



УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2020
T.1 № 2

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

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

**Том 1
№ 2**

**Vol. 1
No. 2**

Москва
2020

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):

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации;

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;

05.27.01 – Твёрдотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

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

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

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

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

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

Шагалиев Рашид Мирзагалиевич, 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 автоматизации и электротехники 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

Земно 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.

Редакторы

Егоров Александр Алексеевич, к. т. н.

Девицын Иван Николаевич

Камилов Эркин Махмуджанович

Переводчик

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

Художественное оформление обложки

© Горбунов Александр Сергеевич

Издается с 2020 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

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

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

Founder and Publisher

Federal State Institution

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

Russian Journal of Cybernetics is a peer-reviewed scholarly journal.

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

- system analysis, control, and information processing;
- simulation, numerical methods, and simulation software;
- solid-state electronics, electronic components, micro- and nanoelectronics, quantum effect devices.

The Journal's mission is to support the research disciplines development on asserted topic in Russia and abroad, relevant to the priority fields of science development, technologies and equipment in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation.

The objectives of the journal are: promotion of advanced ideas in physics, mathematics, engineering sciences, participating in the implementation of the objectives accomplishment worded by the President of the Russian Federation in the Decree from 01.12.2016 No. 642, on the scientific and technological development of the Russian Federation and also on the import substitution on the of strategic development priority areas of the country appropriate to the remit of the journal, ensuring the provision of publishing areas for qualified personnel, the quality improvement of dissertation researches in the areas through the development of mechanism for professional and public discussion of their research results, education of the younger generation of scientists.

The Journal accepts for publication original articles; translations of published articles from foreign journals (with the consent of the right holder for the translation and publication); reviews; essays; commentaries and event reports.

The publication is useful for the scientists working in the relevant fields of sciences, postgraduates and 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. *Valerii 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 – subdivision of SRISA, Moscow

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

Prof. *Vladimir N. Chubarikov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson of the 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. *Nikolay N. Smirnov*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Dean of 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 of the Department of Computational Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow

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

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

Prof. *Rashit M. Shagaliyev*, Doctor of Science (Phys&Math)

Prof. *Sergey O. Starkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Head of 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 Science of the Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

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

Prof. *Valerii P. Il'in*, Doctor of Science (Phys&Math), Professor of the 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 of Federal State Institution Scientific Research Institute for System Analysis of the 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, The French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France

Executive Editor

Taras V. Gavrilenko, PhD (Engineering)

Managing Editor

Anna P. Chalova, PhD (Linguistics)

Technical Editor

Dmitry A. Morgun, PhD (Phys&Math)

Editors

Alexander A. Egorov, PhD (Engineering)

Ivan N. Devitsyn

Erkin M. Kamilov

Translator

Dmitry I. Troitsky, PhD (Engineering), Assoc. Prof.

Cover Design

© Alexander S. Gorbunov

Published since 2020. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

В. Б. Бетелин	
О выгодоприобретателях научно-технического прогресса	6
В. А. Галкин, Т. В. Гавриленко, А. В. Галкин	
О математическом моделировании динамики коагулирующих смесей в несжимаемой жидкости с учетом явления формирования кластеров-тромбов	14
А. А. Шамина, А. В. Звягин, А. В. Акулич, В. В. Тюренкова, Н. Н. Смирнов	
Изучение систем, ослабленных трещинами с изломом	26
Н. О. Бесшапошников, М. С. Дьяченко, А. Г. Леонов, М. А. Матюшин, А. Е. Орловский	
Использование машинного обучения и нейронных сетей для автоматической верификации заданий в текстовом и графическом представлении и помощи преподавателю	35
С. А. Котов, С. А. Мозеров, С. О. Старков	
Определение уровня экспрессии маркера пролиферации Ki-67 с помощью технологии компьютерного зрения	42
Г. Е. Деев, С. В. Ермаков	
В-компьютеры: саморазвитие	47
Б. Г. Заславский, М. А. Филатов, В. В. Еськов, Е. А. Манина	
Проблема нестационарности в физике и биофизике	56

CONTENTS

V. B. Betelin	
On the Beneficiaries of the Technology Advances	6
V. A. Galkin, T. V. Gavrilenko, A. V. Galkin	
Simulation of Coagulable Mixtures Dynamics in Incompressible Liquid Considering Clot Cluster Formation	14
A. A. Shamina, A. V. Zvyagin, A. V. Akulich, V. V. Tyurenkova, N. N. Smirnov	
Investigation of Systems Weakened by Kinked Cracks	26
N. O. Besshaposhnikov, M. S. Diachenko, A. G. Leonov, M. A. Matyushin, A. E. Orlovskii	
The Application of Machine Learning and Neural Networks to Automated Text and Visual Assignment Verification Used as Assistance to Educators	35
S. A. Kotov, S. A. Mozerov, S. O. Starkov	
Estimation of the Ki-67 Proliferation Marker Expression Level with Computer Vision Technology . . .	42
G. E. Deev, S. V. Ermakov	
B-Computers: Self-Evolution	47
B. G. Zaslavsky, M. A. Filatov, V. V. Eskov, E. A. Manina	
Non-Stationary States in Physics and Biophysics	56

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-1

О ВЫГОДОПРИБОРЕТЕЛЯХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА**В. Б. Бетелин**

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация, betelin@niisi.msk.ru

Аннотация: рассматриваются и сопоставляются движущие силы научно-технического прогресса в СССР и России. Показано, как конкуренция за достижение военного и экономического лидерства в мире определяла необходимость создания в СССР передовых военных и гражданских технологий. Приводятся научно-технические достижения СССР по ряду ключевых отраслей и прослеживается взаимосвязь с образовательными технологиями. Отмечаются существенные отличительные особенности российского коммерческого бизнеса по сравнению с принципами социалистического производства, пагубное влияние этих особенностей на развитие научно-технического прогресса в России.

Ключевые слова: научно-технический прогресс, цифровая экономика.

Для цитирования: Бетелин В. Б. О выгодоприобретателях научно-технического прогресса. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):6–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-1.

ON THE BENEFICIARIES OF THE TECHNOLOGY ADVANCES**Vladimir B. Betelin**

Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation, betelin@niisi.msk.ru

Abstract: the study considers and compares the research and development drivers in the USSR and modern Russia. It is shown that the competition for the global military and economic leadership shaped the need to develop advanced military and civil technologies in the USSR. The paper lists the USSR technology achievements in a number of key industries, and the educational technologies behind them. We identified significant differences between the Russian business practices and the socialist ones, and the negative impact of such differences on the research and technology advancement in Russia.

Keywords: research and technology advancement, digital economy.

Cite this article: Betelin V. B. On the Beneficiaries of the Technology Advances. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(2):6–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-1.

О движущих силах научно-технического прогресса и его выгодоприобретателях в СССР

Во второй половине двадцатого века основной движущей силой научно-технического прогресса в СССР являлась конкуренция с США за достижение вначале военного, а затем и экономического лидерства в мире. Достижение военного превосходства или паритета с США в области создания новых систем вооружения требовало, прежде всего, опережающего развития военных атомных, ракетно-космических и авиационных промышленных технологий. Необходимость создания в СССР таких военных серийных технологий и серийных систем вооружения на их основе была продиктована тем, что в начале 50-х годов прошлого века в США были разработаны и серийно производились термоядерные бомбы Mk-19 и Mk-24 с тротильным эквивалентом 10–15 Мт. Были разработаны и серийно производились в США самолеты Б-36, каждый из которых мог доставить две такие бомбы на расстояние до 16 тыс. километров. К 1954 году США располагали арсеналом из 305 бомб Mk-17 и Mk-24 и 385 самолетами Б-36, что в совокупности, очевидно, являлось реальной угрозой уничтожения СССР и большей части его населения [1], поскольку в это время таким оружием и средствами его доставки СССР не располагал.

Парирование этой угрозы обеспечил послевоенный технологический и промышленный прорыв СССР, в результате которого были созданы военные, а затем и гражданские, атомная, ракетно-космическая и новая авиационная (реактивная авиация) отрасли. Эти новые отрасли уже к концу 50-х годов обеспечили разработку и серийное производство термоядерных зарядов мегатонного класса [1],

а также их носителей, бомбардировщиков Ту-95 и баллистических ракет Р-7, которые могли доставить эти заряды на расстояние до 12 тыс. километров [2]. В рамках новой авиационной отрасли на основе бомбардировщиков Ту-95 и Ту-16 были разработаны и серийно выпускались гражданские дальнемагистральный самолет Ту-114 и магистральный Ту-104. До 1990 года каждый четвертый гражданский магистральный самолет в мире производился в СССР в среднем по 80 лайнеров ежегодно [4]. В атомной отрасли на основе диверсификации военных технологий были обеспечены разработка и строительство атомных электростанций, а также атомных энергетических установок для ледокольного флота. Существенно важно, что в рамках реализации этих масштабных атомного, ракетно-космического и авиационного проектов, государством, путем консолидации усилий промышленных и научных предприятий, были созданы новые и модифицированы существующие отрасли промышленности и миллионы новых высокооплачиваемых рабочих мест и в этих отраслях промышленности, и в науке, и в образовании. Например, в 1990 г. в СССР численность атомной отрасли составила 1.1 млн человек [2], авиационной — 1.5 млн [4], а численность по направлению «Наука и научное обслуживание» — 2 млн 804 тыс. человек [5]. В целом же численность промышленно-производственного персонала в РСФСР в 1990 году составляла 23.1 млн человек. То есть выгодоприобретателем научно-технического прогресса как в военных, так и в гражданских промышленных технологиях являлось все население СССР, поскольку этот прогресс обеспечил, в частности, предотвращение ядерного удара по СССР и уничтожение большей части его населения, а также, создание миллионов высокооплачиваемых рабочих мест для населения страны. В целом научно-технический прогресс, инициируемый конкуренцией СССР с США, обеспечил только в РСФСР за 35 лет — с 1945 по 1980 гг. двадцатикратное увеличение объемов промышленного производства [3].

Существенно важно, что научно-технический прогресс в СССР принципиально основывался на «культе знаний», особенно в области точных наук, который государству, в результате целенаправленной политики, удалось сформировать и поддерживать в общественном сознании практически до 1991 года. Умение решать сложные научные и технические проблемы на основе фундаментальных знаний открывало члену общества один из путей к государственному и общественному признанию, материальному благополучию, вхождению во властные структуры, и, что не менее важно, к масштабному техническому творчеству. На приобретение этих умений и знаний, была нацелена естественно-научная компонента массовой образовательной системы СССР, которая обеспечивала подготовку кадров для атомной, авиационной и ракетно-космической отрасли промышленности, включая прикладные научно-исследовательские институты и Академию наук.

О движущих силах научно-технического прогресса и его выгодоприобретателях в России Наше дело — зарабатывать деньги для акционеров [7]

Однако после распада СССР в 1991 году новая Россия отказалась от экономического и политического курса СССР, в том числе и от конкуренции с США за достижение военного и экономического лидерства в мире, и, следовательно, и от движущей силы научно-технического прогресса СССР. Основной экономической политики России и движущей силой научно-технического прогресса стали интересы акционеров коммерческих организаций, основной целью которых, согласно статье 50 Гражданского кодекса является извлечение прибыли. Конечно, максимальной и, конечно, за минимальное время, и с минимальными рисками. К коммерческим относятся и наиболее распространенные формы акционерного общества, и общества с ограниченной ответственностью. Именно поэтому в интервью «Нищета не наша забота» президент АО «Альфа-банк» Петр Авен в газете «Аргументы и факты» [7] на вопрос корреспондента «Кроме прибыли вас еще что-то интересует?», отвечает: «В бизнесе — только она! Мы занимаемся лишь тем, что нам выгодно, — финансовыми операциями, нефтянкой, мобильной связью, телевидением, торговой сетью «Перекресток» ...». И далее, в том же интервью, формулирует один из ключевых постулатов российского коммерческого бизнеса: «Наше дело — зарабатывать деньги для акционеров и клиентов в рамках закона. Других обязанностей у нас нет» [7].

То есть, по сути дела, согласно ГК РФ в обязанности этого российского бизнеса не входит разработка новых технологий добычи нефти, производства средств мобильной связи и телевизионной аппаратуры, поскольку это требует долгосрочных, крупных финансовых вложений и, следовательно, снижения прибыли акционеров, а также связано со значительными рисками возврата вложенных средств, то есть с возможностью еще больших потерь для акционеров. То есть российскому коммерче-

скому бизнесу, которого интересует только прибыль, не выгодно заниматься в России ни разработкой, ни производством промышленных изделий, ни технологиями их разработки и производства.

Но выгодно приобретение промышленных изделий крупных зарубежных компаний и оказание услуг на их основе [6]. Например, оказание на основе зарубежного вычислительного и коммуникационного оборудования дистанционных банковских услуг, услуг мобильной связи или телевизионного вещания.

Собственно, в создании такого коммерческого бизнеса, зарабатывающего, а точнее, делающего деньги для акционеров на основе технологий и оборудования зарубежных компаний состояла и состоит суть проводимых в России экономических реформ. Такому отечественному коммерческому бизнесу, очевидно, не нужны как унаследованные от СССР наука, образование и промышленность, нацеленные на создание и производство промышленных изделий, так и миллионы высокооплачиваемых рабочих мест для населения страны, созданных в промышленности, науке и образовании СССР до 1991 года. Именно по этой причине, например, численность работающих в авиапроме России сократилась к 2004 году в три раза по сравнению с 1990 г., а из 96 магистральных самолетов, приобретенных отечественными перевозчиками в 2002-2005 гг., 76 были иностранного производства [4]. Годовой объем продаж гражданского сегмента отрасли стал ничтожно мал — около \$70 млн. Объем продаж военного сегмента отрасли практически полностью определялся экспортными заказами и не превосходил \$2–\$4 млрд в год. Для сравнения, объем продаж BOEING в 2006 году составил \$61.5 млрд [4].

В целом же численность промышленно-производственного персонала в новой России сократилась с 23.1 млн человек в 1990 году до 12.8 млн человек в 2004 году, то есть почти в два раза [3], при том, что, по свидетельству директора Всероссийского центра уровня жизни Вячеслава Бобкова, «в России такие зарплаты, что прожить на них невозможно» [7]. Однако, в то же самое время, богатые в России покупали яхты стоимостью до 10 млн долларов [7]. Богатые — это и есть выгодоприобретатели научно-технического прогресса в новой России, движущей силой которого является прибыль. То есть богатые — это получатели прибыли частного бизнеса, которыми являются только его акционеры, но не наемные работники этого бизнеса, у которых зарплаты такие, что «прожить на них невозможно», то есть «бедные». В числе этих «бедных» наемных работников «нормальные честные труженики, имеющие стабильный заработок» [7].

И это прямое следствие действия Гражданского кодекса РФ, который законодательно гарантировал и гарантирует сейчас собственнику компании право получения прибыли в любом размере. При этом он не несет никакой ответственности за сохранение рабочих мест, социальную поддержку, индексацию заработной платы наемных работников, главное, чтобы размер заработной платы не был ниже установленного законом МРОТ. То есть действующий Гражданский кодекс РФ, по сути дела, законодательно утверждает главенствование права собственника-работодателя над правами наемных работников, в числе которых и право на достойную жизнь и развитие человека. Точнее, утверждает в России главенство интересов собственника, а не главенство интересов общества и экономики страны.

Мы платим налоги и больше ничего не должны никому [7]

Это — первый ключевой постулат российского коммерческого бизнеса, непосредственно следующий из действующего Гражданского кодекса РФ. Поскольку частный бизнес «платит налоги и больше ничего не должен никому», то борьба с бедностью в новой России — это дело государства [7]. Поэтому и через пятнадцать лет в 2020 году проблема бедности остается более чем актуальной в России. Действительно, по сообщению газеты «Московский комсомолец» [8], в 2019 году число людей с доходами ниже прожиточного уровня выросло до 20.9 млн человек. Уровень бедности повысился до 14.3 % против 13.9 % в 2018 году. Вместе с тем 20 богатейших людей нашей страны — акционеры, выгодоприобретатели частного бизнеса, за последние семь месяцев в совокупности разбогатели на 36 млрд долларов, или на 2.34 трлн рублей, это вполне закономерно, поскольку основная цель этого бизнеса, как и 15 лет назад в 2004 г., — зарабатывать деньги для акционеров [7]. Действительно, в число этих акционеров и 20 богатейших людей нашей страны входит и владелец 84 % акций ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» [9], в Стратегии развития которого до 2022 г. (далее Стратегия) декларируется: «В рамках Стратегии 2022 мы продолжим свою работу по максимизации доходности для акционеров» [10]. Основным инструментом максимизации доходности — повышение операционной эффективности, что вполне может привести к уменьшению числа рабочих мест в компании и доходов наемных работ-

ников. Тем более, что в Стратегии в отношении персонала, то есть наемных работников, планируется только «сокращение уровня травматизма» и «высокий уровень мотивации и вовлеченности» [10], а в интервью «Ведомостям» президент НЛМК говорит о намерении в рамках предложенной им Стратегии и плане «закрыть часть производственной цепочки», что «сейчас обсуждается с профсоюзами и работниками» [9]. То есть отсутствуют какие-либо гарантии даже сохранения существующей численности наемных работников и уровня их оплаты, которые согласно отчетности по МСФО составили в 2018 г. 58.3 тыс. человек и 60.8 тыс. рублей соответственно. Еще один инструмент максимизации доходности в Стратегии — инвестиции в проекты роста, с реализацией при этом «высококонкурентной дивидендной политики» [10], иными словами, инвестирование только в то, что имеет синергию с основным бизнесом [9] и не приводит к снижению дивидендов акционеров, то есть «умный рост производства» [9]. Например, в производство стали для электродвигателей [9], но не в производство собственно электродвигателей и тем более электрокаров на их основе, поскольку это потребовало бы долгосрочных финансовых вложений с высокими рисками и могло бы привести к уменьшению доходов акционеров. То есть критерием выбора направлений и темпов научно-технического прогресса в компании НЛМК, чистая прибыль которой в 2018 г. составила \$2.2 млрд, является рост доходов ее акционеров, но не рост экономики страны и уровней доходов и занятости ее населения. То есть не рост объемов производства российского авиастроения, машиностроения, станкостроения, автомобилестроения и т. д. Именно поэтому на унаследованных от СССР «активах российской металлургии производится в 2 раза больше стали, чем потребляется внутри страны», а «в России 60–70 % потребления стали — это строительство» и, по мнению президента НЛМК, «в этом же сегменте ... основной отложенный спрос» [9]. Поэтому вполне закономерно, что президентом НЛМК является не выпускник технического вуза, а выпускник Финансовой академии при Правительстве России, специалист по финансовому и управленческому консалтингу, который «понял, что производство стали — это управляемая система. И мне стало интересно заниматься оптимизацией этой системы» [9]. Поскольку цель оптимизации этой управляемой системы, как следует из Стратегии, — увеличение прибыли акционеров, то проекты роста должны основываться только на апробированных технических решениях с минимальными рисками, а основные критерии выбора оптимального технического решения должны быть только финансовыми. То есть в новой России последние двадцать пять лет уже не «культ знаний» в области точных наук, а «культ знаний» в области финансового и управленческого консалтинга открывает члену общества путь к государственному и общественному признанию, материальному благополучию и вхождению во властные структуры. Так, например, в 2018 г. средний размер вознаграждения членов Правления Группы «НЛМК» составил 4 млн 138 тыс. рублей в месяц.

Мы занимаемся лишь тем, что нам выгодно [7]

Это — второй ключевой постулат российского коммерческого бизнеса, которому «выгодно» все, что приводит, согласно Гражданскому кодексу РФ, к увеличению прибылей акционеров. «Выгодно» повышение операционной эффективности, которое достигается, в том числе, за счет сокращения рабочих мест и уровня оплаты работников. «Выгодна» реализация проектов роста, которые не уменьшают прибыли акционеров и сохраняют финансовую устойчивость, то есть использование в проектах роста только имеющихся на мировом рынке апробированных (то есть зарубежных) технических и технологических решений с минимальными рисками.

«Не выгодно» использовать не апробированные на мировом рынке отечественные технические и технологические решения. «Не выгодно» диверсифицировать нефтяной, газовый, стальной, алюминиевый и т.д. крупный российский бизнес для разработки и серийного производства высокотехнологичных промышленных изделий. Более того, по сути дела, согласно Гражданскому кодексу РФ, любой бизнес, основанный на производстве промышленных изделий, созданных руками человека, в том числе и микроэлектроники, проигрывает бизнесу на основе продуктов, созданных природой. Нефть, газ, каменный уголь, железная и цветная руды, лес, рыба, питьевая вода — это то, что «само растет». И может быть продано с минимальными рисками и на глобальном, и на внутреннем рынке. При затратах на добычу и подготовку к продаже, обеспечивающих высокий уровень прибыли для акционеров. Об этом убедительно свидетельствуют данные индекса Bloomberg, относительно основы бизнеса российских миллиардов.

Это означает, что при действующем Гражданском кодексе РФ, Россия была, есть и будет на

сырьевой игле и никакие экономические методы, включая и прогрессивное налогообложение, и регулирование процентных ставок, эту ситуацию не изменят. Так же, как и национальные проекты, в рамках которых будут построены жилые дома, транспортные магистрали, аэропорты, создана мощная информационно-коммуникационная инфраструктура и т.д. Но не будут воссозданы отрасли промышленности, аналогичные тем, что были в СССР с миллионами высокооплачиваемых рабочих мест. Такие, например, как микроэлектронная и радиоэлектронная отрасли. Даже на основе заемных технологий и оборудования зарубежных компаний коммерческая микроэлектроника очевидно невыгодна российским акционерам, поскольку требует миллиардных инвестиций в производство, технологии и разработку микроэлектронной продукции при высоких рисках неуспеха на глобальном полупроводниковом рынке. Например, в 2009 году средняя стоимость полупроводникового завода составляла от \$1.6 млрд до \$3 млрд, стоимость разработки технологии около \$0.6 млрд. Хотя создание в России и этих, и машиностроительных отраслей промышленности и рабочих мест обеспечило бы решение и проблемы бедности, и проблемы вывода экономики страны из «застойной ямы», и вхождение России в пятерку крупнейших экономик мира. И, конечно, решение демографической проблемы, поскольку молодым были бы обеспечены стабильные рабочие места и заработок. А не только адресная помощь государства.

Однако в условиях действующего Гражданского кодекса РФ производство промышленных изделий, и особенно высокотехнологичных, таких, например, как микроэлектроника, невыгодно акционерам коммерческих компаний. То есть, другими словами, в этих условиях российский коммерческий бизнес не является и не может являться движущей силой научно-технического прогресса, нацеленного на решение проблем российского общества и экономики России. Действительно, например, сегодня российский коммерческий бизнес, очевидно, является движущей силой использования зарубежных, но не создания собственных массовых дешевых цифровых технологий. Но исключительно и только для увеличения прибылей акционеров бизнеса за счет увеличения темпов оборачиваемости капитала, то есть увеличения объема вкладываемых в бизнес финансовых средств и сокращения времени их возврата. Именно стремление бизнеса к увеличению темпов оборачиваемости капитала являлось и является основной движущей силой научно-технического прогресса сначала в микроэлектронике и бытовой радиоэлектронике, а затем и в бытовой технике, включая автомобили. В этом же, собственно, состоит и суть процессов, получивших название «новая технологическая революция» [18], и, в терминологии ЮНКТАД, явление «цифровая экономика», для которого, однако, по признанию авторов Доклада о цифровой экономике 2019, отсутствует достаточное его понимание [11].

Отсутствие достаточного понимания явления «цифровая экономика»

Это прямо декларируется в разделе В «Что такое цифровая экономика?» Доклада о цифровой экономике 2019 (далее — Доклад), подготовленного в рамках конференции ООН по торговле и развитию (ЮНКТАД) [11]. Утверждается также, что отсутствие определения этого термина — «следствие новизны и отсутствия достаточного понимания и ясности рассматриваемого явления». В этой связи в Докладе вводится «рабочее определение термина цифровая экономика, которое и служит базой для анализа, проведенного в настоящем докладе» [11]. Однако этот анализ, сделанный в Докладе, не привел к достаточному пониманию и ясности рассматриваемого явления. Действительно, в разделе «Заключение», который озаглавлен «Цифровая экономика для многих, а не для некоторых», нет никаких конкретных политических, экономических и технических рекомендаций, обеспечивающих достижение справедливого распределения выгод от цифровизации. Основное содержание этого раздела — общие рассуждения о том, что цифровые технологии могут как способствовать, так и препятствовать достижению цели устойчивого развития в зависимости от принятых политических решений. Указаны «несколько простых решений, но еще меньше было опробовано и проверено». Более того, констатируется, что «существует общая нехватка надежных фактических и статистических данных, свидетельствующих в пользу (или против) той или иной политики, которая обеспечивала бы прежде всего эффективное распределение потенциальных выгод от цифровизации».

Тем не менее, несмотря на отсутствие достаточного понимания и ясности рассматриваемого в Докладе явления, а также путей обеспечения справедливого распределения выгод от цифровизации, в заключении доклада сообществу по вопросам развития предлагается «изучить новые пути оказания поддержки странам, которые отстают в своей готовности участвовать в цифровой экономике и поль-

зоваться ее преимуществами», а также оказывать помощь, направленную на «сокращение цифрового разрыва, укрепление благоприятных условий для создания стоимости в цифровой экономике. . . » [11].

Более того, в условиях этой неопределенности в Докладе рекомендуется создание альянса учреждений-доноров и поощрение практики в области донорской поддержки цифровой экономики **в развивающихся странах**, с особым акцентом на **доступность цифровых технологий**. Руководящим и директивным органом развивающихся стран рекомендуется: «принятие и осуществление национальных стратегий и программ в области цифрового развития», «интеграция донорской поддержки цифровой экономики в местные системы мобилизации и распределения ресурсов, включая . . . **управление государственными финансами**».

Другими словами, в Докладе развивающимся странам фактически предлагается финансировать из собственных и заемных средств дорогостоящие эксперименты (например, «нормативные песочницы») по пониманию того, что же такое цифровая экономика и как обеспечить справедливое распределение выгод от участия в ней.

Согласно ЮНКТАД (2017а) объектами финансирования в развивающейся цифровой экономике могут быть такие ее элементы, как робототехника, искусственный интеллект, Интернет вещей, облачные вычисления, большие данные и 3Д принтеры, а также цифровые платформы, в том числе и Е-торговля. Для этого частного случая цифровой экономики как совокупности перечисленных в ЮНКТАД (2017а) ее элементов можно определить и соответствующих выгодоприобретателей, и сформированную ими систему распределения выгод, в которой нет места России.

Полупроводниковая промышленность США — наиболее значимый выгодоприобретатель проекта «Интернет вещей» США

В течение последних 20 лет ключевым фактором роста доходности и объемов производства полупроводников являлось снижение стоимости одного транзистора при переходе на меньшие проектные нормы. К настоящему времени модель развития лидирующей полупроводниковой отрасли США, в основе которой снижение стоимости транзистора за счет перехода на меньшие проектные нормы, практически себе исчерпала [12].

Концепция новой модели развития полупроводниковой отрасли США как катализатора роста всей экономики страны фактически была сформулирована в 2015 г. в решении Сената США об ускорении разработки и внедрения «Интернета вещей». Инициаторами и наиболее активными участниками обсуждения этой проблемы являлись представители компаний INTEL и Samsung, а также Ассоциация производителей полупроводников США. Проект закона об «Интернете вещей» был одобрен Сенатом в 2017 г. и передан на рассмотрение в Палату представителей. В преамбуле этого закона прогнозируется, что к 2020 г. к Интернету будут подключены более 50 млрд устройств, что может генерировать триллионы долларов оборота в новой экономической деятельности по всему миру [6].

Основой этой новой экономической деятельности будет производство компаниями США сотен миллиардов полупроводников и десятков миллиардов цифровых систем управления этими устройствами. Именно эти компании и будут в числе основных получателей триллионов долларов, то есть основными выгодоприобретателями «Интернета вещей» США.

Россия не владеет технологиями и не располагает предприятиями, способными обеспечить производство таких количеств полупроводников и цифровых систем управления на их основе. Продукцию, относящуюся к категориям как потребительского, так и промышленного «Интернета вещей» США, Россия всего лишь импортирует или собирает из импортных комплектующих. Так же, как и серверы, вычислительную и коммуникационную технику, мобильные устройства, необходимые для организации облачных вычислений и работ по искусственному интеллекту, обработки больших данных, робототехники, цифровых платформ и Е-торговли. То есть выгодоприобретателями этих элементов развивающейся цифровой экономики в России будут, прежде всего, полупроводниковые и радиоэлектронные компании США, но не российские компании и государство.

О массовых дешевых короткоживущих услугах на основе массовых дешевых цифровых технологий

Формирование этой модели оказания услуг непосредственно связано с созданием в конце 80-х — начале 90-х годов прошлого века отдельных сегментов сети Интернет (далее — Сеть) и цифровой техно-

логии по передаче текстовых сообщений («электронная почта»). Стоимость услуг по передаче текстовых сообщений определялась стоимостью аппаратуры передачи данных, включающей вычислительное и коммуникационное оборудование Сети. В свою очередь, стоимость этой аппаратуры определялась стоимостью полупроводников, на основе которых она изготовлена. То есть удешевление стоимости полупроводников в соответствии со стратегией «двойного сокращения» в конечном счете приводило к снижению стоимости передачи текстовых, а затем графических и видео сообщений в Сети. По данным Dr Peering.net, стоимость передачи сообщения объемом 1 Мбайт в Сети с 1998 по 2010 гг. снижалась в среднем на 61 % в год, с более чем \$1 тыс. до нескольких центов. Очевидным следствием этого явилось интенсивное удешевление цифровых технологий и услуг на их основе. При этом доходность этого нематериального «информационного ширпотреба» оказалась значительно выше, чем полупроводникового. Прежде всего из-за огромного числа ежедневно оказываемых услуг (многие сотни миллионов передаваемых сообщений), а также потому, что для нематериальной услуги отсутствуют затраты на разработку и постановку на производство, а время ее жизни фактически определяется временем прохождения сообщения в Сети. О высокой доходности этих услуг свидетельствуют экономические показатели компаний Facebook, Google, Amazon и Apple, которые специализируются на доставке потребителю информации и товаров массового спроса. Действительно, совокупная стоимость этой «Четверки» составляет \$2.8 трлн. В 2017 году Facebook и Google инвестировали в развитие \$29 млрд, а на зарубежных счетах Apple в том же году хранилось \$250 млрд. При этом капитализация Facebook в 2018 году составила \$448 млрд, а Intel только \$165 млрд. Ежедневно 1.2 млрд пользователей тратят на обращение к Facebook в среднем 50 минут. Обращение к Facebook — это одна из шести минут в Интернете и одна из пяти минут в мобильном телефоне [16]. Очевидно, что стратегическая задача и этой компании, и всей «Четверки» — увеличение числа обращений как за счет предложения новых услуг, так и за счет увеличения численности сообщества своих пользователей или, по крайней мере, сохранения этой численности. Необходимое условие решения этой задачи — владение технологиями анализа больших объемов данных, получаемых от пользователей, и формирование на основе этого анализа новых типов услуг, обеспечивающих увеличение и числа обращений, и числа пользователей. Другими словами, компании «Четверки», а точнее акционеры этих компаний, являются основными выгодоприобретателями и научно-технического прогресса в области массовых дешевых цифровых технологий, и таких элементов цифровой экономики, как большие данные и искусственный интеллект, которые являются для «Четверки» ключевыми инструментами увеличения доходности нематериального «информационного ширпотреба». По сути, это инструменты мягкого закрепощения человека обилием предлагаемых удобных и привлекательных услуг, лишаящих его в итоге существенно важных для самостоятельной и независимой от этих компаний жизни умений и навыков. Таких, например, как умение запоминать и анализировать большие объемы данных, выстраивая длинные цепочки умозаключений, письменно излагать результаты проведенного анализа, читать и понимать сложные тексты и т.д. Человек, лишенный таких умений и навыков, — идеальный потребитель все новых услуг, предоставляемых каждой из компаний «Четверки», поскольку практически безоговорочно им доверяет и фактически закрепощается ими.

Как отмечается в книге «Четверка» профессора бизнес-школы университета Нью-Йорк Скотта Галлоуэя [16], интенсивное удешевление цифровых технологий и высокая прибыльность замены сотрудников этими технологиями привели к ускоренному уничтожению рабочих мест и опустошению смежных секторов экономики. Впервые со времен Великой депрессии тридцатилетние американцы живут хуже, чем в том же возрасте жили их родители. [16]. Компании «Четверки» создают высокооплачиваемые рабочие места, но в ничтожном количестве, то есть существенно меньше, чем уничтожают. Они строят Америку, в которой будет 3 миллиона хозяев и 350 миллионов крепостных. [16]. То есть платой за пользование удобными и привлекательными услугами «Четверки» является уничтожение рабочих мест и снижение уровня жизни населения Америки, которое, очевидно, не является выгодоприобретателем научно-технического прогресса в массовых дешевых цифровых технологиях и технологиях больших данных и искусственного интеллекта.

Примером планов ускоренного уничтожения в России рабочих мест и закрепощения пользователей является планируемое к 2025 году сокращение половины из 330 тыс. сотрудников ПАО Сбербанк. Конечно, за счет активного перевода услуг банка в цифровую сферу [7], а также выстраивания персональной работы с каждым клиентом и повышения лояльности своих пользователей, то есть, по сути, их закрепощения на основе технологий больших данных и искусственного интеллекта.

Планируется, что через пять лет 80 % решений смогут приниматься с помощью искусственного интеллекта. Наблюдательный совет ПАО Сбербанк одобрил трансформацию этой кредитной организации, которая выйдет далеко за пределы банковских услуг. Следствием этих преобразований будет закрытие физических отделений и тем самым сокращение штата сотрудников [7]. То есть, по сути, в результате этой трансформации на основе ПАО Сбербанк будет создана компания, аналогичная «Четверке», которая будет создавать высокооплачиваемые рабочие места, но в ничтожном количестве, то есть существенно меньше, чем уничтожает, и строить Россию, в которой будет 1.4 миллиона хозяев и 140 миллионов крепостных. Конечно, основными выгодоприобретателями планируемой трансформации ПАО Сбербанк будут его акционеры, в числе которых 45 % иностранцы.

Однако миром уже правит новая экономика нематериального «информационного ширпотреба», в которой победитель забирает все. Лидер этой новой экономики — «Четверка» — Amazon, Google, Facebook и Apple, вся экономическая мощь которых направлена на уничтожение конкуренции. «Четверка» либо поглощает конкурентов, либо душит их, повторяя функции продукта-конкурента, то есть в обозримом будущем вполне вероятно, что и трансформированный ПАО Сбербанк, и российские компании Яндекс и Ozon многократно уступающие по финансовой мощи «Четверке», будут либо куплены ею, либо уничтожены.

Это, очевидно, ставит под большое сомнение утверждение Г. Грефа о том, что создание цифровой экономики крайне необходимо для экономики нашей страны, поскольку это мировой тренд [17]. Тем более, что двадцатипятилетнее слепое и бездумное следование различным мировым трендам привело в конечном счете к необходимости решать проблемы вывода экономики страны из «серьезной застойной ямы», победы над бедностью и вхождения России в пятерку крупнейших экономик мира.

ЛИТЕРАТУРА

1. *На благо России: К 75-летию акад. РАН Ю. А. Трутнева*. Саров; Саранск: Тип. «Красный Октябрь»; 2002. 456 с. ISBN 5-7493-0488-4.
2. *Военно-промышленный комплекс: энциклопедия*. М.: Воен. Парад; 2005. ISBN 5-902975-01-8.
3. Гражданкин А. И., Кара-Мурза С. Г. *Белая книга: промышленность и строительство в России 1950-2014 гг.* М.: ТД-Алгоритм; 2016.
4. Велихов Е. П., Бетелин В. Б., Кушниренко А. Г. *Промышленность, инновации, образование и наука в России*. М.: Наука; 2009. 141 с.
5. *Российская академия наук, 1991-2001*. М.: Наука, ЦИСН; 2002. 406 с.
6. Бетелин В. Б. России необходим отказ от «экономики услуг» и переход к экономике промышленного производства. *Экономист*. 2019;2:3-12.
7. Бедность тянет Россию в пропасть, но богатых это, похоже, не волнует. *Аргументы и факты*. 13.10.2004. № 41. Режим доступа: <https://aif.ru/archive/1633925>.
8. Калинина Ю. Сказочно богатые россияне. *Московский комсомолец*. 03.08.2019. № 28039.
9. Трифонова П. Президент НЛМК: «Мы станем лучшей металлургической компанией в мире». Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/business/characters/2019/03/04/795560-prezident-nlmc-mi-stanem-luchshei-metallurgicheskoi-kompaniei-v-mire>.
10. Федоришин Г. Стратегия. Режим доступа: <https://lipetsk.nlmk.com/ru/about/strategy/>.
11. *Digital Economy Report 2019*. United Nation Conference on Trade and Development (UNCTAD). Geneva: United Nation Publication; 2019.
12. Бетелин В. Б. Проблемы и перспективы формирования цифровой экономики в России. *Вестник РАН*. 2018;1:3–9.
13. Бетелин В. Б. О проблеме импортозамещения и альтернативной модели экономического развития России. *Стратегические приоритеты*. 2016;1:11-21.
14. Бетелин В. Б. Проблемы и перспективы образования в постиндустриальном информационном обществе. *Вестник РАН*. 2019;89(6):582–592.
15. Бетелин В. Б. О проблеме диверсификации производства на предприятиях оборонно-промышленного комплекса России. *Инновации*. 2018;7:3–7.
16. Galloway S. *The Four. The hidden DNA of Amazon, Apple, Facebook and Google*. Random House Large Print. 448 p.
17. Греф допустил сокращение числа сотрудников Сбербанка вдвое к 2025 году. Режим доступа: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5880ab7e9a794732f8c15c6f>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-2

**О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ КОАГУЛИРУЮЩИХ СМЕСЕЙ В
НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
КЛАСТЕРОВ-ТРОМБОВ****В. А. Галкин^{1,а}, Т. В. Гавриленко^{1,б}, А. В. Галкин²**¹ Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
г. Сургут, Российская Федерация^а val-gal@yandex.ru, ^б taras.gavrilenko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>² Общество с ограниченной ответственностью «ФИНСТАБИЛИТИ», г. Мытищи, Московская обл.,
Российская Федерация, ag@webberry.ru

Аннотация: одной из ключевых проблем, на решение которой направлены ресурсы общества по преодолению заболевания, вызванного новым коронавирусом COVID-19, является проблема нарушения кровотока, связанная, в частности, с процессом тромбообразования. Это явление существенно ограничивает кровоток, снижая доставку кислорода в целом по всему организму. В статье рассмотрены результаты создания математической модели динамики коагулирующих смесей в несжимаемой жидкости с учетом явления формирования кластеров-тромбов. Создание математических моделей процессов коагуляции и тромбообразования в сердечно-сосудистой системе человека обеспечит разработку эффективного управления этими явлениями. В статье описана математическая модель для процессов коагуляции в дисперсных системах — тромбообразования. Представлены результаты численного решения задачи и визуализация аналитического решения задачи, включая такие важнейшие параметры для тромбообразования, как распределение концентрации примеси в жидкости и распределение поля давления. Указанная модель может служить основой для построения иерархической системы образования тромбов в сердечно-сосудистой системе от микроскопического уровня до макроскопических структур. В том числе модель позволит сделать выводы об эффективности использования антикоагулянтов при поступлении пациентов в отделения неотложной помощи и при положительном результате теста на COVID-19.

Ключевые слова: математическое моделирование, тромбообразование, гидродинамика, дисперсные системы, кристаллические структуры.

Благодарности: работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 20-04-60123, 20-07-00236.

Для цитирования: Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Галкин А. В. О математическом моделировании динамики коагулирующих смесей в несжимаемой жидкости с учетом явления формирования кластеров-тромбов. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):14–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-2.

**SIMULATION OF COAGULABLE MIXTURES DYNAMICS IN INCOMPRESSIBLE LIQUID
CONSIDERING CLOT CLUSTER FORMATION****Valerii A. Galkin^{1,а}, Taras V. Gavrilenko^{1,б}, Alexei V. Galkin²**¹ Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian
Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation^а val-gal@yandex.ru, ^б taras.gavrilenko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>² FINSTABILITY Limited Liability Company, Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation,
ag@webberry.ru

Abstract: one of the key problems associated with COVID-19 is blood circulation impairment, particularly caused by thrombosis. The impairment significantly reduces the blood flow and restricts oxygen delivery to the entire body. The paper covers the simulation model for the coagulable mixture dynamics in an incompressible liquid considering clot cluster formation. Simulation models for the thrombosis and coagulation processes in the human cardiovascular system will help efficiently manage these phenomena. The study proposes a simulation model of the coagulation processes in disperse systems, i.e., the thrombosis process. The paper presents the numerical solution results and the visualization of the analytical solution.

The key thrombosis properties such as impurity concentration distribution in the liquid, and the pressure field distribution, were estimated. The simulation model can become a foundation for developing a multi-tier clot formation system in the cardiovascular system: from the microscopic level to the macroscopic structures. Besides, the model can estimate the efficiency of anticoagulants administered to COVID-19 positive patients at emergency care departments.

Keywords: simulation, thrombosis, hydrodynamics, disperse systems, crystal systems.

Acknowledgements: this study is supported by RFBR grants 20-04-60123, 20-07-00236.

Cite this article: Galkin V. A., Gavrilenko T. V., Galkin A. V. Simulation of Coagulable Mixtures Dynamics in Incompressible Liquid Considering Clot Cluster Formation. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(2):14–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-2.

Введение

Одной из ключевых проблем, на решение которой направлены ресурсы общества по преодолению заболевания, вызванного новым коронавирусом COVID-19, является проблема нарушения кровотока, связанная, в частности, с процессом тромбообразования. Это явление существенно ограничивает кровоток, снижая доставку кислорода в целом по всему организму. Математическое исследование процессов коагуляции и фрагментации тромбов в сердечно-сосудистой системе человека обеспечит разработку эффективного управления этими явлениями. Важной является разработка модели течения многофазных дисперсных сред в сердечно-сосудистой системе человека, а также в капиллярах и пористых средах (в более общей постановке задачи) с учетом переменной во времени области течения. Данный класс задач характеризуется сложной геометрией многообразия течения, переменной во времени структурой рассматриваемой области, сочетанием задач гидродинамики и кинетики коагуляции образующихся кластеров-тромбов. Описание динамики такого рода процессов основывается на сочетании задач для уравнения Смолуховского–Больцмана кинетической теории коагуляции в пространственно неоднородной разветвленной пространственной структуре типа пористой среды и гидродинамики, описываемой уравнениями Навье–Стокса. При этом следует учитывать, что изменяющаяся во времени и пространстве плотность распределения компонентов смеси за счет их взаимных реакций изменяет поле течения среды, т.е. изменяются диффузионные коэффициенты, определяющие флуктуации гидродинамического поля скоростей переноса. В простейшем приближении описания тромбообразования модель должна включать в себя уравнения Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости с коэффициентами вязкости, зависящими от плотности распределения переносимых в ней коагулирующих компонентов, рассматриваемых как примесь. При этом предполагается, что примесь оказывает влияние на гидродинамическое поле как совокупность микроскопических рассеивающих центров, аналогичных броуновским частицам в известных классических моделях Смолуховского–Фоккера–Планка–Ланжевена–Колмогорова [1].

Однако сразу следует подчеркнуть, что упомянутые модели описания броуновского движения должны рассматриваться для множества различных стохастических воздействий с усреднением результатов (канонический ансамбль в молекулярной динамике), что является весьма ресурсоемкой задачей. Поэтому в данной работе мы ограничимся эвристической моделью, нацеленной на выделение существенных связей, которые, естественно, потребуют дальнейшей детализации и микрофизического обоснования.

Эмпирическое исследование в физических и биологических средах является ограниченным ввиду высоких требований к ресурсам времени, к безопасности пациентов, а также малых пространственных масштабов. Не менее важной составляющей для медицинского персонала является необходимость качественной визуализации развития образования тромбов. Существует разрыв между специализированным программным обеспечением, направленным на решение научных исследований, и программным обеспечением для конечного потребителя. Зачастую это не позволяет массово внедрять разработки в практическую медицину. Создание программного обеспечения для моделирования и визуализации сложных структур, в том числе течения крови в сосудах и коагуляции (включая формирование тромбов) у человека на высокопроизводительных вычислительных системах, позволит сформировать базу для моделирования процессов, протекающих в физических и биологических средах, имеющую практическое применение в промышленности и в медицине.

Модели дисперсных систем и коагуляция

Многокомпонентные среды-смеси широко распространены в природе и используются во многих областях человеческой деятельности. Для газодинамических смесей в работе [2] рассмотрены модели многокомпонентных сред. Сформулированы условия, при которых из модели многоскоростных взаимодействующих континуумов следует модель турбулентного перемешивания. Предложены уравнения, описывающие для каждой компоненты генерацию, диссипацию и диффузию турбулентности. Для смесей изотермических и политропных газов приведены аналитические решения о структуре волн разрежения и ударных волн.

В задачах описания тромбообразования важен учет процессов коагуляции (слияния или, другими словами, неупругого столкновения) компонентов смеси в гидродинамическом потоке, что может служить источником образования пространственно-временных структур в поле течения среды аналогично реакциям Белоусова–Жаботинского [3–7]. Первая модель реакции Белоусова–Жаботинского была получена в 1967 году Жаботинским и Корзухиным на основе подбора эмпирических соотношений, правильно описывающих колебания в системе, см. [8], в дальнейшем рассмотренных в моделях типа «брюсселятор» в работах Пригожина И. Р. [9].

От неупругого столкновения элементов сложных систем очень многое зависит в нашей повседневной жизни, примером тому служит явление свертываемости (коагуляции) крови при порезах (отсутствие коагуляции крови грозит смертельной опасностью так же, как и ее чрезмерная интенсивность, ведущая к образованию тромбов с последующей закупоркой кровеносных сосудов!), створаживание молока и образование киселя — это тоже коагуляция; процессы полимеризации, т. е. очень интенсивной коагуляции частичек, лежат в основе производства полимерных нитей, использующихся при изготовлении современных материалов. Аналогичные явления можно наблюдать при установлении коммуникаций в телефонной сети, при передаче сообщений по всемирной паутине Интернета.

Во многих физических процессах смеси могут возникать в системах, в которых их вначале не было, в частности, из-за неустойчивости и разрушения контактных границ в условиях динамических нагрузок. В других случаях динамические нагрузки могут приводить к противоположному эффекту: к сепарации компонентов предварительно созданной смеси.

Одним из основных механизмов эволюции дисперсных систем является механизм коагуляции (слияния) частиц системы. Следует подчеркнуть, что обычно исследовательские работы посвящены исследованию поведения уже готовых смесей и не затрагивают вопросов их образования.

Коагуляция (слияние) частиц является одной из основных причин эволюции пространственно неоднородных дисперсных систем, под которыми понимают механическую смесь среды (газообразной или жидкой) с частицами диспергированной фазы (твердой или жидкой), причем свойства фаз существенно зависят от переноса вещества между различными точками координатного пространства. При этом важно подчеркнуть наличие дисперсии скоростей переноса для частиц, находящихся в различных состояниях, иначе заменой системы пространственно-временных координат описание сводится к модели, подобной пространственно однородному случаю. Следует подчеркнуть, что наличие пространственной неоднородности значительно усложняет исследование математических моделей коагуляции. В частности, это обусловлено новым эффектом (по сравнению с пространственно однородными задачами), а именно возникновением не дифференцируемых особенностей решения по пространственно-временным переменным. Эти особенности, в свою очередь, порождают пространственно-временные зоны, в которых соотношение сохранения для оператора столкновений Смолуховского переходит в соотношение диссипации (эти области можно интерпретировать как зоны интенсивного образования осадков, не взаимодействующих с дисперсной фазой).

Математические вопросы корректности задач кинетической теории коагуляции весьма сложные, и большинство результатов относится, как правило, к теории пространственно однородных систем либо близких к ним. Пространственно неоднородные задачи, в особенности, связанные со свободным переносом частиц, осуществляемым посредством однопараметрической группы сдвигов по пространственной переменной, являются наиболее трудными с математической точки зрения.

Математическая модель

Пусть в пространстве $\mathbb{R}_3 = \{x = (x_1, x_2, x_3)\}$ в вязкой среде, заполненной частицами различной массы $\mu \in \mathbb{R}^+$ с распределением концентрации $f(\mu, x, t)$, движущимися под действием гидроди-

намического поля внешней среды, происходит процесс коагуляции при парных соударениях частиц с интенсивностью $\Phi(\mu, \mu_1, x, t) \geq 0$, либо дробление частиц с интенсивностью $\Psi(\mu, \mu_1, x, t) \geq 0$, где μ и μ_1 — массы взаимодействующих частиц. (Ниже возможную зависимость интенсивности соударений и дробления от пространственно-временных координат x, t будем опускать для простоты записи формул. При этом существенной является зависимость от масс.) Для скорости переноса частиц, например, для однородных сфер с массой μ , падающих в вязкой среде под действием гравитации по закону Стокса, справедлива степенная зависимость:

$$V(\mu) \sim \mu^{2/3}.$$

Если при этом частицы движутся в локально-одномерном гидродинамическом потоке внешней среды со скоростью $V(\mu, x, t) = (v_1, v_2, v_3) \in \mathbb{R}_3$ и испытывают при этом броуновское блуждание с коэффициентом диффузии $D(\mu, x, t)$, то принятой математической моделью указанного процесса является кинетическое уравнение Смолуховского для непрерывных масс [10–12]:

$$\frac{\partial f(\mu, x, t)}{\partial t} + \operatorname{div}_x [V(\mu, x, t)f(\mu, x, t)] - \operatorname{div}_x [D(\mu, x, t)\nabla_x f(\mu, x, t)] = S(f) + q(\mu, x, t), \quad (1)$$

$$x, \mu \geq 0, \quad t > 0,$$

где $S(f)$ — оператор столкновений частиц, который действует на неизвестную функцию (концентрацию) f по переменной μ , обычно не затрагивая ее пространственно-временные аргументы x, t , величина $q(\mu, x, t) \geq 0$ — заданная интенсивность источников частиц:

$$S(f) = S_c(f) + S_b(f).$$

Для модели Смолуховского коагулирующих систем, состоящих из частиц с непрерывным спектром масс, оператор неупругих локальных по x, t столкновений $S_c(f)$ имеет следующий вид [1]:

$$S_c(f) = \frac{1}{2} \int_0^\mu \Phi(\mu - \mu_1, \mu_1) f(\mu - \mu_1, x, t) f(\mu_1, x, t) d\mu_1 - f(\mu, x, t) \int_0^\infty \Phi(\mu, \mu_1) f(\mu_1, x, t) d\mu_1. \quad (2)$$

Оператор спонтанного дробления частиц $S_b(f)$ со спектром $\Psi(\mu, \mu_1)$ распределения продуктов распада по значениям масс $\mu \geq 0$, образующихся из делящейся частицы с массой $\mu_1 \geq \mu$ (при условии марковости этого процесса), задается выражением [13]:

$$S_b(f)(\mu, x, t) = \int_0^\infty \Psi(\mu, \mu_1) f(\mu + \mu_1, x, t) d\mu_1 - \frac{1}{2} f(\mu, x, t) \int_0^\mu \Psi(\mu - \mu_1, \mu_1) d\mu_1. \quad (3)$$

Аналогично выглядят операторы $S_c(f)$ и $S_b(f)$ для спектров $f^{(\omega)}$ частиц с дискретными массами $\omega \in \mathbb{N}$ [14]:

$$S_c^{(\omega)}(f^{(\cdot)}) = \frac{1}{2} \sum_{\omega'=1}^{\omega-1} \Phi(\omega - \omega', \omega') f^{(\omega-\omega')} f^{(\omega')} - f^{(\omega)} \sum_{\omega'=1}^{\infty} \Phi(\omega, \omega') f^{(\omega')}, \quad \omega \in \mathbb{N}; \quad (4)$$

$$S_b^{(\omega)}(f) = \sum_{\omega'=1}^{\infty} \Psi(\omega, \omega') f^{(\omega+\omega')} - \frac{1}{2} f^{(\omega)} \sum_{\omega'=1}^{\omega-1} \Psi(\omega - \omega', \omega'). \quad \omega \in \mathbb{N}. \quad (5)$$

Выражения в указанных операторах, записанные со знаком минус, задают «гибель» частиц в спектре, а остальные неотрицательные слагаемые — их «рождение». Эвристический метод их записи основан на локальном законе сохранения массы. (Для оператора столкновений Смолуховского — это соотношения баланса рождения и гибели частиц в процессе их парного мгновенного взаимодействия.) Математическое обоснование модели коагуляции является весьма трудоемким, см. [14].

По своему физическому содержанию вышеуказанные модели взаимодействия частиц в потоке внешней среды соответствуют подходу Больцмана Л. в кинетической теории газов [15].

При рассмотрении математической модели будем налагать следующие предположения физического характера:

- частиц достаточно большое число, чтобы можно было применить функцию распределения числа частиц по массам;
- частицы системы образуют локально-хаотическое множество.

К вышеуказанному классу моделей больцмановского типа для локально взаимодействующих частиц (при парных соударениях) примыкают модели с нелокальными взаимодействиями, к которым, прежде всего, относятся уравнения теории плазмы (Власова А.А.) [16]. В частности, в работе [17] для моделирования роста кристаллических структур в объеме переохлажденного расплава предложено кинетическое уравнение власовского типа.

Состояние такой системы в каждый момент времени t описывается плотностью вероятности распределения частиц $f(m, t)$ по массам m . В начальный момент времени состояние системы задается плотностью вероятности распределения f_0 . Новые частицы могут поступать в нашу систему за счет источника, который действует с интенсивностью $q(m, t)$. На практике источником может быть, например, неоднородность среды. То есть, если мы помещаем в нашу систему ионы какого-либо вещества, на них немедленно конденсируется расплав и образуются новые частицы. Функция Φ — это интенсивность столкновений частиц.

Уравнение коагуляции власовского типа [18–19] в пространстве масс $m \geq 0$ имеет вид:

$$\frac{\partial f(m, t)}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m} f(m, t)}{\partial m} = -\frac{1}{2} f(m, t) \int_0^{\infty} \Phi(m, y) f(y, t) dy + q(m, t), \quad t > 0, \quad (6)$$

где

$$\dot{m} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \Phi(m, y) f(y, t) y dy.$$

Гипотезы, на основе которых записано уравнение (6), предполагают, что в процессе взаимодействия имеет место парное взаимодействие частиц, т.е. поле частиц достаточно разреженное, что соответствует начальной стадии кристаллизации (тромбообразования).

Это уравнение для динамики спектра в пространстве значений непрерывных масс взаимодействующих между собой частиц напрямую связано с задачами создания и эксплуатации ядерных реакторных установок с тяжелым жидкотеплоносителем (ТЖМТ) свинец-висмут или свинец, одной из ключевых проблем эксплуатации которых является проблема замораживания-размораживания ТЖМТ в первом контуре. При замораживании, нагреве и охлаждении ТЖМТ в твердом состоянии могут возникать значительные механические воздействия на конструкции, обусловленные несогласованностью перемещений объемов теплоносителя с перемещениями конструкций и соизмеримостью механических свойств теплоносителя в твердом состоянии со свойствами конструкционных материалов.

Моделирование множественных слияний представляет собой существенно более сложную модель коагуляции и основывается на кинетическом подходе. Но даже такие упрощенные модели демонстрируют крайнюю сложность проблемы, связанную с диссипативными явлениями, исследованными в простейших моделях типа «брюсселятор» Пригожиным И.Р. [9].

Спецификой моделей, рассматриваемых в настоящей работе, является их существенно большая (неограниченная) размерность по спектру масс взаимодействующих частиц, что может служить источником нового класса явлений — спонтанного структурообразования в коагулирующей системе, аналогичного процессу образования ударных фронтов в газовой динамике [20–22].

По существу, вышеперечисленные математические модели — это аналог процессов тромбообразования в кровеносной системе за счет коагуляции сгустков, образующихся в крови. В частности, такие же процессы исследовались для явления роста кристаллов математической модели кристаллизации в объеме переохлажденного расплава, основанной на кинетическом подходе [23]. Очевидно, что уравнение (1) относится к семейству типа «reaction-diffusion» [24–25] с континуумом компонент. Как известно, для трехкомпонентных семейств возможно образование периодических пространственно-временных структур [9].

В многокомпонентных системах коагулирующих смесей со стационарным источником были предсказаны аналогичные явления, см. [26].

Уравнение (1) дополняется при $t = 0$ пространственной области $G \subseteq \mathbb{R}_3$ начальными данными:

$$f(\mu, x, 0) = f^{(0)}(\mu, x), \quad \mu, x \in \Pi_0 = \mathbb{R}_1^+ \times G. \quad (7)$$

Дополнительные условия на границе ∂G области G обсудим ниже.

В рамках рассматриваемой упрощенной модели в качестве первого приближения положим, что перенос частиц подчиняется системе уравнений Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости с полем скоростей течения $V(x, t) = \{V^{(i)}\} \in \mathbb{R}_N$, $x \in \mathbb{R}_N$, $t > 0$ и давлением $p(x, t)$:

$$\frac{\partial}{\partial t} V^{(i)} + \sum_{j=1}^N V^{(j)} \frac{\partial}{\partial x_j} V^{(i)} + \rho^{-1} \frac{\partial}{\partial x_i} \rho^{-1} p = \rho^{-1} R^{(i)} + \operatorname{div}_x [v(n, T) \nabla_x V^{(i)}],$$

$$x \in G, \quad t > 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

$$\operatorname{div}_x V = 0, \quad (9)$$

$$n(\mu, x, t) = \int_0^\infty f(\mu, x, t) d\mu, \quad v(n) \geq 0. \quad (10)$$

Предполагается, что в области G жидкость имеет постоянную плотность $\rho > 0$, $\nu = \eta \rho^{-1}$ — кинематическая вязкость жидкости, η — динамическая вязкость. В общем случае, учитывая закон сохранения энергии, уравнения движения (1) следует рассматривать в совокупности с динамикой температуры жидкости $T(x, t)$, от которой зависит кинематическая вязкость [27–28].

Здесь $R^{(i)} = R^{(i)}(x, t)$ — компоненты плотности поля внешних сил, приложенных к смеси (отметим, что для потенциальных сил их влияние приводит только к аддитивной добавке потенциала сил к величине давления в задаче без их действия, при этом поле скоростей $V(x, t)$ остается неизменным). Предполагается, что составные части смеси захватываются потоком среды, мгновенно приобретая ее локальную скорость $V(x, t)$, оказывая влияние на динамику жидкости, составляющую смесь, через ее интегральную локальную концентрацию $n(\mu, x, t)$. Такая гипотеза о влиянии концентрации смеси на поле течения предполагает, что компоненты смеси являются рассеивающими центрами, которые через свое локальное броуновское блуждание меняют среднее значение изотропного коэффициента вязкости среды $v(n, T)$. При построении более детальных моделей динамики смеси, очевидно, следует учитывать возможность изменения во времени области течения $G(t)$ [29].

В том числе следует учитывать воздействие эффектов инерции для частиц с положительной массой μ , которые меняют конфигурацию поля течения с явной зависимостью $V(\mu, x, t)$ (то же относится к коэффициентам вязкости). Более того, наличие протяженных размеров у коагулирующих частиц в потоке может приводить к сложному явлению — эффекту зацепления, см. [13], когда «... безынерционная неброуновская частичка, вообще говоря, должна крупную частицу обойти ... Однако обтекающие частички обладают конечными размерами. И поскольку на расстоянии порядка радиуса частички от поверхности крупной частицы нормальная составляющая скорости ... конечна, при конвективном переносе возможно «зацепление» мелкой частицы за крупную» [13]. Имеет место также эффект инерционного осаждения. «Поскольку гидродинамическое поле крупной частицы неоднородно, на движение мелких частичек в этом поле всегда оказывает влияние их инерция. Влияние инерции проявляется в уменьшении в некоторых областях течения кривизны траекторий частичек по сравнению с кривизной линий тока среды. Возможны два различных режима движения частичек под влиянием инерции в неоднородном поле среды: докритический, когда траектории частичек и линий тока среды не совпадают, но их поведение аналогично, и сверхкритический, когда влияние инерции столь велико, что траектории частиц пересекают поверхность крупных частиц. В первом случае инерция частиц либо усиливает, либо уменьшает действие других механизмов коагуляции, например, эффекта зацепления. При сверхкритическом режиме имеет место новый механизм коагуляции, действующий самостоятельно, — инерционное осаждение» [13]. Ввиду крайней сложности учета таких эффектов, мы ограничимся рассмотрением вышеупомянутой упрощенной модели, в которой можно провести анализ влияния совместных факторов: процессов коагуляции, фрагментации точечных частиц и их

взаимодействия во внешнем слабо возмущенном гидродинамическом поле несжимаемой жидкости с коэффициентом вязкости, зависящим от интегральной концентрации смеси.

В частности, в настоящей работе предполагается, что область течения G неизменна во времени, а на ее границе заданы условия прилипания, или условия непротекания для поля скоростей $V(x, t)$, задаются также значения концентраций и температуры, или их входящие потоки вдоль нормали к границе области.

Остановимся на явлении внутреннего трения в вязкой несжимаемой жидкости [27, 28, 30, 31], которое для крупномасштабных течений может оказывать влияние на тепловые и электрические явления при больших значениях вязкости ν , меняя характеристики течения, а в некоторых случаях — приводить к фазовым переходам, электрическим пробоям и т.п. Это может повлечь переоценку эксплуатационных режимов при управлении пластами. Аналогичные проблемы связаны с управлением гемодинамикой, в частности, с теплоэлектрическими процессами при течении в пористых средах, характерных для теплокровных организмов, а также с оптимизационными задачами управляемого плавления в вязкой несжимаемой жидкости.

Из закона сохранения энергии следует, что диссипативные процессы, обусловленные внутренним трением, определяют уравнение для температурного поля вязкой несжимаемой жидкости [28, 30]:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(x, t) + \sum_i V^{(i)} \frac{\partial}{\partial x_i} T(x, t) = \chi \Delta T(x, t) + \frac{\varepsilon}{c_p}, \quad t > 0, x \in G, \quad (11)$$

где $\chi = \kappa \rho^{-1} c_p^{-1}$ — коэффициент температуропроводности среды, c_p — теплоемкость. Последнее слагаемое в правой части уравнения (11) описывает общее прогревание среды, вызванное внутренним трением жидкости. Вид диссипативного внутреннего источника тепла определяется следующим выражением:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \nu \sum_{i,j} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} V^{(j)} + \frac{\partial}{\partial x_j} V^{(i)} \right)^2.$$

Прямые расчеты показывают существенное влияние этого источника тепла для жидкостей с большими коэффициентами вязкости ν , что является прямым аналогом закона Джоуля–Ленца в электрических цепях. Имеются экспериментальные подтверждения [32] о влиянии такого вязкого тепловыделения в масляных подшипниках. Отметим, что эту же природу имеет эффект дросселирования течения вязкой жидкости в пористой среде. В частности, в [33] приведена таблица значений тепловыделения нефтепродуктов, воды и метилового спирта при дроссельном движении при заданном перепаде давления. По-видимому, эти же эффекты тепловыделения имеют место при инициализации объемных взрывов при внесении пористого катализатора в вязкие жидкости [34], описываемых функциональными решениями систем законов сохранения [14].

Визуализация и численные решения

Пример визуализации точного решения уравнений трехмерной гидродинамики в пористой среде, состоящей из нитевидной сетки вертикальных препятствий ∂G , которые расположены с периодом $\lambda > 0$ ортогонально к плоскости $x_3 = 0$, приведен ниже. Предполагается, что в препятствиях выполнены условия прилипания $V|_{\partial G} = 0$. Семейство точных решений этих уравнений, включая поля температуры $T(x, t)$ и примеси $n(x, t)$, определяемые постоянными параметрами $\alpha, \beta, \chi, \lambda, \mu, \nu$, имеет следующий вид:

$$V = \begin{pmatrix} \exp(\mu x_3) \sin \lambda x_2 \\ \exp(-\mu x_3) \sin \lambda x_1 \\ 0 \end{pmatrix} \exp\left((\mu^2 - \lambda^2) \nu t\right);$$

$$p = \exp\left(2\nu(\mu^2 - \lambda^2) t\right) \cos(\lambda x_1) \cos(\lambda x_2);$$

$$n = \exp\left((\mu^2 - \lambda^2) \chi t\right) (\exp(-\mu x_3) \cos(\lambda x_1) - \exp(\mu x_3) \cos(\lambda x_2)) +$$

$$+ \exp(\mu^2 \chi t) [\alpha \exp(-\mu x_3) + \beta \exp(-\mu x_3)].$$

Температурное поле $T(x, t)$ в случае отсутствия внутреннего тепловыделения выглядит аналогично полю примесей $n(x, t)$.

Ниже приведены графики различных сечений поля течения и примесей. (Визуализация полей выполнена Дубовиком А.О., ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.)

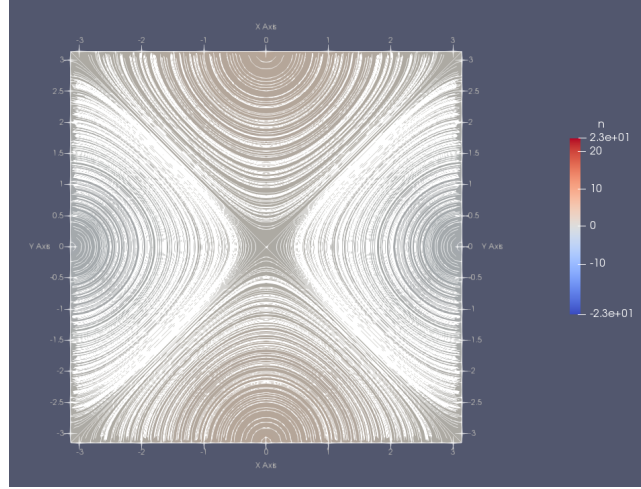


Рис. 1. Пространственное распределение концентраций примеси $n(x, t)$, сечение $x_3 = 0$

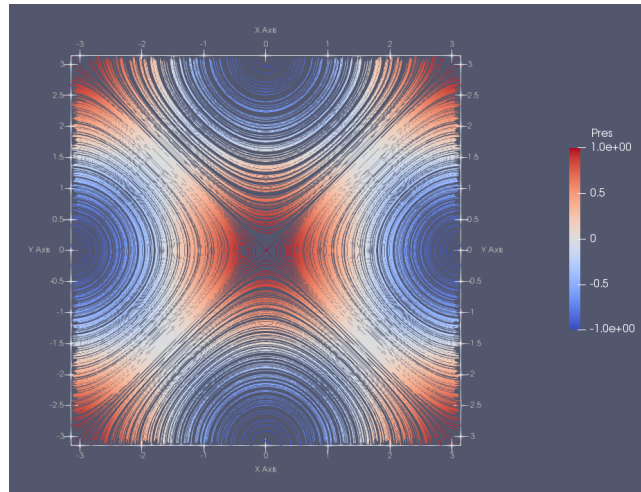


Рис. 2. Пространственное распределение поля давления $p(x, t)$, сечение $x_3 = 0$

Нижеследующий пример стационарной гидродинамики с учетом процесса коагуляции указывает на возможность появления макроскопической структуры в одномерном потоке коагулирующего вещества:

$$V(\mu) \frac{\partial f(\mu, x)}{\partial x} = \frac{1}{2} \int_0^\mu f(\mu - \mu_1, x) f(\mu_1, x) d\mu_1 - f(\mu, x) \int_0^\infty f(\mu_1, x) d\mu_1, \quad x \geq 0, \quad (12)$$

$$f(\mu, 0) = f_0(\mu),$$

где значения скорости пространственного переноса $V(\mu) > 0$ считаются заданной функцией массы $\mu \geq 0$ коагулирующих в потоке частиц. На входе $x = 0$ в одномерный канал течения, расположенный вдоль оси $x \geq 0$, подается заданный стационарный входящий поток частиц $J_0(\mu) = V(\mu)f_0(\mu) \geq 0$. Полагая новой неизвестной величиной значения потока $J(\mu, x) = V(\mu)f(\mu, x)$, получаем для J задачу Коши для уравнения Смолуховского:

$$\frac{\partial J(\mu, x)}{\partial x} = \frac{1}{2} \int_0^\mu \Phi(\mu - \mu_1, \mu_1) J(\mu - \mu_1, x) J(\mu_1, x) d\mu_1 - J(\mu, x) \int_0^\infty \Phi(\mu, \mu_1) J(\mu_1, x) d\mu_1, \quad (13)$$

$$x \geq 0, \quad \mu \geq 0,$$

$$J(\mu, 0) = J_0(\mu), \quad \Phi(\mu, \mu_1) \equiv V^{-1}(\mu)V^{-1}(\mu_1).$$

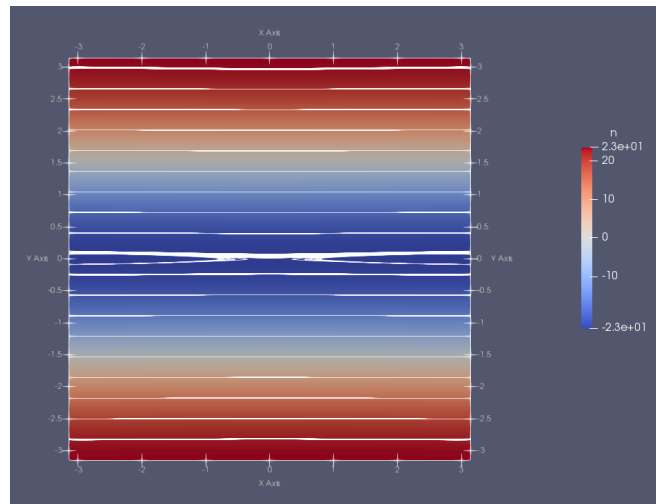


Рис. 3. Пространственное распределение поля концентрации примеси $n(x, t)$, сечение $x_3 > 0$

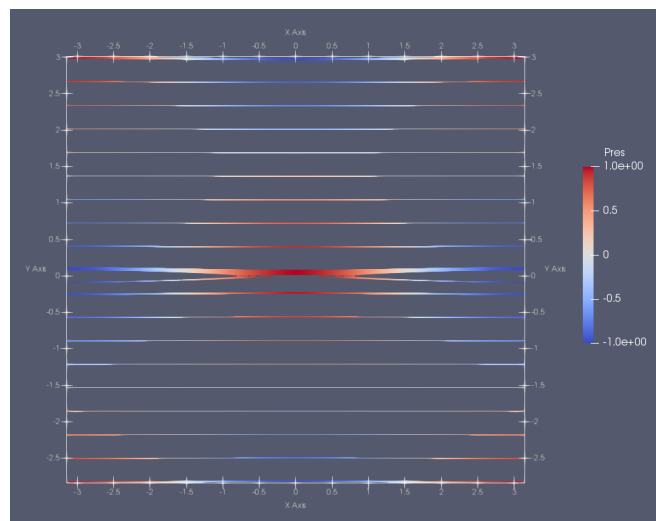


Рис. 4. Пространственное распределение поля давления $p(x, t)$, сечение $x_3 > 0$

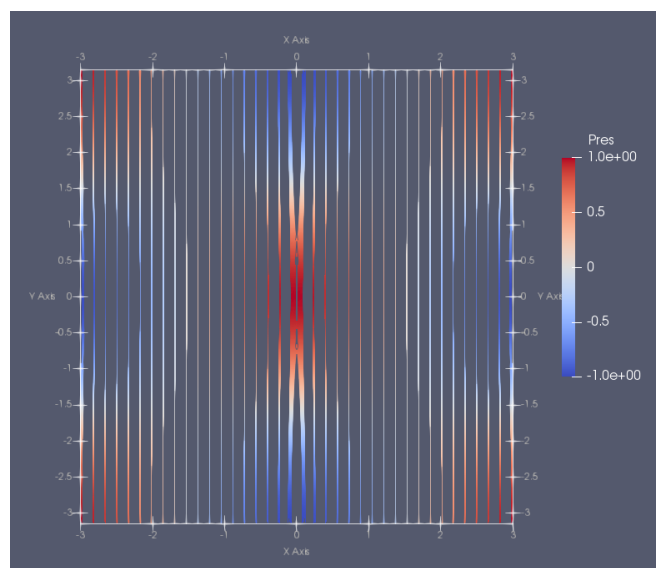


Рис. 5. Пространственное распределение поля давления $p(x, t)$, сечение $x_3 < 0$

Полагая

$$V(\mu) \equiv \mu^{-1} \quad (14)$$

при $\mu > 0$, получаем классический пример решений с диссипативной структурой [23, 24]. В этом случае из потока коагулирующего вещества выделяется макроскопический осадок для значений пространственных координат:

$$x \geq x_c = \frac{1}{\int_0^{\infty} \mu^2 J_0(\mu) d\mu > 0}.$$

Следует подчеркнуть, что величина интегрального потока массы коагулирующих частиц $\int_0^{\infty} \mu_1 J(\mu_1, x) d\mu_1$ является постоянной величиной, равной $\int_0^{\infty} \mu_1 J_0(\mu_1) d\mu_1$ при $0 \leq x \leq x_c$, а при $x \geq x_c$ эта величина монотонно убывает, стремясь к нулю при $x \rightarrow +\infty$, за счет выпадения вдоль канала течения макроскопического осадка, не взаимодействующего с микрочастицами в течении [10].

Для описания характеристик течения выделяющейся макроструктуры и ее воздействия на структуру потока требуются дополнительные гипотезы и исследования [35, 23].

Для наглядного анализа решения уравнений (12), (13) при выполнении условия (14) для скоростей переноса частиц в одномерном потоке (14) рассмотрим пример со следующим распределением частиц на входе канала при $x = 0$:

$$f_0(\mu) = \exp(-\mu), \quad \mu \geq 0.$$

Решая эти уравнения с учетом требования примыкания решения к начальной функции, имеем:

$$J(\mu, x) = \begin{cases} \mu^{-2} x^{-1/2} I_1(2\mu x^{-1/2}) \exp[-\mu(1+x)], & \mu \geq 0, \quad 0 \leq x \leq x_c = 1, \\ \mu^{-2} x^{-1/2} I_1(2\mu x^{-1/2}) \exp[-2\mu x^{-1/2}], & \mu \geq 0, \quad x > x_c, \end{cases}$$

где I_1 — функция Бесселя мнимого аргумента. Положение критической точки x_c , правее которой начинается массовое выделение осадка вдоль течения коагулирующих частиц, определяется равенством $x_c = 1$. Соответствующие формулы для интегрального потока массы коагулирующего вещества вдоль канала $Ox = \{x \geq 0\}$ имеют вид:

$$\bar{J}_{micro}(x) \equiv \int_0^{\infty} \mu_1 J(\mu_1, x) d\mu_1 = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq x_c = 1, \\ x^{-1/2}, & x > x_c. \end{cases} \quad (15)$$

Соответственно, в силу закона сохранения массы поток вещества в виде осадка $\bar{J}_{macro}(x)$ (макроструктуры-полимера), выделяющегося вдоль канала Ox и не взаимодействующего с потоком коагулирующих частиц (микрофазой вещества), определяется следующими формулами:

$$\bar{J}_{macro}(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq x_c = 1, \\ 1 - x^{-1/2}, & x > x_c. \end{cases} \quad (16)$$

Формулы (15), (16) тестировались методом прямого моделирования для указанного процесса и получено удовлетворительное согласие результатов Монте-Карло с аналитическим решением и расчетом по разностной схеме, см. рис. 6.

Заключение

Указанная модель может служить основой для построения иерархической системы образования тромбов в сердечно-сосудистой системе от микроскопического уровня до макроскопических структур. В частности, в работе [36] специалисты медицинского комплекса Маунт-Синай в Нью-Йорке подчеркивают: «Применение средств, снижающих свертываемость крови — антикоагулянтов — может повысить шансы пациентов с COVID-19 на выживание». Исследователи проанализировали записи о 2773 пациентах с COVID-19, поступавших в больницы с 14 марта по 11 апреля 2020 года. Особое внимание они обратили на выживаемость пациентов, которые получали антикоагулянты. Также ученые приняли во внимание определенные факторы риска, включая возраст, этническую принадлежность, хронические

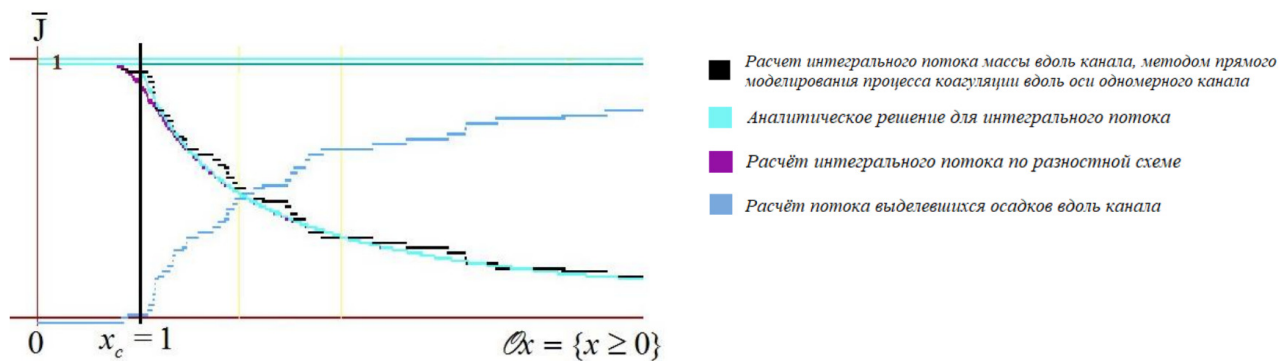


Рис. 6. Интегральные значения количества выпадающих осадков из потока коагулирующих частиц вдоль канала течения Ox

заболевания и т.п. Антикоагулянты получали 28 % пациентов. Им вводилась доза, превышающая профилактическую: высокие концентрации препаратов используются, когда выявлено образование тромбов или есть подозрение, что они появились. Использование антикоагулянтов ассоциировалось с улучшением выживаемости пациентов с COVID-19 как в условиях отделения интенсивной терапии, так и вне его. Среди умерших пациентов те, кто получал антикоагулянты, продержались 21 день. Те, кто не получал, — 14. Прием антикоагулянтов оказался связан с ростом выживаемости среди пациентов с искусственной вентиляцией легких: в группе, не получавшей препараты, погибли 62,7 % пациентов, среди получавших — в два раза меньше, 29,1 %. Всем пациентам при поступлении в больницу делали анализ крови, который показывал также различные маркеры воспаления. Анализ этих записей показал, что у пациентов, получавших антикоагулянты, маркеры воспаления были выше, чем у остальных. Это может свидетельствовать, что пациенты в более тяжелом состоянии, возможно, получали антикоагулянты на ранней стадии. При этом, однако, у получавших антикоагулянты пациентов чаще встречались кровотечения разных видов, от внутримозгового до желудочного, кровоизлияния в глаза и кровь в моче — таковых было 3 %. В группе, не получавшей антикоагулянты, кровотечения и кровоизлияния наблюдались у 1,9 %. Это исследование демонстрирует, что антикоагулянты, принимаемые перорально, подкожно или внутривенно, могут играть важную роль в уходе за пациентами с COVID-19 и они могут предотвратить возможные смертельные исходы, связанные с коронавирусом, включая инфаркт, инсульт и эмболию легких. Возможность использования антикоагулянтов должна рассматриваться при поступлении пациентов в отделения неотложной помощи и при положительном результате теста на COVID-19.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боголюбов Н. Н. *Собрание научных трудов в 12 томах. Том 5. Неравновесная статистическая механика, 1939–1980.* М.: Наука; 2006.
2. Куропатенко В. Ф. Неустановившиеся течения многокомпонентных сред. *Математическое моделирование.* 1989;1:2:118–136.
3. Белоусов Б. П. Периодически действующая реакция и её механизм. *Сборник рефератов по радиационной медицине за 1958 год.* М: Медгиз; 1959. С. 145–147.
4. Белоусов Б. П. Периодически действующая реакция и её механизм. *Автоволновые процессы в системах с диффузией: сб. /* Под ред. М. Т. Грековой. Горький: Институт прикладной физики АН СССР; 1981. 285 с. С. 76.
5. Жаботинский А. М. Периодический процесс окисления малоновой кислоты растворе. *Биофизика.* 1964;9:306–311.
6. Жаботинский А. М. *Концентрационные колебания.* М.: Наука; 1974. 179 с.
7. Zaikin A. N., Zhabotinsky A. M. Concentration Wave Propagation in Two-Dimensional Liquid-Phase Self-Oscillating System. *Nature.* 1970;225:535–537.
8. Корзухин М. Д., Жаботинский А. М. *Математическое моделирование химических и экологических автоколебательных систем.* М.: Наука; 1965.
9. Николис Г., Пригожин И. *Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации.* М.: Мир; 1979. 512 с.
10. Галкин В. А. *Уравнение Смолуховского.* М.: ФИЗМАТЛИТ; 2001. 336 с.

11. Lang R., Xanh N. X. Smoluchowski's Theory of Coagulation in Colloids Holds Rigorously in Boltzmann-Grad Limit. *Z. für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete*. 1980;54:227–280.
12. Dubovskii P. B., Galkin V. A., Stewart I. W. Exact Solution for the Coagulation-Fragmentation Equation. *J. Physics A: Math. Gen.* 1992;25:4737–4744.
13. Волощук В. М., Седунов Ю. С. *Процессы коагуляции в дисперсных системах*. Л.: Гидрометеиздат; 1975.
14. Галкин В. А. *Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского*. М., 2009. 408 с.
15. Больцман Л. *Лекции по теории газов* / Пер. с нем. Под редакцией Б. И. Давыдова. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы; 1953. 554 с.
16. Власов А. А. *Нелокальная статистическая механика*. М.: Наука; 1978. 264 с.
17. Галкин В. А., Забудько М. А. Точные и численные решения уравнений теплопроводности и кинетических уравнений. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2000;1:19–28.
18. Galkin V. A., Zaboudko M. A., Tertychny R. G. The Simulation of Particles Growth Based on Vlasov's Approach. *Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation of Devices and Technologies (ICSDF'95)*. Obninsk, 1995. P. 41–42.
19. Галкин В. А., Забудько М. А., Осецкий Д. Ю., Рыжиков Д. А., Галкина И. В. Математическое моделирование процессов роста агломератов в приближениях Смолуховского и Власова–Лиувилля–Смолуховского. *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия «Математическое моделирование и оптимальное управление»*. 2005;1:67–74.
20. Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н. *Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике*. М.: Мир; 1968.
21. Галкин В. А. Обобщенное решение уравнения Смолуховского для пространственно неоднородных систем. *ДАН СССР*. 1987;293(1):74–77.
22. Галкин В. А. Математическое моделирование газа, образующего конденсированную структуру. *Математическое моделирование*. 2009;21:103–117.
23. Галкин В. А. Кинетический метод решения систем дифференциальных уравнений. *Доклады Академии наук*. 2013;452(1):12–13.
24. Kolmogorov A., Petrovskii I., Piskunov N. Study of a Diffusion Equation That Is Related to the Growth of a Quality of Matter and Its Application to a Biological Problem. *Moscow University Mathematics Bulletin*. 1937;1:1–26.
25. Smoller J. *Shock Waves and Reaction Diffusion Equations*. Springer, 2012. 634 p.
26. Багдасарова И. Р., Галкин В. А. Моделирование периодических структур в распределении дефектов, возникающих в конструкционных материалах ЯЭУ под действием стационарного источника. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 1999;1:85–93.
27. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика*. М.: Наука; 1986. 736 с.
28. Монин А. С., Яглом А. М. *Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Часть 1*. М.: Наука; 1986. 640 с.
29. Бетелин В. Б., Галкин В. А. Задачи управления параметрами несжимаемой жидкости при изменении во времени геометрии течения. *Доклады Академии наук*. 2015;463(2):149.
30. Валландер С. В. *Лекции по гидроаэромеханике*. Л.: Из-во ЛГУ; 1978, 294 с.
31. Галич Н. Е. Тепловая неустойчивость и пробой движущихся вязких жидкостей в электрическом поле и при поглощении света. *Журнал технической физики*. 1989;59(7):10–17.
32. Алтоиз Б. А., Савин Н. В., Шатагина Е. А. Влияние тепловыделения в микропрослойке жидкости при измерении ее вязкости. *Журнал технической физики*. 2014;84(5):21–27.
33. Куштанова Г. Г. *Физика геосферы*. Казань: Изд-во КазГУ; 2004. 44 с.
34. Семенов Н. Н. *Цепные реакции*. М: Гомхимтехиздат; 1934.
35. Галкин В. А. Об одном свойстве коагуляции атмосферного аэрозоля. *Метеорология и гидрология*. 1983;12:11–19.
36. Blood Thinners May Improve Survival Among Hospitalized COVID-19 Patients. *Journal of the American College of Cardiology*. Available at: https://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-05/tmsh-btm050420.php.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-3

ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМ, ОСЛАБЛЕННЫХ ТРЕЩИНАМИ С ИЗЛОМОМ**А. А. Шамина^{1,2}, А. В. Звягин¹, А. В. Акулич², В. В. Тюренкова^{1,2}, Н. Н. Смирнов^{1,2}**¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация, zvyagin.aleksandr2012@yandex.ru*² *Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация: прочность летательных аппаратов любых типов — важнейший вопрос безопасности полетов. Наличие скрытых дефектов в материале существенно влияет на прочность при различных нагрузках. Важными характеристиками прочности материалов с дефектами являются скорость и направление роста трещины, а также величина критической нагрузки (коэффициента интенсивности напряжений), при которой начинается рост трещины. В данной работе исследуется трехмерная упругая среда, ослабленная системой плоских трещин и одной трещиной с изгибом. В качестве численного метода был выбран метод граничных элементов, а именно метод разрывных перемещений. Код реализован на C++. Было проведено сравнение с известными аналитическими результатами. Изучено поведение трещин при изгибе при различных нагрузках.

Ключевые слова: трёхмерное пространство, упругая среда, трещина, коэффициент интенсивности напряжений, метод граничных элементов, метод разрывных смещений.

Благодарности: работа выполнена при поддержке программы научных исследований РАН АААА-А18-118041190145-1 (0065-2019-0021).

Для цитирования: Шамина А. А., Звягин А. В., Акулич А. В., Тюренкова В. В., Смирнов Н. Н. Изучение систем, ослабленных трещинами с изломом. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):26–34. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-3.

INVESTIGATION OF SYSTEMS WEAKENED BY KINKED CRACKS**Anastasiya A. Shamina^{1,2}, Alexandr V. Zvyagin¹, Anna V. Akulich², Veronika V. Tyurenkova^{1,2}, Nikolay N. Smirnov^{1,2}**¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, zvyagin.aleksandr2012@yandex.ru*² *Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation*

Abstract: structural strength of aircraft is a key aspect of flight safety. Hidden defects in the material significantly affect its strength under various loads. The crack growth rate and direction, and the crack growth threshold load (stress intensity factor) affect the strength of the damaged material. This study investigates a 3D elastic structure weakened by a system of flat cracks and a kinked crack. The numerical method used was the boundary element method, specifically, the displacement discontinuity method. The code was developed with C++. The results were compared against the available analytic results. The behavior of cracks under bending and a range of loading conditions was studied.

Keywords: 3D space, elastic medium, crack, stress intensity factor, boundary element method, displacement discontinuity method.

Acknowledgements: this study is supported by the RAS research program АААА-А18-118041190145-1 (0065-2019-0021).

Cite this article: Shamina A. A., Zvyagin A. V., Akulich A. V., Tyurenkova V. V., Smirnov N. N. Investigation of Systems Weakened by Kinked Cracks. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(2):26–34. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-3.

Введение

Конструкции могут испытывать плановые и случайные внешние нагрузки, влияющие на их безопасность [1]. Исследование прочности конструкции летательных аппаратов — сложный процесс,

который можно рассматривать с разных точек зрения. Исследование прочности при различных типах нагрузок представлено в [2, 5], а прочность при высокотемпературных нагрузках обсуждается в [3]. Также были проведены исследования, в которых исследовалось пространственное разрушение мембраны [6]. Проблема разрушения астероидов при их взаимодействии с ударными или взрывающимися ракетами также является актуальной задачей [4]. Данные о наличии микродефектов внутри астероидов помогают нам понять, где находятся неоднородности. Это позволяет спрогнозировать, в какую область следует направить ударный элемент, чтобы взорвать астероид, получив максимальный эффект при минимальных затратах. При разработке таких миссий требуется прогностическое численное моделирование, которое во многом опирается на науку о прочности материалов и конструкций, в частности, на механику линейного разрушения. Основы этой теории были разработаны в [7, 8]. Первичная причина разрушения — наличие дефектов в материале в виде так называемых трещин, которые математически моделируются скачком поля смещения на определенной части поверхности. Для упругой среды это приводит к появлению особенностей на границе трещин. При приближении к границе трещины напряжения стремятся к бесконечности, т.е. концентрация напряжений происходит в достаточно малой окрестности границы. Поскольку существование бесконечных напряжений в реальных материалах невозможно, вблизи краев трещины возникает область необратимых пластических деформаций. Тем не менее в случаях, когда размер этого поля мал по сравнению с размером самой трещины, применимость критериев роста трещины основана на анализе полученного упругого решения [9–14]. Линейная механика разрушения быстро развивалась и в настоящее время является одним из основных инструментов оценки прочности материалов с дефектами. Достаточно полное представление о результатах, полученных в этой области, дают обзоры [14–18].

В качестве основных функций разложения решения мы используем три фундаментальных решения теории упругости о разрыве трех компонент вектора смещения на поверхности граничного элемента. Общее решение всей задачи представляется в виде суммы с неопределенными коэффициентами, т.е. в виде конечного ряда аналитически заданных базисных функций. Коэффициенты ряда определяются методом коллокаций на границе (граничные условия выполняются только в центрах граничных элементов). Такой подход позволяет избежать вычисления сингулярных интегралов, возникающих при использовании прямых методов граничных интегральных уравнений.

Преимущество метода граничных элементов состоит в том, что только поверхность трещин, моделирующая разрыв упругой среды, разбивается на конечные элементы. Это снижает масштабность проблемы на этапе ее решения. Для каждого элемента используются три независимых аналитических решения, в каждом из которых одна из трех компонент вектора смещения терпит разрыв в элементе. Решение конкретной краевой задачи ищется в виде ряда с неопределенными коэффициентами по всему набору элементов. Каждое элементарное решение вносит вклад в поле смещения и в поле напряжений с весом, который является соответствующим неопределенным коэффициентом ряда. Выполнение конкретных граничных условий приводит к системе линейных уравнений после численного определения коэффициентов разложения. Фактически у нас есть аналитическое представление решения в виде конечного ряда внутри области. С точки зрения памяти, нам нужно только сохранить найденные коэффициенты разложения, которые затем позволят нам найти любые требуемые характеристики в любой точке области решения. Это важно с точки зрения простоты практического использования полученного решения. Еще одним важным преимуществом предложенного метода является возможность решения любых краевых задач (задача в напряжениях, задача в перемещениях, любая смешанная задача).

Недостатком метода является его слабая математическая достоверность; поэтому требуется большой объем работы, связанный с проверкой достоверности результатов. Для этого было проведено сравнение с имеющимися аналитическими решениями пространственных задач, а также с известными результатами численного решения задач механики разрушения, полученными другими численными методами. Программные коды реализованы авторами на языке C++. Основной характеристикой линейной механики разрушения является коэффициент интенсивности напряжений на краю трещины (рис. 1), который в случае деформации растяжения в направлении по нормали к плоскости трещины определяется:

$$K_I = \lim_{s \rightarrow 0} \sqrt{2\pi s} \cdot \sigma_{zz}(s),$$

в случае деформации сдвига в плоскости трещины по нормали к ее краю определяется:

$$K_{II} = \lim_{s \rightarrow 0} \sqrt{2\pi s} \cdot \sigma_{nz}(s),$$

а в случае антиплоской деформации (сдвига в плоскости трещины по касательной к краю) определяется:

$$K_{III} = \lim_{s \rightarrow 0} \sqrt{2\pi s} \cdot \sigma_{\tau z}(s).$$

Эта задача решалась численно в трехмерной постановке для разных радиусов. Результаты сравнения позволяют говорить о достаточной эффективности и удовлетворительной точности предложенного метода [22].

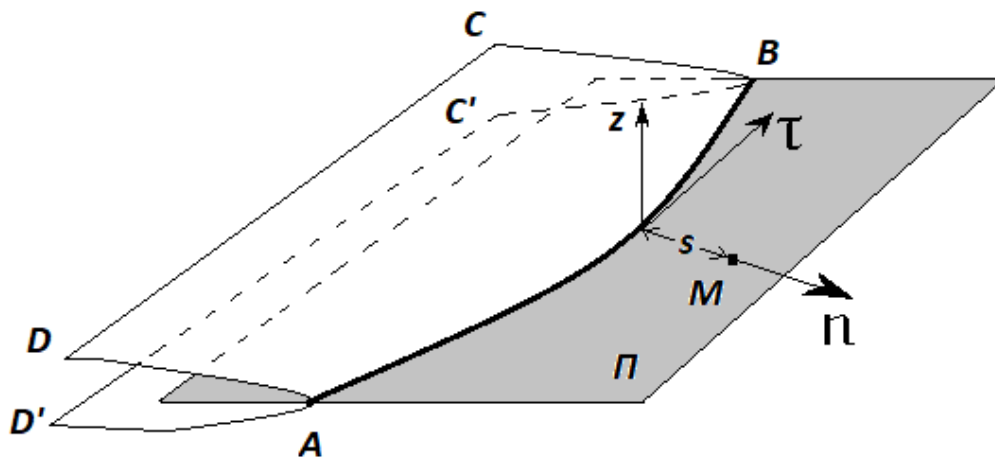


Рис. 1. Определение коэффициентов интенсивности напряжений для случаев различных типов деформаций

Написанная программа была протестирована путем сравнения с известными аналитическими решениями [15–16], [19–21]. Сравнение показало хорошее качественное и количественное согласие с имеющимися результатами других авторов. Например, было проведено сравнение с решением для осесимметричной трещины в виде диска, которая находится под действием внутреннего давления. В цилиндрической системе координат r, φ, z (трещине соответствует диск $z=0, 0 \leq r \leq R$) и в данной задаче имеем граничные условия: $z=0, 0 \leq r \leq R, \sigma_{zz} = -p, \sigma_{rz} = 0$. В аналитическом решении для круглой трещины величина K_I равна:

$$K_I = \frac{2}{\sqrt{\pi R}} \int_0^R \frac{r \sigma_{zz}(r) dr}{\sqrt{R^2 - r^2}}.$$

Круглая трещина с изломом (угол излома 30°) находится под внутренним давлением $p = 0.1$

Представляют определенный практический интерес трещины, поверхность которых имеет излом (угол между плоскостями отдельных сегментов трещины отличен от нуля). Такая геометрическая конфигурация может возникнуть при слиянии двух отдельных плоских трещин. В линейной теории упругости наличие любых скачков в граничных условиях приводит к возникновению особенностей решения. Поскольку сама модель трещины (поверхность разрыва поля перемещений) несёт особенность решения, интересно исследовать влияние возможного излома ее поверхности на изменение распределения напряжений в окрестности края трещины.

Рассматривается упругая среда, ослабленная трещиной с изломом. Трещина является активной, то есть она нагружена внутренним давлением P , как показано на рис. 2. Геометрически поверхность трещины представляет собой два полукруга одного радиуса, плоскости которых расположены под заданным углом друг к другу. Требуется исследовать, в каком направлении наиболее вероятен рост трещины.

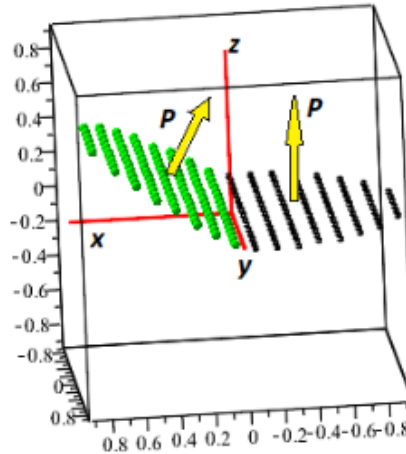


Рис. 2. Трещина с изломом под внутренним давлением, направленным по нормали к берегам трещины

В качестве основной характеристики, отвечающей за возможный рост трещины, принята величина J -интеграла Черепанова–Райса. Данный интеграл представляет собой комбинацию квадратов коэффициентов интенсивности напряжений (Черепанов, Райс) [11–13]:

$$J = \frac{1-\nu}{2\mu} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2\mu} K_{III}^2.$$

Поскольку в рассматриваемой геометрической конфигурации две половины трещины равноправны, исследовался край той половины трещины, которая расположена в плоскости xy (рис. 2). В расчетах использованы безразмерные величины: единицей длины считается радиус полукруга каждой половины трещины; напряжения и давление отнесены к величине 2μ , коэффициент Пуассона выбран равным $\nu = 0.25$. В качестве внутреннего давления принята величина $p = P/2\mu = 0.1$. Такое нереально большое давление выбрано для возможности визуализации раскрытия трещины. Назовём углом излома угол между плоскостями двух плоских полукруглых сегментов трещины. В работе для сравнения представлены расчеты для двух углов излома величиной 30° и 60° .

На рис. 3 представлены графики зависимости величины J от угла. Угол отсчитывается вдоль дуги круглого края трещины и изменяется в пределах $[-\pi/2, \pi/2]$. Нулевая величина угла соответствует точке $x = -1, y = 0, z = 0$ (рис. 2), величина угла $\pi/2$ — соответствует точке с координатами $x = 0, y = 1, z = 0$, угол $-\pi/2$ — точке с координатами $x = 0, y = -1, z = 0$. Две последних точки находятся на линии излома, которая является частью оси y (рис. 2). На рис. 3а приведена зависимость J для угла излома 30° , на Рис. 2б — для угла излома 60° .

Как следует из приведенных на рис. 3 а и б зависимостей, максимальные значения J для обоих углов достигаются в точках, лежащих на линии излома, т.е. на оси y . Это означает, что возможный рост трещины будет развиваться в направлениях линии излома. С увеличением угла излома увеличился максимум J -интеграла и уменьшился минимум. Влияние величины угла излома на качественный вид кривой распределения J -интеграла незначительно.

На рис. 4 представлено раскрытие трещины в сечении излома $x = 0$. Под раскрытием понимается величина разности перемещений, соответствующих верхнему и нижнему берегу трещины. На рис. 4а и 4б представлено трёхмерное раскрытие половины трещины (точки разного цвета соответствуют верхнему и нижнему берегу) соответственно для углов излома 30° и 60° . Сплошная кривая показывает положение точек в сечении излома. Как видим, влияние угла излома на раскрытие также незначительно.

На рис. 5 показано раскрытие всей трещины в сечении $y = 0$ (рис. 5а соответствует углу излома 30° , рис. 5б — углу излома 60°). Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что раскрытие трещины в основном определяется давлением и слабо зависит от угла излома.

Из графиков (рис. 4–5) видно, что максимальное раскрытие достигается в сечении излома $x = 0$. Это соответствует результатам расположения максимальных значений J -интеграла и направлениям

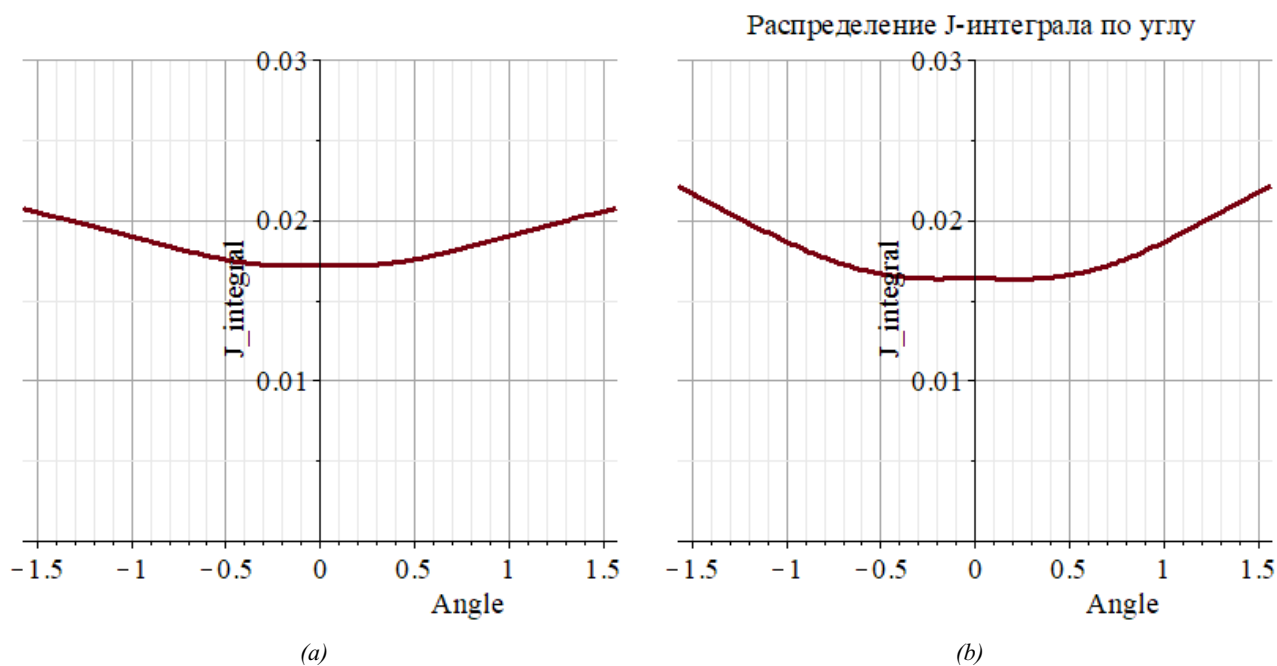


Рис. 3. J -интеграл на интервале $(-\pi/2; \pi/2)$, а — для угла излома 30° , б — для угла излома 60°

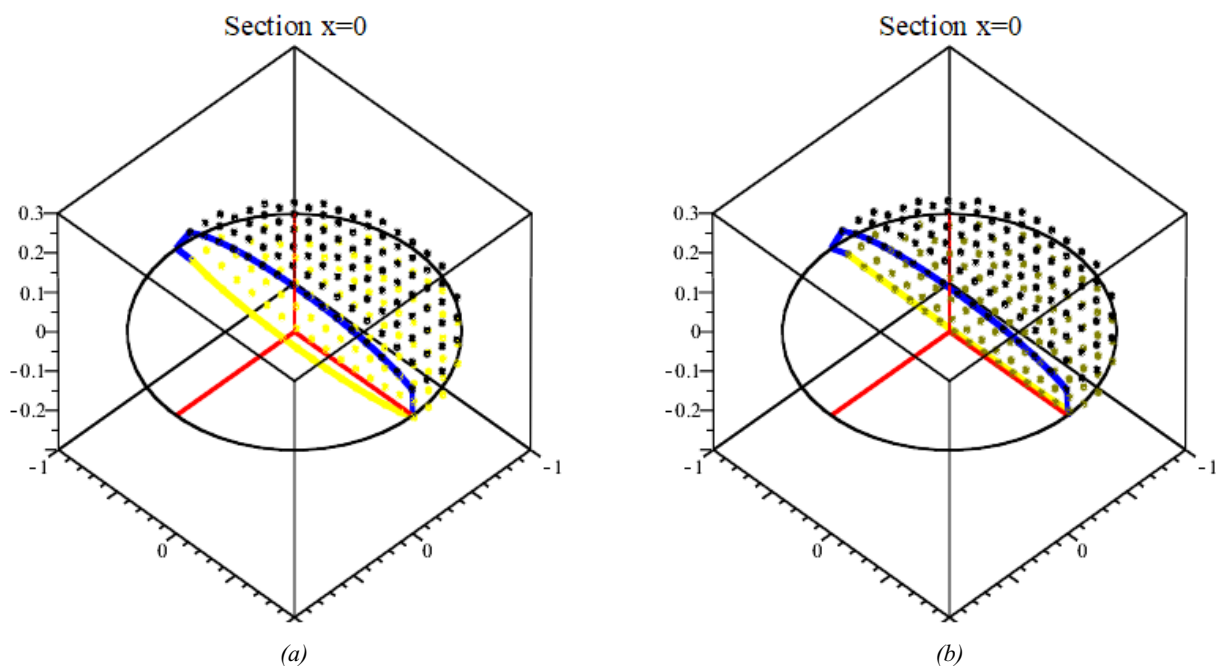


Рис. 4. Раскрытие трещины в пространстве (а — угол излома 30° , б — угол излома 60°). Сплошная кривая соответствует точкам сечения $x = 0$

возможного роста трещины вдоль оси y .

Как известно, в окрестности границы трещины напряжения имеют особенность $\sigma \sim C/\sqrt{s}$, где s — расстояние до края трещины. Для контроля напряжений был произведен их расчёт в цилиндрической системе координат r, φ, z для углов $\varphi \in [\pi/2, 3\pi/2]$, соответствующих границе полуокружности $z = 0$, $x^2 + y^2 = R^2$, $x \leq 0$. В качестве значения радиуса была взята величина $R = 1.01$. Это соответствует значению расстояния s до границы, равному $s = 0.01$.

Графики распределения напряжений по краю трещины, в зависимости от угловой координаты ϕ в полярной системе координат, показаны на рис. 6 (а — соответствует углу излома 30° , б — углу

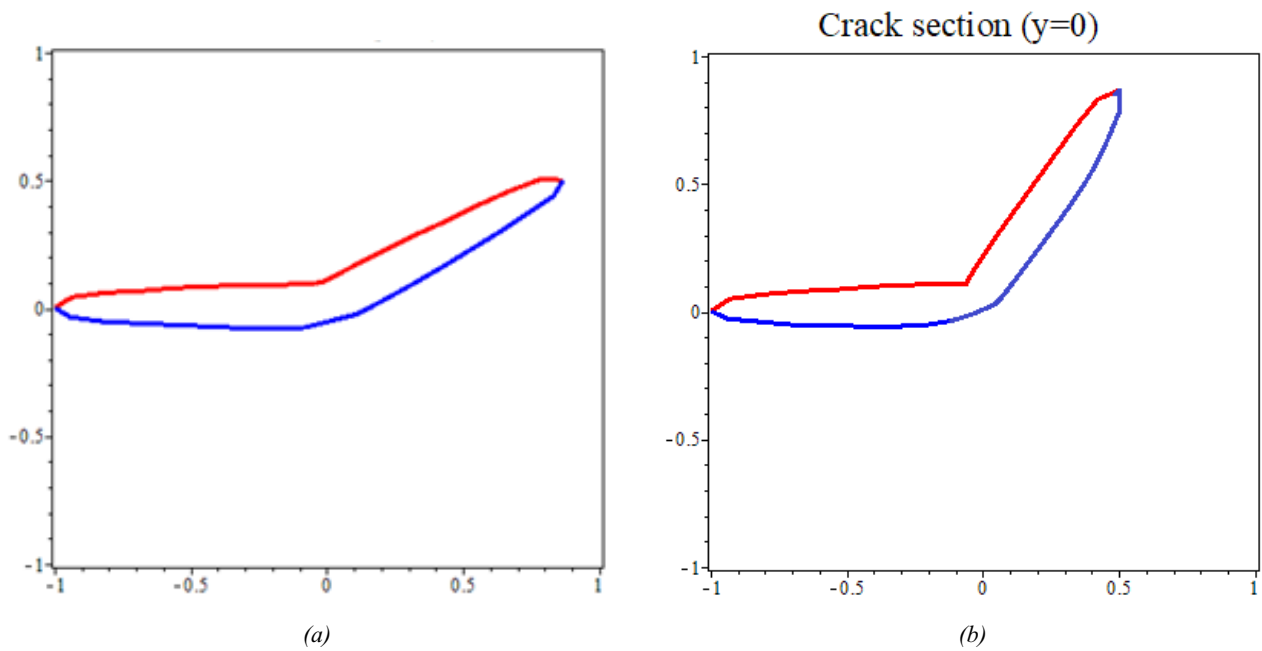


Рис. 5. Раскрытие трещины в сечении $y = 0$ (a — угол излома 30° , b — угол излома 60°)

излома 60°).

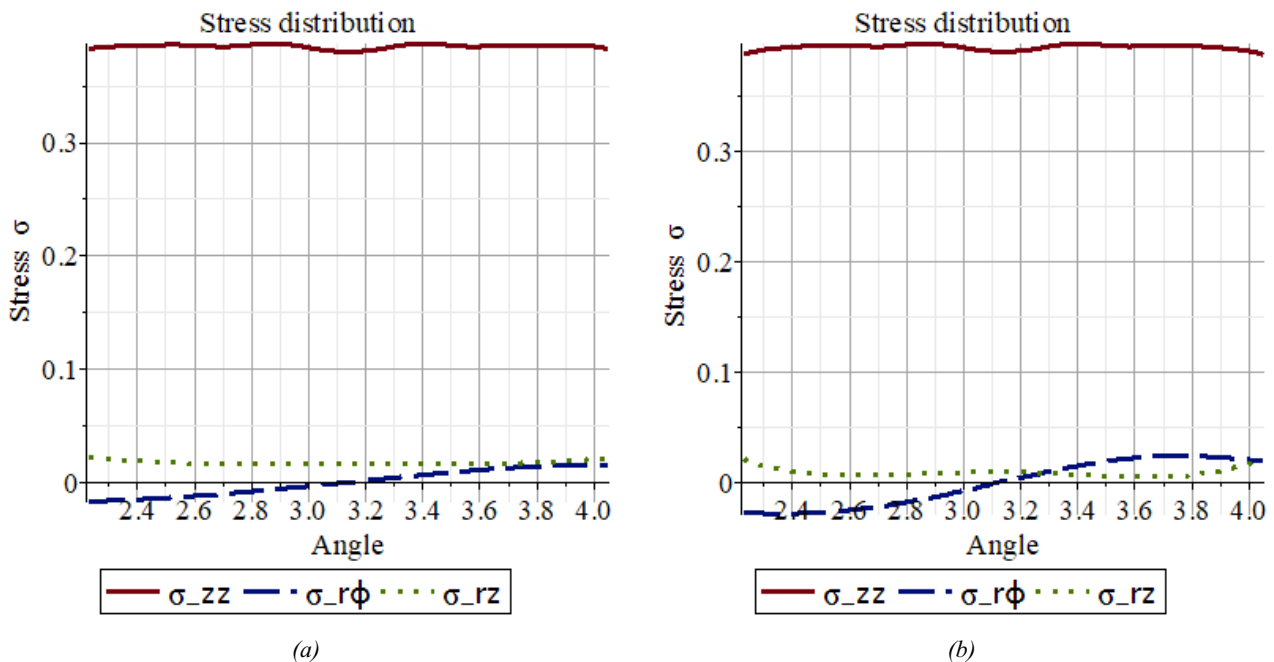


Рис. 6. Графики зависимости напряжений σ_{zz} , $\sigma_{r\varphi}$, σ_{rz} от угловой координаты φ вдоль границы трещины в цилиндрической системе координат (r, φ, z) , $r = 1.01$, $\pi/2 \leq \varphi \leq 3\pi/2$, $z = 0$ (a — угол излома 30° , b — угол излома 60°)

Видно (рис. 6), что напряжения σ_{zz} фактически не зависят от угла излома. Наиболее сильно отличаются напряжения σ_{rz} . То есть данные расчеты показывают, что рост J -интеграла при приближении к излому, в основном, обеспечивается ростом напряжения σ_{rz} . Таким образом, трещина при выполнении критерия разрушения будет расти в направлении линии излома.

Для того чтобы проверить влияние способа нагрузки трещины, были произведены расчеты, в которых берега трещины свободны от нагрузок, при этом упругое пространство подвержено растяже-

нию напряжениями, действующими на бесконечности вдоль оси z . То есть рассматривается упругая среда, ослабленная трещиной с изломом. Угол излома известен и равен 30° . На бесконечности перпендикулярно плоскости одной из частей трещин приложена растягивающая нагрузка $\sigma = 0.1$, как показано на рис. 7.

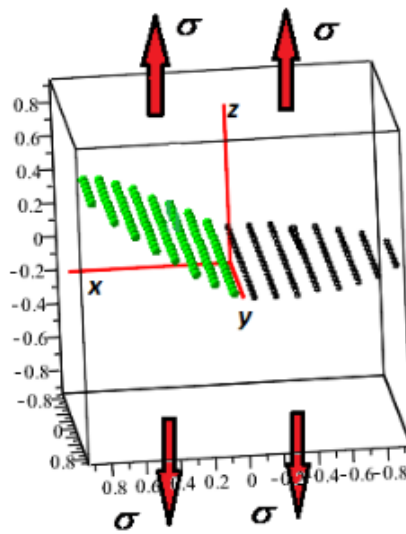


Рис. 7. Трещина с изломом 30° , нагрузка приложена в направлении оси OZ

На рис. 8 приведены графики коэффициентов интенсивности напряжений K_I , K_{II} , K_{III} соответственно. Коэффициенты интенсивности вычислялись по методу перемещений с использованием асимптотических формул:

$$u_z = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\vartheta - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$u_x = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\vartheta + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$u_y = \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2}$$

На графиках представлено распределение соответствующих коэффициентов на интервале $(-\pi/2, \pi/2)$. Нулевой угол соответствует точке границы трещины $x = -1, y = 0, z = 0$, углы $(-\pi/2, \pi/2)$ соответствуют точкам излома границы.

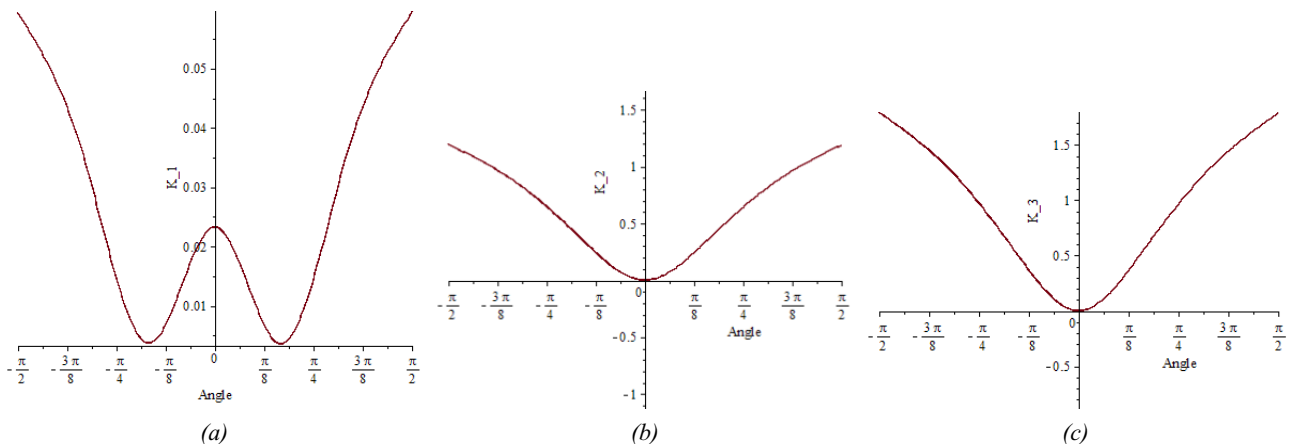


Рис. 8. Распределение коэффициентов интенсивности: $a - K_I$, $b - K_{II}$, $c - K_{III}$

J -интеграл и распределение напряжений вдоль границы сегмента трещины, перпендикулярного оси z в цилиндрической системе координат, представлены на рис. 9 а, б соответственно. Как и в предыдущих случаях, использована величина расстояния до края трещины $s = 0.01$.

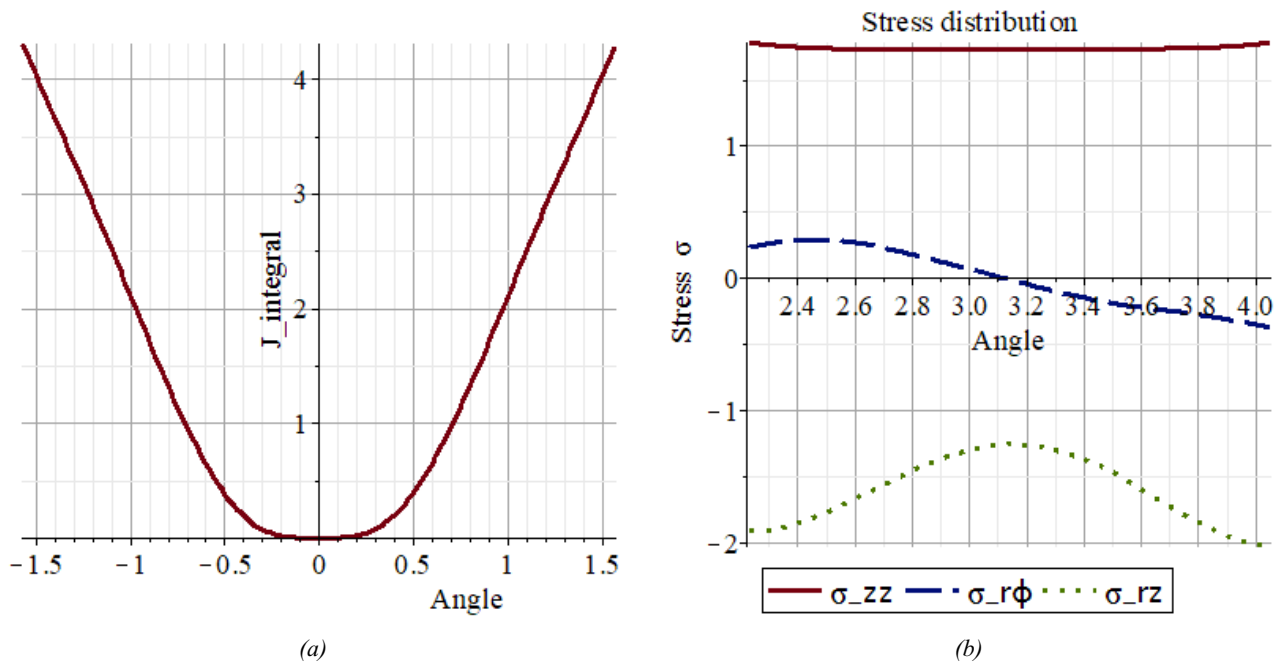


Рис. 9. а — J -интеграл, б — распределение напряжений

Приведенные расчёты показывают очень сильную зависимость задачи от характера нагрузки.

Выводы

1. Трещины с изломом всегда начинают расти вдоль линии излома, независимо от вида нагрузки.
2. Если трещина с изломом находится под давлением, то ее раскрытие и распределение напряжений слабо зависят от угла излома (они чуть больше при большем угле излома).
3. Напряжения очень сильно зависят от характера нагрузки трещины. Если трещина с изломом пассивна, а нагрузка приложена на бесконечности, то напряжения в окрестности трещины очень сильно отличаются.
4. Трещина под нагрузкой, приложенной на бесконечности, менее устойчива. Это следует из сравнения величины комбинации коэффициентов интенсивности напряжений для трещины под давлением и для трещины в пространстве, подвергнутой растяжению на бесконечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smirnov N. N., Kiselev A. B., Smirnova M. N., Nikitin V. F. Space Traffic Hazards from Orbital Debris Mitigation Strategies. *Acta Astronautica*. 2015;109:144–152.
2. Xiaogang L., Xiaotian Zh. The Strength Analysis of Steel Sunk Screw Connections in the Rocket. *Acta Astronautica*. 2017;137:345–352
3. Pisarenko G. S., Tretyachenko G. N. On Some Problems of Strength of Heat-Shield Materials. *Acta Astronautica*. 1983;10(7):521–525.
4. Dearborn D. S. P., Syal M. B., Barbee B. W., Gisler G., Greenaugh K., Howley K. M., Leung R., Lyzhoft J., Miller P. L., Nuth J. A., Plesko C. S., Seery B. D., Wasem J. V., Weaver R. P., Zebeay M. Options and Uncertainties in Planetary Defense: Impulse-Dependent Response and the Physical Properties of Asteroids. *Acta Astronautica*. 2020;166:290–305.
5. Kubota Y., Miyamoto O., Aoki T., Ishida Y., Ogasawara T., Umezu Sh. New Thermal Protection System Using High-Temperature Carbon Fibre-Reinforced Plastic Sandwich Panel. *Acta Astronautica*. 2019;160:519–526.

6. Qingxi H., Wanyuan L., Haiguang Zh., Dali L., Fujun P., Yongchao D. Research into Topology Optimization and the FDM Method for a Space Cracked Membrane. *Acta Astronautica*. 2017;136:443–449.
7. Griffith A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. 1921;221:163–198.
8. Griffith A. A. The Theory of Rupture. *Proceedings of the First International Congress for Applied Mechanics*. Delft, 1924. P. 55–63.
9. Orowan E. Energy Criteria of Fracture. *The Welding Journal*. 1955;34(3):1576–1606.
10. Irwing G. R. Fracture Dynamics. *Fracturing in Metals*. Cleveland: ASM; 1948. P. 147–166.
11. Rice J. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. *J. Appl. Mech.* 1968;35:379–386.
12. Райс Дж. Математические методы в механике разрушения. *Разрушение. Т. 2. Математические основы теории разрушения*. М.: Мир; 1975. С. 204–335.
13. Cherepanov G. P. Crack Propagation in Continuous Media. *J. Appl. Math. Mech.* 1967;31:503–512.
14. Кит Г. С., Хай М. В. *Метод потенциалов в трёхмерных задачах термоупругости тел с трещинами*. Киев: Наукова думка; 1989. 288 с.
15. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений*: В двух томах. Т. 1 / Пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. М.: Мир; 1990. 448 с.
16. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений*: В двух томах. Т. 2 / Пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. М.: Мир; 1990. 1016 с.
17. Slepian L. I. *Models and Phenomena in Fracture Mechanics*. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio: Springer. 2002. 577 p.
18. Шифрин Е. И. *Пространственные задачи линейной механики разрушения*. М.: Издательство физико-математической литературы; 2002. 368 с.
19. Уфлянд Я. С. *Интегральные преобразования в задачах теории упругости*. Л.: Наука, 1967. 402 с.
20. Гольдштейн Р. В. Плоская трещина произвольного разрыва в упругой среде. *Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела*. 1979;3:111–126.
21. Kassir M. K., Sih G. C. External Crack in Elastic Solid. *The International Journal of Fracture Mechanics*. 1968;4(4):347–356.
22. Звягин А. В., Панфилов Д. И., Шамина А. А. Взаимное влияние дискообразных трещин в трехмерном упругом пространстве. *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*. 2019;4:34–41.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ЗАДАНИЙ В ТЕКСТОВОМ И ГРАФИЧЕСКОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ И ПОМОЩИ ПРЕПОДАВАТЕЛЮ

Н. О. Бесшапошников^{1,a}, М. С. Дьяченко^{1,b}, А. Г. Леонов^{1,2,3,4,6}, М. А. Матюшин^{1,2},
А. Е. Орловский^{1,d}

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

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

³ Московский педагогический госуниверситет,
г. Москва, Российская Федерация

⁴ Государственный университет управления, г. Москва, Российская Федерация

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7616-3143>, nbesshaposhnikov@vip.niisi.ru

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5809-4981>, mdyachenko@niisi.ru

⁶ ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9622-1526>, dr.l@vip.niisi.ru

² ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1775-6894>, itsaprank@yandex.ru

^d ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3823-0832>, orlovskiy@niisi.ru

Аннотация: процесс цифровизации образования, активно проводимый в нашей стране и по всему миру, позволил более широко применить в учебном процессе современные приемы преподавания, перенося часть педагогической нагрузки с очного формата на дистанционный. Проектируемые и используемые цифровые образовательные платформы уже сейчас включают в себя не только оцифрованный лекционный видеоматериал и электронные формы учебников, но и элементы автоматизации проверки выполненных учащимися заданий. Расширение области применения автоматической проверки решенных учащимися задач и выполненных упражнений является объективной необходимостью, в противном случае при дистанционных формах образовательного процесса резко возрастает нагрузка на педагога, который должен выделять значительное время на проверку увеличившегося самостоятельной работы школьников и студентов. Кроме того, при дистанционном преподавании снижается эффект личного присутствия педагога, когда учитель и ученики разделены экранами компьютеров. Существенной помощью может стать использование интеллектуальных помощников преподавателя и автоматизированных систем проверки, построенных методами машинного обучения и технологии нейронных сетей. В настоящей статье рассмотрены подходы к решению поставленных задач по автоматической проверке графических заданий и выявлению заимствований в текстовом виде. Показаны возможные варианты реализации этих функций с использованием технологий искусственного интеллекта.

Ключевые слова: цифровая образовательная платформа, поиск заимствований, дистанционное образование, автоматическая проверка, интеллектуальный помощник преподавателя.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ научного проекта № 19-29-14057.

Для цитирования: Бесшапошников Н. О., Дьяченко М. С., Леонов А. Г., Матюшин М. А., Орловский А. Е. Использование машинного обучения и нейронных сетей для автоматической верификации заданий в текстовом и графическом представлении и помощи преподавателю. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):35–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-4.

THE APPLICATION OF MACHINE LEARNING AND NEURAL NETWORKS TO AUTOMATED TEXT AND VISUAL ASSIGNMENT VERIFICATION USED AS ASSISTANCE TO EDUCATORS

Nikita O. Besshaposhnikov^{1,a}, Mikhail S. Diachenko^{1,b}, Alexander G. Leonov^{1,2,3,4,c},
Maxim A. Matyushin^{1,d}, Anton E. Orlovskii^{1,e}

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

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*³ *Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russian Federation*⁴ *State University of Management, Moscow, Russian Federation*^a *ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7616-3143>, nbesshaposhnikov@vip.niisi.ru*^b *ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5809-4981>, mdyachenko@niisi.ru*^c *ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9622-1526>, dr.l@vip.niisi.ru*^d *ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1775-6894>, itsaprank@yandex.ru*^e *ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3823-0832>, orlovskiy@niisi.ru*

Abstract: the digitalization of education in Russia and worldwide enables a more extensive introduction of advanced teaching methods through a partial switch from offline to online teaching. The existing and coming e-learning platforms feature not only digital lecture videos and e-textbooks, but some automated assessment/grading tools. There is a need to expand the coverage of such tools to avoid the extreme burden of online teaching as the educator has to allocate significant time for assessing the increased amount of high school/university student assignments. Also, distant learning diminishes the effect of the educator personal presence since the teacher and the student are separated by their computer screens. Smart educator assistants and automated assessment tools based on machine learning and neural networks can significantly alleviate the problem. This study offers some strategies for automated assessment of graphic assignments and checks for plagiarism. Possible AI-based implementations of such features are presented.

Keywords: e-learning platform, checking for plagiarism, distant learning, automated assessment, smart educator assistant.

Acknowledgements: this study is supported by RFBR, project No. 19-29-14057.

Cite this article: Besshaposhnikov N. O., Diachenko M. S., Leonov A. G., Matyushin M. A., Orlovskii A. E. The Application of Machine Learning and Neural Networks to Automated Text and Visual Assignment Verification Used as Assistance to Educators. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(2):35–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-4.

О полностью автоматическом учебном процессе без участия преподавателя-человека начали говорить еще в 70-х при появлении первых интеллектуальных систем обучения [1, 2, 3], однако фактические успехи в этом направлении на сегодняшний день не позволяют полностью заменить традиционное обучение в формате очной школы, университета и учебного класса. В настоящее время происходит поэтапный переход образования в цифровую форму, что позволяет обеспечить широкую доступность и высокую эффективность образовательного процесса [4].

Цифровизация образования позволила перенести часть учебных процессов из очного формата в учебном классе в дистанционный, что открыло возможности автоматизации части функций преподавателя-человека, позволяющих сохранить качество обучения и полностью использовать все возможности цифровой образовательной платформы. К таким функциям, например, относятся проверка графических заданий, оценка вероятности заимствования решения задания, включая текстовые (антиплагиат), и функция помощи в поиске ответа на распространенные вопросы слушателей, возникающие при решении заданий. Несмотря на то, что данные функции не являются традиционными признаками «интеллектуальных систем обучения» [5], для их эффективной реализации оправдано использование технологий искусственного интеллекта. В статье рассмотрены требования к этим функциям и описаны возможные реализации этих функций с использованием технологий искусственного интеллекта.

Автоматизация проверки заданий является типовой задачей цифровой образовательной платформы, особенно востребованной при обучении программированию. Далее в статье мы остановимся на рассмотрении автоматической проверки графических заданий. Графическим заданием будем называть задачу, результат которой оценивается по изображению. Задача проверки графических заданий возникает, например, в таких дисциплинах, как инженерная и компьютерная графика [6]. В случае с компьютерной графикой проверка задания не может ограничиваться попиксельным сравнением с оригиналом и должна позволять засчитывать задания с незначительными допустимыми отклонениями.

Графическое задание признается правильно решенным, если синтезированное программой ученика изображение близко к тому, что требовалось предоставить по условиям задачи. В качестве меры близости предоставленного и ожидаемого решения может быть выбрана одна из предопределенных функций, например, попиксельное сравнение или интеллектуальное сравнение с эталоном. При этом

от преподавателя не требуется создавать специализированное программное средство для проверки заданий или описывать результаты задания на каком-либо формальном языке.

Функция проверки может быть реализована как классическими методами сравнения с эталоном, так и с использованием современных интеллектуальных методов, например, основанных на применении ИНС [7]. В случае применения интеллектуальных методов для настройки функции проверки результата достаточно предоставить системе одно или несколько изображений, содержащих допустимые ответы. Поскольку в результате сравнения определяется вероятность близости предоставленного изображения к ожидаемому, в случае низкой вероятности задание передается на финальную ручную проверку преподавателю-человеку. На практике интеллектуальная система проверки графических заданий может быть составлена из эмбеддера, переводящего изображения в вектора низкой размерности, и KNN классификатора, работающего в пространстве этих векторов (рисунок 1).

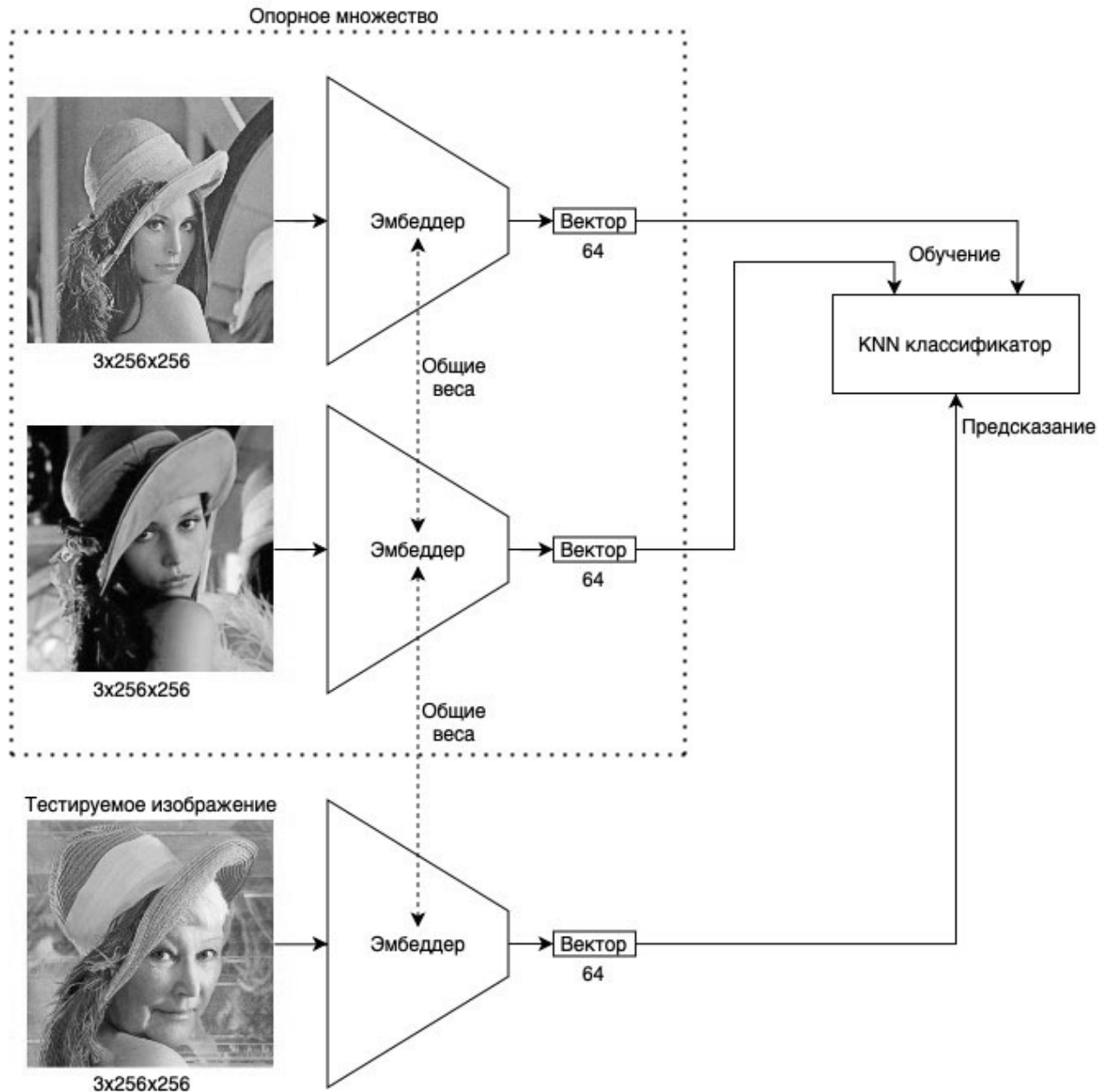


Рис. 1. Архитектура системы сравнения изображений на эмбеддере и KNN классификаторе

Эмбеддер при этом может быть представлен ИНС, которая может быть обучена на любом доступном объемном наборе данных. На время обучения эмбеддер дополняется экстендером до полной ИНС следующего вида: эмбеддер принимает на вход изображение и выдает вектор низкой размерности, экстендер принимает на вход данный вектор и выдает изображение. Во время обучения такая

дополненная экстендером ИНС оптимизирует попиксельное расстояние между входным и выходным изображениями (рисунок 2).

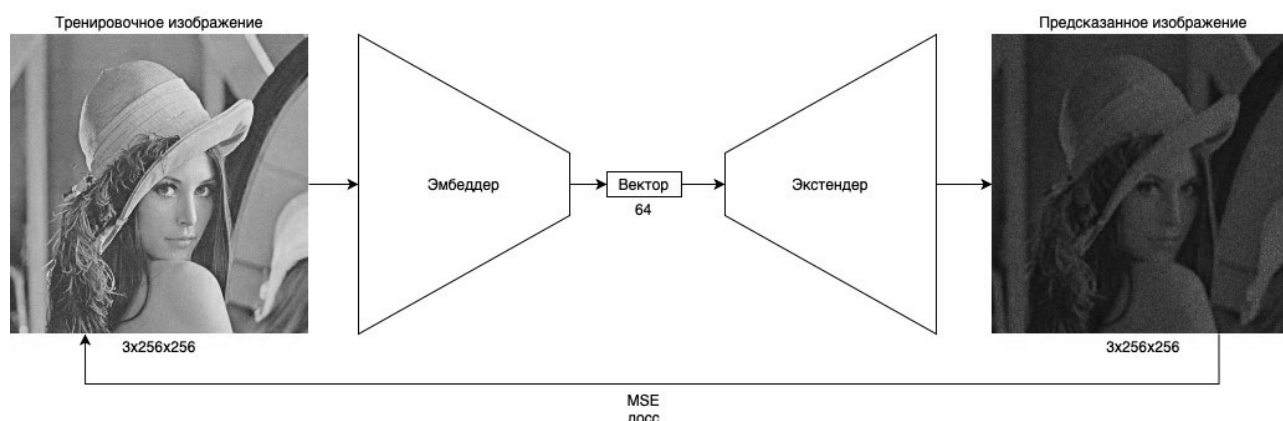


Рис. 2. Схема обучения эмбеддера

Таким образом, эмбеддер обучается кодировать пространственные признаки высокой размерности, заложенные в изображении, в вектор низкой размерности. При этом похожие внешне изображения будут переходить в близкие по евклидовой метрике вектора. Примечательным является тот факт, что для проверки нового типа задач нет необходимости обучать эмбеддер на новых изображениях, достаточно одного изначально качественного обучения на достаточно обширном наборе картинок.

При всей универсальности интеллектуальных методов на практике разработчики систем проверки прибегают к комбинированию интеллектуальных и эвристических методов, например, чтобы исключить возможность успешного прохождения задания при предоставлении пустого, залитого одним тоном или содержащего специальную «маску» (а не решение задания) изображения.

Помимо графических решений, автоматическая проверка может быть внедрена также в широком круге задач. Например, очевидным приложением является автоматическая проверка решений задач по программированию, когда для проверки достаточно протестировать решение на конечном наборе входных данных. Причем здесь искусственный интеллект, как ни странно, тоже может быть с успехом применен, например, для определения так называемого хардкода. Иные случаи, например, автоматизация проверки эссе, без обучения и грамотного внедрения тяжеловесных нейросетевых языковых моделей вообще не представляются осуществимыми.

Не менее актуальной задачей в условиях дистанционного использования является отслеживание и предупреждение заимствований решений.

При работе в учебном классе проблема заимствований решается за счет общения преподавателя с учеником в процессе решения задания, что позволяет оценить уровень его понимания предоставляемой программы и степень его «самостоятельности» при подготовке решения.

В случае с дистанционным режимом выполнения заданий такой возможности нет, поэтому преподавателю для поддержания качества обучения приходится просматривать все решения задач и анализировать возможность их заимствований. За учебный курс количество таких задач для каждого ученика может исчисляться десятками. Рассмотрим данную задачу на примере выполнения задания в рамках курса программирования.

Задача отслеживания заимствований ближе всего к существующему понятию «антиплагиат», то есть речь идет о том, что, например, при решении задачи по программированию решение одного из учеников было полностью или частично использовано одним или несколькими другими учениками. Отличительной особенностью учебных задач по программированию является то, что, во-первых, решение простых (типовых) задач может повторяться с точностью до значений параметров у нескольких учеников, во-вторых, основную часть программы может составлять «шаблон» программы, не изменяемый учащимся. Таким образом, для оценки заимствований остается лишь небольшой фрагмент программы. В связи с этим однозначного решения задачи оценки плагиата в данном случае нет и возможно лишь указать, что несколько сданных решений похожи, что является сигналом для преподавателя, который, обратив внимание на аномалию, проведет действия по предотвращению дальнейшего копирования решений, если это будет подтверждено.

Для реализации этой функции возможно применение нескольких методик: анализ стиля, анализ структуры программы, анализ процесса решения задачи и эвристический анализ.

Анализ стиля, в нашем случае исходного кода [8], является своего рода почерковедческой экспертизой. К ограничению применения этого метода можно отнести то, что у начинающих разработчиков стиль или еще не сформировался, или повторяет отраслевой стандарт, или код может быть автоматически отформатирован используемой средой разработки. К признакам времени можно отнести также активное копирование фрагментов решений с сайтов по программированию или с популярных форумов.

Методы анализа стиля реализуются в том числе с использованием ИНС [8] и хорошо себя зарекомендовали при анализе больших фрагментов исходного кода: выполняется оценка близости стилей кода разных учеников и, если замечена «подозрительная близость», задание отправляется преподавателю на проверку. Для реализации таких методов необходимо сформировать набор метрик кода, на основании которых будет выполняться сопоставление. Примерами метрик являются тип отступов, постановки операторов и элементов блоков, характер именования и длина имен параметров, функций и классов и др.

Сама ИНС представляет собой уже знакомый по распознаванию решений графических задач эмбеддер (рисунок 3). Разница заключается в процессе обучения. Эмбеддер для задачи детектирования плагиата на практике лучше обучать как сиамскую сеть, используя для этого, например, трипплет лосс.

Для обучения могут применяться различные открытые источники данных, например, публичные репозитории с GitHub. Примерами одного класса в данном подходе являются программные коды, принадлежащие одному и тому же автору.

Анализ структуры программы также может применяться для анализа заимствований. В этом случае программа анализируется и трансформируется в представление, которое позволяет сравнить структуры двух программ и их близость [8]. Продвинутое интеллектуальное представление таких методов устойчиво к использованию «обфускации» – добавлению в код избыточных языковых и алгоритмических конструкций с целью снизить «похожесть» двух программ. Для простых заданий такие методы не покажут надежных результатов, так как структура программ у всех учащихся будет одинаковая.

Многообещающим является метод анализа процесса решения задачи. На практике даже простые задачи не сдаются с первой попытки. Таким образом появляется возможность анализировать эволюцию сдаваемого задания, чтобы оценить, как учащийся продвигался к финальному решению. Если цифровая платформа поддерживает онлайн редактирование кода задания, то анализ может быть расширен за счет использования данных о работе ученика в онлайн редакторе. В этом случае при решении задачи собираются метрики о характере работы с кодом, особенности ввода элементов языка (имена параметров, ключевые слова), общие параметры набора и др. Применение ИНС в этом случае потребует подготовки большого объема данных для обучения, что является существенным ограничением для применения этого метода на этапе запуска новой цифровой системы.

Эвристические методы анализа также идут в комбинации с интеллектуальными методами, чтобы исключить простейшие методы заимствования, основанные на сдаче копий без изменений и пр.

Безусловно, любой из приведенных методов может быть обойден учащимися, но основная функция проверки – предотвратить заимствование, а не поймать с поличным. Зная, что задание будет проверяться на предмет заимствований, учащийся может решить потратить больше времени на подготовку самостоятельного решения, чтобы избежать нежелательных для себя последствий. Для решения проблемы заимствований также может применяться технология генерации уникальных заданий для каждого учащегося, но данная тема является предметом отдельного исследования.

В условиях дистанционной работы возникает вопрос донесения до учеников ответов на типовые вопросы. В учебном классе такая информация распространяется естественным образом в процессе занятия, когда преподаватель отвечает на вопрос одного ученика и все остальные ученики невольно слушают ответ. Но в случае дистанционной работы типовые вопросы будут поступать неоднократно. Для снятия этой нагрузки преподавателю может понадобиться интеллектуальный ассистент. Далее будем рассматривать диалоговый ассистент (чат-бот).

Диалоговый ассистент является результатом развития информационных поисковых систем, предоставляющих ответы на вопросы, заданные в форме высказываний на естественном языке. Хотя сама идея диалогового режима общения с учеником появилась еще в 70-х [3], широкое распростра-

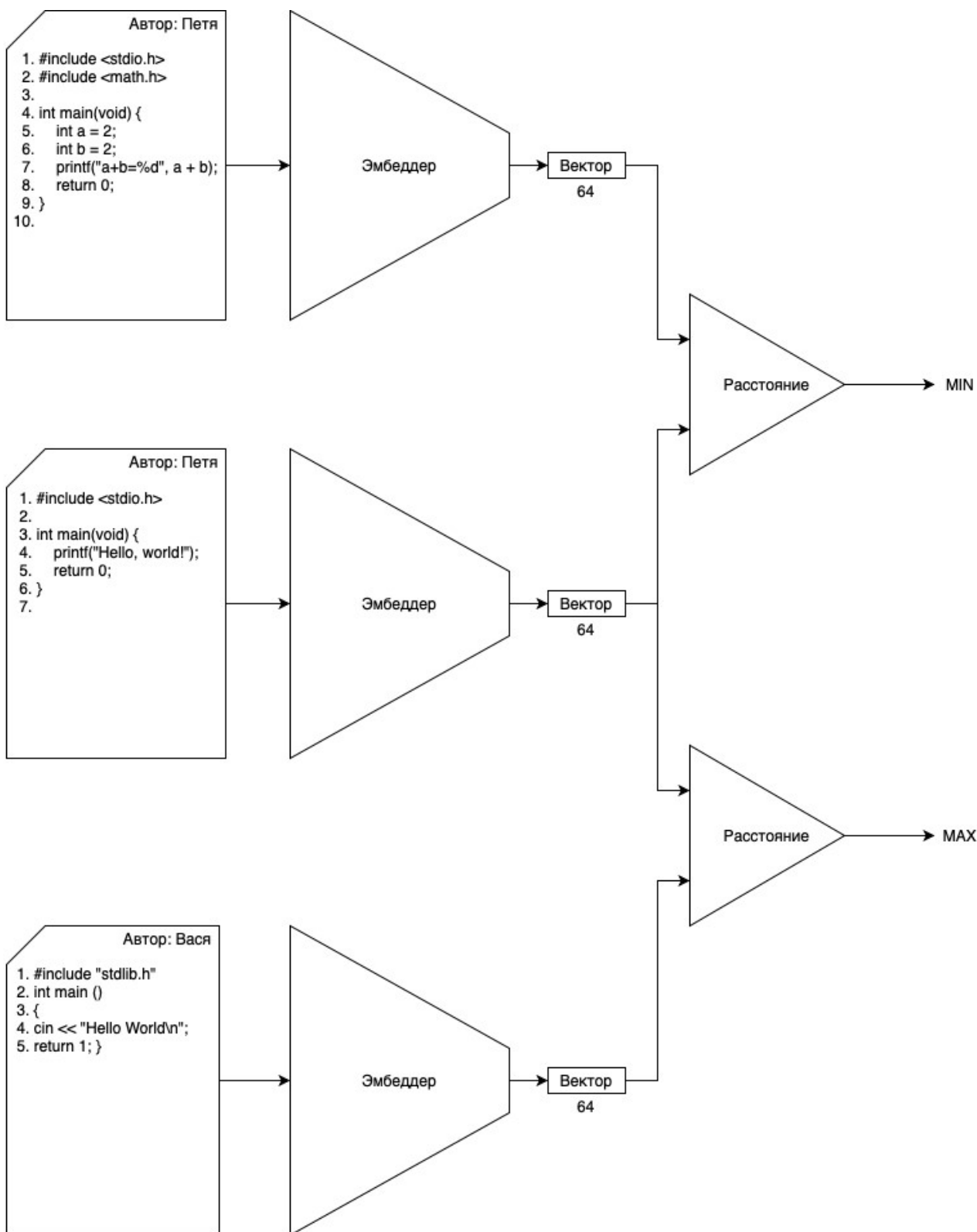


Рис. 3. Архитектура системы сравнения исходных кодов на эмбеддере

нение эта технология получила только последние 10 лет благодаря появлению новых технологий и вычислительных средств для эффективной реализации методик анализа естественного языка.

К требованиям к таким системам можно отнести поддержку лексики обучаемых (сокращений, сленга и пр.), устойчивость к орфографическим и синтаксическим ошибкам, сбор статистики по вопросам для ее дальнейшего анализа, возможность перенаправить вопрос к преподавателю, если ассистент не смог на него ответить.

Анализ естественного языка и диалоговые системы являются высокотехнологичным интеллектуальным решением, требующим специальных знаний, поэтому важно предоставить преподавателю возможность использовать такие решения на высоком уровне, описывая лишь предметную область в виде типовых вопросов и ответов с указанием справочных материалов.

Одним из решений в этой области является библиотека с открытым исходным кодом Rasa [5]. На базе этой библиотеки могут быть построены интеллектуальные решения, не требующие знания специализированных языков описания диалоговых интерфейсов. Таким образом, преподаватель может заранее предусмотреть типовые вопросы учеников и внести их в сценарии ответа диалогового ассистента. Кроме того, становится возможным в случае отсутствия нужного ответа передавать контроль за ходом беседы преподавателю с тем, чтобы в последствие автоматически «дообучать» диалогового ассистента отвечать на большее количество вопросов учеников.

Цифровые образовательные платформы на текущем этапе могут рассматриваться не как замена человека-преподавателя, а как инструмент преподавателя, обеспечивающий автоматизацию ресурсоемких действий. В результате внедрения автоматизации у преподавателя освобождается время для работы с учениками, которые нуждаются в дополнительном внимании, и для непрерывного совершенствования учебных методик. Привычные для преподавателя-человека действия часто оказываются творческими задачами, для решения которых необходимы или специальные знания для их автоматизации, или применение интеллектуальных технологий, берущих на себя всю сложность автоматизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shute V., Towle B. Adaptive E-Learning. *Educational Psychologist*. 2003;38.
2. Paviotti G., Rossi P., Zarka D. *Intelligent Tutoring Systems: an Overview*. 2012.
3. Carbonell J. AI in CAI: An Artificial-Intelligence Approach to Computer-Assisted Instruction. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*. 1970;11(4):190–202.
4. Бесшапошников Н. О., Леонов А. Г., Прилипко А. А. Цифровизация образования — новые возможности управления образовательными треками. *Вестник кибернетики*. 2018; 2:154–160.
5. Алешева Л. Н. Интеллектуальные обучающие системы. *Вестник ГУУ*. 2018;1:149–155. DOI: 10.26425/1816-4277-2018-1-149-155.
6. Бойков А. А. Конструктивно-геометрические основы и методика проверки чертежей в обучающих системах. *Вестник Костромского государственного университета*. 2016;22(1):163–167.
7. Koch G. R., Zemel R., Salakhutdinov R. Siamese Neural Networks for One-Shot Image Recognition. *ICML Deep Learning Workshop*. 2015;2.
8. *Machine Learning in Static Analysis of Program Source*. Режим доступа: <https://habr.com/en/company/pvs-studio/blog/484202/>.
9. RASA. Режим доступа: <http://rasa.com>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ЭКСПРЕССИИ МАРКЕРА ПРОЛИФЕРАЦИИ Ki-67 С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**С. А. Котов¹, С. А. Мозеров^{2,a}, С. О. Старков^{2,b}**¹ ООО «Модель Спектр», г. Обнинск, Российская Федерация, serj-kotoff@mail.ru² Обнинский институт атомной энергетики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация^a mozerov@list.ru, ^b sergeystarkov56@mail.ru

Аннотация: в последнее время в качестве средств компьютерной диагностики широкую популярность приобретают элементы из области компьютерного зрения. Целью данной работы является разработка программных средств, позволяющих автоматически анализировать онкомаркированные клетки в образцах медицинских изображений. В процессе работы была решена такая задача, как выявление количества онкомаркированных клеток в образце медицинского изображения. Это стало возможно благодаря тесному взаимодействию с морфологами, обозначившими интересующие их фрагменты снимка, где необходимо было произвести подсчет онкомаркированных клеток, и опыту программиста в решениях подобных задач других областей жизнедеятельности с помощью технологии компьютерного зрения. Медицинские изображения были размечены морфологами и представляли собой срез стекла, на котором были окрашены в определенный цвет онкомаркированные клетки специальным препаратом. Исследуемым органом стал язык. В результате был совершен подсчет иммунопозитивных клеток, что дает морфологам возможность наблюдать более объективную картину в изображении среза стекла образца, позволяющую скорректировать решение в отношении постановки диагноза и назначения необходимого лечения.

Ключевые слова: компьютерное зрение, Python, OpenCV, онкомаркер Ki-67.

Для цитирования: Котов С. А., Мозеров С. А., Старков С. О. Определение уровня экспрессии маркера пролиферации Ki-67 с помощью технологии компьютерного зрения. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):42–46. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-5.

ESTIMATION OF THE Ki-67 PROLIFERATION MARKER EXPRESSION LEVEL WITH COMPUTER VISION TECHNOLOGY**Sergey A. Kotov¹, Sergey A. Mozerov^{2,a}, Sergey O. Starkov^{2,b}**¹ Model Spektr, OOO, Obninsk, Russian Federation, serj-kotoff@mail.ru² Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University MEPhI, Obninsk, Russian Federation^a mozerov@list.ru, ^b sergeystarkov56@mail.ru

Abstract: lately, computer vision technologies have become common computer diagnostics tools. The study objective is the development of software tools to automatically detect cells with proliferation markers on medical images. We managed to qualitatively assess the number of cells with proliferation markers on a medical image sample. We closely cooperated with morphologists who identified the areas of interest on the image where the cells with proliferation markers were to be counted. Another enabler was extensive experience with developing computer vision systems for other applications. The medical images were tokenized by the morphologists. The images were slices where the proliferation marker cells were dyed. The organ under investigation was the tongue. We counted the immune-positive cells. It helped the morphologists to have some objective slice image metrics used to adjust the diagnosis and therapy plans.

Keywords: computer vision, Python, OpenCV, Ki-67 proliferation marker.

Cite this article: Kotov S. A., Mozerov S. A., Starkov S. O. Estimation of the Ki-67 Proliferation Marker Expression Level with Computer Vision Technology. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(2):42–46. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-5.

Введение

В настоящее время наблюдается бурный рост развития средств компьютерной диагностики. Сама по себе аналитика служит медицине уже более 40 лет, но лишь в последнее десятилетие ее использование в здравоохранении вышло на новый уровень: появились мощные инструменты, в том числе на основе технологий компьютерного зрения, машинного обучения и т.д.

Компьютерное зрение — технология, позволяющая производить детекцию и классификацию объектов. Сама по себе, как научная дисциплина, она относится к тематике обработки изображений, а в технической составляющей ее применяют в системах видеонаблюдения, управления промышленными процессами, моделирования объектов, и в последнее время очень популярны подобные системы в построении дополненной реальности.

Программно подобные системы реализуются с помощью библиотек алгоритмов компьютерного зрения с открытым исходным кодом, таких как Open computer vision (OpenCV) или Point Cloud Library (PCL).

В статье рассматриваются возможности визуального анализа маркера, обсуждается техническая сторона реализации определения его уровня экспрессии на основе технологии компьютерного зрения, приведены основные результаты анализа.

Маркер пролиферации Ki-67

В основе развития злокачественных опухолей лежит пролиферация клеток, которая приводит к увеличению числа атипических элементов. Для определения особенностей пролиферации клеток злокачественных опухолей наиболее распространенным маркером пролиферации является антиген Ki-67, который экспрессируется практически во всех фазах митотического цикла, кроме фазы покоя G_0 , и, соответственно, отражает величину пролиферативного пула [1]. Синтез белка Ki-67 начинается в середине фазы G_1 митоза, и, постепенно нарастая, его уровень достигает максимума в метафазе, затем резко снижаясь в анафазе. Антиген Ki-67, выявляемый соответствующими моноклональными антителами, представляет собой короткоживущий протеин, он разрушается в течение 1,5-2 часов. Поэтому антитела к Ki-67 выявляют только делящиеся клетки, так как Ki-67 не успевает накапливаться и не остается в покоящихся клетках.

Традиционный подсчет митотической активности не отражает пролиферативный потенциал опухоли, так как собственно митоз занимает несколько часов, а подготовка к нему — около 24 ч. Изучение негистонового протеина Ki-67, экспрессирующегося во всех клетках, вышедших из G_0 и ранней G_1 фазы митоза, позволяет определить именно скрытый пролиферативный потенциал опухоли.

Пролиферативная активность прямо коррелирует со степенью гистологической злокачественности, степенью инвазии, наличием метастазов. Физиологическая роль антигена Ki-67 в жизни клетки пока еще не ясна. Тем не менее его присутствие на всех активных фазах митотического цикла позволяет использовать данный белок в качестве универсального маркера пролиферации при оценке активности роста злокачественных новообразований. Темп роста опухолевой массы представляет очень важную информацию для определения онкологической сущности опухоли и ее агрессивности. В таких случаях показатель пролиферативной активности ее является одним из решающих факторов, учитываемых при выборе тактики лечения [2].

Методика разработанной искусственной системы оценки уровня экспрессии маркера Ki-67

Для построения этой искусственной системы получения объективной оценки необходимо решить следующие задачи:

1. Применение математического метода выделения пятен двух типов: коричневого и синего цвета, где клетки рассматриваются как пятна определенного цвета.
2. Расчет соотношения площадей пятен разного цвета на изображении. Необходимое условие — классификация относительно соотношения избытка одного из типов пятен.

Непосредственно реализация системы выполняется программно на языке программирования Python и с помощью библиотеки компьютерного зрения OpenCV [3]. Структура функционирования программного обеспечения показана на рис. 1.

Рассмотрим основные этапы предлагаемого подхода:

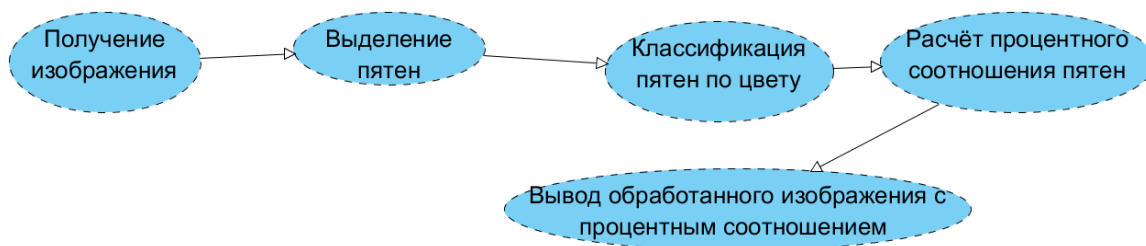


Рис. 1. Схема функционирования программного обеспечения

1. Выделение пятен.

После получения первичного изображения необходимо реализовать процедуру выделения пятен. Для этого используем Адаптивный порог из библиотеки OpenCV [4]:

```
mask = cv2.adaptiveThreshold(cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY), 255, \
cv2.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C, cv2.THRESH_BINARY, 1931, 3)
```

Следующим шагом является очистка маски от слишком мелких вкраплений пикселей. Для этого размываем маску и снова применяем такой же адаптивный порог. Чтобы компенсировать небольшое расширение черных пятен при процедуре очистки, применяется функция сужения чёрных областей маски. Так же используем библиотеку OpenCV [5]:

```
mask = cv2.GaussianBlur(mask, (15, 15), 0)
mask = cv2.adaptiveThreshold(mask, 255, \
cv2.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C, cv2.THRESH_BINARY, 1931, 3) \
kernel = np.ones((5, 5), np.uint8)
mask = cv2.dilate(mask, kernel, iterations = 1)
return mask
```

В итоге сочетания этих методов и функций получаем маску для отсечения светлого фона (выделения пятен):

```
mask = clear_mask(get_mask(img))
```

2. Классификация пятен по цвету.

Следующим шагом является операция разделения: какие пятна относятся к коричневым, а какие — к синим. К коричневым пикселям будем относить пиксели, для которых выполнены следующие условия:

1. Находится внутри пятна ($mask == 0$).
2. Интенсивность синего меньше интенсивности красного или оба одновременно: синий меньше 120 и красный меньше 110, интенсивность зеленого меньше интенсивности красного.
3. К голубым пикселям относим все пиксели пятен, которые не оказались коричневыми.
4. Расчет процентного соотношения пятен.

Расчёт количества пятен коричневых и синих основан на оценке их общей площади. Находятся соотношения между пятнами в процентах: соотношения как для избытка коричневых, так и для избытка голубых пятен, которые отличаются лишь тем, что именно стоит в знаменателе. Но, несмотря на то, что мы считаем оба изображения, пользователь видит один подсчёт: минимальный. Алгоритм действий следующий:

1. Находим соотношение между ними и голубыми и коричневыми клетками.
2. Вычисляем, какое из соотношений получилось меньше.
3. Создается копия исходного изображения и накладывается маска с выделенными на нём пятнами. Создается копия изображения, на которое наносятся коричневые и голубые пиксели.
4. Пользователю возвращается соотношение в процентах и обработанное итоговое изображение.

Полученные результаты

На основе анализа изображений были выявлены клетки, окрашенные в синий и коричневый цвет, посчитано их соотношение, предоставлен выбор обработки одного или нескольких изображений. При обработке данной программы пользователь получает фотографию с выделенными клетками и их процентное соотношение. Графический результат показан на рис. 2.

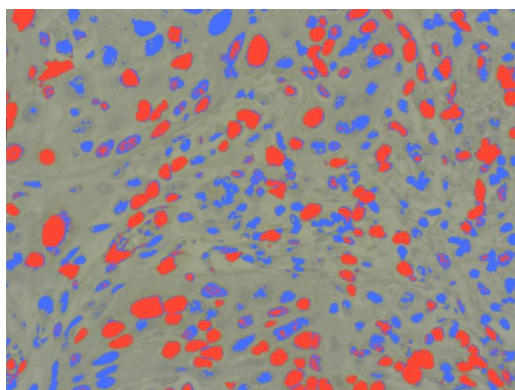


Рис. 2. Графический результат выполнения программы

Медицинские изображения онкомаркера Ki-67 и основные результаты анализа — избыток коричневых и голубых клеток, полученные в результате обработки программы, представлены в таблице.

Таблица

№ кар-тин-ки	Медицинское изображение	Избыток	№ кар-тин-ки	Медицинское изображение	Избыток
1		Коричневых клеток 70 процентов	4		Коричневых клеток 96 процентов
2		Голубых клеток 30 процентов	5		Голубых клеток 39 процентов
3		Коричневых клеток 60 процентов			

Результаты анализа показаны для областей, где непосредственно находится интересующая область для врача, а не для всего медицинского изображения.

Заключение

В первой части программной реализации решена задача выявления на фотографиях клеток, окрашенных в синий и коричневый цвет (иммунопозитивных клеток), и подсчёта их соотношения. С учетом того, что пролиферативная активность клеток опухолей человека коррелирует со степенью их гистологической и биологической злокачественности, подсчет индекса пролиферации с помощью компьютерного зрения значительно повышает объективность данных. Возможность дальнейшего развития текущего программного продукта заключается в увеличении цветового диапазона пятен, для расширения обрабатываемого программой набора данных, в доработке подсчета клеток, поскольку пока погрешность составляет 5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иммуногистохимические методы: руководство* / Пер. с англ. под ред. Г. А. Франка и П. Г. Малькова. М., 2011. 224 с.
2. Волченко Н. Н., Франк Г. А. *Комплекс морфологических и прогностических факторов при раке молочной железы: пособие для врачей*. М., 2000.
3. *OpenCV*. Режим доступа: opencv.org.
4. Жуков А. Технологии на службе медицины: аналитика и искусственный интеллект против рака. Режим доступа: <https://medvestnik.ru/content/interviews/Tehnologii-na-službe-mediciny-analitika-i-iskusstvennyi-intellekt-protiv-raka.html>.
5. *Morphological Transformations*. Режим доступа: https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_imgproc/py_morphological_ops/py_morphological_ops.html?highlight=dilate#dilation.
6. Шапиро Л., Стокман Дж. *Компьютерное зрение*. М.: Бином. Лаборатория знаний; 2006. 752 с. ISBN 5-94774-384-1.
7. Форсайт Д., Понс Ж. *Компьютерное зрение. Современный подход* = *Computer Vision: a Modern Approach*. М.: Вильямс; 2004. 928 с. ISBN 5-8459-0542-7.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-6

В-КОМПЬЮТЕРЫ: САМОРАЗВИТИЕ**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: показано, что В-компьютеры обладают неограниченным потенциалом развития, реализуемым на уровне разнообразных цифровых устройств, интегрируемых В-компьютером. На основании этого факта делается вывод о том, что решение задачи создания искусственного интеллекта в полной мере может быть осуществлено на базе В-компьютеров.

Ключевые слова: В-компьютер, искусственный интеллект (ИИ), шаблон заготовки, абстрактное вычислительное устройство (АВУ), В-схема.

Благодарности: авторы выражают благодарность А. В. Ламкову за обсуждение работы. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-07-00862.

Для цитирования: Деев Г. Е., Ермаков С. В. В-компьютеры: саморазвитие. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):47–55. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-6.

B-COMPUTERS: SELF-EVOLUTION**Georgiy E. Deev^a, Sergey 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: the study demonstrates that the evolution of the B-computer can be unlimited as it can integrate a range of other digital devices. With this fact, we claimed that AI can be implemented with B-computers.

Keywords: B-computer, artificial intelligence (AI), PCB layout template, abstract computer (AC), B-circuit.

Acknowledgements: I wish to show my appreciation to A.V. Lamkov for reviewing this paper. This study is supported by RFBR grants 20-07-00862.

Cite this article: Deev G. E., Ermakov S. V. B-Computers: Self-Evolution. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(2):47–55. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-6.

Предварительное неформальное пояснение

В работе упоминаются «А-компьютеры» и «В-компьютеры» (буквы «А» и «В» — латинские). Под А-компьютерами мы имеем в виду повсеместно используемые компьютеры и родственные им устройства типа всевозможных гаджетов. В связке с А-компьютерами идут В-компьютеры. А-компьютеры имеют исторический приоритет, они первичны, что и оттеняется использованием буквы «А» в их названии. По отношению к ним В-компьютеры вторичны, что также оттеняется использованием в их названии буквы «В». А-компьютеры и В-компьютеры объединяют и одновременно противопоставляют родственные принципы построения абстрактных схем. Принцип А, служащий для построения схем А-компьютеров, гласит: *по одной и той же линии могут передаваться различные информационные сигналы*. Но, понятно, слишком много различных информационных сигналов по одной и той же линии передаваться не может, т.к. в этом случае возникает трудноразрешимая проблема различения сигналов, приводящая к ненадежным вычислениям. Это послужило основанием Дж. фон Нейману для формулировки тезиса о том, что наилучшей системой счисления, пригодной для создания компьютеров, является двоичная система счисления. И действительно, в этом случае вычисления максимально надежны. С тех пор вся компьютерная индустрия двоичная. Вычисления на А-компьютерах, будучи максимально надежными в двоичной системе счисления, тем не менее не избавлены от сбоев.

Принципу А противопоставляется двойственный ему принцип В, гласящий: *по одной и той же линии не могут передаваться различные информационные сигналы*. Как видно, оба принципа, будучи

антитезой друг другу, дополняют один другой так, что третьего не дано. Таким образом, в силу принципа В, между линией и информационным сигналом имеет место взаимно однозначное соответствие и путаницы сигналов в линии никогда не происходит. Этим обеспечивается надежность вычислений при любом количестве сигналов. Поэтому тезис Неймана к В-компьютерам неприменим. Следовательно, В-компьютеры можно создавать для любой системы счисления, не испытывая принципиальных трудностей. Одной из особенностей В-компьютеров является простота базиса, на основе которого можно строить как сами В-компьютеры, так и содержащиеся в них В-устройства. Этот конструктивный базис состоит из двух элементов: из линии, по которой передаются информационные сигналы, и из элемента $\&$, управляющего направлением движения информационного сигнала. Базис можно изобразить записью: $\{ |, \& \}$; такой набор конструктивных элементов удовлетворяет принципу максимальной простоты. Следовательно, В-схемы В-компьютеров максимально просты по своему конструктивному исполнению.

Всякий объект находится на той или иной стадии развития. Под *стадией развития* объекта понимается его *конструктивное состояние*, а также набор функциональных взаимодействий объекта с окружающей средой, который мы будем называть *набором функций объекта*. Под *развитием* понимается переход объекта от одной стадии развития к другой. Это подразумевает как возможное конструктивное изменение самого объекта, так и изменение набора связанных с ним функций. В связи с понятием развития сразу же возникает необходимость в характеристике этого развития, будет ли развитие регрессивным или прогрессивным. Как сказано выше, каждая стадия развития характеризуется двумя компонентами: конструктивными особенностями объекта и его функциональным набором. Вполне естественно предполагать, что функциональный набор объекта зависит от его конструкции, так что набор функций, характеризующих стадию развития, есть своего рода функция его конструктивного совершенства, что отражается записью $\{f_1, f_2, \dots\} = \Psi(k)$, где k — коэффициент, характеризующий конструктивное развитие. Будем считать его меняющимся в пределах $0 \leq k < \infty$ (нет предела совершенству). Итак, стадия развития объекта — это пара $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$, состоящая из коэффициента конструктивного развития k и набора функций $\{f_1, f_2, \dots\}$. Это своеобразный *вектор развития*. Не будем, однако, далее углублять векторную аналогию. Как регресс, так и прогресс характеризуются поведением пары $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$. Оба фактора, входящие в эту пару, могут определяться внешним воздействием, тогда мы говорим об индуцированном развитии. Но может быть и так, что поведение пары $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$ определяется внутренними причинами, присущими объекту, при слабом или вообще отсутствующем внешнем воздействии. Тогда мы говорим о *саморазвитии*.

С понятием саморазвития тесно связано понятие *искусственного интеллекта*, (ИИ), столь популярное в последнее время. Под *искусственным интеллектом* понимается *искусственно созданный объект, обладающий способностью к самостоятельной интеллектуальной деятельности*. Таким образом, первой отличительной чертой искусственного интеллекта является его искусственное происхождение, т.е. он должен быть создан кем-то другим, способным к творческой деятельности, например, человеком творящим или каким-либо еще мыслящим существом (МС), способным к созданию творений. По этой причине муха не является искусственным интеллектом, несмотря на то, что она проявляет признаки интеллекта. Не является по той причине, что ни человек, ни какое-либо другое МС не являются ее создателями. С другой стороны, машинка, катающаяся по полу и управляемая мальчиком с помощью рычажков на пульте управления, также не является ИИ, несмотря на кажущуюся разумность ее поведения. Кажущаяся разумность — это результат работы интеллекта мальчика, а не самой машины. Аналогично знаменитые японские роботы не являются примерами ИИ по той причине, что, хотя они и созданы искусственно, но собственным интеллектом не обладают; они ведут себя, подчиняясь приказам, исходящим от встроенных в них компьютеров, в которых, в свою очередь, содержатся программы, написанные человеком. Эти программы определяют поведение роботов. В конечном счете, поведение робота определяется человеком, как и в случае с машинкой. Все роботы управляются А-компьютерами, атрибутом которых являются программы, создаваемые человеком. Поэтому поведение роботов целиком и полностью зависит от человека. Следовательно, до тех пор, пока они управляются А-компьютерами, никакой «бунт машин» не возможен. Просто-напросто потому, что у этих машин нет собственного интеллекта.

Другое дело — В-компьютеры. В-компьютеры обладают неограниченным потенциалом развития. Наличие потенциала развития допускает возможность саморазвития и в конечном итоге превращения его в интеллект. Этот потенциал может быть использован человеком в своих целях, а может быть использован самим компьютером для собственного развития. Приобретя интеллект, В-компьютер может вступить в конкурентную интеллектуальную игру с человеком и даже выиграть ее. Не обязательно, однако, дело должно закончиться «войной», вполне возможен дружеский симбиоз человека и машины.

Синтез полностью определенных устройств на шаблонах заготовок

Заготовками мы называем абстрактные платы, на которых заранее подготовлены полуфабрикаты для будущих схем устройств. Заготовки удовлетворяют требованию максимальной простоты. На заготовках имеются линии для передачи информационных сигналов, а также множество элементов &. Больше ничего нет. Если в заготовке все линии параллельны, то в такой заготовке варьирование связей невозможно. Варьирование связей возможно только в заготовке, где есть перекрещивающиеся линии. Если есть перекрещивающиеся линии, то их соединение, хотя и возможно, но не обязательно. Наличие соединения будем изображать жирной точкой в перекрестии, как показано на рис. 1.

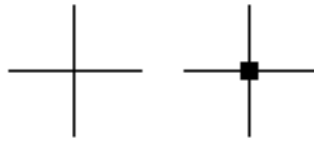


Рис. 1. Соединения нет (слева), соединение есть (справа)

Таким образом, в абстрактных В-схемах выполнение операции соединения сводится к простейшей операции — к постановке точки.

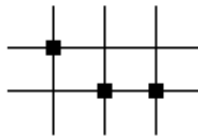


Рис. 2. Пример варианта соединения

На рис. 2 показан один из возможных вариантов соединения пяти перекрещивающихся линий. Всего возможно 2^6 таких вариантов. Этим числом оценивается потенциал развития (потенциал возможностей) данной конфигурации линий.

На следующей странице приведен пример типичной заготовки. Слева изображена «сырая» заготовка, на которой нет никаких соединений; справа — она же, но на ней выбран один из возможных вариантов соединений. Очевидно, что вариантов соединений невообразимо много (2^{728}) и каждому варианту соединений соответствует свое вычислительное устройство. Не все из них представляют в настоящий момент какой-либо интерес, но некоторые, несомненно, представляют. Именно таковым является устройство, получившееся в результате изображенного варианта соединений. Это устройство есть не что иное, как умножитель на три в четверичной системе счисления. Оно обозначается символом: $\bar{x} \cdot 3|\bar{q}$, где $\bar{x}$ — числоид, записанный на сетке $Gr^0 = \dots \bar{2} \bar{1} \bar{0}$, представляющий, в частности, натуральные числа; $\bar{q}$ — состояние умножителя, $\bar{q} \in \{0, 1, 2\}$. Как видно, после выбора варианта соединений на заготовке могут оставаться «лишние» линии. Не играя какой-либо роли по отношению к выбранному варианту соединений, они могут нести новые информационные сигналы и оказаться полезными для других целей. Числом 2^{728} выражается «скрытый» потенциал развития, потенциал возможностей, связанный с заготовками такого типа. Если учесть, что типов заготовок может быть также невообразимо много, то можно представить себе, каков потенциал развития, связанный с В-компьютерами. Символьная атрибутика, присутствующая на рис. 3, необходима нам для понимания функционирования устройства. Само устройство, на современной стадии его развития, в ней не нуждается. Среди множества режимов работы устройства есть режимы, осмысленные с нашей точки зрения. Поэтому имеет смысл снабдить некоторые элементы схемы понятными нам информационными сигналами. Так,

символами 0, 1, 2, 3 снабжены некоторые линии устройства. Группы из четырех линий образуют вход и выход устройств, группы из трех линий — управляющие сигналы. Группа элементов &, у которых на первом (слева) месте стоит 0, образует состояние $\bar{q} = 0$; аналогично, состояния $\bar{q} = 1$ и $\bar{q} = 2$.

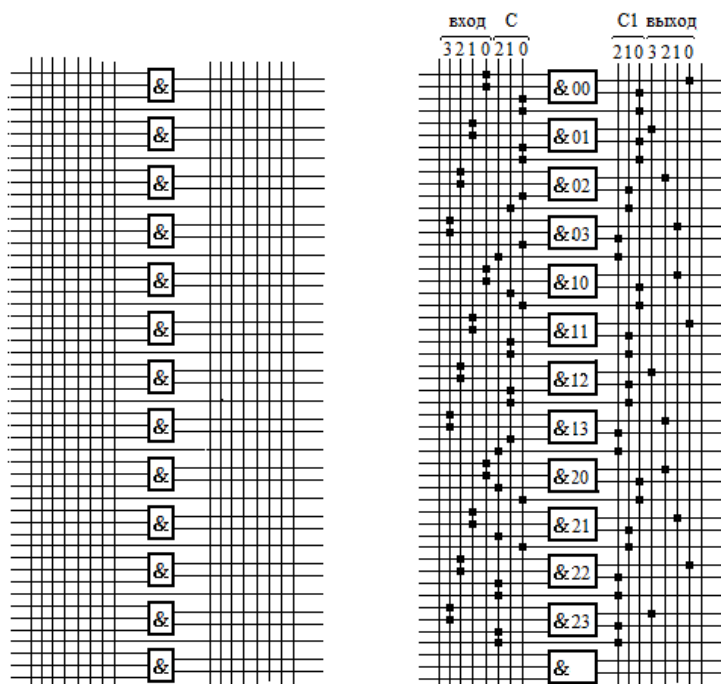


Рис. 3. Заготовка без соединений (слева) и заготовка с соединениями (справа)

Состояние $\bar{q} = 0$ будем называть начальным состоянием. Устройство выполняет умножение на три, будучи поставленным при $t = 0$ именно в начальное состояние. Если его ставить при $t = 0$ в другие состояния, то оно вычисляет другие функции.

Рассмотрим пример вычисления этим устройством.

Пример 1. Пусть $\bar{x} = \dots 00322$ в четверичной системе счисления. За вычислением следим с помощью *развертки во времени процесса вычисления*.

Информация в развертке читается справа налево. Так же справа налево растут номера разрядов в числоидах. В первой строке показаны моменты времени, в которые функционирует устройство. В роли таких моментов выступают целые неотрицательные числа. Во второй строке стоят цифры числа, поданного на вход. В разряде 0, соответствующем моменту $t = 0$, стоит цифра $x_0 = 2$. Аналогично во всех остальных разрядах.

6	5	4	3	2	1	0	t
...	0	0	0	3	2	2	x_t
&00	&00	&00	&20	&13	&12	&02	$\&qx_t$
...	0	0	2	2	3	2	y_t

В строке $\&qx_t$ стоят элементы &, которые срабатывают в момент t . В строке y_t стоят поразрядно расположенные цифры результата, причем соответствие между моментом времени t и номером разряда, как и для входа, сохраняется. Отметим, что устройство является абстрактом, т.е. идеальным объектом, в котором все идеально срабатывает, все элементы & имеют одну и ту же задержку; выходной сигнал выдается в тот же момент времени, что и поступивший входной. Реально выходной сигнал всегда выдается с некоторым запаздыванием относительно входного сигнала. Но инженеры, создающие вычислительные устройства, всегда стремятся это запаздывание уменьшить, насколько это возможно. Математики этот процесс доводят до конца, сводя запаздывание к нулю. Ясно, что это идеализация, но она не портит математического содержания вычислительного процесса, а, скорее, именно она его представляет.

Понятно, что одной конструкции устройства недостаточно, чтобы стал ясен принцип его работы. Требуется еще дать закон функционирования устройства, что обеспечивается его уравнениями функционирования. Они имеют вид:

$$\begin{cases} \bar{q}_{t+1} = \theta \bar{q}_t x_t = \langle 3 \cdot x_t + \bar{q}_t \rangle, \\ y_t = \sigma \bar{q}_t x_t = \langle 3 \cdot x_t + \bar{q} \rangle, \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{q} \in Q_3 = \{0, 1, 2\}$, $x, y \in Z_{(4)} = \{0, 1, 2, 3\}$, θ — функция переходов, σ — функция выходов. В (1) используются обозначения: $\langle \bar{\alpha} \rangle = \langle \dots 00\alpha_r \dots \alpha_1 \alpha_0 \rangle = \alpha_0$ и $\langle \bar{\alpha} \rangle = \langle \dots 00\alpha_r \dots \alpha_1 \alpha_0 \rangle = \dots 00\alpha_r \dots \alpha_1$.

Читаем развертку: при $t = 0$ устройство находится в начальном состоянии $\bar{q} = 0$, что обеспечивается поступлением управляющего сигнала по линии-0 входа-С. К срабатыванию готовы все четыре элемента & начального состояния: &00, &01, &02, &03. Но сработает только один из них, а именно тот, который соответствует поступившей на вход цифре, которой является цифра $x_0 = 2$. Поэтому сработает элемент &02, что и отмечено в развертке. Согласно схеме устройства на выходе появится цифра 2, и будет передан управляющий сигнал для момента времени $t = 1$ на элементы & состояния 1, т.е. на элементы &10, &11, &12, &13. В этот же момент на вход поступает цифра $x_1 = 2$; далее все происходит аналогично тому, как это имело место при $t = 0$. В итоге на выходе сформируется результат, число $\bar{y} = \dots 002232$.

Запишем результат работы устройства в виде: $\dots 00322 \cdot 3|0 = \dots 002232$.

Читаем: если поставить устройство в состояние $\bar{q} = 0$ как начальное (это обозначено нулем справа от вертикальной черты) и подать на вход число $\bar{x} = \dots 00322$, то устройство выдаст результат $\bar{y} = \dots 2232$, являющийся произведением числа $\bar{x} = \dots 00322$ на три: $\dots 00322 \cdot 3 = \dots 2232$. Результат проверяется школьным умножением «столбиком» (в четверичной системе счисления).

Обратим внимание, что результат выдается при $t = 2$, т.е. за 3 (а не за 4) такта. Это объясняется тем, что старшие две цифры результата выдаются устройством одновременно. Это явление обобщается при рассмотрении всех В-устройств, что приводит к выводу о том, что *в В-устройствах вычисление заканчивается в момент поступления старшей цифры из входной информации*. Это справедливо только для В-устройств. Аналогично можно разобрать работу любого из 2^{728} устройств, которые можно создать на шаблоне заготовки, представленной на рис. 3. Если учесть, что шаблонов типа приведенного и других, значительно более сложных, невообразимо много, то, повторим, ясно, насколько велик потенциал развития В-устройств.

В разобранный пример предполагалось, что отображение, реализуемое устройством, *полностью задано*, т.е. известны или уравнения функционирования устройства (1), или его табличное задание (не приводилось), или его В-схема (не приводилась). Требовалось на шаблоне, выполнив нужные соединения, получить его шаблонную В-схему.

Иначе обстоит дело в следующем разделе, где отображение задано фрагментарно.

Синтез устройств по фрагментам отображений

Мы не будем описывать алгоритм синтеза абстрактных вычислительных устройств (АВУ) по фрагментам отображений, а лишь приведем на примере результат его работы. В дальнейшем вместо «алгоритм синтеза» будем говорить просто «алгоритм».

Обозначим символом ${}_p A_q$ абстрактное вычислительное устройство (АВУ) с предвидением на p шагов и с последствием на q шагов, т.е. устройство, функционирование которого описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \bar{q}_{t+1} = \theta \bar{q}_t x_{t+p} \dots x_{t+1} x_t x_{t-1} \dots x_{t-q}, \\ y_t = \sigma \bar{q}_t x_{t+p} \dots x_{t+1} x_t x_{t-1} \dots x_{t-q}, \end{cases} \quad (t \in Z = \{\dots 2, 1, 0, -1, -2, \dots\}) \quad (2)$$

где $x \in Z_k = \{0, 1, \dots, k-1\}$, $y \in Z_l = \{0, 1, \dots, l-1\}$ — множества цифр в k -ичной и l -ичной системах счисления, соответственно; $k, l \geq 2$, натуральные; $p, q \geq 0$. Символом ${}_p A_q$ обозначим множество всех АВУ с предвидением на p шагов и последствием на q шагов: ${}_p A_q = \{{}_p A_q\}$. Множество всех АВУ есть множество $A = \bigcup_p \bigcup_q {}_p A_q$. Абстрактные автоматы образуют множество ${}_0 A_0$.

Фрагментом отображения называется множество соответствий типа $\bar{x} \rightarrow \bar{y}$, где $\bar{x}$ берется из области определения отображения, а $\bar{y}$ — из области значений. Количество соответствий во фрагменте может быть любым, кроме нуля.

Фрагмент отображения называется *репрезентативным*, если он позволяет полностью найти отображение.

Пусть числовой объект $\bar{x} = 1300122203 \underset{0}{1}$ записан в четверичной системе счисления. Это значит, что все его цифры принадлежат множеству цифр $Z_{(4)} = \{0,1,2,3\}$. Очевидно, что номера разрядов растут справа налево, начиная с нулевого разряда, отмеченного нулем снизу. Пусть, аналогично, объект $\bar{y} = 4403212103 \underset{0}{4}$ записан в пятеричной системе счисления, $Z_{(5)} = \{0,1,2,3,4\}$, и пусть отображение таково, что между объектами $\bar{x}$ и $\bar{y}$ имеет место соответствие, которое мы запишем на разрядной сетке:

$$\begin{array}{cccccccccccc|c}
 10 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & t \\
 \hline
 1 & 3 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 2 & 0 & 3 & 1 & x_t \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 4 & 4 & 0 & 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 3 & 4 & y_t
 \end{array} \quad (3)$$

Спрашивается, существуют ли АВУ из класса ${}_p\mathcal{A}_q$, ($p, q \geq 0$), реализующие соответствие числовых объектов $\bar{x} \rightarrow \bar{y}$?

Алгоритм начинает поиск АВУ с класса ${}_0\mathcal{A}_0$, т.е. вначале ставится вопрос, существует ли абстрактный автомат, реализующий указанное соответствие (напомним, что во множестве всех АВУ абстрактные автоматы заполняют класс ${}_0\mathcal{A}_0$).

В результате применения алгоритма выясняется, что существуют два минимальных автомата A_1 и A_2 с двумя состояниями, для которых соответствие (3) имеет место. Эти автоматы задаются таблицами:

$$\begin{array}{l}
 A_1: \quad \begin{array}{c|cc}
 & x & \\
 \hline
 q \backslash & 0 & 1 \\
 \hline
 0 & 0, 0 & 0, 3 \\
 1 & 1, 4 & 1, 2 \\
 2 & 1, 1 & 0, 2 \\
 3 & 0, 4 & 0, 3
 \end{array}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 A_2: \quad \begin{array}{c|cc}
 & x & \\
 \hline
 q \backslash & 0 & 1 \\
 \hline
 0 & 1, 3 & 0, 0 \\
 1 & 1, 4 & 0, 2 \\
 2 & 1, 1 & 0, 2 \\
 3 & 0, 4 & 1, 3
 \end{array}
 \end{array} \quad (4)$$

В таблицах $x \in Z_{(4)} = \{0,1,2,3\}$, q — состояние автомата, $\bar{q} \in Q = \{0, 1\}$, Q — множество состояний автомата. На пересечении строки- x и столбца- q стоит пара (θ, σ) , где $\theta = \theta(q, x)$ — значение функции переходов на паре (q, x) , а $\sigma = \sigma(q, x)$ — значение функции выходов на паре (q, x) .

Таким образом, согласно алгоритму существует два автоматных отображения f_1 и f_2 , реализуемых, соответственно, автоматами A_1 и A_2 , для каждого из которых имеет место, в частности, данное соответствие $\bar{x} \rightarrow \bar{y}$.

Проверим, что это действительно так. Для этого пропустим объект $\bar{x}$ через автоматы A_1 и A_2 и убедимся, что в обоих случаях на выходе будет $\bar{y}$. Изобразим развертки во времени вычисления автоматами при прохождении через них объекта $\bar{x}$.

Через A_1 :

$$\begin{array}{cccccccccccc|c}
 11 & 10 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & t \\
 \hline
 & 1 & 3 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 2 & 0 & 3 & 1 & x_t \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & q_t \\
 & 4 & 4 & 0 & 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 3 & 4 & y_t
 \end{array} \quad (5)$$

Через A_2 :

11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	t	
	1	3	0	0	1	2	2	2	0	3	1		x_t
1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0		q_t
	4	4	0	3	2	1	2	1	0	3	4		y_t

(6)

Символ t обозначает автоматное время и одновременно для строк x_t и y_t номер разряда; начальное состояние автоматов в обоих случаях $q = 0$.

Результаты работы автоматов прочитываются в нижних строках разверток (5) и (6), в обоих случаях совпадают и оказываются равными объекту $\bar{y}$, как и должно быть.

Тот факт, что алгоритм выделил в классе ${}_0A_0$ два автомата A_1 и A_2 , означает, что информации, заложенной во фрагменте соответствия $\bar{x} \rightarrow \bar{y}$, недостаточно для однозначного выделения автомата. Чтобы однозначно найти автомат в классе ${}_0A_0$, дополним соответствие $\bar{x} \rightarrow \bar{y}$ в 11-ом разряде и перейдем к новому соответствию:

11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	t	
0	1	3	0	0	1	2	2	2	0	3	1		x_t
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		↓
3	4	4	0	3	2	1	2	1	0	3	4		y_t

(7)

Пропустим объект $\bar{x}_1 = 01300122203 \underset{0}{1}$ через автоматы A_1 и A_2 и посмотрим, что получится на их выходах. При прохождении $\bar{x}_1$ через A_1 развертка (5) пополнится лишь 12-ым тактом:

12	11	10	...		...	1	0	t	
	0	1				3	1		x_t
0	1	0				1	0		q_t
	3	4				3	4		y_t

(8)

Как видно, в 11-ом такте, в полном соответствии с (7), получился результат $y = 3$, т.е. автомат A_1 реализует соответствие $\bar{x}_1 \rightarrow \bar{y}_1$, где $\bar{y}_1 = 34403212103 \underset{0}{4}$.

При прохождении $\bar{x}_1$ через A_2 будем иметь аналогично:

12	11	10	...		...	1	0	t	
	0	1				3	1		x_t
0	1	0				1	0		q_t
	0	4				4	4		y_t

(9)

Но на этот раз при $t = 11$ автомат A_2 вырабатывает сигнал $y'_{11} = 0$, отличный от требуемой цифры 3:

$$\bar{x}_1 \xrightarrow{A_2} \bar{y}'_1 \neq \bar{y}_1 \quad (10)$$

Схема (10) констатирует, что автомат A_2 не реализует соответствие $\bar{x}_1 \rightarrow \bar{y}_1$, и, таким образом, существует лишь один автомат, A_1 (рис. 4), реализующий соответствие $\bar{x}_1 \rightarrow \bar{y}_1$, а значит, в предположении, что соответствие $\bar{x}_1 \rightarrow \bar{y}_1$ – репрезентативное, существует лишь одно автоматное отображение f_1 , для которого $\bar{x}_1 \rightarrow \bar{y}_1$. Так по одному соответствию можно найти все автоматное отображение.

Если бы мы при $t=11$ потребовали, скажем, соответствия цифр: $\begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 1 & 2 & 4 \end{matrix}$ (а также еще некоторых), то мы не нашли бы ни одного автомата, реализующего соответствие $\bar{x} \rightarrow \bar{y}$ с

указанными соответствиями в 11-ом разряде. В таком случае алгоритм перешел бы к поиску АВУ в классах ${}_1A_0$, ${}_0A_1$ и т.д.

Факт построения автомата A_1 по соответствию $\bar{x}_1 \rightarrow \bar{y}_1$ можно интерпретировать как процесс обучения, с которым синтез A_1 по соответствию $\bar{x}_1 \rightarrow \bar{y}_1$ имеет большое сходство.

Действительно, в мозгу школьника при обучении его, скажем, операции сложения после выполнения им *конечного* числа примеров формируется нечто, позволяющее ему в дальнейшем решить *любой* пример на выполнение операции сложения.

Здесь мы имеем аналогию. Через внешний конструктор, в котором содержится алгоритм синтеза по фрагментам отображений, пропускается *конечное* число соответствий (в рассмотренном примере одно: $\bar{x}_1 \rightarrow \bar{y}_1$), и в результате формируется структура (автомат A_1), позволяющая найти *любое* другое соответствие автоматного отображения f_1 .

Конечно, мы не утверждаем, что в мозгу происходит буквально то же самое, мы лишь подчеркиваем аналогию. Более того, мы не будем стремиться моделировать природу, не только по незнанию того, как она это делает, но и потому, что количественного эффекта при достижении одной и той же цели мы чаще всего добиваемся на путях, отличных от тех, которым следует природа.

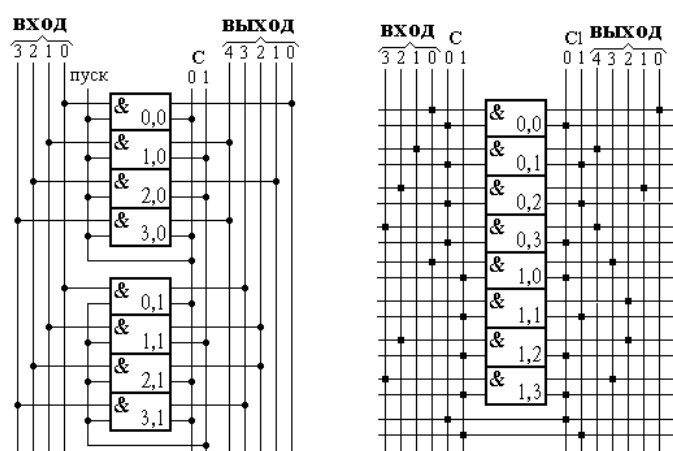


Рис. 4. Каноническая В-схема автомата A_1 (слева) и ее двойник (справа), выполненный на шаблоне заготовки

Всего на такого типа шаблоне заготовки возможно 2^{234} различных вариантов соединений. Показан один из них.

Эффект снижения роли программ в В-компьютерах

Рассмотрим типичный линейный кусок программы, исполняемый на А-компьютере (см. рис. 5). Программа содержит блоки, в которых происходят вычисления функций. Вычисление происходит программно. После завершения вычисления в блоке происходит передача управления в следующий блок, в котором происходит аналогичное. Обращаем внимание на то, что в каждом блоке вычисление происходит *программно*.

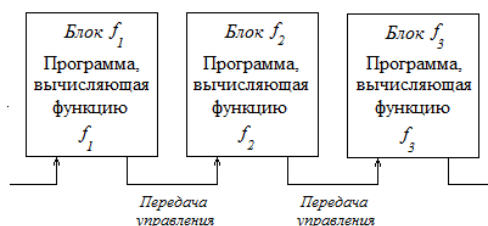


Рис. 5. Линейная часть программы А-компьютера

Сравним эту ситуацию с аналогичной в В-компьютере. Изобразим эту же часть программы, но выполненную В-компьютером. Отличие состоит в том, что вычисление в блоках происходит не

программно, а с помощью устройств.

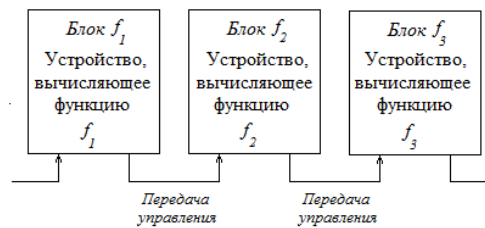


Рис. 6. Та же линейная часть программы, но выполненная В-компьютером

Сразу же обратим внимание на то, что эта часть программы будет выполнена В-компьютером быстрее, чем А-компьютером, поскольку вычисление функции устройством происходит быстрее, чем программное вычисление. Но не только на это обстоятельство обратим внимание, но также и на то, что значительная часть программной составляющей исчезла. Это именно то, что мы называли снижением роли программ в В-компьютерах. В перспективе можно вести речь о почти полном нивелировании роли программ в В-компьютерах. А что останется? Останется та часть программ, которая связана с управленческими функциями, то, что на рисунках обозначено как «передача управления». Но и это в перспективе может быть реализовано аппаратно, с помощью устройств.

Заключение

Приведенный краткий анализ достаточно убедительно показывает, что В-компьютеры имеют возможность неограниченно наращивать свою «железную массу», но не за счет однотипных ящиков, нагромождаемых в пределах определенного объема, а за счет синтеза разнообразных вычислительных устройств и последующей их интеграции в компьютер. Разнообразие вычислительных устройств, интегрированных в В-компьютер, свидетельствует о «развитости» В-компьютера, о его способности решать самые разные и сложные вычислительные задачи. Приведенные примеры показывают, что синтез вычислительных устройств, встраиваемых в В-компьютер, может быть осуществлен самим компьютером внутри самого себя, поскольку дело сводится к простановке точек на шаблонах заготовок — простейшей из всех возможных операций. Решение задачи о создании искусственного интеллекта может быть получено путем использования В-компьютеров, поскольку именно В-компьютеры позволяют избавиться от влияния человеческого фактора, проявляющего себя через программы, влияние которых в В-компьютерах имеют тенденцию к нивелированию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деев Г. Е., Ермаков С. В., Король Н. А., Перегуда А. И., Старков С. О. Компьютеры, ведущие вычисления в k -ичной системе счисления. *Супервычисления и математическое моделирование*. XVI Международная конференция. 3 – 7 октября 2016 года, г. Саров.
2. Деев Г. Е., Ламков А. В. *Абстрактные вычислительные устройства*. В 2 т. Т. 1. М.: Энергоатомиздат; 2004. 548 с.
3. Деев Г. Е. *Абстрактные вычислительные устройства*. В 2 т. Т. 2. М.: Энергоатомиздат; 2007. 332 с.
4. Деев Г. Е. *Теория вычислительных устройств*. Санкт-Петербург: Лань; 2019. 452 с.
5. Минский М. *Вычисления и автоматы*. М.: Мир; 1971. 362 с.
6. Rich E. *Artificial Intelligence*. New York: McGraw-Hill; 1983. 411 p.
7. Эндрю А. *Искусственный интеллект*. М.: Мир; 1985. 264 с.
8. *Вычислительные машины и мышление* / Под ред. Э. Фейгенбаума и Дж. Фельдмана. М.: Мир; 1967. 552 с.
9. Тьюринг А. *Может ли машина мыслить?* М.: Физматгиз; 1960. 112 с.
10. Рафаэл Б. *Думающий компьютер*. М.: Мир; 1979. 408 с.
11. Дрейфус Х. *Чего не могут вычислительные машины: критика искусственного разума*. М.: Прогресс; 1978. 336 с.
12. Тимофеев А. В. *Роботы и искусственный интеллект*. М.: Наука; 1978. 192 с.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-7

ПРОБЛЕМА НЕСТАЦИОНАРНОСТИ В ФИЗИКЕ И БИОФИЗИКЕ**Б. Г. Заславский¹, М. А. Филатов², В. В. Еськов³, Е. А. Манина²**¹ *Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов, Вашингтон, США*² *Сургутский государственный университет, Сургут, Российская Федерация, filatovmik@yandex.ru*³ *Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», Сургут, Российская Федерация*

Аннотация: необходимость изучения неустойчивых систем подчеркивал I. R. Prigogine, но за последние 40 лет эта проблема не рассматривается в науке. Однако за последние 25 лет была доказана статистическая неустойчивость параметров движения в биомеханике в виде эффекта Еськова–Зинченко. Подобные неустойчивые системы имеются и в неживой природе на Земле в виде систем регуляции климата и метеопараметров среды обитания человека. Эти системы в 1948 г. W. Weaver обозначил как системы третьего типа, они обладают особой статистической неустойчивостью, характерной для самоорганизующихся систем. В работе представлены основные свойства таких систем третьего типа и некоторые инварианты для их описания. Существенно, что их моделирование основано на ряде принципов квантовой механики. В частности, принципе неопределенности Гейзенберга и квантовой запутанности.

Ключевые слова: нестационарность, системы третьего типа, эффект Еськова–Зинченко, квантовая запутанность.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП) по теме № 0065-2019-0007 «36.20 Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления» (№ AAAA-A19-119011590093-3)).

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов: все процедуры, выполненные в исследовании с участием людей, соответствуют этическим стандартам институционального и/или национального комитета по исследовательской этике, Хельсинкской декларации 1964 года и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики.

Для цитирования: Заславский Б. Г., Филатов М. А., Еськов В. В., Манина Е. А. Проблема нестационарности в физике и биофизике. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):56–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-7.

NON-STATIONARY STATES IN PHYSICS AND BIOPHYSICS**Boris G. Zaslavsky¹, Mikhail A. Filatov², Valery V. Eskov³, Elena A. Manina²**¹ *Federal Food and Drug Administration, Washington, D.C., USA*² *Surgut State University, Surgut, Russian Federation, filatovmik@yandex.ru*³ *Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation*

Abstract: I. R. Prigogine emphasized the need to research unstable systems. However, for the last 40 years, this problem has not been studied well. Still, in the last 25 years, the statistical instability of biomechanical motion properties was proved as the Eskov–Zinchenko effect. Such unstable systems exist in the Earth’s inorganic nature, too, as the human habitat climate/weather regulation systems. In 1948 W. Weather called such systems “3rd kind systems”. They feature a special statistical instability peculiar to self-organizing systems. The study presents the key properties of such 3rd kind systems and some invariants that define these non-stationary systems. Significantly, the simulation is based on some quantum mechanics postulates. Particularly, these are the Heisenberg uncertainty principle, and the quantum entanglement principle.

Keywords: non-stationary state, 3rd kind systems, Eskov-Zinchenko effect, quantum entanglement.

Acknowledgements: this study is the 47 GP government order contracted to the System Analysis Research Institute, Russian Academy of Sciences, project No. 0065-2019-0007 36.20 Advancing Distribution System Simulation and Computation Methods (No. AAAA-A19-119011590093-3). The authors declare that there is no conflict of interest.

Compliance with ethical standards: all the studies that involved human participants comply with the appropriate institutional and/or national research ethics committee and have been performed in accordance with the ethical standards as laid down in the 1964 Declaration of Helsinki and its later amendments or comparable ethical standards.

Cite this article: Zaslavsky B. G., Filatov M. A., Eskov V. V., Manina E. A. Non-Stationary States in Physics and Biophysics. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(2):56–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-7.

Введение

В 1989 году I. R. Prigogine [1] впервые в истории науки обратил внимание на отсутствие в современной науке должного внимания в отношении нестабильных систем. Для них нет разработанной теории, и нет моделей для описания таких систем. К настоящему времени уже накопилось достаточно экспериментальных данных, которые позволяют представить некоторую классификацию таких нестабильных систем и построить некоторые теоретические модели для их описания.

Напомним, что W. Weaver [2] более 70 лет назад представил особую классификацию всех систем в природе. В нашей интерпретации речь идет фактически о детерминистских системах (*simplicity systems* — системы 1-го типа), стохастических (*nonorganized complexity* — системы 2-го типа) и системах третьего типа (СТТ) — *organized complexity*. Очевидно, что два первых типа систем — объект изучения современной науки, но для СТТ за эти более чем 70 лет ничего не было создано. К СТТ W. Weaver в первую очередь относил живые системы, но какими особыми свойствами обладают такие системы и почему они не могут быть объектом изучения функционального анализа и стохастики? На эти вопросы не были даны ответы ни W. Weaver, ни двумя нобелевскими лауреатами (I. R. Prigogine [1, 3], M. Gell-Mann [4]).

Для ответов на эти вопросы нам необходимо представить особые свойства СТТ и предложить формальный аппарат для их описания, который может быть основан на ряде принципов квантовой механики [5-7]. При этом подчеркнем, что речь идет не о динамическом хаосе, а об особом типе нестабильных систем. Это системы со статистической неустойчивостью любых параметров $x_i(t)$, образующих вектор состояния системы $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в m -мерном фазовом пространстве состояний (ФПС) [3-5]. Динамика поведения СТТ-complexity не может быть описана в рамках современной науки.

Общая проблема нестационарности

В живой и неживой природе существует огромное число объектов (систем), которые демонстрируют нестационарное поведение. Например, в 2009 году была обнаружена звезда KIC 8462852 (звезда Табби), которая демонстрировала особую нерегулярность как по светимости, так и по интервалам (периодам колебания) изменения этой светимости. В 2007 году были зарегистрированы быстрые радиовсплески (БРВ), которые также демонстрировали отсутствие какой-либо периодичности в своих характеристиках. На Земле также имеется много объектов, которые демонстрируют особую нестабильность. Она проявляется в отсутствии статистической устойчивости выборок вектора состояния системы $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в ФПС [3, 4, 6-8].

В 1989 году I. R. Prigogine [1] подчеркивал (см. Philosophy of instability) необходимость изучения таких нестабильных систем, но за эти 30 лет никакого прогресса в этой области не установлено. Очевидно, что само понятие «нестабильность» требует четкого математического определения, которое на сегодня отсутствует, точнее отсутствует классификация видов нестабильности. Общепринятое определение стационарного режима (СР) для любой динамической системы (в детерминизме), для вектора состояния динамической системы $x(t)$ в ФПС в виде $dx/dt=0$ и $x_i=const$ имеет крайне ограниченное применение при изучении СТТ [6-8]. Оно касается систем, которые описываются в рамках функционального анализа, и сразу скажем, что все живые системы (СТТ, по определению W. Weaver [2]) не

являются динамическими системами (в смысле детерминизма), т. е. для них $dx/dt \neq 0$ непрерывно (и постоянно) [8].

В стохастике существует понятие статистической устойчивости (неизменности), когда при многократных повторениях процесса при наблюдении многих выборок одной и той же переменной $x_i(t)$ мы будем наблюдать неизменность статистических функций распределения $f(x)$, их статистических характеристик (статистического среднего $\langle x \rangle$, статистической дисперсии (D_x^*) , спектральных плотностей сигнала — СПС, автокорреляций $A(t)$ и т. д.). Если $f(x)$, СПС, $A(t)$ и др. характеристики от выборки к выборке не изменяются, то в стохастике делается заключение о неизменности системы [3–5].

Однако в живой и неживой природе существуют системы, которые невозможно повторить не только в конце процесса (в виде выборок конечного состояния системы $x_i(t_k)$), но и в виде начальных параметров вектора $x(t_0)$. При этом любое динамическое уравнение имеет уникальный характер, т. к. следующее повторение динамики процесса приводит к другим уравнениям [3–5]. Это означает отсутствие задачи Коши, отсутствие причинно-следственных связей и отсутствие прогнозируемости не только $x(t_k)$, но и любых выборок конечного состояния $x(t_k)$ [6–8]. Именно такими свойствами обладают живые системы.

Такие системы непрерывно показывают $dx/dt \neq 0$, а их статистические функции $f(x)$, СПС, $A(t)$, другие характеристики два раза подряд не могут быть повторены произвольно [3–9]. Это статистически неустойчивые системы с некоторой самоорганизацией. Они не могут описываться в рамках функционального анализа (детерминизма) или стохастики. Для них необходимо создавать новую теорию и новые модели. Очевидно, что такая работа требует в первую очередь разработки новых инвариантов для оценки стационарных состояний (и нового понимания таких стационарных режимов — СР) и для оценки кинематики $x(t)$ в ФПС [3–5, 8]. Некоторые авторы [9–12] отмечают и неустойчивость в работе нейросетей мозга, которая приближается к хаосу СТТ [3–5].

Статистическая неустойчивость параметров в биомеханике и метеорологии

Ранее [3–5] мы отмечали, что в биомеханике любое движение имеет уникальный характер [13]. Это означает, что матрица парных сравнений выборок треморограмм (ТМГ) или теппинграмм (ТПГ) демонстрирует крайне малую долю стохастики (для ТМГ менее 5 %), т. е. мы наблюдаем статистический хаос для выборок ТМГ. Наши дальнейшие исследования показали, что аналогичный результат (низкая доля стохастики) наблюдается и для спектральных плотностей сигнала (СПС) в виде ТМГ, или ТПГ, или параметров ССС человека [14–15]. Например, в табл. 1 мы представляем матрицу парных сравнений СПС, которые были получены быстрым преобразованием Фурье от 15-ти ТМГ (от одного и того же испытуемого в его неизменном состоянии) [3–5].

Таблица 1

Матрица парного сравнения 15-ти СПС треморограмм одного испытуемого ГДВ при повторных экспериментах ($k_1 = 25$), по критерию Вилкоксона

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		,00	,95	,01	,00	,13	,77	,00	,00	,00	,00	,02	,68	,00	,58
2	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,08	,90	,00	,00	,00	,00
3	,95	,00		,01	,00	,15	,56	,00	,00	,01	,00	,48	,38	,00	,60
4	,01	,00	,01		,00	,00	,07	,00	,00	,00	,00	,00	,01	,00	,01
5	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,11	,74	,00	,00	,00	,00	,00	,00
6	,13	,00	,15	,00	,00		,17	,00	,00	,02	,00	,60	,13	,00	,29
7	,77	,00	,56	,07	,00	,17		,00	,00	,01	,00	,01	,66	,00	,75
8	,00	,00	,00	,00	,11	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
9	,00	,00	,00	,00	,74	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00
10	,00	,08	,01	,00	,00	,02	,01	,00	,00		,02	,06	,00	,00	,00
11	,00	,90	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,02		,00	,00	,00	,00
12	,02	,00	,48	,00	,00	,60	,01	,00	,00	,06	,00		,12	,00	,17
13	,68	,00	,38	,01	,00	,13	,66	,00	,00	,00	,00	,12		,00	,54
14	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00
15	,58	,00	,60	,01	,00	,29	,75	,00	,00	,00	,00	,17	,54	,00	

Было построено несколько сот подобных матриц для самих выборок ТМГ и ТПГ их СПС и $A(t)$ для более чем 100 испытуемых, и во всех случаях мы имели долю стохастики менее 25 %. Это означает, что число k_1 пар СПС, которые имеют критерий Вилкоксона $p \geq 0,05$, невелико. Отсутствует статистическая устойчивость выборок не только ТМГ или ТПГ, но и их СПС, $A(t)$, других статистических характеристик. Любая выборка в биомеханике будет уникальной (статистически неповторимой). Статистика тогда будет иметь исторический характер (прогнозы отсутствуют). Характерно, что это сейчас обозначено как эффект Еськова–Зинченко (ЭЕЗ) и этот ЭЕЗ распространен на многие другие параметры организма [7, 8, 13].

Подчеркнем, что к СТТ относятся не только живые системы, но и многие параметры климата, метеопараметры [3, 4]. В качестве примера представляем табл. 2 для температуры воздуха (за 15 лет, выборки за январь). В этой таблице представлены результаты статистического сравнения пар выборок параметров температуры воздуха T за 15 январей в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре (за 15 лет). Очевидно, что число пар выборок температур k , для которых критерий Вилкоксона $p \geq 0,05$ (т. е. эти две сравниваемые выборки температуры могут иметь одну общую генеральную совокупность) невелико: $k_2=30$.

Таблица 2

Матрица парного сравнения выборок температуры T за месяц январь 1991–2009 гг., использовался критерий Вилкоксона (уровень значимости $p < 0,05$, число совпадений $k_2 = 30$)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
1991		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,62	,00	,00	,00	,00
1992	,00		,03	,01	,38	,50	,00	,98	,22	,15	,00	,00	,00	,80	,97
1993	,00	,03		,00	,05	,00	,37	,02	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
1994	,00	,01	,00		,11	,01	,00	,00	,20	,06	,04	,00	,00	,00	,00
1995	,00	,38	,05	,11		,71	,01	,66	,12	,59	,00	,00	,00	,76	,63
1996	,00	,50	,00	,01	,71		,00	,37	,98	,62	,01	,00	,00	,51	,32
1997	,00	,00	,37	,00	,01	,00		,01	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
1998	,00	,98	,02	,00	,66	,37	,01		,23	,05	,00	,00	,00	,56	,67
1999	,00	,22	,00	,20	,12	,98	,00	,23		,94	,00	,00	,00	,40	,08
2000	,00	,15	,00	,06	,59	,62	,00	,05	,94		,00	,00	,00	,01	,05
2001	,62	,00	,00	,04	,00	,01	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00
2002	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00
2003	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00
2004	,00	,80	,00	,00	,76	,51	,00	,56	,40	,01	,00	,00	,00		,97
2005	,00	,97	,00	,00	,63	,32	,00	,67	,08	,05	,00	,00	,00	0,97	

Сравнивая характерные таблицы 1 и 2 (из биомеханики и метеорологии), мы можем сделать общее заключение об отсутствии статистически устойчивых выборок треморограмм и температур окружающей человека среды. Иными словами, мы доказываем гипотезу Н. А. Бернштейна о «повторении без повторений» не только в живой природе, но и в неживой. Для этих двух разных систем мы имеем ЭЕЗ, т. е. отсутствует статистическая устойчивость выборок x_i исследуемого процесса [3–5, 14–15]. Более того, это все приближает к пониманию особых законов живой природы с позиций физики и кибернетики, о чем пытался говорить Е. Schrodinger и другие авторы. Очевидно, что создание новых моделей и новых инвариантов должно изменить ситуацию в биофизике и кибернетике (при изучении СТТ).

Все такие системы сейчас мы обозначаем как гомеостатические системы (ГС), т. е. они демонстрируют статистический хаос (доля стохастики для ТМГ менее 5 %, а для T — менее 30 %). Как тогда сравнивать такие процессы, как определять неизменность системы и ее реальное изменение, если и в якобы стационарном режиме все статистические функции $f(x)$, СПС, $A(t)$, другие статистические характеристики непрерывно и хаотически изменяются? Для всех таких ГС имеет место ЭЕЗ, и тогда необходимо создавать новые инварианты и новые методы моделирования стационарных режимов (СР) [3, 4].

Новые инварианты для гомеостатических систем

Еще раз подчеркнем, что современная стохастика не может описывать системы, которые якобы

находятся в неизменном состоянии, но их статистические функции, СПС, $A(t)$ будут непрерывно и хаотически изменяться от выборки к выборке. Отметим, что если у нас разные объекты исследований, например, регистрируем ТМГ у 15-ти разных испытуемых, то мы так же получаем матрицу парного сравнения выборок ТМГ, похожую на табл. 1. В этом случае мы можем говорить о потере однородности выборок. В случае с температурой мы можем взять 15 разных выборок за январь определенного года, но с разных географических территорий и получим таблицу, сходную с табл. 2.

Наличие малых k_1 (низкая доля стохастики) говорит о потере однородности группы. Иными словами, мы никогда не сможем получить однородную группу испытуемых в биомеханике или параметров в метеорологии. Как работать с такими выборками? Что такое для таких систем (СТТ — ГС) стационарные режимы и какие инварианты необходимо брать для доказательства наличия СР в таких СТТ — ГС? Ответы на эти вопросы следуют из аналогов квантовой механики в описании СТТ-complexity [4–6].

Напомним, что принцип неопределенности Гейзенберга фактически накладывает ограничения на фазовые координаты x_1 — перемещение (квантовой частицы, например) и $x_2 = dx_1/dt$ — скорость этого перемещения. Из неравенства Гейзенберга следует, что $\Delta x_1 \cdot \Delta P \geq h/(4\pi)$, где $P = x_2 \cdot m$. Если (при малых скоростях) масса m частицы неизменна, то мы имеем уравнение Гейзенберга только для фазовых координат: $\Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \geq h/(4\pi m) = Z_{min}^k$.

В случае с биомеханикой мы можем ввести аналог принципа Гейзенберга в виде: $Z_{max} \geq \Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \geq Z_{min}$, где Z_{max} и Z_{min} являются некоторыми константами для данного испытуемого, находящегося в определенном состоянии. Очевидно, что Z_{max} и Z_{min} не имеют ничего общего с Z_{max} и Z_{min} из квантовой механики, но это реальные константы, которые ограничивают наши фазовые координаты (x_1 — координата пальца, x_2 — скорость изменения $x_1(t)$). На плоскости вектора $x = x(t) = (x_1, x_2)^T$ в биомеханике мы имеем некоторые фазовые траектории (см. рис.) движения $x(t)$, которые характеризуют тремор (или любое другое движение человека) в фазовом пространстве состояний (ФПС) [3–5].

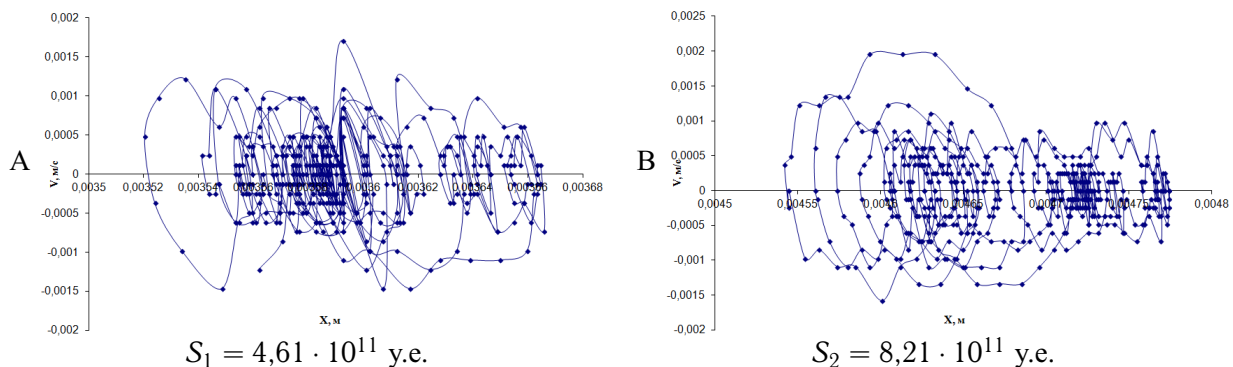


Рис. Фазовые траектории и их ПА для одного и того же испытуемого: *A* — в период релаксации; *B* — в период нагрузки, $F=3H$

Рис. показывает характер фазовых траекторий ТМГ одного и того же испытуемого, находящегося в двух разных физических состояниях (тремор пальца без груза, $F_1=0$ и тремор пальца с грузом, $F_2=3H$). В двух разных физических состояниях биомеханическая система демонстрирует два разных фазовых портрета. Причем каждая фазовая траектория происходит внутри прямоугольника со сторонами Δx_1 (вариационный размах по x_1) и Δx_2 — площади S_1 и S_2 , внутри которых непрерывно и хаотически движется вектор $x(t)$ [14–15].

Ограниченная область ФПС, внутри которой движется (хаотически и непрерывно) вектор состояния $x(t)$ гомеостатической системы, мы обозначаем как псевдоаттрактор (ПА) (или квазиаттрактор (КА) Еськова). Точное определение ПА (или КА) мы представляем ниже, а сейчас только отметим, что площадь ПА и координаты его центра (см. рис.) являются инвариантами. Они статистически сохраняются для одной и той же ГС, находящейся в неизменном (с позиции новой теории хаоса-самоорганизации (ТХС) [3–5]) состоянии.

При оценке состояния (на рис. мы переходим от ПА¹ без груза к ПА² с грузом) системы наблюдается изменение площади S для ПА и изменяются координаты x^c_i центра ПА. Подчеркнем еще

раз, что функции $f(x)$, СПС, $A(t)$ и т. д. непрерывно и хаотически изменяются. Представим определение ПА (или КА Еськова) в рамках функционального анализа.

Формально определение ПА имеет следующий вид: ПА — это ненулевое подмножество Q фазового m -мерного пространства D динамической биологической системы (СТТ), являющееся объединением всех значений $f(t_i)$ состояния биологической динамической системы на конечном отрезке времени $[t_j, \dots, t_e]$ ($j < e$, где t_j — начальный момент времени, а t_e — конечный момент времени состояний биосистем):

$$Q = \bigcup_{l=1}^m \bigcup_{i=j}^e f^l(t_i), \quad Q \neq 0; \quad Q \in D, \quad (1)$$

где m — количество координат x_i пространственных измерений.

Для иллюстрации неизменности (статистической устойчивости) выборок параметров площади S для ПА в случае с биомеханикой (регистрацией ТМГ) мы представляем табл. 3. Здесь представлены результаты расчетов площади S для ПА одного и того же испытуемого, находящегося в двух разных физических состояниях: без нагрузки на конечность ($F_1=0$) и с нагрузкой ($F_2=3$ Н). Очевидно, что после 15-ти повторных регистраций ТМГ у одного испытуемого мы имеем существенные различия между средним значением $\langle S_1 \rangle = 3,02$ у. е. (при $F_1=0$) и средним значением $\langle S_2 \rangle = 4,93$ у. е. (при $F_2=3$ Н) для одного и того же испытуемого. Площади S для ПА статистически устойчивы и существенно различаются.

Таблица 3

Значение площадей псевдоаттракторов S выборок треморограмм одного и того же испытуемого

	$S_1 \cdot 10^8$ у. е., без нагрузки	$S_2 \cdot 10^8$, у. е., с нагрузкой $F_2 = 3$ Н
1	5,78	3,55
2	2,29	3,87
3	1,42	5,74
4	3,89	2,92
5	1,61	6,82
6	3,03	5,71
7	3,86	3,67
8	1,69	4,77
9	1,77	6,78
10	6,27	7,24
11	1,92	5,06
12	2,02	5,28
13	3,42	2,91
14	3,98	6,24
15	2,27	3,36
$\langle S \rangle$	3,02	4,93
Критерий Вилкоксона, значимость различий функций $f(x)$ $p=0,01$		

В целом, в фазовых координатах x_1 и $x_2 = dx_1/dt$ мы имеем в биомеханике инварианты (в виде площади псевдоаттрактора S) для одного и того же испытуемого. Изменение физического статуса (переход к F_2) приводит к изменению площади S . Подчеркнем, что при неизменности состояния биосистемы все статистические характеристики хаотически и постоянно изменяются (см. табл. 1 и рис.).

Таким образом, мы доказываем отсутствие инвариант для параметров биосистем в рамках стохастичности (все выборки $x(t)$ непрерывно и хаотически изменяются), что накладывает ограничения дальнейшего применения стохастичности в биомеханике и изучении электрогенераторных биосистем [9–12]. С другой стороны появляются новые количественные характеристики, которые будут инвариантами для реально (в биологическом смысле) стационарных режимов различных биосистем. Очевидно, что вся биофизика и биоклибернетика сейчас нуждаются в создании новой теории и новых моделей в описании СТТ-complexity, особых гомеостатических систем со статистической неустойчивостью выборок $x(t)$ [13, 16].

Заключение

Проблема в изучении статистической устойчивости выборок параметров в биомеханике и теории электрогенеза переходит в особую (новую) плоскость. Сейчас уже твердо доказано отсутствие

статистической устойчивости выборок параметров треморограмм, теппинграмм (а также многих биоэлектрических процессов, которые обеспечивают регуляцию движений, например, электромиограмм и электроэнцефалограмм). Нет повторений не только статистических функций распределения $f(x)$ выборок $x_i(t)$, но и их спектральных плотностей сигнала, автокорреляций и т. д. для других параметров СТТ-*complexity* [14–16].

Все это подводит нас к выводу об окончании дальнейшего применения методов стохастики в оценке биомеханических параметров (и электрогенераторных систем), что так широко сейчас используется в биофизике, теории электрогенеза, науках о мозге. Возникает необходимость создания новых инвариантов, новых моделей и новой теории для описания систем третьего типа (по классификации W. Weaver). С этих позиций мы предлагаем ввести аналог принципа неопределенности Гейзенберга в описании таких неустойчивых систем. В этом случае параметры псевдоаттракторов сохраняются и мы можем регистрировать статические состояния СТТ или их эволюцию (кинематику в фазовых пространствах состояний).

При кинематике СТТ-*complexity* мы наблюдаем движение центра ПА в ФПС или изменение объема ПА. Сейчас разрабатываются критерии для оценки скорости и ускорений в кинематике СТТ (в ФПС), что позволит избежать проблем, которые связаны со статистической неустойчивостью выборок $x(t)$ в виде эффекта Еськова–Зинченко [14–15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Prigogine I. R. The Philosophy of Instability. *Futures*. 1989;396–400.
2. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36(4):536–544.
3. 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.
4. Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Eskov V. M., Vokhmina Yu. V. Phenomenon Of Statistical Instability Of The Third Type Systems – Complexity. *Technical Physics*. 2017;62(11):1611–1616.
5. Eskov V. V., Filatova D. Yu., Ilyashenko L. K., Vochmina Yu. V. Classification of Uncertainties in Modeling of Complex Biological Systems. *Moscow University Physics Bulletin*. 2019;74(1):57–63.
6. Zilov V. G., Eskov V. M., Khadartsev A. A., Eskov V. V. Experimental Verification of the Bernstein Effect “Repetition without Repetition”. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2017;163(1):1–5.
7. 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.
8. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Eskov V. V., Eskov V. M. Experimental Study of Statistical Stability of Cardiointerval Samples. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2017;164(2):115–117.
9. Churchland M. M., Shenoy K. V. Temporal Complexity and Heterogeneity of Single-Neuron Activity in Premotor and Motor Cortex. *Journal of Neurophysiology*. 2007;97:4235–4257.
10. Churchland M. M., Cunningham J. P., Kaufman M. T., Foster J. D., Nuyujukian P., Ryu S. I., Shenoy K. V. Neural Population Dynamics during Reaching. *Nature*. 2012;487(7405):51–56.
11. Albert S. T., Hadjiosif A. M., Jang J., Zimnik A. J., Soteropoulos D. S., Baker S. N., Churchland M. M., Krakauer J. W., Shadmehr R. Postural Control of Arm and Fingers through Integration of Movement Commands. *Elife*. 2020;9: e52507.
12. Sussillo D., Churchland M. M., Kaufman M. T., Shenoy K. V. A Neural Network That Finds a Naturalistic Solution for the Production of Muscle Activity. *Nature. Neuroscience*. 2015;18(7):1025–1033.
13. Filatova O. E. Standardizing Measurements of the Parameters of Mathematical Models of Neural Networks. *Measurement Techniques*. 1997;40(1):55–59.
14. Filatova D. Yu., Bashkatova Y. V., Melnikova E. G., Shakirova L. S. Homogeneity of the Parameters of the Cardiointervals in School Children after North-South Travel. *Human Ecology*. 2020;1:6–10. (In Russ.)
15. Filatova O. E., Gudkov A. B., Eskov V. V., Chempalova L. S. The Concept of Uniformity of a Group in Human Ecology. *Human Ecology*. 2020;2:40–44. (In Russ.)
16. 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.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jsyb.ru.

Адрес учредителя и издателя:

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1. Телефон: +7 (495) 718-21-10.

Дата выхода в свет 30.06.2020.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 5,1. Уч.-изд. л. 7,5.

Цена свободная.