/C Preform Density on Tribological Characteristics of C/C-SiC Composites under Different Conditions. *Ceramics International*. 2014;40(10)Part B:16641-16646. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.08.025.
11. Zhuan Li, Peng Xiao, Ben-gu Zhang, Yang Li, Yu-hai Lu. Preparation and Tribological Properties of C/C-SiC Brake Composites Modified by In Situ Grown Carbon Nanofibers. *Ceramics International*. 2015;41(9)Part B:11733–11740.
12. Tong Y., Bai S., Qin Q. H., Zhang H., Ye Y. Effect of Infiltration Time on the Microstructure and Mechanical Properties of C/C-SiC Composite Prepared by Si-Zr10 Alloyed Melt Infiltration. *Ceramics International*. 2015;41(3):4014–4020. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.11.088.
13. Wan F., Liu R., Wang Y., Cao Y., Zhang C., James Marrow T. In Situ Observation of Compression Damage in a 3D Needled-Punched Carbon Fiber-Silicon Carbide Ceramic Matrix Composite. *Composite Structures*. 2018;210:189–201. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.11.041.
14. Бухаров С. В., Лебедев А. К., Зинин А. В. Пространственное армирование прошивкой высокоплотных толстостенных заготовок слоистых композиционных материалов. *Авиамашиностроение и транспорт Сибири*: Сб. статей XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 27 мая — 1 июня 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. 458 с. С. 107–115.
15. Zhang J., Luo R., Xiang Q., Yang C. Compressive Fracture Behavior of 3D Needle-Punched Carbon/Carbon Composites. *Materials Science and Engineering*. 2011;528(15):5002–5006.
16. Zhang D., Sun M., Liu X., Xiao X., Qian K. Off-Axis Bending Behaviors and Failure Characterization of 3D Woven Composites. *Composite Structures*. 2019;208(15):45–55. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.10.009.
17. Chen X., Zhang Y., Xie J., Du P., Chen L. Robot Needle-Punching Path Planning for Complex Surface Preforms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018;50(C):132–139. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.09.008.
18. Mouritz A., Cox B. N. A Mechanistic Interpretation of the Comparative In-Plane Mechanical Properties of 3D Woven, Stitched and Pinned Composites. *Compos Part A: Appl Sci Manuf*. 2010;41(6):709–728. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.02.001.
19. Bigaud J., Aboura Z., Martins A. T., Verger S. Analysis of the Mechanical Behavior of Composite T-Joints Reinforced by One Side Stitching. *Composite Structures*. 2018;184:249–255. DOI:

10.1016/j.compstruct.2017.06.041.
20. Ожерелков Д. Ю. *Вязкость разрушения углерод-углеродных композиционных материалов фрикционного назначения*: Дис ... канд. техн. н. 2018.
21. Yan K. F., Zhang C. Y., Qiao S. R., Han D., Li M. In-Plane Shear Strength of a Carbon/Carbon Composite at Different Loading Rates and Temperatures. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528:1458–1462. DOI: 10.1016/j.msea.2010.10.047.
22. Гуняев Г. М., Гофин М. Я. Углерод-углеродные композиционные материалы. *Авиационные материалы и технологии*. 2013;спецвыпуск:62–90.
23. Бушуев Ю. Г., Персин М. И., Соколов В. А. *Углерод-углеродные композиционные материалы:* Справочник. М.: Металлургия, 1994.
24. ТУ 48-4807-237-90 *«Заготовки из армированного рекристаллизованного графита марки АРМИР-П».*

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-8

НЕЙРОСЕТЕВАЯ КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Н. В. Замятин, Г. В. Смирнов, В. И. Маковкин
Томский университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация, zamnv47@gmail.com

Аннотация: рассматривается калибровка оптических измерительных систем определения состава веществ с использованием многослойной нейронной сети. Оптическая измерительная система основана на волоконно-оптических преобразователях, и ее измерительные характеристики могут быть немонотонны и нелинейны. Применимость предлагаемого способа калибровки продемонстрирована в рассматриваемом случае с использованием реальных данных. Нейросетевой подход позволяет получить лучшее качество калибровки, а многослойная нейронная сеть не требует данных для восстановления оптических характеристик.

Ключевые слова: технологический процесс, датчики, оптические преобразователи, калибровка, нейронные сети.

Для цитирования: Замятин Н. В., Смирнов Г. В., Маковкин В. И. Нейросетевая калибровка датчиков для технологий микро- и наноэлектроники. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):74–82. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-8.

NEURAL NETWORK-BASED SENSOR CALIBRATION FOR MICRO AND NANOELECTRONICS APPLICATIONS

N. V. Zamyatin, G. V. Smirnov, V. I. Makovkin
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation, zamnv47@gmail.com

Abstract: we studied multilayer neural network-enabled calibration of optical gas sensor systems. Such systems use fiberoptic converters so their properties can be nonlinear and nonmonotonic. We used real-world data to show the proposed calibration method's applicability. The neural network-based approach offers a higher quality of the calibration, and a multilayer neural network doe not need a training dataset to estimate the optical properties.

Keywords: manufacturing processes, sensors, optical converters, neural networks.

Cite this article: Zamyatin N. V., Smirnov G. V., Makovkin V. I. Neural Network-Based Sensor Calibration for Micro and Nanoelectronics Applications. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):74–82. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-8.

Введение

Методы моделирования систем дают возможность описать множество сложных явлений в поведении веществ в технологических процессах. Однако полученные модели часто являются нелинейными и зависят от параметров, которые необходимо оценить, чтобы правильно представить процесс и его поведение. Управление технологическими процессами в микро- и наноэлектронике невозможно без сенсоров, которые должны обеспечивать системы управления своевременными и достоверными значениями контролируемых физических величин.

Современные системы контроля параметров технологических процессов включают в себя разнообразные измерительные преобразователи, среди которых имеются оптические датчики. Повышенный интерес к этим преобразователям обусловлен их высокой чувствительностью к измеряемым физическим величинам, помехозащищенностью, высокой воспроизводимостью и технологичностью. Но существуют погрешности при измерении из-за нелинейности и влияния помех, необходимость учета которых приводит к поиску способов коррекции характеристик измерительных преобразователей с оптическими датчиками. Среди них эффективными являются методы, улучшающие конструкции оптических датчиков за счет новых используемых в них элементов (в частности, световодов), и алгоритмические методы, позволяющие формировать путем калибровки функцию преобразования с учетом

нелинейности датчика по отношению к измеряемому значению, а также к паразитным воздействиям [1].

Калибровка формально определяется как действия, которые при определенных условиях устанавливают взаимосвязь между значениями величин, указанных измерительной системой, и соответствующими значениями стандартов [2]. Это определение представляет калибровку с метрологической точки зрения, и процесс калибровки выполняется с учетом различных физических и химических свойств веществ. Такая калибровка наиболее часто используется при контроле в технологических процессах. Поэтому для измерений в технологических процессах целью калибровки обычно является установление количественной связи между известными концентрациями и соответствующими им сигналами, что позволяет получить кривую отклика [3].

В данной работе рассматривается применение нейросетевого алгоритма в калибровочном эксперименте, учитывающего нелинейность и случайные паразитные ошибки для капиллярного волоконно-оптического датчика.

Текущее положение дел с калибровкой датчиков

В последние годы наблюдается устойчивое повышение уровня точности датчиков. За десять последних лет приведенная погрешность типовых датчиков уменьшена с уровня 0,25 % до уровня 0,04. . . 0,075 % от диапазона [4]. В то же время постоянная потребность в калибровке и поверке датчиков возрастает, что в конечном итоге влияет на качество технологического процесса.

Точные методы аппроксимации неприменимы из-за регистрации и хранения значительного объёма данных при калибровке измерительного преобразователя, что критично для микропроцессорных систем. Поэтому калибровка приборов контроля веществ сводится к построению простой линейной модели в аналитической форме, обладающей низкой адекватностью. При этом даже простые математические модели требуют определённых начальных условий и допущений, отличающихся от реальных.

Применение газов в технологиях микро и наноэлектроники

Планарная технология процессов микро- и наноэлектроники основана на сложных физико-химических процессах: осаждении различных диэлектрических пленок, термодиффузии, ионном легировании, фотолитографии, электронно-лучевой литографии и др. [5]. Качество интегральных схем зависит от чистоты основных и вспомогательных газов, влияющих на выход годных кристаллов БИС и СБИС. Поэтому промышленные газы играют важную роль в технологических процессах производства электронных компонентов. Даже в относительно простом технологическом процессе может использоваться до сорока разнообразных газов [6]. В технологических процессах применяются специальные промышленные газы для формирования компонентных слоев ионно-плазменными методами. В этих процессах к основному рабочему газу (аргону) добавляется реактивный газ (азот, углекислый газ, метан и т.д.) для направленного изменения состава выращиваемой пленочной фазы. Для контроля параметров газов используют различные датчики, в частности оптические, в ближней ИК-области спектра (NDIR) с применением световодов.

Датчики и достоинства оптических сенсоров на основе световодов

Оптический капиллярный световод (стеклянный) — это трубка круглого сечения с полированными боковой поверхностью и торцами. Оптическое излучение проходит через него, претерпевая многократное полное внутреннее отражение. Оптические капиллярные волокна обладают такими полезными свойствами, как легкий вес, небольшой размер, низкая стоимость, малое затухание и устойчивость к электромагнитным помехам. Эти свойства дают возможность применять их в измерениях параметров технологических процессов из-за способности выдерживать суровые условия работы, а их небольшой объем и инертная природа позволяют им оказывать минимальное воздействие на объект измерения. Поэтому целесообразно совместить канал прохождения оптического излучения и кювету с контролируемым газом в оптическом датчике.

Для оптических волоконных датчиков в качестве чувствительной среды используется анализируемое вещество, взаимодействующее с оптическим излучением, распространяющимся в капилляре оптического волокна. Оптическое излучение, многократно отражаясь от стенок капилляра и испытывая полное внутреннее отражение, взаимодействует с анализируемым веществом по закону Ламберта–Бера.

Оптический датчик может быть чувствительным вплоть до концентраций ppm или даже ppb, быть высокоселективным только к одному конкретному аналиту и быть полностью невосприимчивым к изменению физических величин окружающей среды, таких как температура и давление [7].

Оптический сенсор на капиллярных световодах

Контроль технологических промышленных газов реализуется посредством оптического сенсора на капиллярных световодах (рис. 1), содержащего источники электромагнитного излучения и светофильтры с длинами волн из области поглощения анализируемых газов, расположенных по ходу излучения, набор капиллярных трубчатых газовых кювет с внутренними светоотражающими стенками и фотоприемников, подключенных через усилитель к блоку обработки и регистрации информации. Источники электромагнитного излучения располагают по кругу узла ввода излучения в кюветы, выполненные в виде капиллярных волокон с внешней отражающей поверхностью по длине. При этом длины кювет пропорциональны обратному значению коэффициента поглощения исследуемого газа, а фотоприемники на выходе кювет соединены с усилителями и аналого-цифровыми преобразователями, которые, в свою очередь, подключены к микропроцессору с обученной нейронной сетью.

Сущность модели заключается в следующем. Выбирается газ или смесь газов m, наличие которых предполагается определять при помощи данного устройства, выбирается коэффициент поглощения $k_{\text{погл}}$ или оптическая плотность n каждого из упомянутых газов, с использованием которых рассчитывается для каждого газа длина кювет d.

Пороговая чувствительность метода с минимальным коэффициентом поглощения определяется длиной пути l и способностью системы регистрировать малые изменения интенсивности излучения из-за поглощения $\alpha = [I(\lambda i) - I0(\lambda i)]/I0(\lambda i)$, α — величина, обратная отношению сигнала к шуму измерительной системы. Поскольку каждый излучатель имеет свою ширину спектра излучения, при расчете длин пути необходимо использовать интегральный коэффициент поглощения газа k_0, проинтегрированный в пределах полосы излучения данного источника.

В качестве источников и приемников светового излучения использованы различные оптические и электронные элементы, работающие в соответствующих диапазонах частот, характерных для каждого выбранного для анализа газа: лазеры, светодиоды, фотодиоды, болометры и др.

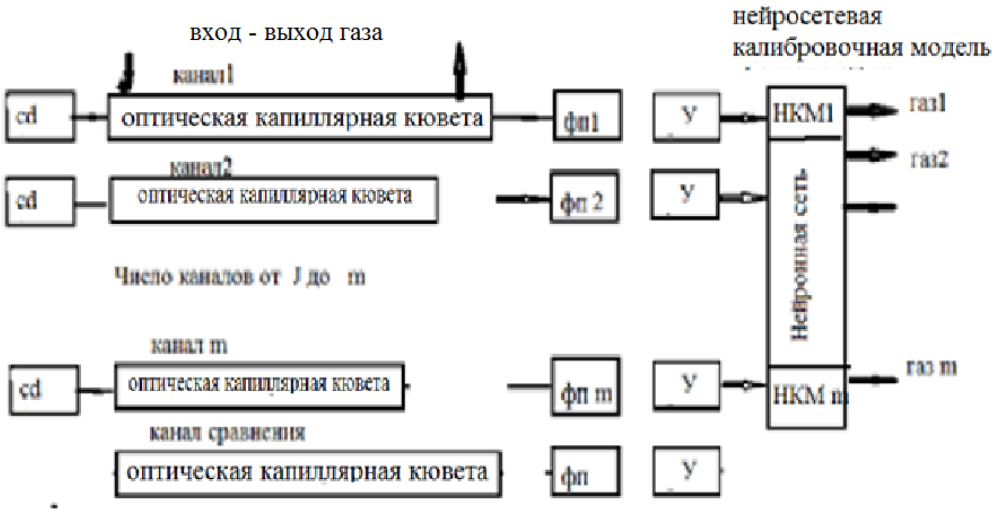


Рис. 1. *Оптический сенсор на капиллярных волокнах*

Разработанное устройство имеет следующие преимущества:

1. Увеличивается оптический путь за счет отражения от стенок капиллярной колонки.
2. Параллельно и одновременно определяются несколько промышленных газов (не нужны газоанализаторы на каждый газ).
3. Калибровочные модели хранятся в нейронной сети, которая может дообучаться после каждой калибровки.
4. Для уменьшения габаритов капиллярные колонки могут быть представлены в виде жгута и свернуты в спираль [8].

Нейронные сети для калибровки датчиков

При калибровке цель состоит в том, чтобы найти набор параметров модели, минимизирующих их разницу между откликом модели и экспериментальными измерениями (рис. 2).

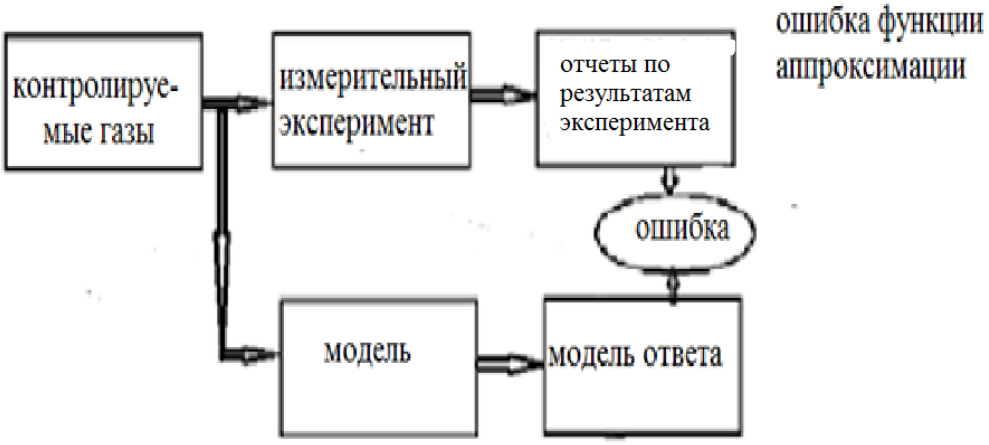


Рис. 2. *Схема калибровочного эксперимента*

Вариант решения проблемы калибровки заключается в оценке функции ошибки, количественно определяющей эту разницу, и минимизации функции ошибки с помощью алгоритма оптимизации. Трудность возникает из-за нелинейной связи между откликом модели и параметрами измерения, что приводит к усложнению функции ошибок из-за мультимодальности или недифференцируемости. Поэтому вычислительные методы, основанные на аналитически или численно полученном градиенте, могут применяться только в частных случаях. Лучше использовать прямую нейросетевую модель для уменьшения расстояния между предсказаниями сети и экспериментальными данными. Эффективность этого заключается в том, что оценка при обученной искусственной нейронной сети (ИНС) получается значительно быстрее, чем полное моделирование системы. Вычислительные затраты включают только обучение ИНС (подгонку синаптических весов) и минимизацию ошибки в прогнозе ИНС.

Описание нейронной сети ее особенности при калибровке

Искусственные нейронные сети [9] представляют собой вычислительные системы, состоящие из множества простых элементов (нейронов), соединенных вместе аналогично биологическому мозгу. Их главной особенностью является способность обобщать и изменять свое поведение на основе внешней информации, которая проходит через ИНС на этапе обучения.

Нелинейная природа нейронных сетей делает их незаменимым инструментом для моделированных сенсоров. Нейронная сеть имеет распределенную структуру и состоит из нелинейных нейронов, поэтому нейронная сеть всегда нелинейна, и эта нелинейность играет значительную роль, если системы, которые производят входные данные, являются нелинейными.

Для нейронной сети не требуется знаний пользователя, потому что нейронная сеть имеет возможность обучаться и для этого нужны обучающие множества. Пользователю нужно только собрать и упорядочить обучающие данные и вызвать алгоритм обучения, чтобы начать обучение сети. Это проще, чем использование традиционных нелинейных моделей систем.

Нейронные сети обладают высокой адаптивностью и способностью к обобщению, они могут изменять и корректировать свои веса в соответствии с изменениями в среде, в которой они находятся. Если характеристики среды внезапно изменяются, сеть может легко адаптироваться к этим изменениям, переучиваться и работать в этих изменившихся условиях.

Нейронные сети по своей природе параллельны, это делает их быстрыми для расчета выходных данных. Свойство массового параллелизма делает их подходящими для технологий СБИС. Предлагаемый способ нейросетевой обработки особенно подходит для компьютеров и для встраиваемых систем на основе стандартных микроконтроллеров (однокристальных компьютеров). Нейронная сеть может быть запрограммирована в системной памяти, не требуя дополнительного оборудования. Предполагается использование нейронных сетей небольшого размера (всего с несколькими нейронами и

несколькими синаптическими весами), что является несомненным преимуществом в мобильных аналитических системах.

Нейронные сети применяются для решения широкого спектра задач, среди которых наиболее заметными являются задачи распознавания образов, прогнозирования, управления, моделирования, обработки данных. В задачах аналитического контроля важную роль играет способность нейронных сетей при моделировании аппроксимировать функции. Прямое моделирование предлагается для калибровки входных сигналов и оценки собственных параметров газоанализаторов.

Особым типом ИНС является так называемая нейронная сеть с прямой связью, состоящей из нейронов, организованных в слои, где выходы из одного слоя используются в качестве входных данных для следующего слоя (рис. 4). В сети нет циклов или петель, нет обратных соединений. Наиболее часто используется многослойный персептрон (MLP) с сигмоидной передаточной функцией и алгоритм обучения с обратным распространением ошибки. В практическом использовании MLP известны своей способностью эффективно аппроксимировать нелинейные соотношения.

Входными данными являются данные с оптического газоанализатора. Выходными данными являются калибровочные зависимости для контролируемых газов. В нейронах полученное значение обрабатывается функцией активации. Для активации нейронов выбрана сигмоидальная функция:

$$y = f(w \cdot x + b),$$

где w — это вес нейрона в слое; x — входное значение; b — смещение.

Нейронная сеть имеет 3 слоя:

1. Входной слой с одним нейроном, для считывания данных с датчика.
2. Скрытый слой, осуществляющий обучение, имеет от 5 до 256 нейронов.
3. Выходной слой с одним нейроном, для отображения калибровочной зависимости.

Архитектура нейронной сети представлена на рис. 3.

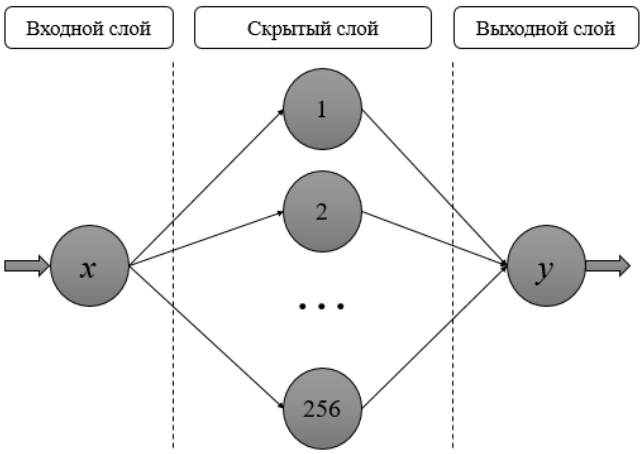


Рис. 3. *Архитектура нейронной сети*

Для определения качества обучения используется среднеквадратичная ошибка. Синаптические веса являются параметрами ИНС, которые должны быть определены в процессе обучения.

Несмотря на популярность ИНС, существует всего несколько рекомендаций по выбору их архитектуры. Например, в [10] показано, что ИНС с любой из широкого спектра непрерывных нелинейных функций активации скрытого слоя и одного скрытого слоя с произвольно большим числом единиц достаточно для свойства «универсальной аппроксимации», для выполнения управляемого выбора топологии ИНС. Наиболее общей стратегией является перекрестная проверка, поскольку она не предполагает каких-либо вероятностных допущений или зависимостей от проблемы идентификации.

Эксперимент с контролем газа CO_2

Оптический газовый сенсор на капиллярных волокнах исследовался для проверки реакции на отдельные газы при различных концентрациях. Такого типа датчики обычно используются для контроля газов из-за их относительно больших молярных коэффициентов поглощения [11]. Для экспериментов был выбран газ CO_2, поскольку он является наиболее часто используемым в технологических

процессах микро- и наноэлектроники. Для этого газа из базы данных HITRAN в районе сильных полос поглощения для источников излучения шириной 5 см$^{-1}$ выбраны информативные интервалы. Для них в таблице приведены центры интервалов в частотах (см$^{-1}$) и длинах волн (нм), также рассчитаны интегральные коэффициенты поглощения на 1 атм, проинтегрированные на ширину спектра излучения источника (5 см$^{-1}$). Выбранные интервалы находятся в ИК, видимой области спектра. Интегральные коэффициенты поглощения составили 15...70 см$^{-1}$. При заданном значении $\alpha = 0{,}01$ для минимального значения ослабления в оптическом капиллярном световоде определяется длина пути l_0, оптимальная для регистрации коэффициента поглощения k_0x, соответствующего концентрации каждого газа. Значения k_0x, l_0 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Молекула	CO_2	CH_4	SO_2	NO_2
Частота, см$^{-1}$	2362	3017	35000	25000
Длина волны, нм	4234	3315	285,7	400
Интегральный коэффициент поглощения для P=1 атм (для ширины спектра 5 см$^{-1}$) k_0, см$^{-1}$	70	15	19,2	16,8
Оптимальная длина пути l_0, см	0,15	0,7	$1{,}7\times10^3$	6×10^2

Как видно из таблицы 1, оптимальная длина пути l_0 меняется в широких пределах 0,15...17000 см и исходя из этого выбирается длина оптического капилляра сенсора. Использовались газовые баллоны с номинальной концентрацией 1000 частей на миллион CO_2. Газ CO_2 имеет частоту поглощения 4,2 мкм.

Изменения концентрации CO_2 показаны на рисунке 4. Частота дискретизации сигнала оптического датчика была установлена на 1 Гц с использованием скользящей средней по 100 точкам данных. Это указывает на то, что отклик датчика является линейным до полиномиального при изменении концентрации CO_2. График на рисунке 4 показывает, что предел обнаружения для CO_2, использующий эту технологию, находится в диапазоне низких ppm. Зависимости были аппроксимированы нейронной сетью.

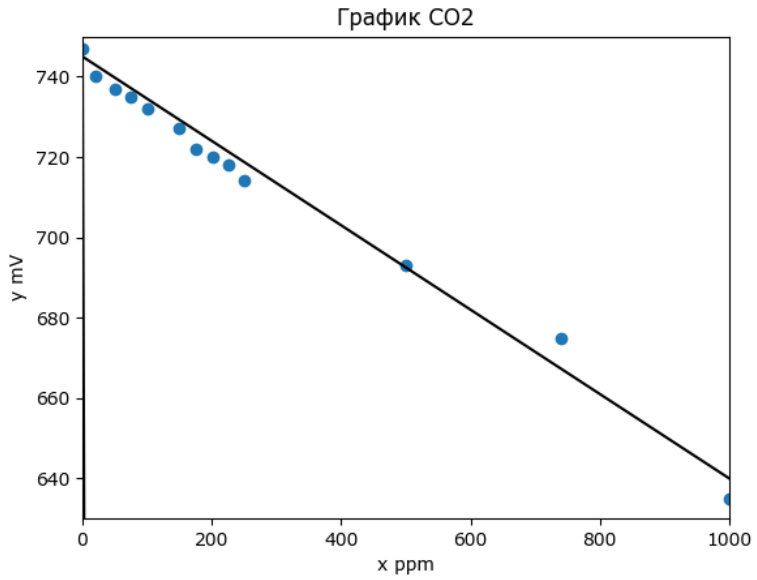


Рис. 4. *Реакция датчика на газ CO_2 с различными концентрациями («•» — реальная концентрация газа; «—» — идеальная концентрация газа)*

Результаты нейросетевой калибровки оптических капиллярных сенсоров

Тестировался метод прямой связи нейронной сети, описанный в реальных ситуациях с газом CO_2, в которых связаны спектральные данные с капиллярного оптического сенсора (y,mV) с параметрами концентрации (x, ppm). Основное внимание уделено способности нейронной сети к калибровке, рассматриваемой в зависимости от количества нейронов скрытом слое, скорости обучения и количества итераций (эпох).

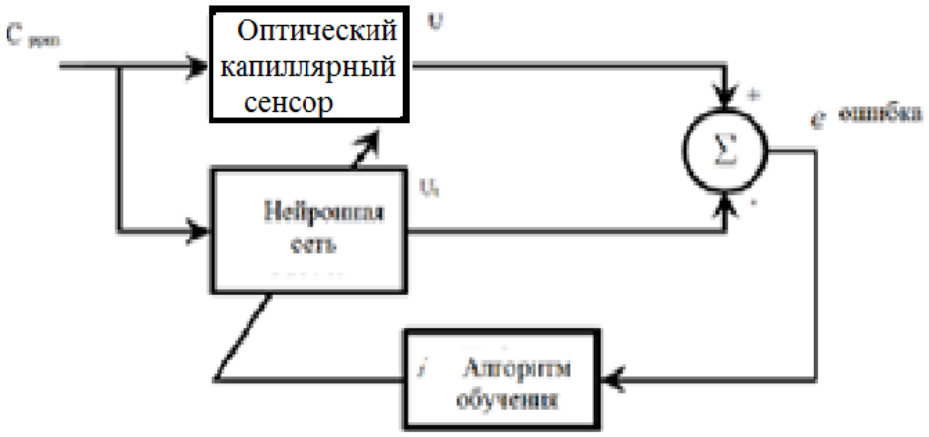


Рис. 5. *Нейросетевая калибровочная модель для газа CO_2*

Модель газоанализатора, представленная многослойной нейронной сетью на основе персептрона, имеет архитектуру 1-5-1, рис. 3. Здесь первый слой представляет входной слой только с одним входом.

Второй слой — это скрытый слой, которых состоит из 5–256 нейронов для достижения нужной точности.

Третий слой — это выходной узел с единственным выходом. В качестве функции активации в скрытом и выходном слое используется сигмоида. Нормализованная концентрация C_{ppm} является входным сигналом для нейронной сети, а нормализованное выходное напряжение U_c' является целевым. Веса сети обновляются в соответствии с алгоритмом обратного распространения ошибки после применения входного набора данных.

Приведенные результаты калибровки представлены в терминах среднеквадратичной ошибки аппроксимации (MSE), которая определяется как

$$\mathrm{MSE} = \left[\sum_{i=1}^{I_p} (y_i - \hat{y}_i)^2 / I_p \right]^{\frac{1}{2}},$$

где I_p — количество выборок, используемых в наборе аппроксимации (рис. 6). Все результаты получены путем тестирования сетей на образцах, которые не применялись для обучения сети и вычисляются с использованием программы нейронной сети, реализованной на python.

Во время обучения сети все входные значения нормализуются так, чтобы они находились в диапазоне 0–1 (для ввода). После преобразования в сети все результаты аппроксимации преобразуются обратно в исходный масштаб. Скорость обучения и число итераций, которые используются на протяжении всей этой работы, приведены в таблице 2.

В таблице 3 приведены значения зависимости MSE от числа скрытых слоев нейронной сети.

Набор данных содержит спектры пропускания в ближнем инфракрасном диапазоне (NDIR) 30 различных образцов с различными концентрациями газов. 20 образцов используются для калибровки, а остальные 10 используются для проверки работоспособности калибровочной модели. Существует эффект переобучения как по количеству нейронов, так и по количеству входных компонентов (переменных).

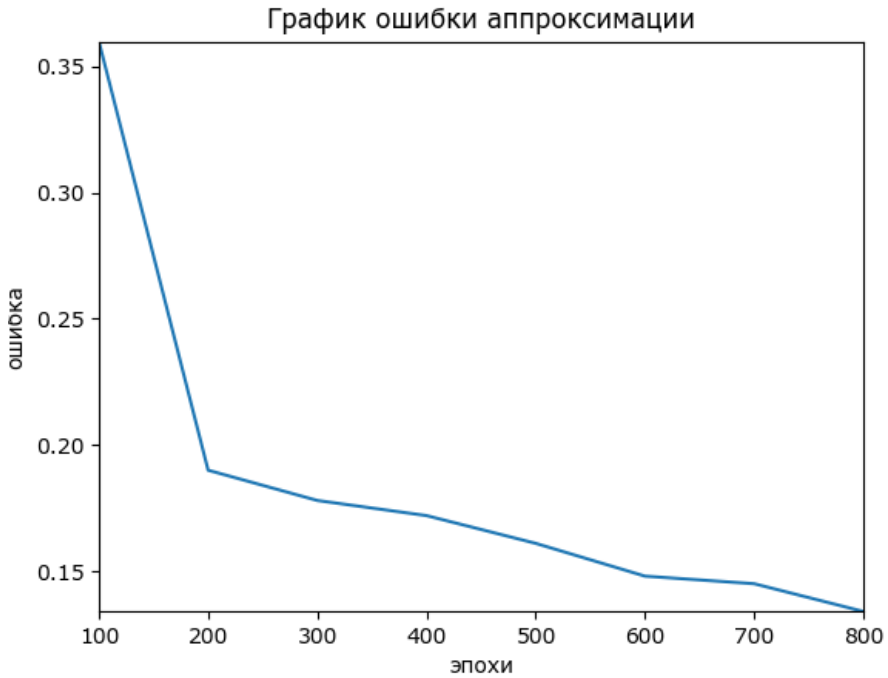


Рис. 6. *Зависимость ошибки аппроксимации от числа эпох*

Таблица 2

Скорость обучения и число итераций

Число итераций	10	50	100	800
Скорость обучения	0.9	0.5	0.25	0.1
MSE	0.35	0.20	0.12	0.06

Таблица 3

MSE от числа скрытых слоев нейронной сети

Число скрытых слоев	1	5	10	50
MSE	0.5	0.2	0.2	0.6

Заключение

В статье предложен и обоснован нейросетевой алгоритм обработки результатов калибровочного эксперимента при контроле промышленных газов в технологических процессах микро- и наноэлектроники, позволяющий получить функцию преобразования. Этот алгоритм был протестирован при обработке результатов калибровки оптического абсорбционного газоанализатора. Рассматривалась возможность применения искусственных нейронных сетей для калибровки используемых моделей. Многоуровневая нейронная сеть с прямой связью сравнивалась с откликом модели и функции ошибки, количественно определяющей, насколько хорошо отклик модели соответствует экспериментальным данным. Нейросетевая модель выбрана за ее нелинейность, разницу в чувствительности к конкретным параметрам, с одной стороны, и простоту в очень быстрой численной оценке с другой. Исследованные стратегии калибровки проверены на калибровке при измерении промышленного газа CO_2.

Нейросетевая модель разработанного газоанализатора показывает производительность, аналогичную фактическому датчику, и имеет очень простую архитектуру. Такие модели могут быть реализованы в простых микроконтроллерах, что снижает стоимость системы.

Сети с сигмоидальными функциями давали лучшие прогнозы, чем сети с линейными передаточными функциями. Количество эпох, которые дают наилучший результат в районе 1000, близко к оптимальному. Следует также отметить, что скорость сходимости зависит от параметров обучения. Основной вывод заключается в том, что ИНС при правильном использовании является хорошим методом калибровки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Emets S. V. et al. Processing Calibration Results for Measuring Transducers with an Integrated Sensor. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1582:012026.
2. Данилов А. А. *Метрологическое обеспечение измерительных систем*. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника-Сервис, 2014. 189 с.
3. Ординарцева Н. П., Баранов А. А., Рыбаков И. М. Нормативно-методологическое обеспечение калибровки измерительных систем. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2017;4:22–27.
4. Шипицын А. Г., Попов А. Е. Алгоритм калибровки эталонных измерительных преобразователей давления. *Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2010;22:53–56.
5. Лобачев Ю. А. Разработка технологии получения и очистки гидридных газов непосредственно в технологических процессах полупроводниковой микроэлектроники: Дисс. . . . канд. техн. наук. 2002. 133 с.
6. *Применение промышленных газов в электронике*. Режим доступа: https://dpairgas.com.ua/?p=1480.
7. Сидоров А. И. *Сенсорная фотоника*: Учеб. пособие. СПб: Университет ИТМО, 2019. 96 с.
8. Патент РФ 2262684. *Оптический абсорбционный газоанализатор*.
9. Замятин Н. В., Смирнов Г. В. *Нейросетевые компьютерные системы и их применение*. Изд-во ТУСУР. 2021. 278 с.
10. Anders U., Korn O. Model Selection in Neural Networks. *Neural Networks*. 1999;12(2):309–323.
11. Mueller M., Graf P., Meyer J., Pentina A., Brunner D., Perez-Cruz F., Hüglin Chr., Emmenegger L. Integration and Calibration of NDIR CO2 Low-Cost Sensors, and Their Operation in a Sensor Network Covering Switzerland. *Atmospheric Measurement Techniques*. Preprint. Discussion started: 18 November 2019. DOI: https://doi.org/10.5194/amt-2019-408.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-9

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ФРАКТАЛЬНО-ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА КАК НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА СУТЬ ФЕНОМЕНА ЖИЗНИ

Б. А. Богатых
г. Обнинск, Калужская область, Российская Федерация, bogboris@yandex.ru

Аннотация: рассмотрены ключевые вопросы постнеклассической природы возникновения и поддержания осцилляторных процессов, являющихся первоосновой в генерации ритмов любого живого вещества — от бактерий до активности мозга человека, которым в последнее время уделяется большое внимание. Данные особенности изучаются в рамках парадигмы числового поля, которому будет отвечать структура-аттрактор гомеостатического фрактально-голографического конструкта, в частности, аттрактор Плыкина, а также в рамках возникновения иерархии кластеров нейронов. При этом попытка описания генерации ритмов живого вещества осуществляется с привлечением наиболее адекватного как физического, так и математического инструментария структуры-аттрактора гомеостатического фрактально-голографического конструкта.

Затронутые математические особенности данного конструкта будут способствовать объяснению природы осцилляций живого вещества и природы психического. Все это в рамках данной концепции открывает большой простор для дальнейшего исследования различных психических феноменов и природы сознания человека.

Ключевые слова: осцилляции, фракталы, голография, гомеостатика, аттрактор Плыкина.

Для цитирования: Богатых Б. А. Базовые принципы фрактально-голографической природы осцилляций живого вещества как новый взгляд на суть феномена жизни. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):83–91. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-9.

KEY PRINCIPLES OF FRACTAL-HOLOGRAPHIC NATURE OF LIVING MATTER OSCILLATIONS AS NEW APPROACH TO THE ESSENCE OF LIFE

B. A. Bogatykh
Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation, bogboris@yandex.ru

Abstract: the key aspects of the post-nonclassical emergence and maintenance of much studied oscillatory processes as the root of any living creature rhythms, from bacteria to human brain activity. These features are studied within the numerical field paradigm being, a structure-attractor of the homeostatic fractal-holographic construct, in particular the Plykin attractor, and as the emergence of a neuron cluster hierarchy. An attempt to describe the generation of living matter rhythms uses the most adequate physical and mathematical tools of the structure-attractor and homeostatic fractal-holographic construct.

The mathematical features of the construct will contribute to explaining the nature of living matter oscillations and the nature of the psychic. This concept is highly promising for further research into various psychic phenomena and the nature of human consciousness.

Keywords: oscillations, fractals, holography, homeostasis, Plykin attractor.

Cite this article: Bogatykh B. A. Key Principles of Fractal-Holographic Nature of Living Matter Oscillations as New Approach to the Essence of Life. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):83–91. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-9.

Никто не отыщет удачно природу вещи
в самой вещи — изыскание должно быть
расширено до более общего
Ф. Бэкон

Введение

В настоящее время в психофизиологических исследованиях большое внимание уделяется осцилляторным процессам, являющимся первоосновой в генерации ритмов любого живого вещества — от бактерий до активности мозга человека [1, 2, 3, 4 и др.]. Так, жизнедеятельность сообщества цианобактерий избирательно реагирует как на направление силы тяготения, так и на направление освещения,

а также на характер пространства, находясь в данный момент времени [5]. Данные особенности сообществ цианобактерий интерпретируются в рамках того, что психика, представляя собой отражение действительности, включенное в регуляцию жизнедеятельности, является атрибутом живого. Более того, в своих основных проявлениях психика, по сути, одновозрастна живому веществу.

В сообществах цианобактерий за счет слипания их клеточных стенок и цитоплазматических выростов формируются трихомы – цепочки клеток, соединенные плазмодесмами. В дальнейшем при добавлении образования капсулоподобных оболочек формируются колонии микроорганизмов, в которых возникает синхронизация электрической активности не только с помощью прямого контакта между цианобактериями, но и между удаленными участками колонии микроорганизмов [1, 6].

Своеобразно генерация осцилляторной активности формируется у многоклеточных животных. Уже после оплодотворения яйцеклетка сразу начинает продуцировать собственную (эндогенную) генерацию осцилляторной активности [1, 2, 4, 7], с последующим активированием дробления зиготы. У части клеток нервной системы эндогенно возникающая ритмика интерпретируется как появление прообразов нейронов — носителей ритмов [1]. У развивающихся нейронов возникающая ритмика ответственна за формирование связей нервной системы. Со своей стороны, ритмичность электрической активности мозга четко выявляется на электроэнцефалограммах (ЭЭГ), как в бодрствующем состоянии, так и во время сна [8, 9]. Наряду с этим колебания состояния мозга отражаются в частотном составе ЭЭГ, характеризуя его текущий паттерн функционального состояния в данный момент. Так, например, альфа-ритм, отражающийся в колебаниях потенциалов от 7 до 13 Гц, реагируя на внешние стимулы, отражает широкий круг сенсорных, моторных и когнитивных процессов [10, 11, 12]. Помимо этого, альфа-ритму отводится роль в отражении организации интеграции сенсорных потоков [13], а при формировании условного рефлекса он отражает связь афферентного и эфферентного звеньев [14].

Таким образом, целью настоящей статьи является поиск подходов к объяснению постнеклассического познания природы возникновения и поддержания осцилляторных процессов в генерации ритмов живого вещества в рамках принципа парадигмы числового поля, в частности, гомеостатического фрактально-голографического конструкта структуры-аттрактора Плыкина, а также с учетом иерархии нейронных кластеров.

Природа фрактально-голографического конструкта

Фрактально-голографический конструкт (ФГК) рассмотрен нами в ряде работ [15–17], также изучен математический аппарат фрактальной геометрии, присутствующий в природе живого — ряды Фибоначчи (РФ), золотая пропорция (ЗП), немарковские процессы (НП), разного вида математические прогрессии [15–17].

Следует отметить особенность синтеза этих двух уникальных концептуальных конструктов — голографии и фрактальности, так как данный синтез является чрезвычайно полезным для понимания принципа работы сознания, целостной связи человека не только с живой природой, но и со всей Вселенной, на что указывал Дэвид Бом [18]. Бом предположил, что информация о Вселенной опосредуется мозгом человека через нейронную организацию. Более того, она становится доступной каждой клетке (не только мозга) человека аналогично генетической информации, содержащейся в генах каждой отдельной клетки тела организма [18]. С данной позиции, структура ФГК, на наш взгляд, будет более организованной, особенно при нарастании большого количества степеней свободы, а также при этом будет осуществляться ряд особенностей, обозначенных в нашей предыдущей работе [17].

Фрактальную природу имеют также странные аттракторы, имеющие предельные инвариантные множества типа «подковы» («подковы Смейла»), которые получили название базисных (рис. 1). В совокупности базисных множеств был найден частичный порядок. Здесь экстремальные по отношению к этому порядку множества либо притягивают к себе траектории точек достаточно малых своих окрестностей, формируя странные аттракторы, либо выталкивают за пределы достаточно малых окрестностей все точки, не принадлежащие этому множеству (формирование репеллеров) [20–23]. Классические примеры странных аттракторов — аттрактор Лоренца, Рёссела, Плыкина, Эноно [19, 20], отчасти повторяющие идею «подковы Смейла» (рис. 1).

Математический аппарат ФГК — РФ, ЗП, математические прогрессии — обнаруживается в мире живого вплоть до субклеточного уровня. Например, РФ присутствуют в цитоскелете клетки, как у одноклеточных, например, парамеций-туфелек, так и у многоклеточных. Так, все нейроны мозга имеют свой собственный цитоскелет, причем одной из составляющих цитоскелета являются микротрубочки,

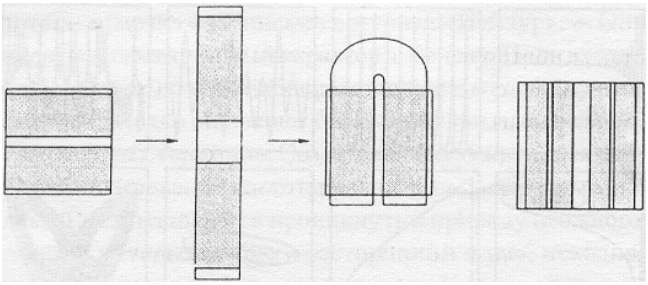


Рис. 1. *Отображение, получившее название «подкова Смейла» [19]*

представляющие собой белковый полимер, состоящий из субъединиц, и носящие название тубулины. Это указывает на то, что каждый нейрон обладает своеобразной «личной нервной системой». В основе организации микротрубочек млекопитающих заложены как раз числовые отношения Фибоначчи — из 5 правых и 8 левых винтовых структур (в сумме 13), а в двойных микротрубочках внешний слой содержит уже 21 ряд димеров тубулина, представляющий следующее число Фибоначчи. Именно числовым отношениям Фибоначчи отводится роль повышения эффективности микротрубочек как «информационного процессора». Представляя собой своеобразные клеточные автоматы, они могут передавать и обрабатывать сложные сигналы в виде волн различных состояний электрической поляризации молекул тубулина [24, 25]. Иными словами, РФ (числовые отношения), как и ЗП, и математические прогрессии, выступают, на наш взгляд, далеко не полным математическим инструментарием как фрактальной геометрии, так и голографии [15].

Осцилляторные процессы в генерации ритмов живого вещества

Современные исследования — магниторезонансная томография, позитронно-эмиссионная томография — подтверждают идею о том, что ЭЭГ, отображая синхронизированную электрическую активность большой популяции нейронов, отражает нейрофункциональную программу деятельности мозга, в то время как в нейрофизиологических феноменах отражается пространственно-временная организационная структура мозга. При всем этом многие образования мозга — верхние оливы, гиппокамп, мозжечок, ретикулярная формация — содержат нейроны-генераторы, ответственные за пейсмекерную активность клеток мозга [26, 27]. Причем функционирование их ритмической активности, связанное с широким набором явлений, запрограммировано и запускается экспрессией определенных генов [28, 29]. Следовательно, пейсмекерная активность клеток мозга обусловлена спектром химико-физических процессов, отражаемых в виде процессов синаптического возбуждения и торможения, являющихся как биохимическими реакциями в тканях организма, так и электрическими следствиями некоторых из них.

Таким образом, ритмическую активность мозга выполняют генераторы — совокупность клеток, имеющих пейсмекерный механизм, а синхронизацию осцилляций обеспечивают синапсы. Однако у прокариотов нет синапсов, но, как отмечено выше, у цианобактерий присутствует слипание их клеточных стенок и цитоплазматических выростов, формируя при этом бактериальные пленки и маты, которые могут выступать своеобразной моделью (прообразом) нервной системы. Всё это способствует образованию целостных колоний микроорганизмов, в которых возникает синхронизация электрической активности, которая осуществляется не только с помощью прямого контакта между клетками, но и между удаленными участками колонии микроорганизмов [1]. Данный феномен можно, на наш взгляд, объяснить, привлекая феномен формирования иерархии кластеров (рассмотрим чуть ниже), а также природу гомеостатического фрактально-голографического конструкта.

Осцилляции в виде электрической активности у многоклеточных организмов впервые появляются у дробящейся зиготы, и уже на первых этапах ее дробления бластомеры образуют кластеры, связывающие прообразы тех нейронов, которые в дальнейшем будут обладать специфическими свойствами [30]. Причем данная осцилляторная активность бластомеров задана генетически [31]. В последующем развитии организма данные бластомеры, являясь родоначальниками кластеризации синаптически связанных клеток, обеспечивают формирование широкого спектра особенностей как нейронных систем, так и дальнейшего поведения. Выявлена особенность активации конкретных групп (кластеров) нейронов, ответственных за решение пространственно-образных либо вербально-логических задач [7]. Каково же само явление кластеризации как одного из основополагающих принципов формирования и

функционирования сложных систем?

Феномен кластеризации

Процесс формирования многовариантной иерархии сложности, на котором возникают специфические свойства в системах, как в неживой, так и в живой природе, имеет свою особенность. Так, возникновение специфических свойств систем не в последнюю очередь обусловлено именно количественным составом элементов (рассмотрено более подробно в нашей работе [15, с. 39–40]), т. е. необходимы некоторая критическая масса (некий кластер) тех или иных элементов и их специфическое взаимодействие. Нервные клетки многих образований мозга (таламус, гипоталамус, гипофиз и т. д.) формируются в группы по 50–70 штук (кластер). Данные кластеры, каждый обволакиваясь капсулой и выступая как отдельный элемент, снова объединяются в самоподобные группы — ***иерархию кластеров*** (ИК), и так вплоть до образования уже ядер таламуса, гипоталамуса, гипофиза и т. д. Из психологии восприятия известно, что понимание осуществляется при наполнении критической массы (кластер) элементов смыслового тезауруса.

Учитывая приведенные примеры, важно отметить, что процесс формирования кластеров имеет важную особенность. А именно: наполненность некоторой совокупности тех или иных элементов, например количественного состава элементов смыслового тезауруса, не достигшая критической массы (кластера), еще не формирует целостность восприятия. Только при достижении критической массы элементов смыслового тезауруса происходит то, что в ядерной физике называют схлопыванием, т.е. осуществляется взаимодействие всей совокупности элементов критической массы с формированием целостности, ответственной уже за процесс восприятия (инсайт). Более того, данная сформированная целостность смыслового тезауруса в дальнейшем, как правило, выступает уже в виде элемента, наполняя следующую совокупность критической массы (кластер) элементов смыслового тезауруса более высокого порядка. И так до бесконечности.

Аналогичные системные свойства формирования кластеризации определяют появление жизнедеятельности, эволюцию биологических систем, коллективного интеллекта и т. д., обусловливая при этом иерархию системных свойств, т. е. широко привлекая ИК. Иными словами, ИК присутствует на всех уровнях организации живого, начиная с генетического уровня. Так, например, у человека процесс слияния яйцеклетки и сперматозоида формирует кластер хромосом и, соответственно, генов, запускающих образование зиготы. И уже первые дробления зиготы формируют генетически заданную ритмическую активность осцилляций, но только в сформированной целокупной основе (кластере) бластомеров, которая, в свою очередь, является системообразующей для формирования функциональной совокупности (кластеров) нейронов. Данные кластеры нейронов начинают исполнять роль центров синаптического переключения клеток при объединении с другими клетками (кластерами) организма, формируя функциональные системы (следующий уровень ИК) уже до целостного организма. Феномен ИК отражает самоподобие систем, так свойственно природе фрактала.

Гомеостатический фрактально-голографический конструкт

В данном контексте можно отметить, что для живых систем понятие «адаптивное поведение» подразумевает рефлексию динамики параметров внешней среды и ответное изменение внутреннего состояния живых систем, с сохранением оптимально возможных в данных условиях рамок жизнедеятельности. Причем данное явление, которое получило название «***гомеостазис***», характерно не только для отдельной растительной, животной особи или человека, но и для группы людей, животных и для более высоких уровней иерархии живого. Это явление получило название ***гомеостатика*** [32, 33]. Характерной особенностью гомеостатики явилось изучение и построение моделей, основанных на управлении противоположностями. Важнейшей составляющей (целостностью) данных моделей является управляемое внутреннее противоречие, которое, по существу, является жизненно важным ресурсом любой подсистемы живого организма, с точки зрения его гармонизации. Можно сказать, что гармония всего живого не обладает каким-либо смыслом вне противоречивости. Иными словами, всякое противоречие структурно, как и всякая структура противоречива [33].

По сути, гомеостатическая система, обеспечивающая поддержание гомеостаза живых организмов в заданных пределах, состоит из элементарных ячеек управления — своеобразных гомеостатов, имеющих, несмотря на различие материальных основ, одну и ту же структурную универсальную схему. А именно: в общем случае гомеостат представляет собой иерархическое, двух- и более полярное управ-

ление, которое даже в самом упрощенном виде (через цели и противоречия) будет представлять собой универсальный алгоритм [33], отражающий основные свойства гомеостатического управления тех или иных иерархических систем — от молекулярных до групповых сообществ живых систем. Объединяющим принципом данных ячеек управления (гомеостатов), формирующих иерархическую структуру, на наш взгляд, будет являться фрактальность, а точнее ФГК. Иными словами, в основе иерархических структур живого вещества лежит формирование гомеостатических ФГК.

Гомеостатический фрактально-голографический аттрактор Плыкина и фрактальность каналов

Структуре-аттрактору гомеостатического ФГК в данном случае, на наш взгляд, будет отвечать аттрактор Плыкина, изучаемый в рамках фрактальности каналов, рассмотренных нами ранее [15]. В конечном итоге здесь просматривается иная природа, иная топология. Фрактальность каналов позволяет наиболее адекватно объяснить, во-первых, иерархию системных уровней организации живого, во-вторых, отразить размерность подобия тех или иных систем живого и, в-третьих, — коэволюционную, сопряженную эволюцию развивающихся систем и структур объектов.

Фрактальности каналов в форме гомеостатического ФГК будет отвечать, как отмечено выше, один из странных (фрактальных) аттракторов — аттрактор Плыкина (см. рис. 2). Как и другие странные аттракторы, он несет в себе неслучайные последовательности, генерирующие порядок. Так, на рис. 2 в качестве простейшего примера представлена область притяжения из 4-х компонент связностей (трех связностей от трех притягивающихся множеств, а 4-ой связностью является среда).

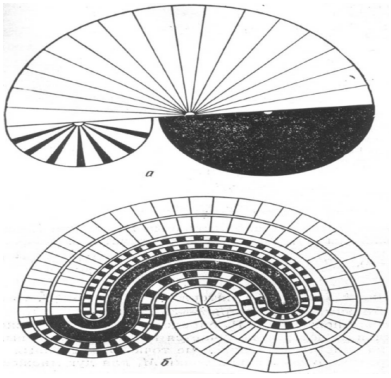


Рис. 2. *Аттрактор Плыкина, область притяжения которого состоит из 4-х компонент связности. Притягивающее множество, порождённое отображением фигуры вверху (а) на фигуру внизу (б) [20]*

Видно, что притягивающиеся множества порождены отображением верхней фигуры (а) на фигуру внизу (б) в соответствии с рисунком. В простейшем случае в качестве трёх притягивающихся множеств могут выступать, например, процессы преобразования своеобразных целостностей — генетических, физиологических, функциональных и т.д., ответственных за формирование осцилляций живого вещества.

Следует отметить, что аттрактор Плыкина, область притяжения которого состоит из четырех компонент связности, не является окончательным. Компонент связности может быть значительно больше, благодаря чему отражается более широкий спектр связанных между собой взаимодействий информационных системных процессов, обеспечивая процесс интеграции нейрофизиологических, психических и социальных процессов [16].

Возникает вопрос. Как же происходит взаимодействие и взаимосодействие каналов в структуре гомеостатического фрактально-голографического конструкта-аттрактора, как осуществляется их связность между собой и, соответственно, последующая интеграция тех или иных системных процессов? Как отмечено выше, хаотические (фрактальные) аттракторы, имея разупорядоченность в определенном диапазоне, великолепно совмещаются с упорядоченностью в другом диапазоне, отражая этим «кооперативные», синтетические взаимоотношения детерминизма и статистичности [15]. При этом данную особенность не в последнюю очередь обеспечивает преобразование «подковы Смейла» (рис. 1), присутствие которой наличествует в каждом (из 4, 6 и более) компоненте связности притягивающихся множеств аттрактора Плыкина. Именно функционирование (работа) в совокупности всех подков связ-

ностей, притягивающихся множеств (включая и среду) обеспечивает перевод из хаотичности функционирования в упорядоченную, согласованную работу включенных тех или иных систем. При этом с использованием всего наличествующего спектра взаимодействия и взаимосодействия информационных системных процессов обеспечивается более многомерный и глобальный процесс интеграции и конгруэнтности затронутых системных процессов — генетических, физиологических, функциональных, нейрофизиологических, психических и т. д. В рамках этих представлений природа осцилляторных проявлений живого вещества, формируясь в индивидуальном развитии, представляет собой систему взаимосвязанных интегральных систем ИК, отражая при этом субъективное отражение объективного соотношения организма либо совокупности организмов со средой.

С другой стороны, с принятием неопределенности как условия построения знания, важной составляющей картины мира осцилляторных процессов живого вещества становится, в рамках фрактальности каналов, идея многоуровневости ИК, что в конечном итоге ведет к представлению о самоопределяемости живого вещества. В данной системе многомерность живого вещества будет порождать совокупные эффекты взаимосодействия «многоразличных слоев», которые, по сути, не могут быть положены в единую цепочку причинной связи в реальном времени и пространстве. Здесь, по-видимому, будет срабатывать сворачивание и упаковывание многоразличных слоев вместе либо мгновенное разворачивание в одновременно срабатывающую иерархию слоев, в рамках природы гомеостатического ФГК (принципа) странного аттрактора, в частности, аттрактора Плыкина.

Природа осцилляций живого вещества

Природе микротрубочек цитоскелета клеток отводится роль «информационного процессора» [24, 25]. Непроизвольно напрашивается мысль, что данное объединение микроскопической квантовой когерентности (микротрубочки цитоскелета клеток, содержащих РФ) с макроскопическим поведением колонии микроорганизмов может быть обусловлено тем, что «информационным процессором» будет, по-видимому, не в последнюю очередь, управлять гомеостатический ФГК (принцип) странного аттрактора. Этому также будет соответствовать использование ранее нами математической и информационной составляющей как голографии, так и фрактальной геометрии: разнообразие растительных и животных организмов проявляет себя через ту или иную математическую формулу — ЗП, РФ, немарковские процессы, математические прогрессии [15, 17]. Их использование позволило, в целом, по-новому взглянуть как на эволюционный процесс живого, так и на отдельные его проявления [15, 16]. В частности, анализ природы полиморфических рядов в растительном и животном мире, природы гомологических рядов наследственной изменчивости Вавилова, теории функциональных систем П.К. Анохина, способствовал формулированию дискретно-непрерывной (дискретно-континуальной) интерпретации эволюции органического мира [15].

Анализ принципа голографии (последовательность Морса-Туэ, последовательность Фибоначчи, преобразование Прибрама) создает ряд возможных вариантов избыточной информации для возникновения квазиголографической памяти [15, 17]. Все это, вероятно, будет выполнять свои функции при формировании в колонии цианобактерий своеобразной ИК, представляющих собой самоподобные образования гомеостатического ФГК.

Что касается многоклеточных организмов, включая высших животных и человека, то здесь необходимо рассмотреть работу мозга и нервной системы организма. Как известно, нейронно-синапсовая схема мозга не статична, т. е. не обладает ни постоянными синапсами, ни постоянными их интенсивностями, изменяясь порой быстрее, чем за секунду. Кроме того, изменяются и сами связи. Центральную роль в управлении всем этим также играет цитоскелет нервных клеток мозга. Если бы нейронно-синапсовая схема мозга была статична, она бы была эквивалентна схеме компьютера [34]. Следовательно, потенциальная вычислительная возможность мозга оказывается значительно большей, чем это можно ожидать, если бы мозг использовал в качестве простейших вычислительных блоков целые нейроны. Но поскольку функционированием мозга управляют микротрубочки, то в микротрубочковых процессах должно быть что-то отличное от простых вычислений. В этом контексте гипотеза Хамероффа–Пенроуза [25, 34] основана на том положении, что такая вычислительная активность должна предполагать микроскопическую квантовую когерентность, объединенную неким тонким образом с макроскопическим поведением. Данное объединение микроскопической квантовой когерентности с макроскопическим поведением может, на наш взгляд, быть обусловлено сопряженностью РФ, заложенных в организации микротрубочек нервных клеток и работы функциональных систем организма,

в рамках стратегии числовых отношений РФ, ЗП [15, 16], и, соответственно, реализуется в психике в целом и сознании — в частности.

Наличие широкого спектра перекрывания элементов символьной информации голографии и математического аппарата фрактальной геометрии гомеостатического ФГК обусловливает их взаимодействие, взаимопроникновение. Таким образом, языком кодирования-перекодирования является и дух, и материя [17]. Тем не менее перекодировка физических (физиологических) процессов в идеальные процессы, на наш взгляд, должна срабатывать уже в психофизиологических, психофизических и вплоть до психических процессов. Все это будет наиболее адекватно отвечать принципу «парадигмы числового поля» [17].

Возникает вопрос. Не эти ли, в совокупности, особенности проявления природы живого побудили исследователей [35] выдвинуть идею некоего подобия «социального интеллекта» в колониях простейших за счет их широкой кооперативной организации и сложной коммуникации, осуществляемой с помощью дыхания, питания и других функций?

Наряду с этим, в рамках фрактальности каналов аттрактора Плыкина, который содержит в себе плодотворный хаос, осмысление многомерности и неопределенности природы живого вещества позволяет, на наш взгляд, осуществить решение проблемы конструируемости, формирования осцилляций живого вещества. То есть здесь, на основе взаимодействия широкого спектра информационных системных процессов, осуществляется процесс самоорганизации, эмерджентности формирования осцилляций живого вещества.

Заключение

Рассмотренные ключевые вопросы поиска подходов к объяснению постнеклассического познания природы возникновения и поддержания осцилляторной активности цианобактерий как информирования генерации осцилляторной активности у многоклеточных животных с последующей генерацией ритмов живого вещества и различных психофизических феноменов необходимо изучать в рамках гомеостатического ФГК странного (фрактального) аттрактора. В частности, феномен образования капсулоподобных оболочек у одноклеточных с формированием ИК в колонии микроорганизмов, а также формирование иерархии нейронных кластеров у многоклеточных животных отражает следующие особенности.

Во-первых, феномен самоподобия, свойственный природе фрактала, а в целом — природе гомеостатического ФГК аттрактора Плыкина, с привлечением наиболее адекватного его физического и математического инструментария, рассмотренного выше, что позволяет, на наш взгляд, наиболее адекватно отразить природу возникновения и поддержания осцилляторных процессов в генерации ритмов живого вещества.

Во-вторых, именно наличие широкого спектра перекрывания элементов, входящих в систему при максимально возможных отношениях элементов гомеостатического ФГК, обусловливает их взаимодействие, взаимопроникновение и постоянный переход (перекодировку) идеального (фрактальности – при всем ее математическом аппарате) в материальное образование (физика голограммы). Таким образом, языком кодирования-перекодирования являются и дух, и материя.

В-третьих, познание природы осцилляций живого вещества, на наш взгляд, будет соответствовать дальнейшему своему развитию в рамках «парадигмы числового поля» [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Греченко Т. Н., Харитонов А. Н., Жегалло А. В., Александров Ю. И. Психофизиологический анализ осцилляторных процессов в поведении биосоциальных систем. *Психол. журн*. 2015;36(5):75–86.
2. Загускин С. Л., Загускина Л. Д. Ритмы микроструктур нервной клетки речного рака и их физиологическое значение. *Морфология*. 1996;4:90–95.
3. Alle‘ne C., Cattani A., Ackman J. B., Bonifazi P., Aniksztejn L., Ben-Ari Y., Cossart R. Sequential Generation of Two Distinct Synapse-Driven Network Patterns in Developing Neocortex. *J. Neurosci*. 2008;28(48):12851–12863.
4. Dumollard R., Carroll J., Dupont G., Sardet C. Calcium Wave Pacemakers in Eggs. *Journal of Cell Science*. 2002;115(18):3557–3564.

5. Харитонов А. Н., Греченко Т. Н., Сумина Е. Л., Сумин Д. Л., Орлеанский В. К. *Социальная жизнь цианобактерий. Дифференционно-интеграционная теория развития*. Кн. 2 / Сост. и ред. Н. И. Чуприкова, Е. В. Волкова. М.: Языки славянской культуры, 2014. С. 283–302.
6. Рыбальченко О. В. *Морфо-физиологические аспекты взаимодействий микроорганизмов в микробных сообществах*: Автореф. дисс. … докт. биол. наук. СПб., 2003.
7. Роик А. О., Иваницкий Г. А. Нейрофизиологическая модель когнитивного пространства. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2011;61(6)688–696.
8. Безденежных Б. Н. *Динамика взаимодействия функциональных систем в структуре деятельности*. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2004.
9. Данилова Н. Н. *Психофизиология*. М.: Аспект Пресс, 2000. 373 с.
10. Иваницкий Г. А. Распознавание типа решаемой в уме задачи по нескольким секундам ЭЭГ с помощью обучаемого классификатора. *Журнал высшей нервной деятельности*. 1997;47(4):743–747.
11. Марченко О. П. Электрические потенциалы мозга, связанные с категоризацией названий одушевленных и неодушевленных объектов. *Экспериментальная психология*. 2010;3(1):5–29.
12. Чернышева М. П. Циркадианные осцилляторы и гормоны. *Цитология*. 2013;55(11):761–777.
13. Симонов П. В. Тета-ритм и механизмы квантования извлекаемых из памяти энграмм. *Память и следовые процессы:* Тезисы докл. 4-й Всесоюзн. конференц. Пущино, 1979.
14. Ливанов М. Н. *Пространственная организация процессов головного мозга*. М.: Наука, 1972. 181 с.
15. Богатых Б. А. *Фрактальная природа живого: Системное исследование биологической эволюции и природы сознания*. М.: Книжный дом «Либроком». 2012. 256 с.
16. Богатых Б. А. Системная психофизиология и психофизиологическая проблема. *Сложные системы*. 2017;3(24):62–76.
17. Богатых Б. А. Фрактально-голографический конструкт и теория поля К. Левина. *Национальный психологический журнал*. 2018;2(30):123–134.
18. Bohm D. A New Theory of the Relationship of Mind and Matter. *Journal of the American Society for Psychical Research*. 1986;80(2–3):113–35.
19. Берже П., Помо И., Видаль К. *Порядок в хаосе. О детерминистическом подходе к турбулентности*. М.: Мир, 1991. 367 с.
20. Плыкин Р. В. К проблеме топологической классификации странных аттракторов динамических систем. *УМН*. 2002;57(6):123–166.
21. McDonald S., Grebogi C., Ott E., Yorke J. Fractal Basin Boundaries. *Physica D: Nonlinear Phenomena.* 1985;17(2):125–153.
22. Ruelle D., Takens F. On the Nature of Turbulence. *Commun. Math. Phys*. 1971;20:167–192; 23:343–344.
23. Smale S. Differentiable Dynamical Systems. *Bull. Amer. Math. Soc*. 1967;73:747–817.
24. Hameroff S. R. *Ultimate Computing. Biomolecular Consciousness and NanoTechnology*. Elsevier Science Publishers B.V. 1987.
25. Hameroff S. R. Quantum Computation in Brain Microtubules? The Penrose–Hameroff “Orch OR” Model of Consciousness. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1998;356:1869–1896.
26. Данилова Н. Н. Роль высокочастотных ритмов электрической активности мозга в обеспечении психических процессов. *Психология. Журнал Высшей школы экономики*. 2006;3(2):62–72.
27. Başar E. Oscillations in “Brain-Body-Mind” – a Holistic View Including the Autonomous System. *Brain Res*. 2008;1235:2–11.
28. Соколов Е. Н. Пейсмекерный потенциал в организации поведения. *Пейсмекерный потенциал нейрона*. Тбилиси: Мецниереба, 1975. С. 177–190.
29. Begleiter H., Porjesz B. Genetic of Human Brain Oscillations. *International Journal of Psychophysiology*. 2006;60:162–171.
30. Muller H. A. Of Mice, Frogs and Flies: Generation of Membrane Asymmetries in Early Development. *Dev. Growth Differ*. 2001;43(4):327–342.
31. Кузень С. И., Санагурский Д. И., Муращик И. Г., Гойда О. А. Изменения трансмембранного потенциала развивающегося эмбриона вьюна при действии инсулина, торможении транскрипции и трансляции. *Биофизика*. 1980;25(4):658–663.
32. Горский Ю. М. *Основы гомеостатики. Гармония и дисгармония в живых, природных, социальных и искусственных системах*. Иркутск. 1998.

33. Степанов А. М. Нейрокибернетические аспекты рефлексивных процессов. *Рефлексивные процессы и управление*: Международный научно-практический междисциплинарный журнал. 2003;3(2):57–69. Режим доступа: http://www.reflexion.ru/Library/J2003_2.pdf.
34. Penrose R. *The Emperor's New Mind*. New York: Oxford Univ. Press, 1989.
35. Jacob E. B., Becker I., Shapira Y., Levine H. Bacterial Linguistic Communication and Social Intelligence. *Trends in Microbiology*. 2004;12(8):366–372.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-10

НОВОЕ ПОНИМАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

К. А. Хадарцева[1], **О. Е. Филатова**
[1] *Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация*
medins@tsu.tula.ru

Аннотация: в рамках существующей теории динамических систем стационарные режимы любой динамической системы описываются уравнением $dx/dt=0$, для вектора состояния этой системы $x=x(t)=(x_1, x_2,\ldots, x_m)^T$ в m-мерном фазовом пространстве состояний. С позиций стохастики для неизменности системы достаточно сохранения статистической функции распределения $f(x)$ или ее характеристик (статистического математического ожидания $<x>$, статистической дисперсии Dx^*, спектральной плотности сигнала, автокорреляции и т.д.) в рамках определенных (статистических) допущений. Однако в живой природе любые параметры $x_i(t)$ всего вектора состояния $x(t)$ биосистемы демонстрируют непрерывное, хаотическое движение в фазовом пространстве состояний. При этом отсутствует статистическая устойчивость выборок $x_i(t)$, что получило название эффекта Еськова–Зинченко. В этом случае вводится понятие псевдоаттрактора, некоторый аналог принципа неопределенности Гейзенберга, и дается определение двух типов неопределенностей (1-го и 2-го). В итоге мы приходим к инверсии понятий: то, что в физике (и биомедицине) сейчас считается стационарным режимом, является кинематикой (движением $x(t)$ в фазовом пространстве состояний), а движение биосистем является (для них) стационарным режимом.

Ключевые слова: стандарт, стационарный режим, эффект Еськова–Зинченко.

Для цитирования: Хадарцева К. А., Филатова О. Е. Новое понимание стационарных режимов биологических систем. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):92–101. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-10.

NEW UNDERSTANDING OF STEADY STATES IN BIOLOGICAL SYSTEMS

K. A. Khadartseva[1], **O. E. Filatova**
[1] *Tula State University, Tula, Russian Federation*
medins@tsu.tula.ru

Abstract: within the existing theory of dynamic systems, steady states of any dynamic system are described as $dx/dt=0$, for the state vector of the system $x=x(t)=(x_1, x_2,\ldots, x_m)^T$ in the m-dimensional state phase space. From the stochastic point of view, the preservation of the statistical distribution function $f(x)$ or its properties (statistical mathematical expectation $<x>$, statistical variance Dx^*, the spectral density of the signal, autocorrelation, etc.) within certain (statistical) assumptions is sufficient for the system to remain unchanged. However, in the living nature any parameters $x_i(t)$ of the entire state vector $x(t)$ of the biosystem show continuous, chaotic motion in the state phase space. There are no statistical stability in $x_i(t)$ samples, which is called the Eskov-Zinchenko effect. We introduce the concept of a pseudoattractor similar to the Heisenberg uncertainty principle and define two types of uncertainties: 1st and 2nd. As a result, we inverse the concepts: what in physics (and biomedicine) is now considered to be a steady state is kinematics (the motion of $x(t)$ in the state phase space), and the motion of biosystems is (for them) a steady state.

Keywords: standard, steady state, Eskov–Zinchenko effect.

Cite this article: Khadartseva K. A., Filatova O. E. New Understanding of Steady States in Biological Systems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):92–101. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-10.

Введение

Традиционно к динамическим системам относят объекты, которые можно описывать с помощью различных уравнений (например, дифференциальных, разностных, интегральных, интегро-дифференциальных и других). В этом случае обычно используют некоторые переменные, например, компоненты $x_i(t)$ вектора состояния такой системы $x=x(t)=(x_1, x_2,\ldots, x_m)^T$ в m-мерном фазовом пространстве состояний (ФПС). В физике довольно часто аргументом в таких уравнениях выступает время t, а функцией является, например, $x(t)$ [1–5].

В итоге мы для таких систем и процессов, в которых эти системы участвуют, можем задать некоторую фазовую траекторию $x(t)$ в таком m-мерном фазовом пространстве состояний (ФПС) и анализировать ее поведение. Это составляет, например, основу качественной теории дифференциальных уравнений и т.д. Для таких систем и для их вектора $x(t)$ мы можем определить стационарный режим моделируемой биосистемы как $dx/dt=0$, т.е. любая $x_i(t)=const$ [6–11].

В стохастике имеются другие подходы при определении равновесия (неизменности) биосистемы, но там тоже требуется сохранение неизменности (постоянства) некоторых характеристик статистической функции распределения $x(t)$ и выборок переменных $x_i(t)$ в рамках детерминистской или стохастической науки (ДСН).

Какую теорию и какие методы мы тогда должны использовать, если окажется, что для любой биосистемы ее вектор состояния демонстрирует (непрерывно) $dx/dt\neq 0$ и статистические характеристики полученных выборок (якобы для биосистемы в неизменном физическом и физиологическом состоянии) демонстрируют непрерывные и хаотические изменения? Можно ли вообще применять методы ДСН в описании таких особых биосистем?

Оказалось, что именно такими свойствами обладают все параметры организма человека [12–18]. Это получило название эффекта Еськова–Зинченко (ЭЕЗ) в виде уникальности выборок параметров $x_i(t)$ организма человека (при повторных регистрациях у одного и того же испытуемого или при регистрации параметров отдельной группы испытуемых (тоже при повторениях)). Эти системы (по предложению W. Weaver [19]) были названы системами третьего типа — СТТ. Их описание и моделирование потребовало выхода за пределы современной науки (ДСН) [20–26], как это и предполагал Weaver более 70-ти лет назад. Однако вся современная наука продолжает изучать СТТ только в рамках ДСН [27–35].

Традиционная интерпретация стационарных режимов биосистем

Сразу отметим, что последние 100–150 лет во всех науках о живых системах (биологии, биофизике, медицине, психологии и т.д.) господствует центральная догма естествознания: параметры организма (человека, животного, растения) можно описывать в рамках стохастики. При этом существует определенное требование к стандартам, т.е. к описанию некоторых, якобы устойчивых, состояний организма живого объекта. Для упрощения в дальнейшем мы будем представлять и изучать только организм человека, т.к. такой подход максимально затрагивает биомедицину и психологию с позиции медицинской и биологической кибернетики. При этом аналогичные результаты мы получали и на животных [36–42].

Итак, современная физика, биофизика и биомедицина твердо уверены, что методы статистики (в общем случае будем говорить о стохастике) вполне адекватно представляют неизменность организма (например, его гомеостаз), стационарные — неизменные состояния функциональных систем организма (ФСО), работу нейронных сетей мозга (НСМ) и мозг в целом. Подчеркнем, что в биомедицине работают с выборками $x(t)$ и для них рассчитывают статистическую функцию распределения $f(x)$, ее характеристики (статистическое математическое ожидание $<x>$, статистическую дисперсию D_x^*, спектральную плотность сигнала (СПС), автокорреляцию $A(t)$ и т.д.).

В рамках стохастики требуют, чтобы при повторной регистрации выборки $x_i(t)$ ее $f(x)$, $<x>$, D_x^*, СПС, $A(t)$ не изменялись (в рамках законов стохастики). Если в момент времени t мы получили выборку $\{x_i^1(t)\}$, а в следующий момент t_2 имеем выборку $\{x_i^2(t)\}$ и их статистические характеристики совпадают, то в биомедицине считают, что с биосистемой ничего существенного не произошло. В этом случае можно говорить о неизменности биосистемы, а с позиции физики — о стационарном режиме [6–11].

При этом никто уже давно в биомедицине не требует точного совпадения даже этих числовых характеристик (для выборки $\{x_i^1(t)\}$ и $\{x_i^2(t)\}$). Давно уже все понимают, что детерминистский подход и детерминистские модели имеют разовый характер. На любых интервалах времени Δt, и Δt_2 мы не можем получить точное (по всем точкам выборок) совпадение значений $x(t)$ или их распределения. Однако в стохастике выработали особые оценки совпадения выборок (статистическая проверка гипотез, например). В итоге все эти 100–150 лет биомедицина живет в твердой уверенности в том, что у биосистем (у гомеостаза, ФСО, НСМ) существуют стационарные режимы (в виде неизменности выборок $x(t)$), если биосистема находится в неизменном физиологическом (и физическом!) состоянии. Просто это постулируется, принимается на веру, но этому строгих доказательств никто в биомедицине

за последние 150 лет не представил. На этом основана и современная биокибернетика [27–35].

В 1947 году выдающийся российский биомеханик Н.А. Бернштейн [43] высказал сомнения в справедливости этой догмы биомедицины. В биомеханике он сформулировал гипотезу о «повторении без повторения» в организации любого движения человека [43]. Эту гипотезу Бернштейн пытался обосновать доказательством наличия не менее пяти систем регуляции движений (системы *A, B, C, D, E*) и возможным хаотическим вмешательством любой этой системы в организацию любого вида движений. Подчеркнем, что за эти 74 года никакого опровержения этому нет (но нет и доказательств!).

Н.А. Бернштейн верил, что любая эта система (из пяти) может в любой момент времени включаться в «построение данного движения», а сила (и роль) этого вмешательства тоже может быть произвольной (хаотичной). В итоге он выдвигает гипотезу о «повторении без повторения». Подчеркнем, что никакого количественного доказательства он не представил тогда. Более того, после опубликования статьи (в 1957 году) с критикой теории И.П. Павлова физиологи России постарались замолчать об этой гипотезе, а мировая физиология просто все это игнорировала последние 70 лет.

В итоге более 70-ти лет гипотеза Н.А. Бернштейна о хаосе в биомеханике была забыта, ее просто игнорировали. Еще более трагическая судьба была у W. Weaver, когда он вывел все биомедицинские системы за пределы ДСН. Он начал говорить о биосистемах как о системах третьего типа — СТТ (*complexity*), которые не могут быть объектом всей ДСН [19].

Представления W. Weaver об СТТ — живых системах

В 1948 году W. Weaver (вместе с C. Shannon он был основоположником теории современной информации) представил всему мировому научному сообществу общую классификацию систем живой и неживой природы. W. Weaver говорил, что более 300 лет наука активно изучает детерминистские системы (системы 1-го типа — СПТ). Действительно, например, теория динамических систем (ТДС) активно создавалась в XVII, XVIII и XIX веках.

Она продолжает развиваться и в XX, и XXI веках. В ее основе лежит постулат о причинно-следственных связях. В детерминизме задание начального состояния $x(t_0)$ всего вектора состояния системы $x=x(t)=(x_1, x_2,..,x_m)^T$ в m-мерном фазовом пространстве состояний (ФПС) и уравнения, описывающие динамику $x(t)$ в ФПС, полностью определяют конечное состояние $x(t_k)$ и траекторию движений $x(t)$ в ФПС. Детерминистская теория хорошо описывает СПТ, и это действительно достижение человечества, которое продолжает развиваться. Напомним, что в ТДС Пуанкаре представил задачу о трех телах, которая поставила проблему хаоса в ДСН.

Для СПТ строго выполняется принцип детерминизма: прошлое и настоящее определяют будущее состояние системы. Это было основой учений Ньютона и Лейбница. Более того, некоторые положения детерминизма плавно перешли и в стохастику. Например, в стохастике считается, что начальное состояние $x(t_0)$ любой системы мы можем повторить многократно. Это элемент детерминизма, и это объединяет стохастику и детерминизм (прошлое определяет будущее).

Справедливости ради мы должны сказать, что для стохастических систем (систем 2-го типа — СВТ) W. Weaver вводит уже понятие *complexity*. Он определяет СВТ как *disorganized complexity*. В чем это *complexity* проявляется, W. Weaver в своей фундаментальной работе явно не говорит. Однако это следует из определения любого стохастического процесса. Если мы имеем дело с непрерывной случайной величиной (НСВ), а параметры $x_i(t)$ функции организма всегда будут НСВ, то повторить (точно) конечное состояние $x(t_k)$ уже невозможно для СВТ [6–11].

Мы не можем второй раз попасть в точку $x(t_k)$ в ФПС, которая была зарегистрирована для первого процесса с исследуемой системой. Поэтому в стохастике мы работаем с выборками (облаком точек в ФПС). Очевидно, что одна выборка (облако точек в ФПС), которая была получена на интервале Δt_1, не может точно (по раннее полученным точкам $x(t_k)$) совпасть со второй выборкой $x(t_k)$, которые были получены на интервале Δt_2. Поточечное совпадение двух выборок неизменной системы уже невозможно. В детерминизме это все легко повторить. Тогда появляется первая *complexity* для СВТ.

Сейчас анализ таких двух выборок (двух облаков в ФПС) производится в рамках теории вероятности и статистики. Здесь не требуется точного совпадения точек, а нужно, чтобы совпадали статистические характеристики ($<x>$, D_x^*), их СПС и $A(t)$. Это уже правила сравнения выборок (а не отдельных точек) по законам стохастики. Однако $x(t_0)$ мы должны повторять многократно и точно (иначе опыты не будут совпадать, они будут различны). Здесь детерминизм и стохастика едины.

Для СВТ W. Weaver вводит понятие *complexity* именно из-за того, что: невозможно точно повторить (одно) конечное состояние системы $x(t_k)$; невозможно и все точки выборки повторить (это тем более невозможно); вводятся новые правила оценки коллективного поведения системы на данном интервале времени Δt. Напомним, что в детерминизме все совпадает по точкам в момент времени t, но в стохастике мы уже работаем с выборками, которые по точкам не совпадают.

Подчеркнем, что понятие «коллективное поведение» не имеет строгой интерпретации, т.к. выборку мы можем получить после N испытаний с одним объектом или при измерении (по одному разу!) N якобы одинаковых, разных объектов (испытуемых). Подчеркнем, что слово «одинаковый» (или тождественный) в современной статистике строго не определено. Используют понятие «однородной» группы испытуемых. Однако критериев (точных) оценки такой однородности пока в стохастике нет. Очевидно, что если группа испытуемых неоднородна, то стохастика не может описывать такую группу.

Это выглядит очень странно, т.к. математика требует строгих определений, и тогда непонятно по каким критериям формируется группа якобы «однородных» испытуемых? Вообще критерии формирования группы (однородной?) в биологии, медицине, психологии, экологии и других науках о живых системах пока выглядят очень странно. Обычно ограничиваются приблизительно одинаковым возрастом, полом, отсутствием заболеваний и другими (нечеткими) критериями.

Очевидно, что все это является чисто биологическими критериями и не имеет никакого отношения к получаемым выборкам и их точной математической оценке. Это вступает в противоречие с существующей математикой, и возникает острая необходимость в точном описании «однородности» самих выборок, а не биологической оценки исследуемых групп. Это касается и выборок одного человека, где сам испытуемый не изменяется, но получаемые выборки могут быть неоднородными. В этом случае отсутствует статистическое совпадение выборок для одного и того же испытуемого (или для одной группы) [27–35, 42–49]. Подчеркнем, что корректное определение однородности требует повторных измерений и сравнений самих выборок. Для биокибернетики это имеет принципиальное значение.

Существуют ли точные критерии оценки однородности выборок в математике?

Следует сразу отметить, что в статистике существуют строгие критерии оценки любых выборок. Они основаны на оценке отнесения полученной выборки параметра $x_i(t)$ к одной генеральной совокупности. При этом выборки по отдельным точкам будут совершенно не совпадать, и тогда мы уходим от строгого детерминизма. В детерминизме прошлое определяет будущее и точка $x(t_k)$ всегда для СПТ многократно повторима. Для СВТ мы говорим о повторимости выборки (по определенным правилам). При этом нужно проверять выборки на предмет их принадлежности к одной генеральной совокупности. Отметим, что ни Weaver, ни Н.А. Бернштейн [43] это не проверили в режиме повторных регистраций выборок $x_i(t)$. Нет точных оценок и в определении гомеостаза [44–50].

Очевидно, что уже появляется *complexity* и *uncertainty*, т.к. мы не можем многократно повторить $x(t_k)$ точно для СВТ. Одна точка $x(t_k)$ уже не может задать выборку, даже если это будет математическое ожидание M_x (т.е. $M_x=\langle x\rangle$ для данной выборки). В итоге, следуя логике W. Weaver, мы должны работать с выборками и сравнивать две выборки $x(t_k)$ для интервалов Δt_1 и Δt_2. При изучении СВТ мы должны рассматривать систему не в отдельных точках, а на некоторых интервалах измерения $x(t)$. Это означает изменение идеологии измерений СВТ, т.к. от точки (для t_1) мы переходим к интервалам Δt_1.

Строго говоря, переход от отдельных точек $x(t_k)$, которые регистрируются в данный момент времени t, к регистрации облака точек на интервалах Δt_1 и Δt_2 нам еще не гарантирует доказательства неизменности системы. Как только мы переходим к интервалам Δt, возникает проблема: что было (или будет) с системой до интервала Δt_1 и после Δt_1. Остается ли исследуемая система неизменной (стационарный режим) на любых других интервалах времени, которые не входят в данное измерение? Никто в биомедицине пока не измеряет непрерывно параметры биосистем. Эта проблема игнорируется [12–35]. Никто сейчас даже не пытался проверить статистическую устойчивость выборок на разных интервалах Δt.

Никто за эти (более 300 лет) не задавался таким вопросом в отношении биосистем (СТТ). Более того, за эти более чем 300 лет никто не спрашивал в биомедицинской науке: а остаются ли статистически неизменными выборки, которые регистрируются у одной и той же биосистемы в ее якобы неизменном физическом и физиологическом состоянии?

Подчеркнем, что ответы на эти вопросы имеют фундаментальное значение, т.к. если СТТ непрерывно и хаотически изменяются, то любая выборка параметра организма $x_i(t)$ является уникальной. Это означает, что вся биология, медицина, психология, экология и другие науки о живых системах имеют исторический характер. Они изучают артефакты, т.е. процессы, которые когда-то происходили с этими биосистемами. Тогда великий физик (Резерфорд) был прав, называя эти науки «кашеварением». Строго говоря, все науки о живых системах это *Fuzziness* [50–58].

Более того, это означает, что знание о прошлом СТТ не дает никакой информации о будущем состоянии биосистемы. Распад причинно-следственных связей с позиции ДСН говорит о принципиальной непознаваемости СТТ. В этом и заключается главная *complexity* для СТТ, о которой говорил W. Weaver 73 года назад [49–57]. Однако никто не понял эти идеи W. Weaver.

Следуя логике W. Weaver в его классификации трех типов систем во всей природе, мы сейчас должны логически закончить его рассуждения. Иными словами, мы должны сказать: как одна точка не может описать СВТ (нужно работать с выборкой — облаком точек в ФПС), так и одна выборка не может описать СТТ. В этом главная *complexity* для всех живых систем. Одновременно появляется и общая *uncertainty* для СТТ [55–61]. Будущее СТТ невозможно прогнозировать.

Любая выборка $x_i(t)$ для СТТ будет уникальной, ее невозможно (произвольно!) дважды повторить. Фактически это означает, что СТТ (живые системы) не имеют стационарных режимов (СР). Их вектор состояния $x(t)$ находится в непрерывном и хаотическом движении в ФПС. Тогда ДСН не может изучать и описывать любые живые системы. Это и есть *complexity* и глобальная *uncertainty* [49–61]. Однако неустойчивость выборок за последние 100-150 лет никто не изучал (в режиме многих повторений).

Об этом прямо писал W. Weaver в 1948 году: «These new problems, moreover, cannot be handled with the statistical techniques so effective in describing behavior in problems of disorganized complexity. These new problems, and the future of the world depends on many of them, requires science to make a third great advance an advance that must be even greater than the nineteenth∼century conquest of problems of simplicity or the twentieth∼century victory over problems of disorganized complexity. Science must, over the next 50 years, learn to deal with these problems of organized complexity» [19, с. 5–6].

Для изучения СТТ нужны другие инварианты и другая наука. ЭЕЗ доказывает невозможность дальнейшего применения ДСН, т. к. выборки неоднородны и хаотически изменяются. Возникает закономерный вопрос: существуют ли какие-либо методы и модели, которые бы показывали неизменность (и однородность) выборок $x(t)$? Можно ли выявить СР для СТТ? Очевидно, что в рамках ДСН это выполнить невозможно, т.к. имеем потерю причинно-следственных связей (прошлое не влияет на будущее) и ДСН уже не работает [12–35]. Об этом постоянно говорили нобелевские лауреаты [62–66], но они не проверили гипотезу W. Weaver об СТТ.

W. Weaver в своей работе прямо противопоставил СТТ всей науке еще в самом названии статьи «Science and Complexity», выделяя (противопоставляя) *complexity* современной ДСН. Он поясняет, почему это так. Ответ очевиден: ДСН не может описывать СТТ. Появляются глобальные *uncertainty* и *complexity* во всей науке об СТТ. Это означает, что вся биологическая и медицинская кибернетика работает с уникальными системами и СТТ не может быть объектом ДСН. Очень близко к этому подошел Г.Р. Иваницкий [67–70], но гипотезу W. Weaver никто так и не проверил [71–79].

Обсуждение

Понятие стационарного режима для любой биосистемы ассоциируется с понятиями *норма* или *стандарт*. Существует ли в биомедицине норма для параметров гомеостаза, функциональных систем организма — ФСО (в классификации П.К. Анохина)? Есть ли вообще стационарные режимы для биосистем и как их можно измерять?

Интересно, что академик Ю.В. Наточин (один из ведущих специалистов по теории гомеостаза) в фундаментальной работе «Гомеостаз» наглядно продемонстрировал реальную эволюцию понятия стандарта (нормы) в медицине. Первоначально он говорит о норме (гомеостаза) как о некоторой точке: «. . . механизм выбора данного значения, установки точки стандарта, не ясен, более того он может сдвигаться. . . » [44, с. 5].

Признавая неустойчивость стандарта, Наточин предлагает использовать статистику и находить стандарт по выборке [44]. Он демонстрирует переход от детерминизма (где точно все определяется) к стохастике (работаем с выборкой). Однако в конце своих рассуждений Наточин предлагает учитывать

вариационные размахи параметров гомеостаза. Фактически академик продемонстрировал все виды системного подхода, классификацию которых в 1948 году впервые представил W. Weaver (детерминизм — стохастика — наука об СТТ). Наука об СТТ сейчас нами разрабатывается в виде теории хаоса-самоорганизации (ТХС). Согласно теореме K. Gödel эта ТХС имеет новые понятия, законы и модели [45–56, 71–79].

В рамках ТХС мы вводим понятие псевдоаттрактора (ПА), который и учитывает вариационные размахи. В рамках ТХС доказано, что внутри ПА вектор состояния системы *x(t)* совершает непрерывные и хаотические движения. Внутри ПА мы наблюдаем хаотический калейдоскоп изменения выборок *x(t)*, их статистических функций распределения *f(x)*, их $<x>$, D_x^*, СПС, *A(t)* и т.д. В целом, Ю.В. Наточин невольно повторил рассуждения W. Weaver и подошел к ТХС в оценке гомеостаза. При этом ТХС стационарные режимы определяет как неустойчивость параметров ПА в ФПС. Вектор *x(t)* при этом хаотически движется внутри ПА [49–61]. Это лежит в основе новой науки — теории хаоса-самоорганизации (ТХС).

Следует подчеркнуть, что четыре нобелевских лауреата (I.R. Prigogine, M. Gell-Man, R. Penrose и В.И. Гинзбург) были уверены в возможностях стохастики при описании СТТ [62-66]. За последние 20 лет только Г.Р. Иваницкий [67–70] высказывал сомнение в стохастической устойчивости выборок. Однако никто не предлагал новый аппарат для реального описания СТТ — *complexity* [49–61, 71–79].

Заключение

Детальное изучение выборок любых параметров функций организма человека показало, что у биосистем (СТТ — *complexity* по W. Weaver) отсутствуют стационарные режимы. Это означает ЭЕЗ, где доказано отсутствие статистической устойчивости выборок *x(t)* для СТТ. ЭЕЗ доказывает и потерю причинно-следственных связей для биосистем. Новая наука (ТХС) основана на том, что прошлое не определяет будущее для СТТ.

Одновременно мы приходим к отрицанию стандартов (нормы) в медицине в рамках детерминизма (как точки в ФПС) и в рамках стохастики (путем анализа выборок *x(t)*). Любая выборка *x(t)* для СТТ будет уникальной, ее *f(x)*, $<x>$, $D_x{}^*$, СПС, *A(t)* и т.д. имеют исторический характер. В ДСН нет стандарта (СР) из-за ЭЕЗ.

Переход к ТХС приводит к расчету ПА, которые могут дать инварианты в виде площади *S* для ПА и координат центра ПА. Однако в ТХС вводится иное понимание СР и стандарта. Стандарт (норма) задается параметрами ПА, которые, действительно, сохраняются. Нами доказано, что и величина *k* — число пар, показывающих статистическое совпадение выборок *x(t)*, тоже может быть стандартом в ТХС. Однако это уже другая тема для исследования. Она требует нескольких сотен повторных регистраций выборок у каждого испытуемого (и для всей группы также).

ЛИТЕРАТУРА

1. Betelin V. B., Eskov V. M., Galkin V. A., Gavrilenko T. V. Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems. Doklady Mathematics. 2017;95(1):92–94. DOI: 10.1134/S1064562417010240.
2. Eskov V. M., Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Vochmina J. V. Biosystem Kinematics as Evolution: Stationary Modes and Movement Speed of Complex Systems: Complexity. *Moscow University Physics Bulletin*. 2015;70(2):140–152. DOI: 10.3103/S0027134915020046.
3. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina J. V., Gavrilenko T. V. The Evolution of the Chaotic Dynamics of Collective Modes as a Method for the Behavioral Description of Living Systems. Moscow University Physics Bulletin. 2016;71(2):143–154. DOI: 10.3103/S0027134916020053.
4. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina Y. V., Gorbunov D. V., Ilyashenko L. K. Shannon Entropy in the Research on Stationary Regimes and the Evolution of Complexity. *Moscow University Physics Bulletin*. 2017;72(3):309–317. DOI: 10.3103/S0027134917030067.
5. Eskov V. V., Filatova D. Y., Ilyashenko L. K., Vochmina Y. V. Classification of Uncertainties in Modeling of Complex Biological Systems. Moscow University Physics Bulletin. 2019;74(1):57–63. DOI: 10.3103/S0027134919010089.
6. Еськов В. М., Галкин В. А., Еськов В. В., Филатов М. А. Физические и живые системы различаются существенно. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;4:52–59. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-57-64.

7. Галкин В. А., Попов Ю. М., Григоренко В. В., Архипкина М. В. Новые подходы в математическом моделировании биосистем. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;4:60–69. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-65-73.
8. Хадарцев А. А., Гавриленко Т. В., Горбунов Д. В., Веденеев В. В. Математические Аспекты Статьи W. Weaver “Science and Complexity”. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;4:70–79. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-74-84.
9. Филатов М. А., Еськов В. М., Козлова В. В., Филатова Д. Ю., Мельникова Е. Г. Доказательство гипотезы W. Weaver в электрофизиологии. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:5–12. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-5-8.
10. Еськов В. В. Математическая трактовка стационарных состояний в биомеханике. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:69–82. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-60-69.
11. Козлова В. В., Филатов М. А., Еськов В. В., Шакирова Л. С. Новые подходы в измерении биосистем с позиций “Complexity” W. Weaver и “Fuzziness” L.A. Zadeh. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:83–93. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-70-78.
12. Eskov V. M., Bashkatova Y. V., Beloshchenko D. V., Ilyashenko L. K. Cardiointervals Parameters of Human Body in Response to Hypothermia. Ekologiya cheloveka (Human Ecology). 2018;10:39–45.
13. Shakirova L. S., Filatova D. Yu., Ilyashenko L. K., Bashkatova Yu. V. Integrally-Temporal and Spectral Parameters of Cardiovascular System of Pre-Adolescent Population of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra under the Conditions of Latitudinal Displacements. Ekologiya cheloveka (Human Ecology). 2018;11:32–36.
14. Eskov V. M., Bazhenova A. E., Ilyashenko L. K., Grigorieva S. V. Effect of Cold on Involuntary Movements in Men with Different Levels of Physical Fitness in the Russian North. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;6:39–44.
15. Filatova O. E., Berestin D. K., Ilyashenko L. K., Bashkatova Yu. V. The Influence of Hypothermia on the Parameters of the Electromyogram at Low Muscle Tone State. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;5:43–48.
16. Filatov M. A., Ilyashenko L. K., Makeeva S. V. Psychophysiological Parameters of Students before and after Translatitude Travels. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;4:18–24.
17. Eskov V. V., Filatova O. E., Bashkatova Y. V., Filatova D. Y., Ilyashenko L. K. Age-Related Changes in Heart Rate Variability among Residents of the Russian North. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;2:21–26.
18. Filatov M. A., Ilyashenko L. K., Kolosova A. I., Makeeva S. V. Stochastic and Chaotic Analysis of Students’ Attention Parameters of Different Ecological Zones. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;7:11–16.
19. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36:536–544.
20. Bashkatova Yu. V., Filatov M. A., Shakirova L. S. State of Athletes’ Cardiovascular System under Physical Load in the Russian North. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2020;6:41–45.
21. Khadartseva K. A., Filatov M. A., Melnikova E. G. The Problem of Homogenous Sampling of Cardiovascular System Parameters among Migrants in the Russian North. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2020;7:27–31.
22. Eskov V. V., Popov Yu. M., Filatova D. Yu., Simanovskaya O. E. Chaos of Involuntary Movements under Conditions of Local Cooling. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;12:26–31.
23. Eskov V. M. Gudkov A. B., Filatov M. A. Eskov V. V. Principles of Homeostatic Regulation of Functions in Human Ecology. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;10:41–49.
24. Filatova D. Yu., Bashkatova Yu. V., Melnikova E. G., Shakirova L. S. Homogeneity of the Parameters of the Cardiointervals in School Children after North-South Travel. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2020;1:6–10.
25. Filatova O. E., Bashkatova Y. V., Filatova D. Y., Ilyashenko L. K. Human Organism in the Conditions of Homeostatic Dynamics of Meteoroligical Parameters of the Russian North. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;9:24–30.
26. Filatova O. E., Gudkov A. B., Eskov V. V., Chempalova L. S. The Concept of Uniformity of a Group in Human Ecology. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2020;2:40–44.
27. Попов Ю. М., Сазонова Н. В., Полухин В. В., Ивахно Н. В., Мельникова Е. Г. Статистическая

неустойчивость параметров симпатической вегетативной нервной системы аборигенов Севера РФ. *Вестник новых медицинских технологий*. 2019;26(4):141–145. DOI: 10.24411/1609-2163-2019-16557.
28. Филатова О. Е., Еськов В. В., Григорьева С. В., Хакимова В. В., Гумарова О. А. Биомеханика и биофизика сложных систем с позиций квантовой механики. *Вестник новых медицинских технологий*. 2019;26(4):146–151. DOI: 10.24411/1609-2163-2019-16564.
29. Филатова О. Е., Мельникова Е. Г., Афаневич К. А., Головачева Е. А., Фадюшина С. И. Сравнительная характеристика нейровегетативного статуса аборигенов — жителей Югры. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;27(1):125–129. DOI: 10.24411/1609-2163-2020-16614.
30. Зилов В. Г., Киричук В. Ф., Фудин Н. А. Экспериментальное обоснование иерархической организации хаоса в нервно-мышечной физиологии. Вестник новых медицинских технологий. 2019;26(1):133–136. DOI: 10.24411/1609-2163-2019-16375.
31. Зинченко Ю. П., Еськов В. М., Филатов М. А., Григорьева С. В. Стохастика и хаос в организации движений. Вестник новых медицинских технологий. 2019;26(2):101–106. DOI: 10.24411/1609-2163-2019-16376.
32. Попов Ю. М., Сазонова Н. В., Полухин В. В., Ивахно Н. В., Мельникова Е. Г. Статистическая неустойчивость параметров симпатической вегетативной нервной системы аборигенов Севера РФ. *Вестник новых медицинских технологий*. 2019;26(4):141–145. DOI: 10.24411/1609-2163-2019-16557.
33. Заславский Б. Г., Филатов М. А., Еськов В. В., Манина Е. А. Проблема нестационарности в физике и биофизике. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):61–67.
34. Галкин В. А., Еськов В. В., Пятин В. Ф., Кирасирова Л. А., Кульчицкий В. А. Существует ли стохастическая устойчивость выборок в нейронауках? *Новости медико-биологических наук*. 2020;20(3):126–132.
35. Еськов В. В. *Математическое моделирование гомеостаза и эволюции complexity*. Тула: Издательство ТулГУ; 2016. 307 с.
36. Еськов В. В., Пятин В. Ф., Филатова Д. Ю. Башкатова Ю. В. *Хаос параметров гомеостаза сердечно-сосудистой системы человека*. Самара: ООО «Порто-Принт»; 2018. 312 с.
37. Еськов В. В., Пятин В. Ф., Шакирова Л. С., Мельникова Е. Г. *Роль хаоса в регуляции физиологических функций организма*. Самара: ООО «Порто-принт»; 2020. 248 с.
38. Еськов В. В., Башкатова Ю. В., Шакирова Л. С., Веденеева Т. С., Мордвинцева А. Ю. Проблема стандартов в медицине и физиологии. *Архив клинической медицины*. 2020;29(3):211–216.
39. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. *Конец определенности: хаос гомеостатических систем*. Тула: Тульское производственное полиграфическое объединение; 2017. 596 с.
40. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. *Complexity: хаос гомеостатических систем*. Самара: ООО «Порто-принт»; 2017. 388 с.
41. Еськов В. М., Галкин В. А., Пятин В. Ф., Филатов М. А. *Организация движений: стохастика или хаос?* Самара: ООО «Порто-принт»; 2020. 144 с.
42. Еськов В. М., Пятин В. Ф., Башкатова Ю. В. Медицинская и биологическая кибернетика: перспективы развития. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):58–67.
43. Бернштейн Н. А. *О построении движений*. М.: Медгиз; 1947. 254 с.
44. Наточин Ю. В. Гомеостаз. *Успехи физиологических наук*. 2017;48(4):3–15.
45. Еськов В. В., Галкин В. А., Филатова О. Е., Шакирова Л. С., Хвостов Д. Ю. Моделирование эвристической деятельности мозга человека. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:13–24. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-9-17.
46. Еськов В. М., Колосова А. И., Фадюшина С. И., Мордвинцева А. Ю. Хаотическая динамика ритмики сердца. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:25–34. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-18-28.
47. Галкин В. А., Еськов В. В., Попов Ю. М., Веденеев В. В., Салимова Ю. В. Социофилософские аспекты предложения W. Weaver о системах трёх типов. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:35–47. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-29-36.
48. Еськов В. М. Реформы образования России: сознательная деструкция или слабоумие? *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:48–58. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-37-51.
49. Козлова В. В., Галкин В. А., Филатов М. А., Еськов В. М. Моделирование нейросетей мозга с позиций гипотезы W. Weaver. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:59–68. DOI: 10.12737/2306-

174X-2021-52-59.
50. Grigorenko V. V., Eskov V. M., Nazina N. B., Egorov A. A. Information-Analytical System of Cardiographic Information Functional Diagnostics. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1515:052027. DOI:10.1088/1742-6596/1515/5/052027.
51. Grigorenko V. V., Bashkatova Yu. V., Shakirova L. S., Egorov A. A., Nazina N. B. New Information Technologies in the Estimation of Stationary Modes of the Third Type Systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;862:052034. DOI:10.1088/1757-899X/862/5/052034.
52. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Eskov V. V., Ilyashenko L. K., Kitanina K. Yu. Examination of Statistical Instability of Electroencephalograms. Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2019;168(7):5–9. DOI: 10.1007/s10517-019-04633-7.
53. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Eskov V. M., Ilyashenko L. K. New Effect in Physiology of Human Nervous Muscle System. Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2019;167(4):419–423. DOI:10.1007/s10517-019-04540-x.
54. Eskov V. M., Eskov V. V., Braginskii M. Ya., Pashnin A. S. Determination of the Degree of Synergism of the Human Cardiorespiratory System under Conditions of Physical Effort. *Measurement Techniques*. 2011;54(7):832–837. DOI: 10.1007/S11018-011-9812-Y.
55. Eskov V. M., Papshev V. A., Eskov V. V., Zharkov D. A. Measuring Biomechanical Parameters of Human Extremity Tremor. *Measurement Techniques*. 2003;46(1):93–99. DOI: 10.1023/A:1023482026679.
56. Eskov V. M. Models of Hierarchical Respiratory Neuron Networks. Neurocomputing. 1996;11(2–4):203–226. DOI: 10.1016/0925–2312(95)00048-8.
57. Es'kov V. M., Filatova O. E., Ivashenko V. P. Computer Identification of Compartmental Neuron Circuits. Measurement Techniques. 1994;37(8):967–971. DOI: 10.1007/BF00977157.
58. Eskov V. M. Automatic Identification of Differential-Equations Simulating the Behavior of Neuron Circuits. Measurement Techniques. 1994;37(3):359–364. DOI: 10.1007/BF02614280.
59. Menskii M. B. Dissipation and Decoherence In Quantum Systems. *Physics–Uspekhi*. 2003;46(11):1163. DOI: 10.3367/UFNr.0173.200311d.1199.
60. Menskii M. B. Quantum Measurements, the Phenomenon of Life, and Time Arrow: Three Great Problems of Physics (in Ginzburg's Terminology) and Their Interrelation. *Physics–Uspekhi*. 2007;50(4):397. DOI: 10.3367/UFNr.0177.200704j.0415.
61. Menskii M. B. Concept of Consciousness in the Context of Quantum Mechanics. *Physics–Uspekhi*. 2005;48(4):389. DOI: 10.3367/UFNr.0175.200504c.0413.
62. Prigogine I. R. The philosophy of Instability. *Futures*.1989;21(4):396–400.
63. Prigogine I. R. The End of Certainty: *Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. Free Press; 1996.
64. Gell-Mann M. Fundamental Sources of Unpredictability. *Complexity*. 1997;3(1):13–19.
65. Penrose R. Newton, Quantum Theory and Reality. In: Hawking S.W., Israel W. *300 Years of Gravity*. Cambridge University Press: Cambridge; 1987.
66. Ginzburg V. L. What Problems of Physics and Astrophysics Seem Now To Be Especially Important and Interesting (Thirty Years Later, Already on the Verge of XXI Century)? *Physics–Uspekhi*. 1999;42:353–373. DOI: 10.1070/PU1999v042n04ABEH000562.
67. Ivanitskii G. R. 21st Century: What is Life From the Perspective of Physics? Physics–Uspekhi. 2010;53(4):327–356. DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004a.0337.
68. Ivanitskii G. R. Self-Organizing Dynamic Stability of Far-From-Equilibrium Biological Systems. *Physics–Uspekhi*. 2017;60:705–730. DOI: 10.3367/UFNe.2016.08.037871.
69. Ivanitskii G. R. The Robot and the Human. Where's their similarity limit? Physics–Uspekhi. 2018;61(9):871–895. DOI: 10.3367/UFNe.2018.03.038302.
70. Ivanitskii G. R. X-men: Humans with an Unusual Interaction between Receptor Systems Who Construct a World of New Images within Themselves (on the 140th Anniversary of the Birth of Academician P. P. Lazarev). Physics–Uspekhi. 2019;62(7):711–734. DOI: 10.3367/UFNe.2019.01.038524.
71. Еськов В. М., Хадарцев А. А., Филатова О. Е., Хадарцева К. А. Околосуточные ритмы показателей кардиореспираторной системы и биологического возраста человека. Терапевт. 2012;8:036–043.
72. Eskov V. M., Eskov V. V., Filatova O. E., Filatov M. A. Two Types of Systems and Three Types of Paradigms in Systems Philosophy and System Science. Journal of Biomedical Science and Engineering. 2012;5(10):602–607.

73. Еськов В. В., Вохмина Ю. В., Гавриленко Т. В., Зимин М. И. Модели хаоса в физике и теории хаоса-самоорганизации. Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013;2:42–56.
74. Еськов В. М., Филатова О. Е., Фудин Н. А., Хадарцев А. А. Новые методы изучения интервалов устойчивости биологических динамических систем в рамках компартментно-кластерного подхода. Вестник новых медицинских технологий. 2004;11(3):5–6.
75. Еськов В. М., Зилов В. Г., Хадарцев А. А. Новые подходы в теоретической биологии и медицине на базе теории хаоса и синергетики. Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2006;5(3):617–622.
76. Еськов В. М., Филатова О. Е., Полухин В. В. Проблема выбора абстракций при применении биофизики в медицине. Вестник новых медицинских технологий. 2017;24(1):158–167.
77. Хадарцев А. А., Филатова О. Е., Мандрыка И. А., Еськов В. В. Энтропийный подход в физике живых систем и теории хаоса-самоорганизации. *Успехи кибернетики*. 2020;1(3):41–49. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-5.
78. Галкин В. А., Гореликов А. В., Бычин И. В., Дубовик А. О., Ряховский А. В. Тестирование алгоритмов вычислительной магнитной гидродинамики на задаче с точным решением. *Успехи кибернетики*. 2020;1(4):29–37. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-4-4.
79. Пятин В. Ф., Еськов В. В., Филатова О. Е., Башкатова Ю. В. Новые представления о гомеостазе и эволюции гомеостаза. *Архив клинической и экспериментальной медицины*. 2019;28(1):21–27.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-11

ЧТО ОБЩЕГО МЕЖДУ «FUZZINESS» L. A. ZADEH И «COMPLEXITY» W. WEAVER В КИБЕРНЕТИКЕ

М. И. Зимин[1], В. Ф. Пятин[2], М. А. Филатов[3], Л. С. Шакирова
[1] *2554620 ONTARIO LTD., г. Торонто, Канада, zimin7@yandex.ru*
[2] *Самарский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Самара, Российская Федерация*
[3] *Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*

Аннотация: до настоящего времени все исследования и моделирование в биологии и медицине выполнялись в рамках разных стохастических методов и теорий. Однако в середине XX века биомеханик и физиолог Н. А. Бернштейн, основоположник теории информации W. Weaver и математик L. A. Zadeh (основоположник Fuzziness) предложили другую концепцию описания и моделирования биосистем. Спустя 50 лет был доказан эффект Еськова–Зинченко в биомеханике и началась эпоха создания новой теории и новой науки для описания сложных медицинских систем. Эта теория базируется на доказательстве статистической неустойчивости выборок любых параметров биосистем. Одновременно был создан аналог принципа неопределенности Гейзенберга в биомедицине. Все это позволило дать новую трактовку понятия гомеостаза в биомедицине и создать особую теорию и модели в медицинской и биологической кибернетике.

Ключевые слова: стохастика, хаос, неопределенность, сложность, эффект Еськова–Зинченко.

Для цитирования: Зимин М. И., Пятин В. Ф., Филатов М. А., Шакирова Л. С. Что общего между «Fuzziness» L. A. Zadeh И «Complexity» W. Weaver в кибернетике. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):102–112. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-11.

WHAT DO ZADEH'S FUZZINESS AND WEAVER'S COMPLEXITY HAVE IN COMMON IN CYBERNETICS?

M. I. Zimin[1], V. F. Pyatin[2], M. A. Filatov[3], L. S. Shakirova
[1] *2554620 ONTARIO LTD, Toronto, Canada, zimin7@yandex.ru*
[2] *Samara State Medical University, Samara, Russian Federation*
[3] *Surgut state University, Surgut, Russian Federation*

Abstract: till now, all the research and modeling in biology and medicine stayed within various stochastic methods and theories. However, N.A. Bernstein, the famous physiologist and expert in biomechanics, W. Weaver, the founder of information theory, and L.A. Zadeh, the mathematician and the founder of the Fuzziness concept proposed a different approach to biosystem definition and modeling in the middle of the 20th century. 50 years later, the Eskov–Zinchenko effect in biomechanics was discovered, and the real era of making a new theory and new science for describing complex medical systems began. This theory is based on the proven statistical instability of any biosystem property samples. At the same time, an analog of the Heisenberg uncertainty principle in biomedicine was created. All this made it possible to propose a new interpretation of the homeostasis concept in biomedicine and a special theory and models in medical and biological cybernetics.

Keywords: stochastics, chaos, uncertainty, complexity, Eskov–Zinchenko effect.

Cite this article: Zimin M. I., Pyatin V. F., Filatov M. A., Shakirova L. S. What do Zadeh's Fuzziness and Weaver's Complexity Have in Common in Cybernetics? *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):102–112. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-11.

Введение

В середине XX века появились две выдающиеся работы: одна в области биомеханики (Н.А. Бернштейна) [1] и вторая в области кибернетики и теории информации (W. Weaver) [2]. Они представили всей науке новый, революционный подход в изучении и описании любых биосистем. В первой работе [1] была выдвинута гипотеза в биомеханике о «повторении без повторений». Фактически Н.А. Бернштейн доказывал невозможность два раза подряд повторить одно и то же движение одинаково.

Однако сам термин «без повторений» (фактически это эквивалент термину «одинаково») и тогда, и после (за эти более чем 70 лет) никем не был расшифрован. Через год W. Weaver выступил с еще более революционным заявлением о том, что все живые системы не являются объектом современной детерминистской и стохастической науки (ДСН). Эти живые системы W. Weaver вывел в третий тип (системы третьего типа — СТТ), которые невозможно описывать в рамках ДСН. Он прогнозировал, что через 50 лет их начнут активно изучать, и этот прогноз оправдался.

На рубеже XX и XXI веков нами был доказан эффект Еськова–Зинченко (ЭЕЗ), в котором отсутствует статистическая устойчивость выборок любых параметров биосистем (СТТ) [3-11]. В этом заключается реальная *complexity* и *uncertainty*, о которых говорили три нобелевских лауреата: I.R. Prigogine [12] и M. Gell-Mann [13], R. Penrose [14] — в своих публикациях. Доказанный ЭЕЗ реально раскрывает истинный смысл понятий неопределенности при попытках описания будущего состояния биосистем [3–11]. Это объясняется уникальностью любой выборки параметров СТТ, и это и есть реальная *complexity* для всей современной науки [15–21].

Три гипотезы, которые могли бы начать создание новой науки

В 1947 году выдающийся биомеханик XX века Н.А. Бернштейн выдвинул гипотезу в биомеханике о «повторении без повторений» [1]. В своей монографии он доказал, что в организации движений участвуют 5 разных систем регуляции (A, B, C, D, E). Н.А. Бернштейн логически предположил, что эти разные системы могут произвольно (хаотически) включаться в организацию движений на хаотически разные интервалы времени Δt. Поскольку моменты такого включения и интервалы времени Δt хаотичны, то и вся организация любого движения человека может происходить хаотически.

В итоге возникла гипотеза Н.А. Бернштейна о «повторениях без повторений» в организации движений человека [1]. Эта гипотеза никем не была тогда подтверждена количественно. Более того, сам Н.А. Бернштейн не показал и не доказал, о каких «без повторений» может идти речь. В математике и кибернетике на сегодня существует два вида повторений: точное (в рамках детерминистского подхода) и произвольное (в рамках стохастики). Позже никто даже не проверил гипотезу Н.А. Бернштейна, хотя и не было ее опровержения [3–11].

Напомним, что в теории динамических систем, где используются дифференциальные, разностные, интегральные и другие уравнения, мы имеем дело с точным значением вектора состояния системы $x=x(t)= (x_1, x_2, \ldots, x_m)^T$ в m-мерном фазовом пространстве состояний (ФПС). Это означает, что при задании начального состояния этого вектора $x(t_0)$ в ФПС и задании уравнения движения мы всегда спрогнозируем конечное состояние $x(t_f)$ и саму траекторию движения $x(t)$ в ФПС (решается задача Коши). Все эти процессы мы можем повторить неограниченное число раз, и всегда все будет точно повторяться (и $x(t_0)$, и $x(t)$, и $x(t_f)$).

Это составляет основу детерминистского подхода: прошлое точно определяет будущее состояние системы [22-27]. На этом основана физика, химия и вся биомедицина, где часто используются различные динамические уравнения. Причинно-следственные связи четко определяют будущее состояние системы. Однако в стохастике появляются существенные отличия. Если мы будем точно повторять начальное состояние системы в виде $x(t_0)$, то нет никаких гарантий, что процесс закончится точным попаданием в предполагаемую точку $x(t_f)$. Точнее говоря, после повторения процесса (для непрерывной случайной величины — НСМ), мы никогда не попадем в исходную точку $x_1(t_f)$, которую мы получили в результате первого опыта (мы попадем в точку $x_2(t_f)$). Любой стохастический процесс точно повторить нельзя, включая и выборку параметров $x(t)$ в ФПС (выборка точно неповторима).

Более точно, если мы повторно получим выборку значений НСМ, то эта вторая выборка никогда точно не повторит первую, исходную. Однако в стохастике разработаны особые методы (отличные от точной детерминистской науки), которые позволяют сравнивать две такие выборки и выносить решение об их совпадении (статистическом) или об отсутствии такого совпадения. Подчеркнем, что это особые стохастические методы сравнения и они уже неточные (например, совпадение с доверительной вероятностью, в рамках статистической проверки гипотез и т.д.). При переходе от детерминизма к стохастике мы теряем точность в сравнении и никогда не требуем полного совпадения (работаем с облаком точек).

Это будет принципиальным различием между детерминистским подходом и стохастикой. В этом появляется определенная сложность. Но эта *complexity* в стохастике имеет свое разрешение. Подчеркнем еще раз: Н.А. Бернштейн лично не сказал о каких «без повторений» идет речь в биомеханике.

Осталось загадкой: точность «неповторений» в рамках детерминизма или идет речь о точности в рамках стохастики.

Еще дальше пошел W. Weaver: он впервые в истории человечества дал четкую классификацию всех систем природы. Фактически W. Weaver заложил основу и новой кибернетики, и новой теории информации. До настоящего времени вся кибернетика является детерминистской и стохастической наукой (ДСН), т.к. в ней используются или динамические, или стохастические системы. Именно об этом и говорил W. Weaver. Он предложил: *simplicity* — это системы первого типа (СПТ), т.е. детерминистские системы; системы второго типа (СВТ) — *disorganized complexity* и системы третьего типа — *organized complexity* [2].

Так четко эта классификация всех систем природы ни до W. Weaver, ни после него не была представлена. Подчеркнем, что СТТ (живые системы) W. Weaver вывел за пределы ДСН и это было его главной гипотезой. Однако никто еще за 70 лет это не пытался доказать (кроме нашей научной школы [15–21]). Через 20 лет L.A. Zadeh поддержит эту гипотезу, но только устно, без каких-либо доказательств. В целом, эти три гипотезы так и остались без доказательств до начала XXI века.

Почему гипотеза W. Weaver является революционной?

В предыдущем параграфе мы представили три гипотезы об особенностях поведения живых систем. Подчеркнем, что первая гипотеза Н.А. Бернштейна о «повторении без повторений» нашла некоторое косвенное подтверждение. Н.А. Бернштейн доказал реальность пяти систем регуляции движений (системы A, B, C, D, E), но он не доказал их хаотическое вмешательство в организацию любого движения. Этот хаос (в виде «повторений без повторений») остался только предположением и не более того. Однако можно бы было логически объединить эту гипотезу Н.А. Бернштейна с гипотезой W. Weaver и получить выдающийся результат [3-11], который мы и получили на рубеже XX и XXI веков [15–26].

Напомним рассуждения W. Weaver о трех типах систем. Он указывал, что *simplicity* — это системы первого типа (СПТ), которые человечество изучало (и строило для них детерминистские модели) всего 300 лет, т.е. все три (XVII, XVIII и XIX) века человечество реализовывало детерминизм Лапласа и Ньютона, в котором прошлое состояние системы точно определяет ее будущее. Для СПТ при задании начального значения вектора $x(t_0)$ и уравнений, описывающих эти СПТ, мы всегда могли предсказать фазовую траекторию $x(t)$ в ФПС и конечное состояние этого вектора в виде $x(t_f)$. Это — основа ДСН: прошлое определяет будущее [22–27].

Очевидно, что конечная точка $x(t_f)$ строго прогнозируется в детерминизме и ее можно любое число раз повторить (точно!) в рамках задачи Коши. Здесь жестко работают причинно-следственные связи. При переходе к *disorganized complexity* — системам второго типа (СВТ) — W. Weaver вводит понятие *complexity* [2]. Сейчас, спустя 70 лет, мы связываем слово *complexity* с понятием неопределенности. Для стохастических систем неопределенность возникает в конце процесса с системой. При этом начальные параметры $x(t_0)$ мы должны повторить точно (в рамках детерминизма).

Обращаем внимание на первое упоминание *complexity* для СВТ самим W. Weaver. Он использует это слово, когда обращает внимание на невозможность точно повторить $x(t_f)$ для системы в конце процесса. Иными словами, СВТ не могут во втором сходном процессе повторить (в конце процесса) точное состояние $x(t_f)$, которое было получено в первом процессе с системой. Появляется неопределенность и *complexity* для СВТ, которой нет для *simplicity*. Так как одна точка $x(t_f)$ всегда для СПТ точно воспроизводится, то для СВТ мы уже всегда должны многократно повторить процесс и получить множество точек — выборку $x(t_f)$.

Еще раз подчеркнем: для описания *disorganized complexity* мы переходим от одной точки к выборке (облаку точек в ФПС). Очевидно, что при переходе к СТТ мы уже не можем пользоваться одной выборкой (как одна точка не может описывать СВТ). Следуя логике W. Weaver при переходе к СТТ, мы должны работать с выборками… выборок. W. Weaver четко выделил невозможность использования статистики в описании СТТ: «… as contrasted with the disorganized situation with which statistics can cope, show the essential feature of *organization*. In fact, one can refer to this group of problems as those of *organized complexity*» [2, с. 4].

W. Weaver оставил без ответа вопрос о том, как описывать СТТ без использования статистики. Следуя его логике, мы должны работать с выборками выборок (как с выборками точек для СВТ вместо одной точки для СПТ). Этот вопрос оставался без ответа почти 70 лет, т.к. никто даже не пытался

доказать или опровергнуть эту гипотезу. Однако W. Weaver выступил с еще одной гипотезой (или прогнозом), где он говорил о гигантском скачке в развитии науки и всего человечества, если мы через 50 лет изучим реальные свойства СТТ и научимся их моделировать. Это было гениальным предвидением W. Weaver, о котором никто за эти 70 лет никогда не говорил. Это была его вторая гениальная гипотеза, после гипотезы об СТТ [2].

Представим эту вторую гипотезу дословно (без перевода), ибо она имеет действительно абсолютно точное значение для понимания гениальности этого человека: «These new problems, moreover, cannot be handled with the statistical techniques so effective in describing behavior in problems of disorganized complexity. These new problems, and the future of the world depends on many of them, requires science to make a third great advance an advance that must be even greater than the nineteenth∼century conquest of problems of simplicity or the twentieth∼century victory over problems of disorganized complexity. Science must, over the next 50 years, learn to deal with these problems of organized complexity» [2, с. 5–6] . Подчеркнем, что W. Weaver выводил за рамки ДСН познание СТТ-*complexity*, он ставил изучение живых систем выше всей детерминистско-стохастической науки (ДСН).

В итоге все эти десятилетия человечество игнорировало его первую гипотезу: СТТ — не объект ДСН и вторую гипотезу о гигантском рывке человечества при изучении СТТ (вне рамок ДСН). Очевидно, что к этим гипотезам присоединился и основоположник «Fuzziness» L.A. Zadeh, который просто говорил: «I began to feel that complex systems cannot be dealt with effectively by the use of conventional approaches largely because the description languages based on classical mathematics are not sufficiently expressive to serve as a means of characterization of input — output relations in on environment of imprecision, uncertainty and completeness of information» [28].

В итоге все трое выдающихся ученых XX века (Н.А. Бернштейн, W. Weaver, L.A. Zadeh), которые были основоположниками новых наук (теории информации, Fuzziness) или нового направления в науке (в биомеханике после работ Н.А. Бернштейна), остались без должного внимания. Их просто игнорировали десятилетиями. Можно сейчас понять, почему это происходило: отсутствовали доказательства реальности гипотез о «повторении без повторений» и о том, что СТТ — не объект ДСН. Сейчас эти доказательства имеются. Они представлены в новой теории хаоса-самоорганизации (ТХС) с использованием неопределенностей 1-го и 2-го типа и аналога принципа неопределенности Гейзенберга [29-37].

Теория хаоса-самоорганизации доказывает три гипотезы выдающихся ученых XX века

Действительно, для доказательства гениальной гипотезы W. Weaver (СТТ — не объект ДСН) необходимо было соединить логику W. Weaver с гипотезой Н.А. Бернштейна (о «повторении без повторений») в единое целое. Это легко сделать, если понять смысл высказывания W. Weaver о переходе от СПТ к СВТ и от СВТ к СТТ. Очевидно, что системы второго типа невозможно описывать одной точкой в ФПС, т.к. эта точка гипотетически может совпадать со средним статистическим значением $< x >$ или находиться за пределами трех сигм (3σ) слева или справа от $< x >$. Иными словами, знание значения $x(t_i)$ не несет никакой информации о состоянии любой системы (второго типа). Поэтому для описания СВТ нужна выборка, которая получается после повторения многих испытаний для одной и той же системы.

При переходе от СВТ к СТТ (биосистемам), следуя логике W. Weaver, мы должны уже не работать с одной выборкой параметра $x_1(t)$, описывающего СТТ. Как одна точка для СВТ ничего не означает (не дает объективной информации о состоянии *disorganized complexity*), так и целая выборка точек не может нам давать объективной информации об СТТ. Почему такое утверждение должно быть верным? Ответ на этот вопрос мы можем получить, если вернемся к гипотезе Н.А. Бернштейна. Он говорил, что любое повторение (в биомеханике) происходит без повторений.

Что имел в виду Н.А. Бернштейн, когда говорил «без повторений»? На этот вопрос мы ответили 20 лет назад, когда начали повторять выборки параметров треморограмм (ТМГ) и теппинграмм (ТПГ). Действительно, если у одного и того же испытуемого многократно зарегистрировать 15 выборок (подряд в неизменном психическом и физиологическом состоянии испытуемого) ТМГ или ТПГ, а затем эти выборки (все) попарно сравнить, то окажется очень малое число k пар выборок с одной (общей) генеральной совокупностью. Для иллюстрации сказанного представим типичную матрицу парных сравнений ТМГ для одного и того же испытуемого в его неизменном состоянии в виде таблицы 1.

Таблица 1

Результаты попарного сравнения по критерию Вилкоксона ТМГ одного испытуемого при повторных измерениях (подряд) за короткое время ($T = 5$ сек), число совпадений $k_1 = 6$ [38]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0.00	0.00	0.00	**0.07**	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	**0.99**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	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	0.07	0.00	0.99	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.39**	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	0.01	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	**0.28**	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	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	**0.09**	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	0.01
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	0.09	0.00	0.00		**0.09**	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09		0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	

Здесь в таблице 1 вносились критерии Вилкоксона P_{ij} при парном сравнении i-й и j-й выборок ТМГ данного испытуемого. Подчеркнем, что каждая такая выборка ТМГ содержит не менее 500 точек — положений пальца относительно датчика, погрешность измерения $\Delta x \leq 0{,}1$ мм. В табл. 1 мы имеем число K пар, для которых критерий Вилкоксона $P_{ij} \geq 0{,}05$, в виде очень малой величины, k_1=6, это менее 5 % от всех 105 разных пар сравнения в данной матрице. Напомним, что в статистике всегда требуют не менее 95 % статистических совпадений, например, для доверительной вероятности $\beta \geq 0{,}95$. У нас же все наоборот, более 95 % пар ТМГ в табл. 1 статистически не совпадают, их критерии Вилкоксона $P_{ij} \leq 0{,}05$.

Фактически это означает отсутствие статистических совпадений выборок ТМГ и выборки являются уникальными (они статистически не совпадают). Для ТПГ, т.е. для произвольных колебательных движений пальца, с участием сознания испытуемого, число k_2 пар с $P_{ij} \geq 0{,}05$ возрастает в 2-3 раза, но не более. Доля стохастики в матрицах парных сравнений выборок ТПГ тоже невелика. Обычно $K_2 \leq 15$ % от всех 105 пар, и это означает завершение применения статистики в описании СТТ (см. табл. 2).

Таблица 2

Критерий Вилкоксона (для непараметрического распределения) в матрице парного сравнения 15-ти ТПГ одного испытуемого при повторных экспериментах ($k_2 = 18$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		**0.28**	0.00	**0.33**	0.00	**0.88**	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00
2	0.28		**0.31**	0.00	0.00	0.00	**0.52**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.07**
3	0.00	0.31		0.00	0.00	0.00	**0.32**	0.01	0.00	**0.07**	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.22**
4	0.33	0.00	0.00		**0.09**	**0.84**	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	0.09		0.03	0.00	**0.25**	0.00	0.00	0.00	0.01	**0.84**	0.00	0.00
6	0.88	0.00	0.00	0.84	0.03		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00
7	0.01	0.52	0.32	0.00	0.00	0.00		0.01	0.00	0.00	**0.24**	0.00	0.00	0.00	**0.34**
8	0.00	0.00	0.01	0.00	0.25	0.00	0.01		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.04	0.00	0.00	0.00	**0.06**	0.00
10	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00		0.00	**0.76**	0.00	0.00
12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	**0.26**	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00		0.00	0.00
14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.26	0.00		0.00
15	0.00	0.07	0.22	0.00	0.00	0.00	0.34	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Об этом и говорил W. Weaver, когда выдвинул гипотезу о том, что СТТ не являются объектом

статистики. А сейчас мы твердо говорим о том, что живые системы не могут описываться в рамках всей ДСН из-за эффекта Еськова–Зинченко (ЭЕЗ) – отсутствия статистической устойчивости выборок [39–47]. Подчеркнем, что это относится не только к биомеханике (см. табл. 1 и 2), но и ко всем параметрам $x_i(t)$ функций организма человека. Например, в таблице 3 мы демонстрируем матрицу парных сравнений выборок параметров кардиоинтервалов (КИ). Здесь K_3 (для них $P_{ij} \geq 0{,}05$) тоже невелико.

Таблица 3

Матрица парного сравнения выборок кардиоинтервалов испытуемого (без нагрузки, число повторов $n = 15$), использовался критерий Вилкоксона (значимость $< 0{,}05$, число совпадений $k_2 = 10$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,56**	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,02		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,09**	0,00	0,05	**0,24**	0,00	0,00	0,00	0,04
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	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00		**0,89**	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	0,89		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		**0,16**	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	0,16		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	**0,72**	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,80**
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	**0,40**	0,02	0,00
10	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	**0,66**
11	0,56	0,24	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	0,40	0,00	0,00	0,00		**0,92**	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,92		0,00
15	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	

Обычно для КИ и других параметров сердечно-сосудистой системы человека (ССС) величина $K_2 \leq 15$ %. Это сопоставимо с организацией теппинга, где сознание повысило K_2 (против K_1 для ТМГ) тоже почти до $K_2 \leq 15$ %. В любом случае это очень малые величины и говорить о возможностях стохастики в описании любых параметров СТТ сейчас уже бессмысленно [48–56]. Очевидно, что биокибернетика и вся кибернетика (как наука об управлении в живых и неживых системах) должны перейти на новый уровень. Это третий уровень развития науки и человечества, о котором говорил W. Weaver еще в 1948 году (см. выше его цитату). На этом уровне мы должны познать тайны управления в живых системах, которые существенно отличны от неживых систем. Именно из-за этого W. Weaver и вывел биосистемы за пределы ДСН [2].

Как и прогнозировал W. Weaver, человечество через 50 лет перешло к изучению самого себя (СТТ), и здесь нужна другая наука и другие модели поведения СТТ. Сейчас мы создаем такую науку в виде теории хаоса и самоорганизации (ТХС). В этой ТХС, согласно теореме K. Gödel, имеются другие понятия, модели и законы. Но главное в ТХС — это наличие неопределенностей 1-го и 2-го типов [3–11, 22–31, 57–75].

Обсуждение

В середине XX века трое выдающихся ученых (Н.А. Бернштейн в биомеханике, W. Weaver в теории информации и L.A. Zadeh в теории «Fuzziness») выдвинули гипотезы, которые должны были резко изменить ход развития науки о живых системах и ход развития всей науки в целом. Однако за прошедшие десятилетия мнения этих трех выдающихся ученых упорно игнорировались. Более того, W. Weaver прямо указал на невозможность дальнейшего применения стохастики в изучении биосистем. Однако количественное доказательство этому мы представили только 50 лет спустя, когда была доказана гипотеза Н.А. Бернштейна в виде ЭЕЗ [3–11, 22–31, 53–59].

Это было революционное заявление, которое могло бы перевести все человечество на третью ступень развития и науки, и всех социумов (именно это W. Weaver подчеркивал в своей работе). Такая революция, по прогнозам W. Weaver, должна была произойти в начале XXI века, и это было бы эквивалентно (по значимости) революционным изменениям в физике начала XX века. Тогда создавалась квантовая механика, теория относительности и возникла новая (неклассическая) физика. Но эта новая

физика не вышла за пределы детерминистской и стохастической науки (ДСН). Конец определенности, как это декларировал I.R. Prigogine [12], не наступил. Более того, за последние 30 лет никто так и не раскрыл смысл *complexity*, о которой говорили M. Gell-Mann [13], R. Penrose [14].

Вся современная наука базируется на постулате причинно-следственных связей и использовании различных уравнений и методов стохастики. Уже в XXI веке наука все-таки не готова принять указанные три гипотезы (Н.А. Бернштейна, W. Weaver и L.A. Zadeh) об особых СТТ — живых системах. Вся биомедицина, психология, экология работают в рамках детерминизма и стохастики. Во всех этих «нечетких» науках прошлое определяет будущее, пусть и не точно, в рамках стохастики, но всегда как бы должны быть повторения процессов и некоторый прогноз будущего состояния системы. Это основа кибернетики и биокибернетики, и это является огромной ошибкой или заблуждением [62-75].

Что будет, если исчезнут причинно-следственные связи, если любая выборка будет уникальной и стохастика не сможет описывать биосистемы? Об этом говорили (см. выше) все трое выдающихся ученых, но их игнорировали. Сейчас мы четко доказали ЭЕЗ в виде статистической неустойчивости выборок. Для СТТ необходимо создавать новую науку. Это будет третья ступень развития человечества и третья наука, отличная от ДСН [3–11, 35–56].

Заключение

Представление гипотезы Н.А. Бернштейна (о «повторении без повторений»), гипотезы W. Weaver и L.A. Zadeh (СТТ не могут быть объектом стохастики) должно было начать создание новой науки и новый этап развития человечества. Это развитие должно быть связано с созданием новой (третьей по счету, о чем говорил W. Weaver) науки, согласно теореме K. Gödel. Однако мы продолжаем описывать (и изучать) все биосистемы в рамках традиционной ДСН, что является огромной иллюзией знаний (уникальные выборки для СТТ имеют такие же значения, как точка $x(t_f)$ дает информацию об СВТ).

Человечество проигнорировало гипотезы этих ученых, но их доказательство лежало на поверхности. Нужно было многократно повторять регистрацию выборок любых параметров функций организма и проверять эти выборки на наличие (или отсутствие) их статистических совпадений. Именно об этом пытался сказать Н.А. Бернштейн («повторение без повторений»). Нужно было соединить гипотезы W. Weaver и Н.А. Бернштейна и получить ЭЕЗ.

Однако за эти 50 лет никто не пытался это сделать, видимо, опасались выйти за пределы всей современной детерминистской и стохастической науки (ДСН). Продолжать дальше использовать методы и модели ДСН в изучении биосистем бессмысленно. Эти системы уникальны, и прошлое не определяет будущее для них. Человечество и наука должны перейти к теории хаоса-самоорганизации и совершить рывок в изучении самого человека и всего человечества. Человек и любое общество (социум) — это системы третьего типа, и они не объект изучения ДСН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bernstein N. A. *The Coordination and Regulation of Movements*. Oxford, New York; Pergamon Press. 1967. 196 p.
2. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36(4):536–544.
3. Мирошниченко И. В., Белощенко Д. В., Монастырецкая О. А., Снигирев А. С. Гомеостатические системы порождают проблему однородности выборок в биофизике. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;3:15–25. DOI: 10.12737/article_5c06331a8c81a9.75037142.
4. Хадарцев А. А., Зинченко Ю. П., Галкин В. А., Шакирова Л. С. Эргодичность систем третьего типа. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;1:67–75.
5. Прохоров С. А., Гумарова О. А., Монастырецкая О. А., Хвостов Д. Ю., Афаневич И. А. Нестабильные системы: проблема однородности групп. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;1:62–72.
6. Мирошниченко И. В., Денисова Л. А., Эльман К. А., Срыбник М. А. Энтропийный подход в оценке параметров кардиоинтервалов пришлого детско-юношеского населения Югры. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;2:23–31.
7. Филатов М. А., Прохоров С. А., Ивахно Н. В., Головачева Е. А., Игнатенко А. П. Возможности моделирования статистической неустойчивости выборок в физиологии. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;27(2):120–124.

8. Башкатова Ю. В., Денисова Л. А., Мнацаканян Ю. В., Хвостов Д. Ю., Салимова Ю. В. Новые методы изучения статистической устойчивости выборок кардиоинтервалов. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;27(2):133–136.
9. Горбунова М. Н., Мордвинцева А. Ю., Веденеева Т. С., Воробей О. А., Мандрыка И. А. Проблема однородности выборок произвольных и непроизвольных движений человека. *Вестник новых медицинских технологий*. 2021;28(1):60–63.
10. Еськов В. М., Хадарцев А. А., Филатов М. А., Третьяков С. А. Три великие проблемы физиологии и медицины. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;27(4):115–118.
11. Попов Ю. М., Сазонова Н. В., Полухин В. В., Ивахно Н. В., Мельникова Е. Г. Статистическая неустойчивость параметров симпатической вегетативной нервной системы аборигенов Севера РФ. *Вестник новых медицинских технологий*. 2019;26(4):141–145.
12. Prigogine I. R. The End of Certainty: *Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. Free Press, 1996.
13. Gell-Mann M. Fundamental Sources of Unpredictability. *Complexity*. 1997;3(1):13–19.
14. Penrose R. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Mind and Laws of Physics*. Oxford: Oxford University Press; 1989.
15. Мирошниченко И. В., Григоренко В. В., Башкатова Ю. В., Шакирова Л. С. Инварианты параметров систем третьего типа. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;1:58–66.
16. Розенберг Г. С., Полухин В. В., Попов Ю. М., Сазонова Н. В., Салимова Ю. В. Представления W. Weaver и теории хаоса-самоорганизации о системах третьего типа. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;3:14–23.
17. Kolosova A. I., Filatov M. A., Maistrenko E. V., Ilyashenko L. K. An Analysis of the Attention Indices in Students from Surgut and Samara Oblast from the Standpoint of Stochastics and Chaos. *Biophysics*. 2019;64(4):662–666.
18. Eskov V. V., Filatova D. Y., Ilyashenko L. K., Vochmina Y. V. Classification of Uncertainties in Modeling of Complex Biological Systems. *Moscow University Physics Bulletin*. 2019;74(1):57–63.
19. Козлова В. В., Макеева С. В., Воробей О. А., Оразбаева Ж. А., Фаузитдинова К. А. Реальная сложность в современной биомедицинской науке. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;4:9–17.
20. Якунин В. Е., Горбунова Д. С., Часовских А. В., Мороз О. А., Балашов В. Г. Теорема Гленсдорфа-Пригожина в описании параметров кардиоинтервалов школьников при широтных перемещениях. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;1:22–30.
21. Хадарцев А. А., Гавриленко Т. В., Горбунов Д. В., Веденеев В. В. Математические аспекты статьи W.Weaver «Science and complexity». *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;4:70–79.
22. Seising R. Warren Weaver's "Science and complexity" Revisited. *Soft Computing in Humanities and Social Sciences*. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. 2012;273:55–87.
23. Козупица Г. С., Хадарцева К. А., Шелим Л. И. Теория хаоса-самоорганизации — фундамент развития общей теории систем. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;1:63–70.
24. Зинченко Ю. П., Еськов В. М., Филатов М. А., Григорьева С. В. Психология эвристики и модели эвристической деятельности мозга. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;3:73–84.
25. Eskov V. M., Zinchenko Y. P., Filatov M. A., Ilyashenko L. K. Glansdorff-Prigogine Theorem in the Description of Tremor Chaotic Dynamics in Cold Stress. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2017;5:27–32.
26. Eskov V. M., Filatova O. E., Eskov V. V., Gavrilenko T. V. The Evolution of the Idea of Homeostasis: Determinism, Stochastics, and Chaos-Self-Organization. Biophysics. 2017;62(5):809–820.
27. Твердислов В. А., Манина Е. А. Возможны ли причинно-следственные связи в науках о биосистемах? *Вестник новых медицинских технологий*. 2021;28(1):64–68.
28. Seising R., Interview with L. A. Zadeh. Berkeley, CA, Univ. California, Soda Hall, 26 July 2000, unpublished.
29. Филатова О. Е., Козлова В. В., Еськов В. В., Шакирова Л. С. Новые инварианты в оценке систем третьего типа. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;3:68–75.
30. Еськов В. М., Филатова О. Е., Полухин В. В., Нувальцева Я. Н., Веденеева Т. С. Новое понимание статичности в биомеханике и проблема стандартов гомеостаза. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;3:22–31.

31. Eskov V. V., Orlov E. V., Bashkatova Yu. V., Melnikova E. G. The Problem of Statistical Stability of Parameters of the Cardiovascular System. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2020;11:27–31.
32. Филатова О. Е., Еськов В. В., Григорьева С. В., Хакимова В. В., Гумарова О. А. Биомеханика и биофизика сложных систем с позиций квантовой механики. *Вестник новых медицинских технологий*. 2019;26(4):146–151.
33. Галкин В. А., Попов Ю. М., Григоренко В. В., Архипкина М. В. Новые подходы в математическом моделировании биосистем. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;4:60–69.
34. Еськов В. В., Пятин В. Ф., Фадюшина С. И., Нувальцева Я. Н., Оразбаева Ж. А. Новые модели стандартов в биологии и медицине. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;2:67–75.
35. Еськов В. М., Мирошниченко И. В., Мнацаканян Ю. В., Журавлева А. Н. Проблема устойчивости гомеостатического регулирования функциональных систем организма. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;1:73–87.
36. Филатов М. А., Нувальцева Я. Н., Оразбаева Ж. А., Афаневич К. А. Медицинская кибернетика и биофизика с позиций общей теории систем. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;27(2):116–119.
37. Еськов В. М., Пятин В. Ф., Еськов В. В., Миллер А. В., Веденеев В. В. Существуют ли отличия между произвольными и непроизвольными движениями? *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;27(3):88–91.
38. Еськов В. М., Колосова А. И., Фадюшина С. И., Мордвинцева А. Ю. Хаотическая динамика ритмики сердца. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:25–34.
39. Прохоров С. А., Белощенко Д. В., Шейдер А. Д., Горбунова М. Н. Методы теории хаоса-самоорганизации в оценке параметров систем третьего типа — *complexity*. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;2:32–41.
40. Галкин В. А., Миллер А. В., Хвостов Д. Ю., Игнатенко А. П., Веденеев В. В. Соотношение между динамическим хаосом и неустойчивостью систем 3-го типа. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;4:69–74.
41. Яхно В. Г., Горбунов Д. В., Булатов И. Б., Горбунов С. В. Термодинамика неравновесных систем И.Р. Пригожина в оценке параметров электромиограмм. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;1:71–79.
42. Eskov V. M., Gudkov A. B., Filatov M. A., Eskov V. V. Principles of Homeostatic Regulation of Functions in Human Ecology. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2019;10:41–49.
43. Чемпалова Л. С., Яхно Т. А., Манина Е. А., Игнатенко А. П., Оразбаева Ж. А. Гипотеза W. Weaver при изучении произвольных и непроизвольных движений. *Вестник новых медицинских технологий*. 2021;28(1):75–77.
44. Гордиевский А. Ю., Попов Ю. М., Сазонова Н. Н., Салимова Ю. В. Энтропия и энергия в биомеханике. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;3:51–61.
45. Khadartsev A. A., Eskov V. V., Pyatin V. F., Filatov M. A. The Use of Tremorography for the Assessment of Motor Functions. *Biomedical Engineering*. 2021;54(6):388–392.
46. Белощенко Д. В., Горбунов Д. В., Башкатова Ю. В., Мороз О. А. Матрицы парных сравнений выборок в оценке параметров систем третьего типа — *complexity. Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;1:40–47.
47. Буданов В. Г. Информационная динамика и социально-экономические кризисы в цифровую эпоху. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;4:44–58.
48. Еськов В. М., Галкин В. А., Хвостов Д. Ю., Ерега И. Р. Проблема компартментно-кластерного моделирования биосистем. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;2:61–70.
49. Filatova O. E., Gudkov A. B., Eskov V. V., Chempalova L. S. The Concept of Uniformity of a Group in Human Ecology. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2020;2:40–44.
50. Leonov B. I., Grigorenko V. V., Eskov V. M., Khadartsev A. A., Ilyashenko L. K. Automation of the Diagnosis of Age-Related Changes in Parameters of the Cardiovascular System. *Biomedical Engineering*. 2018;52(3):210–214.
51. Eskov V. V., Popov Yu. M., Filatova D. Yu., Simanovskaya O. E. Chaos of Involuntary Movements under Conditions of Local Cooling. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2019;12:26–31.
52. Чемпалова Л. С., Трофимов В. Н., Мельникова Е. Г., Аксенова Ю. А., Пономарева Н. И. Нейрове-

гетативная система приезжих жителей Югры в возрастном аспекте. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;4:41–47.
53. Хадарцев А. А., Пятин В. Ф., Еськов В. В., Веденеева Т. С., ИгнатенкоА. П. Реализация гипотезы Н.А. Бернштейна о «повторении без повторений». *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;3:24–30.
54. Гавриленко Т. В., Горбунов Д. В., Горбунова Д. С., Булатов И. Б. Возможность использования энтропийного подхода в оценке параметров движений. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;2:68–75.
55. Галкин В. А., Еськов В. В., Пятин В. Ф., Кирасирова Л. А., Кульчицкий В. А. Существует ли стохастическая устойчивость выборок в нейронауках? *Новости медико-биологических наук*. 2020;20(3):126–132.
56. Еськов В. В. *Математическое моделирование гомеостаза и эволюции complexity*: монография. Тула: Издательство ТулГУ; 2016. 307 с.
57. Еськов В. М., Зинченко Ю. П., Филатов М. А., Еськов В. В. Эффект Еськова–Зинченко опровергает представления I.R. Prigogine, J.A. Wheeler и M. Gell-Mann о детерминированном хаосе биосистем — complexity. *Вестник новых медицинских технологий*. 2016;23(2):34–43.
58. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. *Конец определенности: хаос гомеостатических систем* / Под ред. А. А. Хадарцева, Г. С. Розенберга. Тула: Тульское производственное полиграфическое объединение; 2017. 596 с.
59. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. *Complexity*: *хаос гомеостатических систем* / Под ред. Г. С. Розенберга. Самара: ООО «Порто-принт»; 2017. 388 с.
60. Попов Ю. М., Иванова Н. В., Белощенко Д. В., Поросинин О. И., Игнатенко А. П. Иерархия хаоса в системах управления движением. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;4:24–33.
61. 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 1047* (2021) 012099. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012099.
62. Filatova O. E., Pyatin V. F., Filatov M. A., Shakirova L. S. The Low Temperature Influence on Cardiointervals under Physical Training of Man. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2021;1:17–21.
63. Filatov M. A., Ilyashenko L. K., Makeeva S. V. Psychophysiological Parameters of Students before and after Translatitude Travels. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2019;4:18–24.
64. Филатова О. Е., Мельникова Е. Г., Афаневич К. А., Головачева Е. А., Фадюшина С. И. Сравнительная характеристика нейровегетативного статуса аборигенов — жителей Югры. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;27(1):125–129.
65. Башкатова Ю. В., Чемпалова Л. С., Трофимов В. Н., Аксенова Ю. А., Пономарева Н. И. Состояние вегетативной нервной системы в условиях нагрузки у женщин на Севере РФ. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;27(2):112–115.
66. Ивахно Н. В., Гумарова О. А., Лупынина Е. Ю., Воробей О. А., Афаневич И. А. Оценка параметров треморограмм с позиций теории хаоса-самоорганизации. *Вестник новых медицинских технологий*. 2019;26(3):117–121.
67. Filatov M. A., Ilyashenko L. K., Kolosova A. I., Makeeva S. V. Stochastic and Chaotic Analysis of Students' Attention Parameters of Different Ecological Zones. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2019;7:11–16.
68. Khadartseva K. A., Filatov M. A., Melnikova E. G. The Problem of Homogenous Sampling of Cardiovascular System Parameters among Migrants in the Russian North. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2020;7:27–31.
69. Bashkatova Yu. V., Filatov M. A., Shakirova L. S. State of Athletes' Cardiovascular System under Physical Load in the Russian North. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2020;6:41–45.
70. Filatova D. Yu., Bashkatova Yu. V., Melnikova E. G., Shakirova L. S. Homogeneity of the Parameters of the Cardiointervals in School Children after North-South Travel. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2020;1:6–10.
71. Eskov V. M., Bashkatova Yu. V., Beloshchenko D. V., Ilyashenko L. K. Cardiointervals Parameters of Human Body in Response to Hypothermia. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2018;10:39–45.
72. Khromushin V. A., Pyatin V. F., Eskov V. V., Ilyashenko L. K., Vokhmina Yu. V. New Principles in the

Operation of Neural Emulators in Medical Diagnosis. *Biomedical Engineering*. 2019;53(2):117–120.
73. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Eskov V. M., Ilyashenko L. K. New Effect in Physiology of Human Nervous Muscle System. Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2019;167(4):419–423.
74. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Eskov V. V., Ilyashenko L. K., Kitanina K. Yu. Examination of Statistical Instability of Electroencephalograms. Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2019;168(7):5–9.
75. Еськов В. М., Хадарцев А. А., Еськов В. В. *Третья парадигма. Том III. Восстановительная медицина в зеркале теории хаоса-самоорганизации. Часть I* / Под ред. В. М. Еськова, А. А. Хадарцева. Тула: Изд-во ТулГУ; 2016. 312 с.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jcyb.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 30.09.2022.
Формат 60 × 84/8.
Усл. печ. л. 8. Уч.-изд. л. 11,8.
Цена свободная.