

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**



*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

*Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля*

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и нанoeлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств. Управление в организационных системах*

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества

12+

www.rtf-mirea.ru



11(3) 2023



ISSN 2782-3210 (Print)
ISSN 2500-316X (Online)

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
- Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
- Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
- Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
- Аналитическое приборостроение и технологии
- Математическое моделирование
- Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств. Управление в организационных системах
- Управление качеством продукции. Стандартизация
- Мировоззренческие основы технологии и общества
- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
- Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing
- Modern radio engineering and telecommunication systems
- Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics
- Analytical instrument engineering and technology
- Mathematical modeling
- Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems
- Product quality management. Standardization
- Philosophical foundations of technology and society

Russian Technological Journal
2023, том 11, № 3

Russian Technological Journal
2023, Vol. 11, No. 3

<https://www.rtj-mirea.ru>



Russian Technological Journal 2023, том 11, № 3

Дата опубликования 31 мая 2023 г.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радио-технических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

Периодичность: один раз в два месяца.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 г. издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026), а с января 2016 г. по июль 2021 г. под названием «Российский технологический журнал» (ISSN 2500-316X).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» 119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук, индексируется в РГБ, РИНЦ, eLibrary, Соционет, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, президент ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (ПТУ МИРЭА), Москва, Россия.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией	к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор	д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор	А.С. Алексеенко
Технический редактор	Д.В. Трофимова

119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 - 81733 от 19.08.2021 г. СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

<https://www.rtlj-mirea.ru>

Russian Technological Journal 2023, Vol. 11, No. 3

Publication date May 31, 2023.

The peer-reviewed scientific and technical journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Periodicity: bimonthly.

The journal was founded in December 2013. The titles were «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026) and «Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal» from January 2016 until July 2021 (ISSN 2500-316X).

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution of Higher Education
«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia.

The journal is included into the List of peer-reviewed science press of the State Commission for Academic Degrees and Titles of Russian Federation. The Journal is included in Russian State Library (RSL), Russian Science Citation Index, eLibrary, Socionet, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

Editor-in-Chief:

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, President of MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Editorial staff:

Managing Editor	Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor	Dr. Sci. (Eng.), Prof. Gennady V. Kulikov
Executive Editor	Anna S. Alekseenko
Technical Editor	Darya V. Trofimova

86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

The registration number ПИ № ФС 77 - 81733 was issued in August 19, 2021 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media of Russia.

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич	д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Банис Юрас Йонович	хабилированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banyas@ff.vu.lt
Бетелин Владимир Борисович	академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
Боков Алексей Алексеевич	д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Вахрушев Сергей Борисович	д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Гуляев Юрий Васильевич	академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Жуков Дмитрий Олегович	д.т.н., профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Кимель Алексей Вольдемарович	к.ф.-м.н., профессор, Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды. Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Крамаров Сергей Олегович	д.ф.-м.н., профессор, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Новиков Дмитрий Александрович	академик РАН, д.т.н., директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, https://orcid.org/0000-0002-9314-3304 , novikov@ipu.ru
Перно Филипп	Dr. Sci. (Electronics), профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Романов Михаил Петрович	д.т.н., профессор, директор Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Савиных Виктор Петрович	академик РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва, Россия. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Соболевский Андрей Николаевич	д.ф.-м.н., директор Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, http://orcid.org/0000-0002-3082-5113 , sobolevski@iitp.ru
Сюй Ли Да	академик Европейской академии наук, Российской инженерной академии и Инженерной академии Армении, Dr. Sci. (Systems Science), профессор, Университет Олд Доминион, Норфолк, Соединенные Штаты Америки. Scopus Author ID 13408889400, https://orcid.org/0000-0002-5954-5115 , lxu@odu.edu
Харин Юрий Семенович	академик Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Чаплыгин Юрий Александрович	академик РАН, д.т.н., профессор, член Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, президент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
Шпак Василий Викторович	к.э.н., зам. министра промышленности и торговли Российской Федерации, Министерство промышленности и торговли РФ, Москва, Россия; доцент, Институт микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Editorial Board

Stanislav A. Kudzh	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Juras Banys	Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
Vladimir B. Betelin	Academician at the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
Alexei A. Bokov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Sergey B. Vakhrushev	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Yury V. Gulyaev	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Dmitry O. Zhukov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Alexey V. Kimel	PhD (Phys.-Math.), Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Sergey O. Kramarov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Surgut State University, Surgut, Russia. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Dmitry A. Novikov	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, https://orcid.org/0000-0002-9314-3304 , novikov@ipu.ru
Philippe Pernod	Dr. Sci. (Electronics), Professor, Dean of Research of Centrale Lille, Villeneuve-d'Ascq, France. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Mikhail P. Romanov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Viktor P. Savinykh	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Andrei N. Sobolevski	Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director of Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Moscow, Russia. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, http://orcid.org/0000-0002-3082-5113 , sobolevski@iitp.ru
Li Da Xu	Academician at the European Academy of Sciences, Russian Academy of Engineering (formerly, USSR Academy of Engineering), and Armenian Academy of Engineering, Dr. Sci. (Systems Science), Professor and Eminent Scholar in Information Technology and Decision Sciences, Old Dominion University, Norfolk, VA, the United States of America. Scopus Author ID 13408889400, https://orcid.org/0000-0002-5954-5115 , lxu@odu.edu
Yury S. Kharin	Academician at the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Yuri A. Chaplygin	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Member of the Departments of Nanotechnology and Information Technology of the RAS, President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
Vasilii V. Shpak	Cand. Sci. (Econ.), Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation, Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Moscow, Russia; Associate Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- А.С. Албычев, С.А. Кудж*
7 Среда исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения цифровой валюты центрального банка
- С.О. Крамаров, О.Р. Попов, И.Э. Джариев, Е.А. Петров*
17 Динамика формирования связей в сетях, структурированных на основе прогностических терминов

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- Г.В. Куликов, С.Х. Данг, А.Г. Куликов*
30 Влияние погрешностей системы синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

- В.Р. Билык, К.А. Брехов, М.Б. Агранат, Е.Д. Мишина*
38 Дисперсия оптических характеристик кристалла Si:PbGeO в терагерцовом диапазоне
- С.И. Советов, С.Ф. Тюрин*
46 Метод синтеза логического элемента, реализующего несколько функций одновременно

Математическое моделирование

- А.Е. Александров, С.П. Борисов, Л.В. Бунина, С.С. Быковский, И.В. Степанова, А.П. Титов*
56 Статистическая модель оценки надежности систем неразрушающего контроля на основе решения обратных задач
- Э.М. Карташов*
70 Развитие обобщенных модельных представлений теплового удара для локально-неравновесных процессов переноса теплоты
- И.Г. Лебо*
86 Численное моделирование экспериментов по взаимодействию мощных ультрафиолетовых лазерных импульсов с конденсированными мишенями

Мировоззренческие основы технологии и общества

- Nadezhda I. Chernova, Ekaterina A. Ivanova, Nadezhda B. Bogush, Nataliya V. Katakhova*
104 Technology for determining non-humanities university students' cognitive-and-psychological characteristics

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- Alexander S. Albychev, Stanislav A. Kudzh*
7 Development of a research environment for the operational and computational architecture of central bank digital currency software
- Sergey O. Kramarov, Oleg R. Popov, Ismail E. Dzhariev, Egor A. Petrov*
17 Dynamics of link formation in networks structured on the basis of predictive terms

Modern radio engineering and telecommunication systems

- Gennady V. Kulikov, Xuan Khang Dang, Alexey G. Kulikov*
30 Effect of synchronization system errors on the reception noise immunity of amplitude-phase shift keyed signals

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- Vladislav R. Bilyk, Kirill A. Brekhov, Mikhail B. Agranat, Elena D. Mishina*
38 Dispersion of optical constants of Si:PbGeO crystal in the terahertz range
- Stanislav I. Sovetov, Sergey F. Tyurin*
46 Method for synthesizing a logic element that implements several functions simultaneously

Mathematical modeling

- Alexander E. Alexandrov, Sergey P. Borisov, Ludmila V. Bunina, Sergey S. Bikovsky, Irina V. Stepanova, Andrey P. Titov*
56 Statistical model for assessing the reliability of non-destructive testing systems by solving inverse problems
- Eduard M. Kartashov*
70 Developing generalized model representations of thermal shock for local non-equilibrium heat transfer processes
- Ivan G. Lebo*
86 Mathematical modeling of experiments on the interaction of a high-power ultraviolet laser pulse with condensed targets

Philosophical foundations of technology and society

- Nadezhda I. Chernova, Ekaterina A. Ivanova, Nadezhda B. Bogush, Nataliya V. Katakhova*
104 Technology for determining non-humanities university students' cognitive-and-psychological characteristics

УДК 004
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-7-16>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Среда исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения цифровой валюты центрального банка

А.С. Албычев^{1, 2, @},
С.А. Кудж²

¹ Федеральное казначейство Министерства финансов Российской Федерации, Москва, 101000 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: albychev@mirea.ru

Резюме

Цели. Внедрение и разработка информационно-вычислительной архитектуры и информационного обеспечения цифровой валюты центрального банка (ЦВЦБ) страны основываются на выборе программно-аппаратной платформы, включая технологии и способы взаимодействия элементов вычислительного комплекса. Внедрение технологий ЦВЦБ существенно зависит как от операционно-вычислительной архитектуры, так и от технологических характеристик конкретной реализации информационного обеспечения цифровой валюты, что определяет необходимость разработки соответствующей среды исследований. Цель статьи – разработка инфраструктуры среды экспериментальных исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения ЦВЦБ.

Методы. Развитие цифровых технологий не сформировало стек реализации ЦВЦБ, а комплекс технологических реализаций находится в разработке во многих странах мира. Основой для формирования программно-аппаратного комплекса информационного обеспечения являются теоретические и экспериментальные исследования современных инструментов цифрового управления транзакциями.

Результаты. Рассмотрены архитектурные и технологические компоненты, составляющие операционно-вычислительную среду цифровой валюты центрального банка: операционно-вычислительные архитектуры, блокчейн-технологии, алгоритмы консенсуса, формы представления цифровых валют. Представлено 5 вариантов операционно-вычислительных архитектур ЦВЦБ. Проведено исследование информационных моделей взаимодействия участников транзакций ЦВЦБ, направленных на установление степени влияния архитектурного решения на характеристики вычислительного комплекса информационного обеспечения. Проанализированы особенности цифровых валют в форме аккаунтов и токенов.

Выводы. Разработана инфраструктура среды исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения ЦВЦБ. Созданы предпосылки для комплексного анализа технологических характеристик операционно-вычислительной среды ЦВЦБ. Проведен анализ вариантов операционно-вычислительных архитектур. В результате анализа сформирован сводный перечень характеристик приведенных архитектур. В зависимости от требований, предъявляемых к ЦВЦБ, на основе этого перечня может быть выбрана наиболее адекватная операционно-вычислительная архитектура.

Ключевые слова: цифровая валюта, цифровая валюта центрального банка, блокчейн, алгоритм консенсуса, архитектура цифровой валюты

• Поступила: 20.03.2023 • Доработана: 14.04.2023 • Принята к опубликованию: 20.04.2023

Для цитирования: Албычев А.С., Кудж С.А. Среда исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения цифровой валюты центрального банка. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):7–16. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-7-16>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Development of a research environment for the operational and computational architecture of central bank digital currency software

Alexander S. Albychev ^{1, 2, @},
Stanislav A. Kudzh ²

¹ The Federal Treasury of the Ministry of Finance of the Russian Federation, Moscow, 101000 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: albychev@mirea.ru

Abstract

Objectives. The development and implementation of information and computing architecture and information support for a state central bank digital currency (CBDC) is based on the selection of a software and hardware platform, including technologies and methods for supporting interaction between the elements of the computing complex. The implementation of CBDC technologies significantly depends both on the operational and computing architecture, as well as on the technological characteristics of the means for implementing digital currency information support, which determines the need to develop an appropriate research environment. Thus, the present study sets out to develop an infrastructure for the experimental research environment of the operational and computing architecture used to provide information support for the CBDC.

Methods. Digital technologies required for forming an CBDC implementation stack are under development in many countries of the world. The basis for the formation of a software and hardware complex for providing CBDC information support is comprised of theoretical and experimental studies into contemporary digital transaction management tools.

Results. The main architectural and technological components that make up the CBDC operational and computing environment comprise operational and computing architectures, blockchain technologies, consensus algorithms, and various forms of digital currencies. Five CBDC operational and computing architecture options are presented. Information models of interaction between the participants in transactions of the central bank digital currency were studied with the aim of establishing the effects of an architectural solution to the characteristics of the computing complex used to provide information support. Features of various digital currencies in the form of accounts and tokens were analyzed.

Conclusions. A research environment infrastructure for the CBDC operational and computing information support architecture has been developed. The prerequisites for a comprehensive analysis of the technological characteristics of the CBDC operational and computing environment are set out along with a comparison of operational and computing architecture variants. As a result of the analysis, a summary list of the characteristics of the studied architectures is drawn up. This provides for selecting the optimal operational and computing architecture depending on the requirements imposed on the CBDC.

Keywords: digital currency, central bank digital currency, blockchain, consensus algorithm, digital currency architecture

• Submitted: 20.03.2023 • Revised: 14.04.2023 • Accepted: 20.04.2023

For citation: Albychev A.S., Kudzh S.A. Development of a research environment for the operational and computational architecture of central bank digital currency software. *Russ. Technol. J.* 2023; 11(3):7–16. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-7-16>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий в области финансов, электронных платежей, цифровых валют и блокчейн-систем [1] привело к рассмотрению возможности выпуска суверенных государственных цифровых валют. Цифровые валюты центрального банка (ЦВЦБ) активно рассматриваются различными государствами как новая форма представления денежных средств наряду с существующими [2, 3]. ЦВЦБ находится под управлением центрального банка (ЦБ) страны и имеет соотношение 1:1 с национальной валютой.

При исследовании ЦВЦБ акцентируют внимание на различных характеристиках цифровой валюты [3, 4]. В некоторых работах на первый план выносятся вопросы производительности технологического обеспечения цифровых валют [5–7], т.е. возможности обработки определенного числа финансовых операций за отрезок времени. В других работах рассматривается обеспечение надежности хранения данных [3, 7, 8], защищенности от совершения несанкционированных операций с цифровой валютой [4, 7, 9], также исследователи рассматривают приватность [7, 9, 10] как один из аспектов ЦВЦБ.

Блокчейн-технологии [5, 11] применяются в цифровых валютах для обеспечения неподдельности истории транзакций. В свою очередь, алгоритмы обеспечения консенсуса [7, 12, 13] нужны для защиты от недобросовестного поведения одного из участников в блокчейн-сети. Иными словами, в ситуации отсутствия единого источника достоверной информации появляется потребность в алгоритме консенсуса, который бы позволил этого избежать.

Как правило, в работах исследуются два способа хранения данных цифровых валют: аккаунты и токены [8, 9, 14–16]. Первая форма хранения данных подразумевает, что у владельца аккаунта есть некоторое число, отражающее текущий баланс счета, а финансовые операции заключаются в изменении соответствующего числа у участников транзакции. Токены описаны менее детально, но в целом

их можно представить как связку из уникального идентификатора токена и номинала. Каждому токенту устанавливается текущий владелец, например, с помощью уникального идентификатора владельца. Финансовые операции в этом случае заключаются в изменении уникального идентификатора владельца для одного или нескольких токенов.

В ряде работ [7, 14, 17] отмечено, что одним из основных вопросов при разработке ЦВЦБ является выбор операционно-вычислительной архитектуры. Операционно-вычислительная архитектура описывает участников системы, обеспечивающей функционирование цифровой валюты, и связи между ними. В некоторых работах используется другой, более широкий термин – дизайн ЦВЦБ [5, 18], включающий, в т.ч. и детали реализации цифровой валюты. При выборе операционно-вычислительной архитектуры важно учитывать как организационные требования, такие как соблюдение принципа «знай своего клиента» (KYC, Know Your Customer) [6, 14, 19], так и технические аспекты.

Цель статьи – разработка инфраструктуры среды исследований операционно-вычислительной архитектуры информационного обеспечения цифровой валюты центрального банка.

1. ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОПЕРАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АРХИТЕКТУР ЦВЦБ

Рассмотрим варианты операционно-вычислительных архитектур для обеспечения функционирования ЦВЦБ, их достоинства и недостатки.

1.1. Централизованная двухуровневая архитектура

В качестве наиболее простого варианта с точки зрения архитектуры может рассматриваться централизованная двухуровневая архитектура, где единственной организацией, обеспечивающей функционирование ЦВЦБ, будет ЦБ (схема представлена на рис. 1).

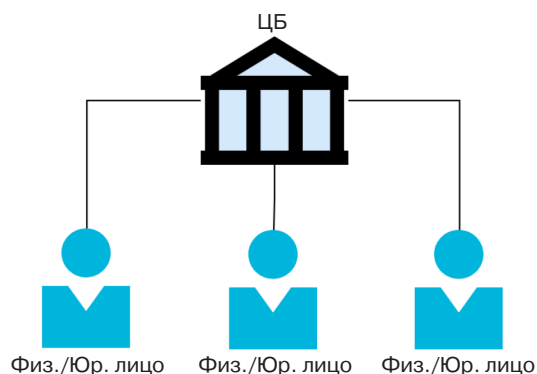


Рис. 1. Схема централизованной двухуровневой архитектуры ЦВЦБ

В таком варианте реализации ЦВЦБ единственным источником достоверной информации о движении и принадлежности средств является ЦБ, который при этом также осуществляет все технологическое обеспечение. ЦБ реализует как выпуск цифровой валюты, так и обработку транзакций. К достоинствам этого варианта можно отнести:

- 1) простоту в реализации, т.к. отсутствует необходимость в координировании работы нескольких организаций;
- 2) минимизацию задержек при выполнении транзакций ввиду отсутствия посредников;
- 3) ЦБ имеет доступ ко всем данным в реальном времени.

Однако такая операционно-вычислительная архитектура имеет значимые недостатки:

- 1) все техническое обеспечение ЦВЦБ должно предоставляться единым поставщиком – ЦБ;
- 2) организационное обеспечение ЦВЦБ также полностью возлагается на ЦБ (например, соответствие принципу КУС).

При такой операционно-вычислительной архитектуре, в зависимости от реализации технологического обеспечения ЦВЦБ, надежность хранения данных и защищенность может обеспечиваться с разным уровнем качества.

1.2. Централизованная трехуровневая архитектура

Дополнение двухуровневой архитектуры промежуточным звеном в виде частных банков формирует трехуровневую архитектуру. С помощью банков возможно снижение организационной нагрузки на ЦБ, т.к. они могут обеспечивать соблюдение принципа КУС. Схема трехуровневой архитектуры представлена на рис. 2.

Преимущества такой архитектуры заключаются в следующем:

- 1) простота в реализации, т.к. хранение данных и исполнение транзакций обеспечивается ЦБ;

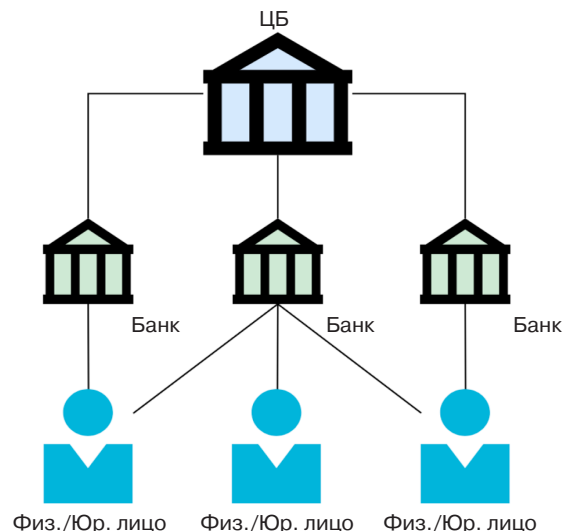


Рис. 2. Схема централизованной трехуровневой архитектуры ЦВЦБ

- 2) организационное обеспечение (соблюдение принципа КУС) распределяется между частными банками;
- 3) ЦБ имеет доступ ко всем данным в реальном времени;
- 4) ЦБ предоставляет банкам единый инструмент для осуществления транзакций.

Архитектура имеет недостаток: все техническое обеспечение ЦВЦБ должно предоставляться единым поставщиком – ЦБ.

Надежность хранения данных и защищенность в этом случае также сильно зависят от ЦБ, как и при двухуровневой архитектуре.

1.3. Четырехуровневая архитектура с единым оператором ЦВЦБ

В работе [7] предлагается несколько операционно-вычислительных архитектур, одна из которых состоит в передаче технологического обеспечения функционирования ЦВЦБ отдельной организации – оператору ЦВЦБ. Представленная на рис. 3 схема показывает связь между элементами архитектуры.

Во многом эта операционно-вычислительная архитектура схожа с трехуровневой централизованной архитектурой. Разделение ответственности между оператором ЦВЦБ, ЦБ и частными банками обладает следующими преимуществами:

- 1) ресурсоемкая задача исполнения транзакций обеспечивается оператором ЦВЦБ;
- 2) организационное обеспечение (соблюдение принципа КУС) распределяется между частными банками;
- 3) оператор ЦВЦБ предоставляет банкам единый инструмент для осуществления транзакций.

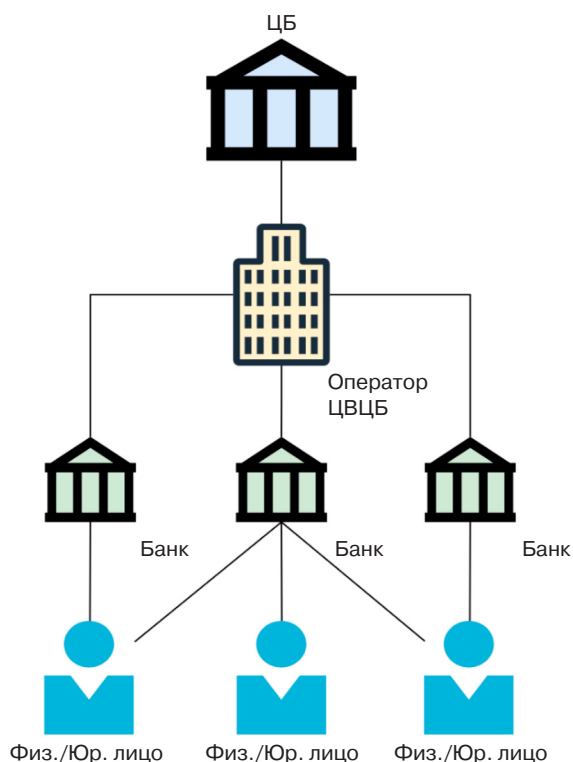


Рис. 3. Схема четырехуровневой архитектуры с единым оператором ЦВЦБ

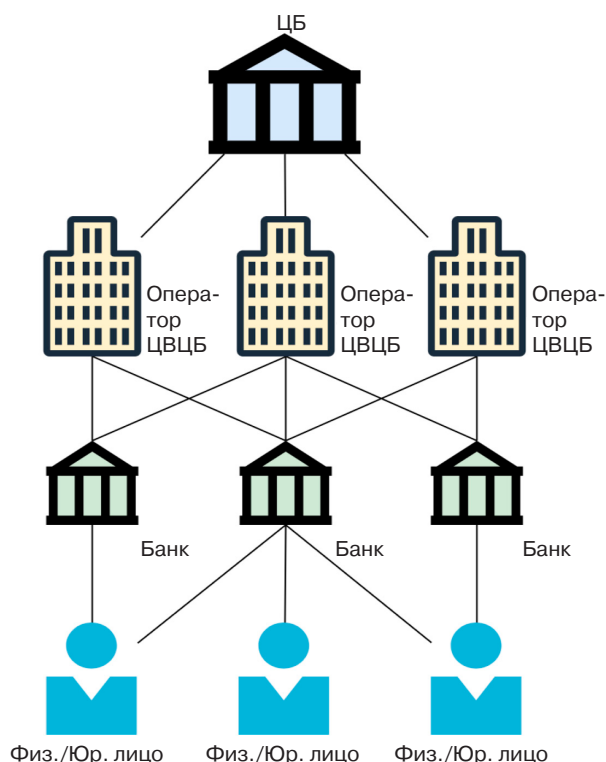


Рис. 4. Схема четырехуровневой архитектуры с сегментированием между несколькими операторами ЦВЦБ

Однако недостатки архитектуры значимы:

- 1) ЦБ не имеет доступа ко всем данным в реальном времени, требуется отдельный API для доступа к истории транзакций;
- 2) все данные транзакций находятся под контролем одной организации;
- 3) все техническое обеспечение ЦВЦБ должно предоставляться единым поставщиком — оператором ЦВЦБ.

Перечисленные недостатки позволяют предположить, что монополия на оперирование транзакциями может привести к недобросовестному использованию системы ЦВЦБ. Кроме того, как и в случае с описанными централизованными архитектурами, вопрос масштабирования системы процессинга транзакций становится задачей одной организации.

1.4. Четырехуровневая архитектура с сегментированием между несколькими операторами ЦВЦБ

Четырехуровневая архитектура с несколькими операторами ЦВЦБ (рис. 4), также предложенная в работе [7], решает ряд проблем, связанных с монополией на данные: устраняется единая точка отказа системы, повышается ее масштабируемость. Это достигается путем сегментирования данных ЦВЦБ.

Перечислим достоинства этой архитектуры:

- 1) организационное обеспечение (соблюдение принципа KYC) распределяется между частными банками;
- 2) вычислительная нагрузка по процессингу транзакций распределяется между несколькими операторами ЦВЦБ.

К недостаткам следует отнести:

- 1) усложнение доступа к истории транзакций для ЦБ ввиду ее сегментированности;
- 2) усложнение процессинга транзакций, связанных с вовлечением двух и более операторов;
- 3) более сложную логику взаимодействия банков с операторами из-за использования связи «многие ко многим».

Несмотря на отсутствие единой точки отказа, каждый сегмент при такой архитектуре является зоной ответственности только одной организации, и в случае сбоя данные о транзакциях могут быть утеряны. Также возможно недобросовестное использование системы ЦВЦБ со стороны оператора, хотя рамки ограничены одним сегментом.

1.5. Четырехуровневая архитектура с сегментированием и репликацией между несколькими операторами ЦВЦБ

С целью устранения недостатков операционно-вычислительной архитектуры с сегментированием

предлагается уточнение, включающее репликацию данных между операторами ЦВЦБ. Как показано на рис. 5, каждый сегмент должен быть реплицирован между несколькими операторами. Выполнение транзакции потребует достижения консенсуса между операторами ЦВЦБ, владеющими сегментом. В таком случае можно гибко подбирать алгоритм консенсуса, соответствующий предпочтениям по защищенности и производительности.

Чем больше операторов ЦВЦБ вовлечено в функционирование одного сегмента, тем выше надежность системы, но тем выше избыточность хранимых данных. Чем больше операторов ЦВЦБ участвует в обработке транзакции для обеспечения консенсуса, тем более устойчива система к недобросовестным действиям со стороны операторов. Однако при этом снижается производительность.

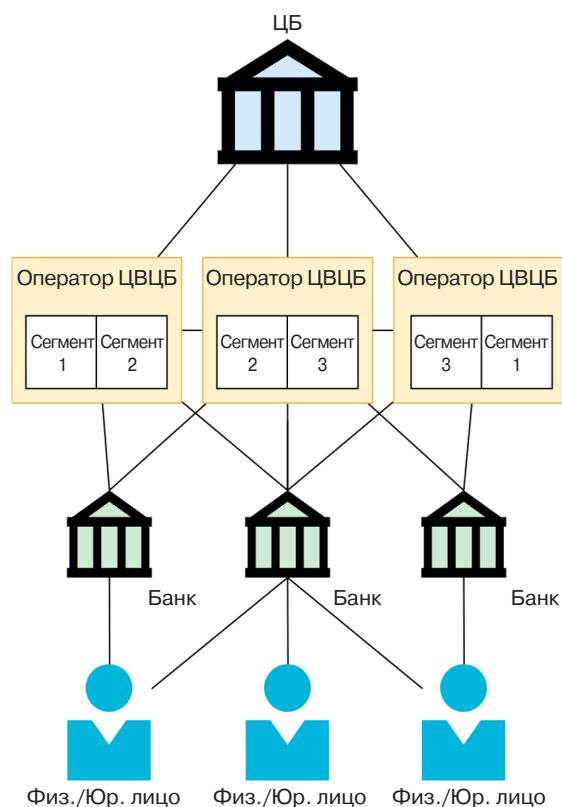


Рис. 5. Схема четырехуровневой архитектуры с сегментированием и репликацией между несколькими операторами ЦВЦБ

Рассматриваемая операционно-вычислительная архитектура имеет следующие достоинства:

- 1) организационное обеспечение (соблюдение принципа KYC), распределяется между частными банками;
- 2) вычислительная нагрузка по процессингу транзакций распределяется между несколькими операторами ЦВЦБ;
- 3) отключение оператора не приводит к потерям данных и доступности сервиса ЦВЦБ;

- 4) наличие алгоритма консенсуса при выполнении транзакций позволяет операторам взаимно проверять результаты для избежания недобросовестных действий.

Операционно-вычислительная архитектура имеет ряд недостатков:

- 1) усложнение доступа к истории транзакций для ЦБ по причине ее сегментированности;
- 2) усложнение процессинга транзакций, связанных с вовлечением двух и более операторов;
- 3) более сложную логику взаимодействия банков с операторами из-за использования связи «многие ко многим»;
- 4) повышенную ресурсоемкость процессинга транзакции и увеличения суммарного объема хранимых данных ввиду избыточности.

2. ИНФРАСТРУКТУРА СРЕДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленной задачи разработаем инфраструктуру среды исследований с применением технологий виртуализации [20].

В состав блокчейн-сети при этом будут входить несколько организаций, а каждая организация может иметь один и более узлов [21]. Тогда суммарный объем необходимых ресурсов центрального процессора, оперативной памяти и дискового пространства, необходимых для проведения эксперимента, можно рассчитать по формуле:

$$R_{\text{total}} = \sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^{N_i} (R_{ij} R_h + R_c),$$

где O – число организаций; N_i – число узлов в i -й организации; R_{ij} – объем ресурса, необходимый j -му узлу в i -й организации для функционирования; R_h – накладные расходы ресурса на работу гипервизора, пропорциональные выделяемому ресурсу; R_c – накладные расходы ресурса на работу гипервизора, необходимые для поддержания работы узла независимо от выделенного для него объема ресурса.

Так, для поддержания работы модели ЦВЦБ, содержащей 4 организации (в одной из которых 4 узла, а в трех других – по 2 узла), при условии, что требуемый узлам объем оперативной памяти инвариантен и равен 2, $R_h = 0$, а $R_c = 0.2$, потребуется 22 Гб оперативной памяти.

В случае реализации цифровой валюты в форме аккаунтов сами транзакции (без учета вычислительной сложности алгоритма консенсуса) имеют вычислительную сложность $O(1)$, т.к. изменения одного или двух скалярных значений являются тривиальными операциями. Однако при реализации цифровых

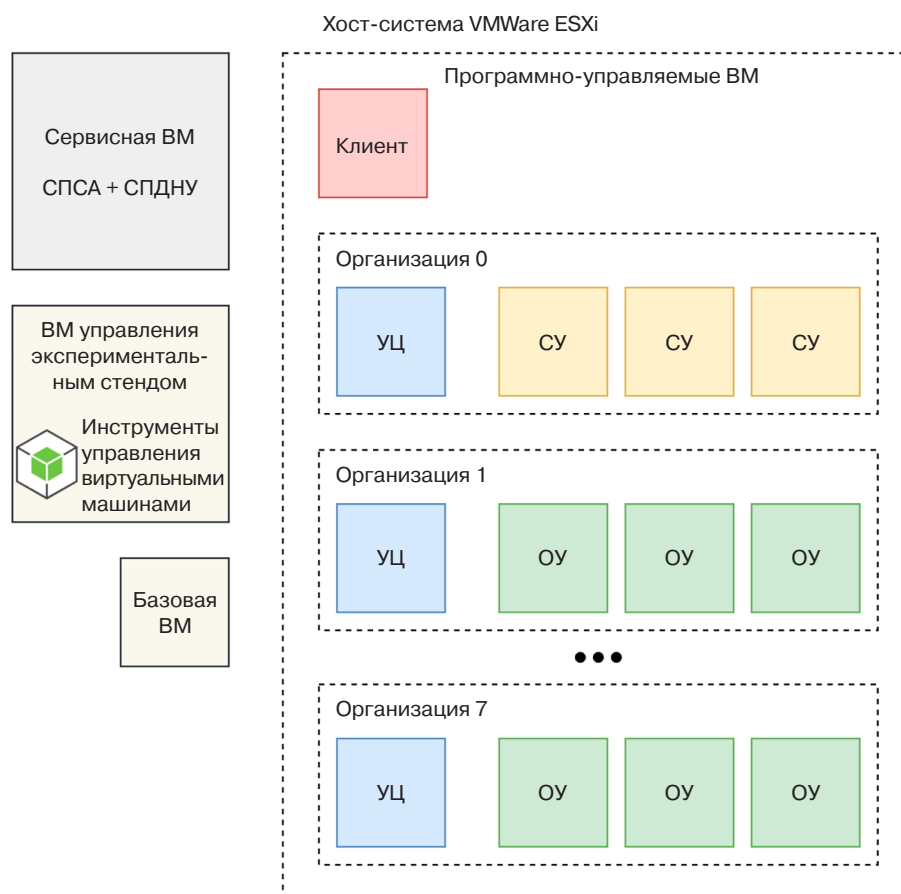


Рис. 6. Схема инфраструктуры исследовательской среды

(СПСА – служба преобразования сетевых адресов; СПДНУ – сервер протокола динамической настройки узла; УЦ – удостоверяющий центр; СУ – служба упорядочения; ОУ – одноранговый узел)

валют в форме токенов транзакции могут иметь большую вычислительную сложность.

Обе формы представления цифровой валюты можно рассмотреть с точки зрения прозрачности финансовых операций для контролирующих органов. Если хранить историю транзакций, то в случае аккаунтов с числовым представлением баланса крайне затруднительно отследить пути передачи некоторой суммы денег. Достоверно разграничить факт расходования целевых средств от других проблематично, если они проходили через единый аккаунт. Напротив, при использовании токенов, когда каждая денежная единица имеет свой уникальный идентификатор, история транзакций отражает передачу конкретной денежной единицы от одного владельца к другому. Таким образом, возможна реализация механизма для выявления нецелевого расходования денежных средств.

Для проведения исследований технологических параметров информационного обеспечения ЦВЦБ разработана инфраструктура среды исследований с использованием *VMWare ESXi*¹.

В качестве инструментов использованы:

- модифицированная версия *Repexlab*² для работы с *VMWare ESXi*;
- плагин *vagrant-vmware-esxi*³;
- утилита *ovftool*⁴;
- система *Ansible*⁵;
- монитор *atop*⁶.

Общая схема конфигурации приведена на рис. 6.

Инструментарий управления экспериментом был размещен на выделенной виртуальной машине (VM). Сервисная VM использовалась для настройки сети NAT и сервиса DHCP с назначением IP-адресов в соответствии с MAC-адресами программно-управляемых VM. Использовалась заранее сконфигурированная VM (на рис. 6 – «Базовая VM»),

² <https://github.com/rnd-student-lab/repexlab>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

³ <https://github.com/josenk/vagrant-vmware-esxi>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

⁴ <https://developer.vmware.com/web/tool/4.4.0/ovf>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

⁵ <https://www.ansible.com/>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

⁶ <https://www.atoptool.nl/>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

¹ <https://www.vmware.com/products/esxi-and-esx.html>. Дата обращения 17.03.2023. / Accessed March 17, 2023.

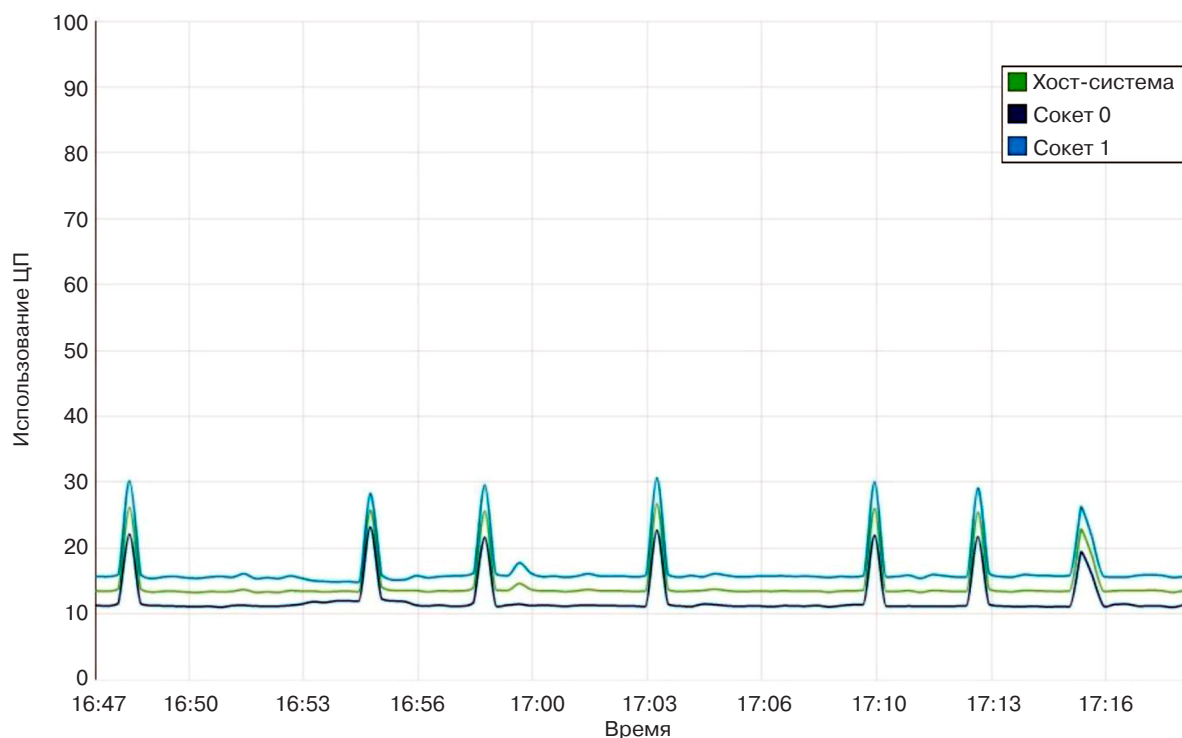


Рис. 7. Использование ресурсов ЦП после провизии VM под управлением гипервизора VMWare ESXi

которая впоследствии клонировалась для создания и настройки программно-управляемых VM. При запуске и провизии всех 33 программно-управляемых VM нагрузка на центральный процессор (ЦП) от установленной системы мониторинга оказалась приемлемой, как показано на рис. 7.

3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АРХИТЕКТУР

Выделен ряд свойств, приведенных в таблице, которые характеризуют рассмотренные операционно-вычислительные архитектуры. На их основе может быть осуществлен выбор архитектуры, наиболее адекватной требованиям, предъявляемым к ЦВЦБ.

Применение алгоритмов консенсуса становится целесообразным при размещении сегмента у нескольких операторов ЦВЦБ. Независимо от формы представления ЦВЦБ, при проектировании следует определить приемлемое число операторов на один сегмент, что требует проведения экспериментальных исследований. Для этого требуется разработать экспериментально-исследовательскую среду, обеспечивающую функционирование модели ЦВЦБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены архитектурные и технологические компоненты, составляющие ЦВЦБ. Проанализированы варианты операционно-вычислительных архитектур ЦВЦБ,

Таблица. Таблица характеристик операционно-вычислительных архитектур

Характеристика	A1	A2	A3	A4	A5
Техническое обеспечение для хранения всего объема данных предоставляет ЦБ	+	+	–	–	–
Техническое обеспечение для обработки всего объема транзакций предоставляет ЦБ	+	+	–	–	–
Техническое обеспечение для хранения всего объема данных предоставляет оператор	–	–	+	+	+
Техническое обеспечение для обработки всего объема транзакций предоставляет оператор	–	–	+	+	+
Техническое обеспечение распределяется и масштабируется горизонтально между несколькими операторами	–	–	–	+	+
Принцип КУС осуществляется ЦБ	+	–	–	–	–
Принцип КУС осуществляется частными банками	–	+	+	+	+

Окончание таблицы

Характеристика	A1	A2	A3	A4	A5
Система сохранит частичную работоспособность при отключении сервисов одного оператора	–	–	–	+	+
Система сохранит полную работоспособность при отключении сервисов одного оператора	–	–	–	–	+
Система сохранит частичную работоспособность при отключении сервисов ЦБ	–	–	+	+	+
Система сохранит полную работоспособность при отключении сервисов ЦБ	–	–	+	–	–
ЦБ имеет доступ ко всем данным в реальном времени	+	+	–	–	–
Операторы верифицируют результаты обработки транзакций	–	–	–	–	+
Резервирование данных у независимых операторов	–	–	–	–	+
Отсутствие кросс-сегментарных транзакций	+	+	+	–	–
ЦБ предоставляет платформу для физических / юридических лиц	+	–	–	–	–
ЦБ предоставляет платформу для банков	+	+	–	–	–
ЦБ предоставляет платформу для оператора(ов)	–	–	+	+	+
Оператор(ы) предоставляет(ют) платформу для банков	–	–	+	+	+
Частные банки предоставляют платформу для физических / юридических лиц	–	+	+	+	+

Примечание: A1 – централизованная двухуровневая архитектура,

A2 – централизованная трехуровневая архитектура,

A3 – четырехуровневая архитектура с единым оператором ЦВЦБ,

A4 – четырехуровневая архитектура с сегментированием между несколькими операторами ЦВЦБ,

A5 – четырехуровневая архитектура с сегментированием и репликацией между несколькими операторами ЦВЦБ.

отличающихся по своим характеристикам. В результате анализа сформирован сводный перечень характеристик приведенных операционно-вычислительных архитектур. В зависимости от требований, предъявляемых к ЦВЦБ, на его основе может быть выбрана наиболее адекватная операционно-вычислительная архитектура. Акцентируется внимание на формах представления ЦВЦБ и их влиянии на свойства ЦВЦБ. Хранение цифровых валют в форме аккаунтов может быть менее ресурсоемким, чем в форме токенов. В то же время история транзакций в цифровой валюте в форме токенов предоставляет более удобный инструмент для аудита.

Разработана инфраструктура среды исследований операционно-вычислительной архитектуры

информационного обеспечения ЦВЦБ. Таким образом, созданы предпосылки для комплексного анализа технологических характеристик операционно-вычислительной среды ЦВЦБ. Дальнейшие исследования могут быть направлены на выбор технологического обеспечения для разработки экспериментально-исследовательской среды, экспериментальную и аналитическую оценку зависимости характеристик ЦВЦБ от используемого алгоритма консенсуса, формы представления цифровой валюты и других параметров.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Allen F., Gu X., Jagtiani J. Fintech, cryptocurrencies, and CBDC: Financial structural transformation in China. *J. Int. Money Finance*. 2022;124(3–4):102625. <https://doi.org/10.1016/j.jimonfin.2022.102625>
- Wang Y.-R., Ma C.-Q., Ren Y.-S. A model for CBDC audits based on blockchain technology: Learning from the DCEP. *Res. Int. Bus. Financ.* 2022;63(3):101781. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2022.101781>
- Choi K.J., Henry R., Lehar A., Reardon J., Safavi-Naini R. A proposal for a Canadian CBDC. *SSRN Electron. J.* 2021. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3786426>
- Chu Y., Lee J., Kim S., Kim H., Yoon Y., Chung H. Review of offline payment function of CBDC considering security requirements. *Appl. Sci.* 2022;12(9):4488. <https://doi.org/10.3390/app12094488>
- Zhang T., Huang Z. Blockchain and central bank digital currency. *ICT Express*. 2022;8(2):264–270. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2021.09.014>
- Tsai W.-T., Zhao Z., Zhang C., Yu L., Deng E. A multi-chain model for CBDC. In: *2018 5th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*. Dalian, China: IEEE; 2018. P. 25–34. <https://doi.org/10.1109/DSA.2018.00016>

7. Jin S.Y., Xia Y. CEV Framework: A central bank digital currency evaluation and verification framework with a focus on consensus algorithms and operating architectures. *IEEE Access*. 2022;10:63698–63714. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183092>
8. Opare E.A., Kim K. A compendium of practices for central bank digital currencies for multinational financial infrastructures. *IEEE Access*. 2020;8:110810–110847. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001970>
9. Lee Y., Son B., Park S., Lee J., Jang H. A survey on security and privacy in blockchain-based central bank digital currencies. *J. Internet Serv. Inform. Secur.* 2021;11(3): 16–29. <https://doi.org/10.22667/JISIS.2021.08.31.016>
10. Ballaschk D., Paulick J. The public, the private and the secret: Thoughts on privacy in central bank digital currencies. *Journal of Payments Strategy & Systems*. 2021;15(3):277–286. Available from URL: <https://www.bundesbank.de/resource/blob/880792/7f4b5efd53026f51a9f53b176859e715/mL/digital-currencies-ballaschk-paulick-data.pdf>
11. Monrat A.A., Schelén O., Andersson K. A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges, and opportunities. *IEEE Access*. 2019;7: 117134–117151. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936094>
12. Hang L., Kim D.-H. Optimal blockchain network construction methodology based on analysis of configurable components for enhancing Hyperledger Fabric performance. *Blockchain: Res. Appl.* 2021;2(1):100009. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2021.100009>
13. Lashkari B., Musilek P. A comprehensive review of blockchain consensus mechanisms. *IEEE Access*. 2021;9:43620–43652. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065880>
14. Auer R., Böhme R. The technology of retail central bank digital currency. *BIS Quarterly Review*. 2020. Available from URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3561198
15. Ozili P.K. Central bank digital currency research around the world: a review of literature. *J. Money Launder. Control*. 2022;26(2):215–226. <https://doi.org/10.1108/JMLC-11-2021-0126>
16. Bordo M.D., Levin A.T. Central bank digital currency and the future of monetary policy. *NBER Working Paper Series*. 2017; Working Paper 23711. <https://doi.org/10.3386/w23711>
17. Zhang J., Tian R., Cao Y., Yuan X., Yu Z., Yan X., et al. A hybrid model for central bank digital currency based on blockchain. *IEEE Access*. 2021;9:53589–53601. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071033>
18. Allen S., Čapkun S., Eyal I., Fanti G., Ford B.A., Grimmelmann J., et al. Design choices for central bank digital currency: Policy and technical considerations. *NBER Working Paper Series*. 2020; Working Paper 27634. <https://doi.org/10.3386/w27634>
19. Chaum D., Grothoff C., Moser T. How to issue a central bank digital currency. *SNB Working Papers*. 2021;3. 38 p. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3965032>
20. Netto M.A.S., Menon S., Vieira H.V., Costa L.T., de Oliveira F.M., Saad R., et al. Evaluating load generation in virtualized environments for software performance testing. In: *2011 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing Workshops and Phd Forum*. 2011. P. 993–1000. <https://doi.org/10.1109/IPDPS.2011.244>
21. Албычев А.С., Ильин Д.Ю., Никульчев Е.В., Магомедов Ш.Г. Разработка методики экспериментального исследования технологического обеспечения цифровой валюты центрального банка. *Вестник РГПТУ*. 2022;82:136–146. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2022-82-136-146>
[Albychev A.S., Ilin D.Y., Nikulchev E.V., Magomedov S.G. Development of a methodology for experimental studies of technologies for central bank digital currencies. *Vestnik of RSREU*. 2022;82:136–146 (in Russ.). <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2022-82-136-146>]

Об авторах

Албычев Александр Сергеевич, заместитель руководителя, Федеральное казначейство Министерства финансов Российской Федерации (101000, Россия, Москва, Большой Златоустинский пер., д. 6, стр. 1); заведующий кафедрой «Государственные финансовые технологии» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: albychev@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9632-7806>

Кудж Станислав Алексеевич, д.т.н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: rector@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400. <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

About the authors

Alexander S. Albychev, Deputy Head of the Federal Treasury, The Ministry of Finance of the Russian Federation (6/1, Bol'shoi Zlatoustinskii per., Moscow, 101000 Russia); Head of the State Financial Technologies Department, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: albychev@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9632-7806>

Stanislav A. Kudzh, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: rector@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400. <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

УДК 001.18:004.94:008.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-17-29>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Динамика формирования связей в сетях, структурированных на основе прогностических терминов

С.О. Крамаров^{1, 2},
О.Р. Попов^{3, @},
И.Э. Джариев²,
Е.А. Петров²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Сургутский государственный университет, Сургут, 628408 Россия

³ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: cs41825@aaanet.ru

Резюме

Цели. Для моделирования и анализа информационной проводимости сложных сетей с нерегулярной структурой возможно применение известных в физике твердого тела методов теории перколяции, позволяющих количественно оценить, насколько данная сеть близка к перколяционному переходу, и тем самым сформировать модель прогнозирования. Объектом исследования выступают международные информационные сети, структурированные на основе словарей модельных прогностических терминов, тематически относящихся к перспективным информационным технологиям.

Методы. Применен алгоритмический подход, согласно которому задается последовательность комбинирования необходимых операций по автоматизированной обработке текстовой информации внутренними алгоритмами специализированных баз данных (БД), программных сред и оболочек, предусматривающих их интеграцию при передаче данных. Данный подход, в частности, включает этапы построения терминологической модели предметной области в библиографической БД Scopus, затем обработку текстов на естественном языке с выводом визуальной карты научного ландшафта предметной области в программе VOSviewer и далее – сбор расширенных данных параметров, характеризующих динамику формирования связей научной терминологической сети в программной среде *Pajek*.

Результаты. Визуальный кластерный анализ, составляющий в динамике 2004–2021 гг. диапазон 645–3364 термов категории «Технологии памяти и хранения данных», интегрированных суммарно в 23 кластера, выявил активное кластерообразование в области термина «quantum memory» (квантовая память), позволяющее делать качественные выводы о локальной динамике научного ландшафта. Проведенный в программном пакете *STATISTICA* разведочный анализ данных свидетельствует о корреляции поведения введенного интегратора ключевых слов MADSTA с базовыми терминами, включая периоды экстремумов, что подтверждает правильность выбора методики детализации исследования по годам.

Выводы. Заложена основа для формирования комплекса базовых параметров, необходимых при обширном вычислительном моделировании кластерообразования в семантическом поле научных текстов, особенно в отношении симуляций формирования наибольшего компонента сети и перколяционных переходов.

Ключевые слова: информационная сеть, алгоритм, база данных, термин, кластер, визуализация, картографирование, динамика, сетевой анализ

• Поступила: 11.08.2022 • Доработана: 01.11.2022 • Принята к опубликованию: 02.03.2023

Для цитирования: Крамаров С.О., Попов О.Р., Джариев И.Э., Петров Е.А. Динамика формирования связей в сетях, структурированных на основе прогностических терминов. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):17–29. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-17-29>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Dynamics of link formation in networks structured on the basis of predictive terms

Sergey O. Kramarov ^{1, 2},
Oleg R. Popov ^{3, @},
Ismail E. Dzhariev ²,
Egor A. Petrov ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Surgut State University, Surgut, 628408 Russia

³ Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006 Russia

@ Corresponding author, e-mail: cs41825@aaanet.ru

Abstract

Objectives. In order to model and analyze the information conductivity of complex networks having an irregular structure, it is possible to use percolation theory methods known in solid-state physics to quantify how close the given network is to a percolation transition, and thus to form a prediction model. Thus, the object of the study comprises international information networks structured on the basis of dictionaries of model predictive terms thematically related to cutting-edge information technologies.

Methods. An algorithmic approach is applied to establish the sequence of combining the necessary operations for automated processing of textual information by the internal algorithms of specialized databases, software environments and shells providing for their integration during data transmission. This approach comprises the stages of constructing a terminological model of the subject area in the Scopus bibliographic database, then processing texts in natural language with the output of a visual map of the scientific landscape of the subject area in the VOSviewer program, and then collecting the extended data of parameters characterizing the dynamics of the formation of links of the scientific terminological network in the Pajek software environment.

Results. Visual cluster analysis of the range of 645–3364 terms in the 2004–2021 dynamics of the memory and data storage technologies category, which are integrated into a total of 23 clusters, revealed active cluster formation in the field of the term *quantum memory*. On this basis, allowing qualitative conclusions are drawn concerning the local dynamics of the scientific landscape. The exploratory data analysis carried out in the STATISTICA software package indicates the correlation of the behavior of the introduced MADSTA keyword integrator with basic terms including periods of extremes, confirming the correctness of the choice of the methodology for detailing the study by year.

Conclusions. A basis is established for the formation of a set of basic parameters required for an extensive computational modeling of a cluster formation in the semantic field of the scientific texts, especially in relation to simulations of the formation of the largest component of the network and percolation transitions.

Keywords: information network, algorithm, database, term, cluster, visualization, mapping, dynamics, network analysis

• Submitted: 11.08.2022 • Revised: 01.11.2022 • Accepted: 02.03.2023

For citation: Kramarov S.O., Popov O.R., Dzhariev I.E., Petrov E.A. Dynamics of link formation in networks structured on the basis of predictive terms. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):17–29. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-17-29>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение распространения информации в сетях социальных связей, имеющих случайную топологию, является актуальной задачей для оптимизации современных социотехнических систем, что подтверждается незабываемым интересом к проблематике анализа социальных сетей (SNA – social network analysis) [1–3].

Отдельную категорию сложных сетей, наряду с социальными и биологическими, представляют информационные сети, называемые также «сетями знаний». Примером являются сети ссылок цитирования между научными публикациями, структура которых достаточно точно отражает структуру информации, хранящейся в ее вершинах – статьях, что и определяет терминологию «информационная сеть».

Применительно к анализу отношений между классами слов в тезаурусе информационную сеть можно также рассматривать как концептуальную, представляющую структуру языка или, возможно, даже ментальные конструкции, используемые для его представления [4].

Для моделирования и анализа информационных процессов, протекающих в сетях с нерегулярной структурой, возможно применение известных в физике твердого тела методов теории перколяции [5], которая способна ответить на важные вопросы.

Перколяция (лат. *percolare*) в переводе с латинского означает протекание, просачивание. Долгое время эта простая вероятностная модель являлась в физике базовой идеальной моделью для демонстрации фазовых переходов и критических явлений. В виде математического объекта она впервые была рассмотрена в классической работе Бродбента и Хаммерсли в 1957 г. [6], в которой были введены название, а также геометрические и вероятностные понятия.

Методы решения различных теоретических и прикладных задач в течение последних десятилетий привнесли новое понимание в математическое исследование просачивания [7]. Проникновение жидкости внутрь пористого камня, распространение эпидемий или информации в социальной сети, на первый взгляд, не имеют ничего общего, но оказывается, что все три аспекта математическим образом сходятся в аддитивную компоненту [7–9].

В самом общем виде, независимо от физической природы и модели системы, теория перколяции отвечает на вопрос, какова вероятность того, что существует открытый путь из 0 до бесконечности (или существует ли бесконечный кластер связанных между собой пор или узлов). Таким образом, проблема сводится к поиску ответа на вопрос, существуют ли такие пути для данной вероятности p . В основном теория касается существования такого кластера и его структуры по отношению к вероятности заполнения p .

Для математического описания этой критичности следует определить модель перколяции. В качестве примера выберем наиболее простую модель на бесконечной двумерной (или квадратной) решетке. Точки пересечения линий называются узлами (вершинами графа), а сами линии – связями (ребрами графа). Существуют две решеточные модели: проницаемости связей и проницаемости узлов.

В первой модели математически каждая связь занята с вероятностью p или свободна с вероятностью $1 - p$. Затем занятые связи соединяют узлы в кластеры. Эту модель можно использовать для моделирования процесса проникновения жидкости внутрь пористого камня и распространения эпидемий.

В модели перколяции узлов мы занимаем не связь, а каждый узел с вероятностью p , оставляя его свободным с вероятностью $1 - p$. В целом перколяция связей считается менее общей, чем перколяция узлов, из-за того, что перколяцию связей можно переформулировать как перколяцию узлов на другой решетке, но не наоборот.

Теория перколяции в основном фокусируется на появлении бесконечного кластера с увеличением вероятности p . Для характеристики этого явления часто принимают размер гигантского скопления S , который определяется как:

$$S = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{S_1}{N}, \quad (1)$$

где N – размер системы (общее количество узлов); S_1 – количество узлов в самом большом кластере.

С увеличением вероятности p должна существовать критическая p_c , называемая порогом перколяции

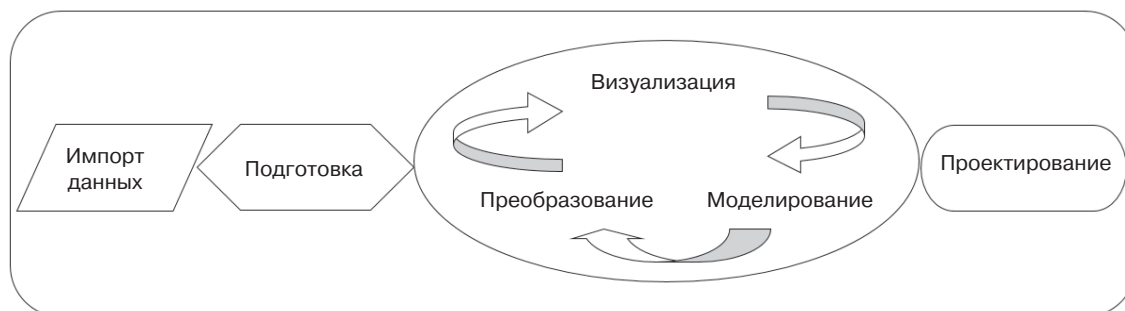


Рис. 1. Схема алгоритма реализации научного проекта science data [11]

или критической точкой, выше которой можно найти ненулевое значение S . Это определяет перколяционный переход системы по отношению к управляющему параметру p , а S является соответствующим параметром порядка.

Чтобы описать особенности конечных кластеров, также используется распределение кластеров по размерам:

$$p_S = \frac{m_S}{\sum_S m_S}, \quad (2)$$

где m_S – количество кластеров размера S .

В настоящее время построены модели для трехмерных и более высоких измерений решетки или для других условий перколяции.

При обширном вычислительном моделировании социальных сетей как на классических 2D-регулярных решетках, так и для сетей более высокой размерности, получены результаты, подтверждающие отображение фазы переходного поведения, характеризующейся наибольшим компонентом в предлагаемой модели динамического мнения (non-consensus opinion (NCO) модель), с известной физической проблемой просачивания в несжимаемых жидкостях [9].

Использование методов вычислительного моделирования случайных сетей с большим числом связей привело к аналитическим решениям, например, к построению стохастических моделей описания динамики изменения состояния узлов и перколяционных переходов, прогнозирующих динамику поведения социальных сетей [2].

По аналогии с социальными сетями полагаем, что правильно построенная методика исследования позволит количественно оценить, насколько информационная сеть близка к порогу перколяции, и тем самым сформировать модель ее прогнозирования.

В связи с этим имеет смысл применить методы картирования и сетевого анализа для изучения закономерностей, влияющих на порог перколяции при распространении и кластеризации информации в сетях, структурированных на основе словарей модельных прогностических терминов, извлеченных

из сетевых ресурсов, тезаурусов, наукометрических и библиографических баз данных.

В работе [10] в условиях конвергентных тенденций «стыковых» междисциплинарных связей при развитии сложных геоинформационных систем, обосновано приоритетное значение информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) и сферы информационных наук. Это положение предопределило основной выбор предметной области для данного исследования.

ИНСТРУМЕНТ И МЕТОДЫ

Базовый инструментальный этап выполнения научного проекта, связанного с обработкой больших объемов информации, данных – science data, обозначен на рис. 1. Основной механизм генерации знаний для итогового проектирования кроется в большом центральном блоке, включающем визуализацию и моделирование данных. Анализ полученных знаний на каждом шаге будет требовать их преобразование и оптимизацию, включая в себя сужение круга наблюдений, представляющих интерес, вычисление набора сводных статистических данных, средних значений и т.п.

Алгоритмический подход преследует цель обеспечить максимальную объективность поиска и скорость, с которой он позволяет углубиться в заданную предметную область исследований.

Базовые шаги и инструментальный реализации эмпирической части алгоритма рассмотрены в [12]. Вариант, модифицированный для решения текущих исследовательских задач, состоит из следующих итераций:

- 1) формирование терминологической модели предметной области на основе матрицы, определяющей уровень зрелости (system maturity level, SML) самоорганизующихся интеллектуальных систем;
- 2) формирование алгоритмических запросов библиографической базы данных (БД) Scopus¹ по специальной формуле и вывод данных

¹ <https://www.scopus.com/>. Дата обращения 01.03.2022. / Accessed March 01, 2022.

- в формате .csv для дальнейшей обработки и анализа в программных инструментах;
- 3) препроцессинг, векторизация, кластеризация полученной терминологической БД внутренними алгоритмами программной среды *VOSviewer*²;
 - 4) первичный визуальный анализ внутри- и межкластерных взаимодействий базовыми интерфейсами программы *VOSviewer* по годам и термам;
 - 5) детальное исследование параметров связей научной терминологической сети по кластерам в динамике развития с помощью алгоритмов программного продукта *Pajek*³;
 - 6) обработка данных и вывод наглядных динамических зависимостей параметров связей терминологической сети в среде *STATISTICA*⁴.

Существует несколько способов достижения поставленной цели. Начальным этапом данной работы является формирование терминологической модели предметной области, на основе которой сформирована база данных для дальнейшего исследования.

Основой для выбора заданного шаблона ключевых слов выбрана методика расчета SML-матрицы самоорганизующихся интеллектуальных систем (ИС) [13], позволяющая количественно оценить показатель зрелости ИС. Показатель SML применяется на системном уровне и представляет собой индекс зрелости от 0 до 1.

В рамках данного исследования интерес представляет 4 уровень зрелости социотехнической системы (sociotechnical system), диапазон индекса зрелости 0.60–0.80, описание «прогнозируемые технологии не выходят за рамки исследований и создания некоторых прототипов, а требования социально-экономической адаптации новых технологий могут быть разработаны за счет достижения компромисса между сообществами» [13].

В целях определения базовых структур предметной области экспертным методом выделены четыре категории перспективных направлений развития ИКТ, соответствующих четвертому уровню SML-матрицы:

- 1) человеко-машинные интерфейсы (human-computer interfaces all, HCIA);
- 2) инженерия вычислений (computing engineering all, CEA);
- 3) технологии памяти и хранения данных (memory and data storage technologies all, MADSTA);
- 4) электроника и коммуникации (electronics and communications all, ECA).

В настоящем исследовании предлагается подход, основанный на выделении устойчивых шаблонов

ключевых слов путем анализа корпусов предметно-ориентированных текстов, включая не только стационарные БД наукометрической и библиометрической информации, но и используя достаточно динамичные сетевые тезаурусы, одним из которых является сетевая энциклопедия Википедия⁵ [14].

При этом желаемый уровень достоверности получаемой информации может быть повышен за счет формирования комбинированного алгоритма извлечения терминов. Данный алгоритм допускает многоуровневый выбор на основе расширенной экспертной среды с использованием внутренних сервисов Википедии на первом этапе, и научно достоверных алгоритмических способов предоставления информации из высокоавторитетных качественных исследовательских БД, например, Scopus и Web of Science⁶ [15] – на втором.

Расширенная терминологическая основа получена путем обработки полученных экспертным методом исходных наборов базовых ключевых слов в библиографической БД Scopus по специальной формуле. Извлеченная полезная база данных для исследования составляет в динамике диапазон 645–3364 терминов, в т.ч. связанных публикациями, в которых имеется их совместное вхождение.

В [16] подробно классифицируются основные вычислительные методы, приводящие к автоматическому режиму обнаружения знаний в публикациях, включая дистрибутивное семантическое моделирование. Помимо анализа моделирования на уровне термов существует анализ на уровне темы распространения – так называемое тематическое моделирование, позволяющее глубже понять процесс распространения информации. В аспекте поиска и фильтрации информации достаточно широкое применение получили две генеративные модели: вероятностный скрытый семантический анализ (probabilistic latent semantic analysis, PLSA) и, более распространенная, скрытое распределение Дирихле (latent Dirichlet allocation), являющаяся, в свою очередь, обобщением PLSA.

В последнее время предложен принципиально иной и более универсальный подход к тематическим моделям, основанный на сетевом моделировании – стохастической блочной модели (stochastic block model) [17].

Однако использование данных методов для анализа научной литературы встречается редко [16–18].

На основе изучения программ для визуализации и картирования науки и технологий в качестве первичного инструмента для тематического кластерного анализа и визуализации полученных данных выбран программный комплекс *VOSviewer*. Данный инструмент находится в свободном доступе и хорошо

² <https://www.vosviewer.com/>. Дата обращения 22.03.2022. / Accessed March 22, 2022.

³ <http://mrvar.fdv.uni-lj.si/pajek/>. Дата обращения 03.04.2022. / Accessed April 03, 2022.

⁴ <https://www.statistica.com/en/>. Дата обращения 15.06.2022. / Accessed June 15, 2022.

⁵ <https://www.wikipedia.org/>. Дата обращения 15.03.2022. / Accessed March 15, 2022.

⁶ <http://www.webofknowledge.com/>. Дата обращения 04.03.2022. / Accessed March 04, 2022.

интегрирован с библиографическими БД, включая Scopus [19, 20].

Внутренние алгоритмы *VOSviewer* обеспечивают векторизацию, нормализацию, построение терм-документной матрицы, библиометрическое картирование и первоначальную кластеризацию текстовых данных, динамически изменяемых в контексте поставленных исследованиями задач.

Карты, созданные *VOSviewer*, включают элементы, которыми могут быть публикации, исследователи или термины. *VOSviewer* картирует силу ссылки, отражающую количество публикаций, в которых два термина встречаются вместе (в случае совпадения ссылки вхождения).

Для каждой пары элементов i и j *VOSviewer* требует в качестве входных данных сходство s_{ij} ($s_{ij} > 0$). Чтобы определить сходство между предметами, обычно определяют частоту совпадения, преобразованную с использованием меры сходства. Могут быть применены разные типы мер подобия: сила ассоциации, индекс Жаккара, корреляция Пирсона, косинусная мера.

В *VOSviewer* сходство s_{ij} рассчитывается с использованием силы ассоциации AS , определенной в уравнении:

$$AS_{ij} = \frac{s_{ij}}{s_i s_j}, \quad (3)$$

где s_i – сходство элемента i -й компоненты; s_j – сходство элемента j -й компоненты; s_{ij} – сходство пары. Все перечисленные величины имеют размерность, равную единице.

После расчета сходства между элементами применяется специальная техника их картирования [16]. *VOSviewer* определяет местонахождение элементов на карте, минимизируя функцию:

$$V(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i < j} s_{ij} \|x_i - x_j\|^2, \quad (4)$$

где x_i, x_j – местоположение узлов i и j в двумерном пространстве; n – количество узлов в сети; $\|x_i - x_j\|$ – евклидовы расстояния между узлами i и j , при условии:

$$\frac{2}{n(n-1)} \sum_{i < j} s_{ij} \|x_i - x_j\| = 1. \quad (5)$$

Следовательно, идея *VOSviewer* состоит в том, чтобы минимизировать взвешенную сумму квадратов расстояний между всеми парами элементов. Квадрат расстояния между парой элементов взвешивается как сходство между элементами.

В результате формируется сложная ассоциированная структура исследуемой сети с узлами, терминами, рассчитанными по весу различных элементов по трем базовым критериям: степени узлов, расстоянию и прочности связей между узлами, причем размер узлов зависит от веса определенного термина.

Особо следует обратить внимание на динамику формирования, так называемого самого большого или «гигантского компонента» сети. Классическим примером дискретного распределения вероятностей является модель распределения случайных чисел Пуассона. Основываясь на этом, Эрдёш и Реньи [21] предложили предельно простую модель сети, названную ими «случайным графом». Было показано, что случайный граф обладает важным свойством, которое можно назвать фазовым переходом к состоянию, когда обширная доля всех вершин соединена вместе в один гигантский компонент.

Эвристический аргумент [4] позволяет, используя пуассоновское распределение, рассчитать ожидаемый размер гигантского компонента случайных сетей. Пусть u – часть вершин сети, не принадлежащих гигантскому компоненту. Вероятность того, что вершина не принадлежит гигантскому компоненту, также равна вероятности того, что ни один из сетевых соседей вершины не принадлежит гигантскому компоненту, т.е. u^k , где k – степень вершины.

После применения процедуры усреднения выражение по вероятности пуассоновского распределения степеней p_k в соотношении самосогласования для u в пределах большого размера графа выглядит так:

$$u = \sum_{k=0}^{\infty} p_k u^k = e^{-z} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(zu)^k}{k!} = e^{z(u-1)}, \quad (6)$$

где e – число Эйлера, k – степень вершины, z – средняя степень всех вершин N сети.

Доля S сети, занятая гигантской компонентой, равна $S = 1 - u$. Усредняя выражение для модели случайного графа Эрдёша и Реньи по вероятности пуассоновского распределения степеней, получаем следующее соотношение самосогласования в пределах большого размера графа:

$$S = 1 - e^{-zS}. \quad (7)$$

Появление гигантского компонента говорит о фазовом (перколяционном) переходе в точке $z = 1$, в которой также происходит расхождение среднего размера $\langle s \rangle$ негигантских компонент при исследовании поведения случайного графа. При $z < 1$ единственным отрицательным решением данного уравнения является $S = 0$, а при $z > 1$ существует и ненулевое решение, которое определяет размер гигантского компонента.

Задачи общего сетевого анализа выполняет программный продукт *Pajek*. Это программная среда с множеством различных эффективных (субквадратичных) алгоритмов сетевого анализа, основанная на графах визуализации больших сетей [22].

С библиометрической точки зрения методы, предлагаемые *Pajek*, включают кластеризацию и анализ основных связей. Программный продукт используется не только для выявления глобальной структуры сетей знаний, но и позволяет операционализировать и измерять стабильность полученных сетевых моделей [23]. Важным свойством *Pajek* служит тесная связь с *VOSviewer*, позволяющая напрямую двусторонне взаимодействовать данным сетевым средам, а также экспорт данных в форматах широко распространенных других внешних инструментов, включая язык программирования R, *Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)* и *Excel* [22].

Наиболее фундаментальные подходы к изучению сетей знаний связаны с базовой описательной статистикой сетевой структуры, такой как измерение количества и размера компонентов в сети, а также вычисление различных показателей центральности (степень, близость, промежуточность). С точки зрения поставленных в данной работе задач указанные последние характеристики сетевых взаимодействий эффективно вычисляются в *Pajek*.

В качестве программного пакета для статистического анализа использована универсальная интегрированная система *STATISTICA*. Правильное применение системы позволяет избавить пользователя от рутинных вычислений, наглядно отображает результаты кластерного анализа [24], оставляя специалисту интерпретацию результатов и формулировку выводов. При этом она снабжена подсказками, что

немаловажно для реализации функций анализа данных, их управления и визуализации. В плане реализации итераций алгоритма данного исследования система интегрирована с *Excel*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные, полученные из библиографической БД Scopus, взяты от первого года публикаций, в котором вхождение каждого из ключевых слов в статьях превышает нижний порог, равный 10 статьям, и до 2021 г. включительно. Библиографические данные детализированы по годам для картирования и первичного визуального анализа кластеров. В нашем случае общий временной диапазон исследования охватывает период с 1978 по 2021 гг.

В рамках задач данного этапа исследования в качестве базы для выбора установленных ключевых слов была выбрана категория «Технологии памяти и хранения данных».

С целью анализа поведения тренда из терминологической модели выбраны 4 ключевых слова: «phase-change memory», «patterned media», «quantum memory», «DNA digital data storage». Из полученной базы данных следуют разные даты начального вхождения терминов.

В этой связи оптимизирована формула запроса в Scopus. Например, база публикаций для ключевого слова «quantum memory», ограниченная 1978 г., задавалась формулой: TITLE (quantumANDmemory) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 1978)).

Для извлеченных публикаций были автоматически выгружены их полные библиографические описания в формате .csv для дальнейшей обработки и анализа в программных инструментах, включающие по каждой записи в целом 33 информационных поля.

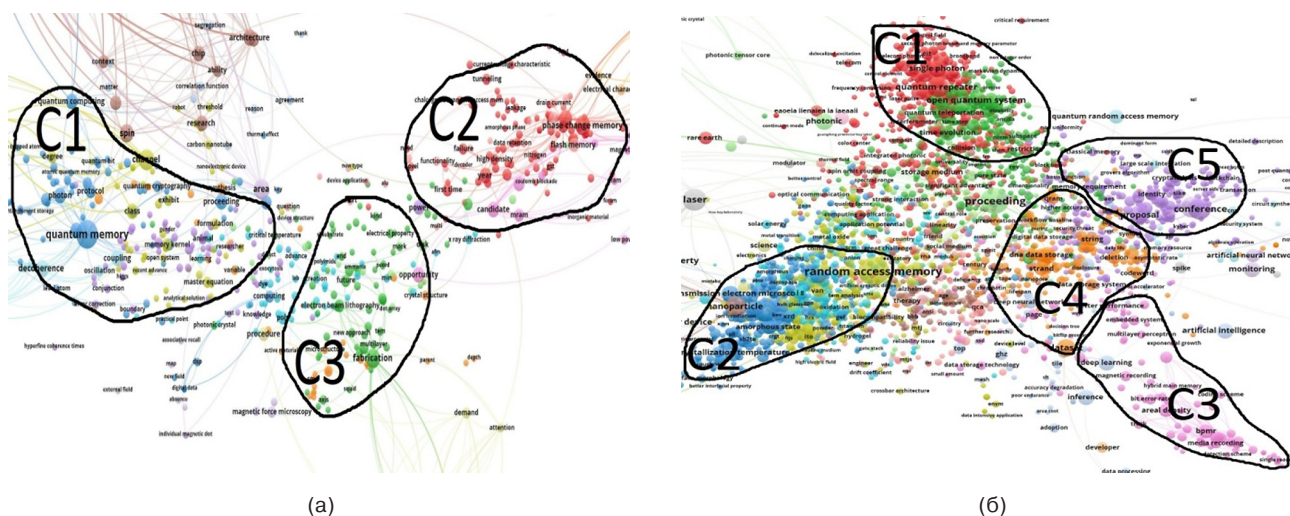


Рис. 2. Карта визуализации *VOSviewer*, показывающая динамику кластеризации данных для интегратора ключевых слов MADSTA. Обозначение кластеров в области термов: «quantum memory» (C1), «phase-change memory» (C2), «patterned media» (C3), «DNA digital data storage» (C4), «post-quantum cryptography» (C5): (a) начало периода 2004 г.; (б) завершение периода 2021 г.

Необходимо отметить, что в контексте рассматриваемых вопросов работа проводилась с текстовыми данными из полей «название», «аннотация» базы выгруженных документов. Данные области выбираются в *VOSviewer* автоматически при загрузке исходного документа.

Чтобы понять более четкую структуру сети, в среде *VOSviewer* дополнительно введен параметр, который реализует сетевую интеграцию указанных ключевых слов, с названием MADSTA. Время введения данного интегратора связано с периодом активной фазы исследований с момента вхождения 4-го ключевого слова «DNA digital data storage», т.е. с 2004 до 2021 гг.

В указанном временном интервале сравнительный визуальный анализ полученного диапазона 645–3364 термов, интегрированных суммарно в 23 кластера, показывает на рис. 2 хорошо выраженную динамику кластеризации вокруг термов «quantum memory», «phase-change memory». При этом заметна активизация исследований к 2021 г. в области термина «DNA digital data storage», которая вытеснила терм «patterned media» на периферию научного ландшафта. В то же время возле

области «quantum memory» явно визуализируется образование нового кластера, связанного с термом «post-quantum cryptography». Это можно объяснить тем, что многие криптографы сейчас активно разрабатывают новые алгоритмы поиска квантовых ключей [25], чтобы подготовиться к тому времени, когда квантовые вычисления станут угрозой безопасности.

Для дальнейшего анализа кластеризации производится автоматизированная передача данных из одной сетевой среды *VOSviewer* в другую – сетевой калькулятор *Pajek* [21].

Начало работы в *Pajek* осуществляется с использованием трех расширений файлов, характеризующих определенные типы данных: networks, partition, vectors. При загрузке данных в программу проводится исследование параметров, характеризующих динамическое состояние связей сети. Отметим, что *Pajek* идеально подходит для выполнения таких задач, поскольку является сетевым вычислителем.

Данные, обработанные в *Pajek*, приведены в сводной таблице. Здесь представлены параметры, характеризующие динамическое состояние связей сети, только для интегратора терминов.

Таблица. Динамика параметров, характеризующих состояние связей терминологической сети, для интегратора ключевых слов MADSTA

Год	Общее число связей (Total Link Strength)	Средняя степень (Average Degree)	Плотность (Density)	Центральность (Degree Centralization)	Промежуточность (Betweenness Centralization)
2004	6140	19.039	0.029	0.139	0.073
2005	15292	29.896	0.029	0.146	0.192
2006	15167	29.827	0.029	0.184	0.092
2007	34415	44.899	0.029	0.211	0.054
2008	22696	27.831	0.017	0.194	0.120
2009	41099	40.833	0.020	0.117	0.034
2010	27976	30.017	0.016	0.236	0.201
2011	30205	22.366	0.008	0.151	0.118
2012	27010	22.813	0.009	0.210	0.240
2013	35111	29.419	0.012	0.172	0.101
2014	32007	29.230	0.013	0.294	0.236
2015	32552	29.232	0.012	0.101	0.075
2016	31683	27.780	0.012	0.110	0.065
2017	35182	27.358	0.011	0.084	0.052
2018	34183	26.726	0.010	0.117	0.070
2019	38765	25.878	0.009	0.148	0.140
2020	43288	27.285	0.009	0.126	0.065
2021	44552	26.488	0.008	0.082	0.072

Результаты разведочного анализа данных, реализованного в универсальном интегрированном пакете *STATISTICA*, с кратким описанием параметров приведены ниже.

Параметр Total Link Strength (общее число связей в сети) характеризует количество линий в простой сети. Также одним из важных для исследования параметров является среднее число связей на один узел – Average Degree. Средняя степень всех вершин отдельной сети – показатель структурной сплоченности сети. Данный показатель не зависит от размера сети, поэтому среднюю степень можно сравнивать между сетями разного размера.

На рис. 3а динамика поведения Average Degree приводит к средним значениям 20–30 единиц связей на один узел. Это объясняется тем, что интерес научного сообщества к данному направлению стабильно не угасает. В нашем случае наличие максимумов в 2007 и 2009 гг. может оказаться проблемной областью.

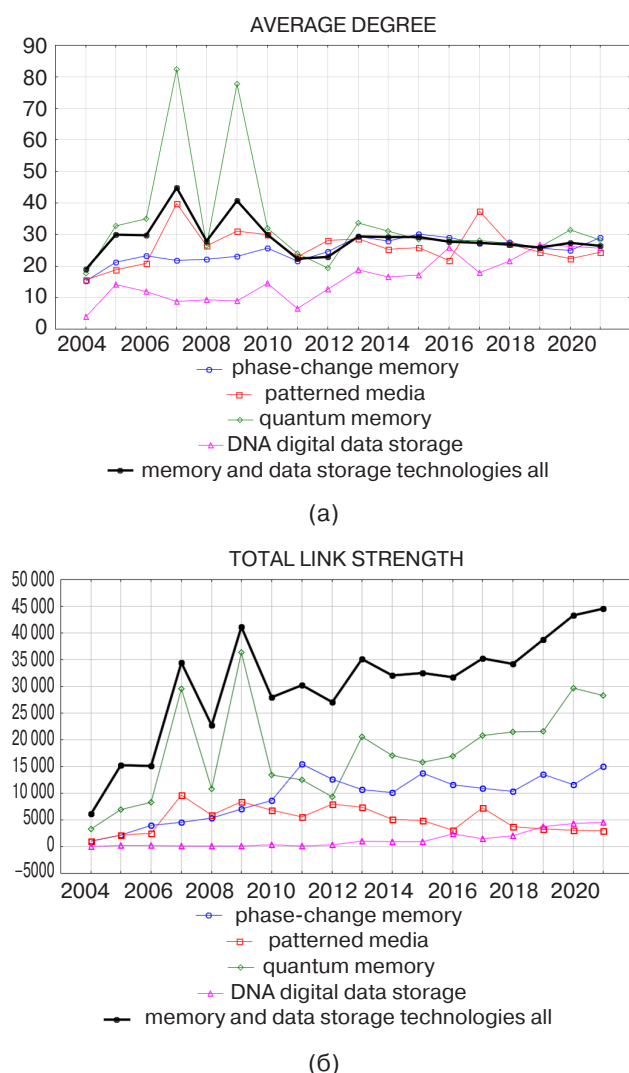


Рис. 3. Зависимость средней степени и общего числа связей от времени: (а) зависимость средней степени всех вершин с учетом введенного параметра от времени; (б) зависимость общего числа связей в сети от времени

Выдвигаемая гипотеза предполагает влияние одного ключевого слова – «quantum memory» на остальные слова по эффекту последствия. На рис. 3б отчетливо виден тренд увеличения общего числа связей для «quantum memory». Это свидетельствует о том, что направление в данном периоде было релевантным, следовательно, общее количество связей для остальных слов определяет динамическое поведение общей сети. Введение параметра MADSTA демонстрирует плавное увеличение общего числа связей в сети, что приводит к анализу следующего динамического параметра – Density.

Density (плотность) отвечает за количество линий в простой сети, выраженное как доля от максимально возможного количества линий. Параметры для определения корреляционной зависимости (Density) охватывают максимальный период времени, т.к. ключевые слова входили в исследуемую сеть поочередно, в разные временные промежутки.

На рис. 4 видно, что интегративное увеличение количества связей в сети усложняет структуру взаимодействия вследствие роста максимально возможного количества линий. Следовательно, зависимости будут стремиться к минимальным значениям. При этом поведение параметра MADSTA в графике позволяет выявить, что объединение 4 ключевых слов не влечет за собой изменений в динамике поведения показателя плотности сети. Параметр MADSTA, коррелируя с кривыми, подтверждает правильность выбора методики детализации исследования по годам.

Первый параметр Degree Centralization (DC) представляет вариацию степеней центральности вершин сети, деленное на максимальное значение степени, которое возможно в сети того же размера.

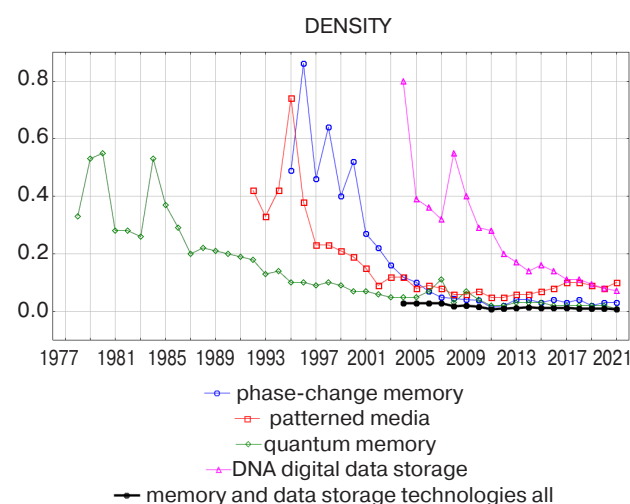


Рис. 4. Зависимость показателя плотности сети от времени

Рис. 5а сообщает, что осцилляции показателя DC по четырем ключевым словам приводят к образованию взаимной связи на интервале от 2004 до

2021 г. Значения интегрирующего параметра в этой зависимости демонстрируют слабую корреляцию.

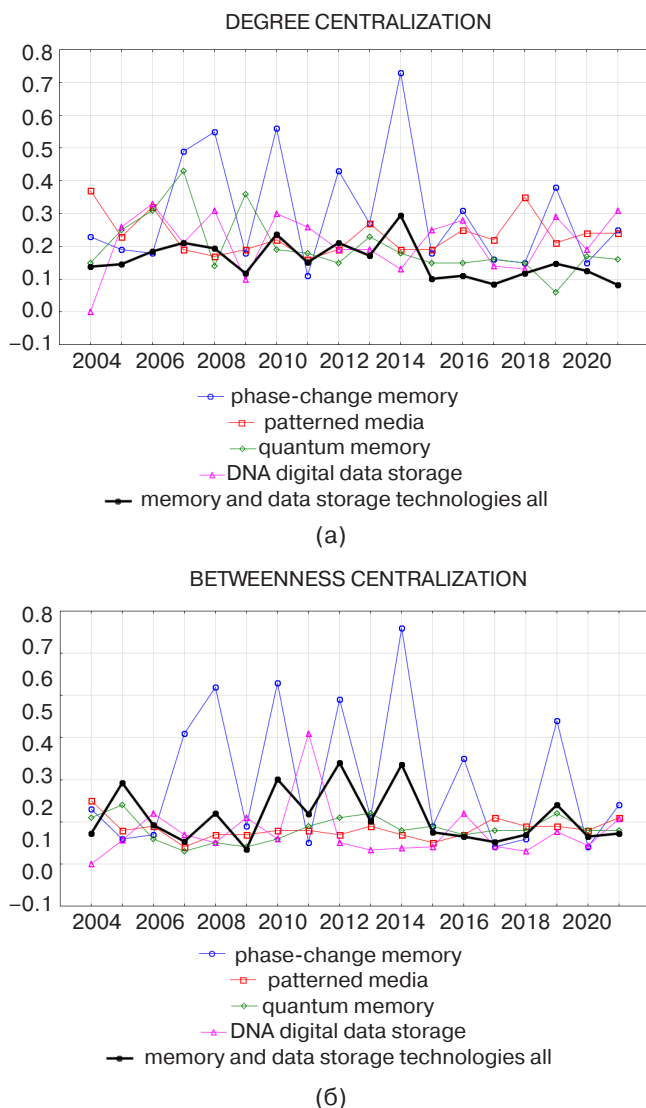


Рис. 5. Зависимость DC и BC сети от времени:
(а) зависимость степеней центральности вершин
сети от времени; (б) зависимость показателя
промежуточности между вершинами сети от времени

Betweenness Centralization (BC) – это вариация показателей промежуточности между вершинами сети, деленное на максимальное значение показателя промежуточности, возможное в сети одинакового размера. Для отдельного узла промежуточность отображает уровень его включенности в комбинации связей между другими узлами.

На рис. 5б видно, что осцилляция показателя BC ключевых слов в данной зависимости на интервале от 2004 до 2021 г. синхронна, что означает одинаковую фазу поведения кривых. Графически на заданном интервале наблюдается сильная корреляция экстремумов phase-change memory и MADSTA. Это объясняется тем, что появление тренда, связанного с осцилляциями показателя phase-change memory,

является импульсом для других терминов, при котором семантические связи на кратчайших путях между узлами проявляются более выражено.

Таким образом, использование эмпирического исследования предоставляет возможность найти на этапе разведочного анализа скрытые зависимости динамических параметров сетевых взаимодействий от времени, создавая основу для количественной оценки кластеризации и перколяционных переходов.

Анализ графиков показывает, что введение интегрирующего параметра MADSTA отображает взаимодействие исследуемых ключевых слов. Подтверждением этому служит тесная корреляция на графиках зависимостей динамических параметров сети (средней степени, показателя промежуточности и плотности) на заданном интервале. Общее количество связей возрастает, что объясняет образование новых кластеров (C4, C5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритмический подход, реализованный в работе, позволяет обеспечить максимальную объективность поиска и скорость, с которой он позволяет углубиться в заданную предметную область исследований. Уровень достоверности получаемой информации повышен за счет формирования комбинированного алгоритма извлечения терминов на основе расширенной экспертной среды и научно достоверных качественных исследовательских БД.

Реализация алгоритмических запросов библиографической БД Scopus позволяет создать расширенную терминологическую базу, составляющую в динамике 2004–2021 гг. диапазон 645–3364 термов категории «Технологии памяти и хранения данных», и обеспечить вывод данных в формате .csv для дальнейшей обработки и анализа в специализированных программных инструментах.

Сравнительный анализ карты визуализации данных термов, выполненных в программной среде VOSviewer, интегрированных суммарно в 23 кластера, выявил в области кластера C1 («quantum memory») активное кластерообразование, связанное с термом C5 «post-quantum cryptography», позволяющее делать качественные выводы о локальной динамике научного ландшафта.

Результатом эмпирического исследования динамики формирования взаимодействий термов в сетевом калькуляторе Pajek и последующей обработки полученных параметров в пакете STATISTICA является построение временных рядов по изменению средней степени и общего числа связей, плотности сети, степеней центральности и показателя промежуточности библиографической сети.

Для продолжения анализа следует дополнить полученный эмпирический материал данными общих

сетевых параметров, характеризующих количество и размеры компонентов в сети, распределение расстояний в сети и степень распределения сетевых фрагментов, включая наличие гигантского компонента.

Формирование полного комплекса базовых параметров необходимо при последующем математическом и вычислительном моделировании информационных

сетей, в ходе которых будет проведена оценка динамики кластеризации сети и достижения порога перколяции с течением времени.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maltseva D., Batagelj V. Journals publishing social network analysis. *Scientometrics*. 2021;126(4): 3593–3620. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-03889-z>
2. Жуков Д.О., Хватова Т.Ю., Зальцман А.Д. Моделирование стохастической динамики изменения состояний узлов и перколяционных переходов в социальных сетях с учетом самоорганизации и наличия памяти. *Информатика и ее применения*. 2021;15(1):102–110. <https://doi.org/10.14357/19922264210114>
3. Chkhartishvili A.G., Gubanov D.A., Novikov D.A. Models of influence in social networks. In: *Social Networks: Models of Information Influence, Control and Confrontation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2019;189:1–40. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05429-8_1
4. Newman M.E.J. The structure and function of complex networks. *SIAM Rev.* 2003;45(2):167–256. <https://doi.org/10.1137/S003614450342480>
5. Dashko Yu.V., Kramarov S.O., Zhdanov A.V. Sintering of polycrystalline ferroelectrics and the percolation problem in stochastically packed networks. *Ferroelectrics*. 1996;186(1): 85–88. <https://doi.org/10.1080/00150199608218039>
6. Broadbent S.R., Hammersley J.M. Percolation processes: I. Crystals and mazes. *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1957;53(3):629–641. <https://doi.org/10.1017/S0305004100032680>
7. Li M., Liu R.-R., Lu L., Hu M.-B., Xu S., Zhang Y.-C. Percolation on complex networks: Theory and application. *Phys. Rep.* 2021;907:1–68. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.12.003>
8. Brunk N.E., Twarock R. Percolation theory reveals biophysical properties of virus-like particles. *ACS Nano*. 2021;15(8):12988–12995. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c01882>
9. Shao J., Havlin S., Stanley H.E. Dynamic opinion model and invasion percolation. *Phys. Rev. Lett.* 2009; 103(1):018701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.018701>
10. Бодрунов С.Д. *Ноономика*. М.: Культурная революция; 2018. 432 с. ISBN 978-5-6040343-1-6
11. Wickham H., Golemund G. *R for data science: import, tidy, transform, visualize, and model data*. O'Reilly Media, Inc.; 2016. 492 p.
12. Попов О.Р., Крамаров С.О. Исследование распространения информации в сетях, структурированных из набора прогностических терминов. *Вестник кибернетики*. 2022;1(45):38–45. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-1-38-45>

REFERENCES

1. Maltseva D., Batagelj V. Journals publishing social network analysis. *Scientometrics*. 2021;126(4): 3593–3620. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-03889-z>
2. Zhukov D.O., Khvatova T.Yu., Zal'tsman A.D. Modeling of the stochastic dynamics of changes in node states and percolation transitions in social networks with self-organization and memory. *Informatika i ee Primeneniya = Informatics and Applications*. 2021;15(1):102–110 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/19922264210114>
3. Chkhartishvili A.G., Gubanov D.A., Novikov D.A. Models of influence in social networks. In: *Social Networks: Models of Information Influence, Control and Confrontation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2019;189:1–40. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05429-8_1
4. Newman M.E.J. The structure and function of complex networks. *SIAM Rev.* 2003;45(2):167–256. <https://doi.org/10.1137/S003614450342480>
5. Dashko Yu.V., Kramarov S.O., Zhdanov A.V. Sintering of polycrystalline ferroelectrics and the percolation problem in stochastically packed networks. *Ferroelectrics*. 1996;186(1):85–88. <https://doi.org/10.1080/00150199608218039>
6. Broadbent S.R., Hammersley J.M. Percolation processes: I. Crystals and mazes. *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1957;53(3):629–641. <https://doi.org/10.1017/S0305004100032680>
7. Li M., Liu R.-R., Lu L., Hu M.-B., Xu S., Zhang Y.-C. Percolation on complex networks: Theory and application. *Phys. Rep.* 2021;907:1–68. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.12.003>
8. Brunk N.E., Twarock R. Percolation theory reveals biophysical properties of virus-like particles. *ACS Nano*. 2021;15(8):12988–12995. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c01882>
9. Shao J., Havlin S., Stanley H.E. Dynamic opinion model and invasion percolation. *Phys. Rev. Lett.* 2009;103(1):018701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.018701>
10. Bodrunov S.D. *Noonomika (Noonomics)*. Moscow: Kul'turnaya revolyutsiya; 2018. 432 p. (in Russ.). ISBN 978-5-6040343-1-6
11. Wickham H., Golemund G. *R for data science: import, tidy, transform, visualize, and model data*. O'Reilly Media, Inc.; 2016. 492 p.
12. Popov O.R., Kramarov S.O. The study of information dissemination in networks arranged from a set of forecasting terms. *Vestnik kibernetiki = Proceedings in Cybernetics*. 2022;1(45):38–45 (in Russ.). <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-1-38-45>

13. Попов О.Р. Адаптация мировых практик к проблеме долгосрочного технологического прогнозирования состояния самоорганизующихся интеллектуальных систем. *Интеллектуальные ресурсы – региональному развитию*. 2021;2:91–98.
14. Когай В.Н., Пак В.С. Алгоритмическая модель компьютерной системы выделения ключевых слов из текста на базе онтологий. *Проблемы современной науки и образования*. 2016;16(58):33–40.
15. Панин С.Б. Современные наукометрические системы «WoS» и «Scopus»: издательские проблемы и новые ориентиры для российской вузовской науки. *Гуманитарные исследования Центральной России*. 2019;3:51–65. <https://doi.org/10.24411/2541-9056-2019-11030>
16. Thilakaratne M., Falkner K., Atapattu T. A systematic review on literature-based discovery: general overview, methodology, & statistical analysis. *ACM Computing Surveys*. 2019;52(6):Article 129. <https://doi.org/10.1145/3365756>
17. Gerlach M., Peixoto T.P., Altmann E.G. A network approach to topic models. *Sci. Adv.* 2018;4(7):eaq1360. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aq1360>
18. Zelenkov Yu. The topic dynamics in knowledge management research. In: Uden L., Ting I.H., Corchado J. (Eds.). *Knowledge Management in Organizations (KMO 2019): Proceedings of the 14th International Conference*. 2019. P. 324–335. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21451-7_28
19. Van Eck N.J., Waltman L. Visualizing bibliometric networks. In: Ding Y., Rousseau R., Wolfram D. (Eds.). *Measuring Scholarly Impact: Methods and Practice*. Springer; 2014. P. 284–321. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13
20. Van Eck N.J., Waltman L. *Accuracy of citation data in Web of Science and Scopus*. arXiv preprint arXiv:1906.07011. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.07011>
21. Erdős P., Rényi A. On random graphs I. *Publ. Math. Debrecen*. 1959;6:290–297. URL: <https://studylib.net/doc/25387956/on-random-graphs--1959--by-p.-erdos-and-a.-renyi>
22. De Nooy W., Mrvar A., Batagelj V. *Exploratory social network analysis with Pajek: Revised and expanded edition for updated software*. 3rd ed. Series: Structural Analysis in the Social Sciences. Cambridge: Cambridge University Press; 2018. 484 p. <https://doi.org/10.1017/9781108565691>
23. Doreian P., Batagelj V., Ferligoj A. (Eds.). *Advances in network clustering and blockmodeling*. John Wiley & Sons; 2020. 414 p.
24. Zuanazzi N.R., de Castilhos Ghisi N., Oliveira E.C. Analysis of global trends and gaps for studies about 2, 4-D herbicide toxicity: A scientometric review. *Chemosphere*. 2020;241:125016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125016>
25. Сигов А.С., Андрианова Е.Г., Жуков Д.О., Зыков С.В., Тарасов И.Е. Квантовая информатика: обзор основных достижений. *Russ. Technol. J.* 2019;7(1):5–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-5-37>
13. Popov O.R. Adaptation of world practices to the problem of long-term technological forecasting of the state of self-organizing intelligent systems. *Intellectual'nye resursy – regional'nomu razvitiyu = Intellectual Resources – Regional Development*. 2021;2:91–98 (in Russ.).
14. Kogai V.N., Pak V.S. Algorithmic model of computer system of keywords extracting from text based on ontology. *Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniya = Problems of Modern Science and Education*. 2016;16(58):33–40 (in Russ.).
15. Panin S.B. Modern scientometric systems “WoS” and “Scopus”: publishing problems and new guidelines for Russian university science. *Gumanitarnye issledovaniya Tsentral'noi Rossii = Humanities Researches of the Central Russia*. 2019;3:51–65 (in Russ.). <https://doi.org/10.24411/2541-9056-2019-11030>
16. Thilakaratne M., Falkner K., Atapattu T. A systematic review on literature-based discovery: general overview, methodology, & statistical analysis. *ACM Computing Surveys*. 2019;52(6):Article 129. <https://doi.org/10.1145/3365756>
17. Gerlach M., Peixoto T.P., Altmann E.G. A network approach to topic models. *Sci. Adv.* 2018;4(7):eaq1360. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aq1360>
18. Zelenkov Yu. The topic dynamics in knowledge management research. In: Uden L., Ting I.H., Corchado J. (Eds.). *Knowledge Management in Organizations (KMO 2019): Proceedings of the 14th International Conference*. 2019. P. 324–335. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21451-7_28
19. Van Eck N.J., Waltman L. Visualizing bibliometric networks. In: Ding Y., Rousseau R., Wolfram D. (Eds.). *Measuring Scholarly Impact: Methods and Practice*. Springer; 2014. P. 284–321. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13
20. Van Eck N.J., Waltman L. *Accuracy of citation data in Web of Science and Scopus*. arXiv preprint arXiv:1906.07011. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.07011>
21. Erdős P., Rényi A. On random graphs I. *Publ. Math. Debrecen*. 1959;6:290–297. Available from URL: <https://studylib.net/doc/25387956/on-random-graphs--1959--by-p.-erdos-and-a.-renyi>
22. De Nooy W., Mrvar A., Batagelj V. *Exploratory social network analysis with Pajek: Revised and expanded edition for updated software*. 3rd ed. Series: Structural Analysis in the Social Sciences. Cambridge: Cambridge University Press; 2018. 484 p. <https://doi.org/10.1017/9781108565691>
23. Doreian P., Batagelj V., Ferligoj A. (Eds.). *Advances in network clustering and blockmodeling*. John Wiley & Sons; 2020. 414 p.
24. Zuanazzi N.R., de Castilhos Ghisi N., Oliveira E.C. Analysis of global trends and gaps for studies about 2, 4-D herbicide toxicity: A scientometric review. *Chemosphere*. 2020;241:125016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125016>
25. Sigov A.S., Andrianova E.G., Zhukov D.O., Zykov S.V., Tarasov I.E. Quantum informatics: Overview of the main achievements. *Russ. Technol. J.* 2019;7(1):5–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-5-37>

Об авторах

Крамаров Сергей Олегович, д.ф.-м.н., профессор, советник президента университета, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); главный научный сотрудник, БУ ВО «Сургутский государственный университет» (628408, Россия, Сургут, ул. Энергетиков, д. 22). E-mail: maooovo@yandex.ru. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

Попов Олег Русланович, к.т.н., доцент, эксперт-аналитик временной научной группы кафедры технологии и профессионально-педагогического образования, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (344006, Россия, Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, д. 105/42). E-mail: cs41825@aaanet.ru. ResearcherID AAT-8018-2021, <http://orcid.org/0000-0001-6209-3554>

Джариев Исмаил Эльшан оглы, младший научный сотрудник, аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Политехнического института БУ ВО «Сургутский государственный университет» (628408, Россия, Сургут, ул. Энергетиков, д. 22). E-mail: dzhariev2_ie@edu.surgu.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4068-1050>

Петров Егор Аркадьевич, младший научный сотрудник, аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Политехнического института БУ ВО «Сургутский государственный университет» (628408, Россия, Сургут, ул. Энергетиков, д. 22). E-mail: petrov2_ea@edu.surgu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4151-197X>

About the authors

Sergey O. Kramarov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Advisor to the President of the University, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Chief Researcher, Surgut State University (22, Energetikov ul., Surgut, 628408 Russia). E-mail: maooovo@yandex.ru. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

Oleg R. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Expert-Analyst of the Temporary Scientific Team of the Department of Technology and Professional and Pedagogical Education, Southern Federal University (105/42, Bolshaya Sadovaya ul., Rostov-on-Don, 344006 Russia). E-mail: cs41825@aaanet.ru. ResearcherID AAT-8018-2021, <http://orcid.org/0000-0001-6209-3554>

Ismail E. Dzhariev, Junior Researcher, Postgraduate Student, Department of Automated Information Processing and Management Systems of the Polytechnic Institute, Surgut State University (22, Energetikov ul., Surgut, 628408 Russia). E-mail: dzhariev2_ie@edu.surgu.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4068-1050>

Egor A. Petrov, Junior Researcher, Postgraduate Student, Department of Automated Information Processing and Management Systems of the Polytechnic Institute, Surgut State University (22, Energetikov ul., Surgut, 628408 Russia). E-mail: petrov2_ea@edu.surgu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4151-197X>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние погрешностей системы синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией

Г.В. Куликов^{1, @},
С.Х. Данг¹,
А.Г. Куликов²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² CGF, Москва, 105082 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Резюме

Цели. Актуальной задачей современных систем радиосвязи и телевидения является повышение качества и количества передаваемой информации. Применение многопозиционных сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией (АФМ) 16-АФМ и 32-АФМ в системах цифрового спутникового телевидения стандарта DVB-S2 обеспечило возможность передачи на 30% больше данных в тех же полосах частот по сравнению с предыдущим стандартом DVB-S. Такое увеличение скорости передачи информации определило более жесткие требования к аппаратному обеспечению этих систем. Для приема сигналов АФМ, как и для многих других систем, использующих когерентную обработку сигналов, важную роль играет стабильность работы систем синхронизации. Наличие погрешностей в их работе может значительно снизить качество приема информации. Цель работы – анализ влияния погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией с кольцевой структурой сигнального созвездия.

Методы. Используются методы статистической радиотехники и теории оптимального приема сигналов.

Результаты. Проведен анализ влияния погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией с кольцевой структурой сигнального созвездия. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от величины фазового сдвига и смещения тактовых моментов. Проведено сравнение влияния погрешностей синхронизации на качество приема с известными результатами для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ).

Выводы. Установлено, что при допустимых энергетических потерях не более 1 дБ критической фазовой погрешностью можно считать величину 2–3 градуса, а критическая тактовая погрешность составляет 3–4%. Когерентный приемник сигналов АФМ более чувствителен к фазовой погрешности опорных колебаний, чем аналогичный приемник сигналов КАМ, а тактовые погрешности одинаково сказываются на качестве приема этих сигналов.

Ключевые слова: амплитудно-фазовая манипуляция, синхронизация, фазовая погрешность, тактовая погрешность, помехоустойчивость

• Поступила: 23.11.2022 • Доработана: 14.12.2022 • Принята к опубликованию: 03.03.2023

Для цитирования: Куликов Г.В., Данг С.Х., Куликов А.Г. Влияние погрешностей системы синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):30–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-30-37>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Effect of synchronization system errors on the reception noise immunity of amplitude-phase shift keyed signals

Gennady V. Kulikov ^{1, @},
Xuan Khang Dang ¹,
Alexey G. Kulikov ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² CGF, Moscow, 105082 Russia

@ Corresponding author, e-mail: kulikov@mirea.ru

Abstract

Objectives. An urgent task in the context of modern radio and television systems is to improve the quality and quantity of transmitted information. For example, the use of multiple amplitude-phase shift keyed (APSK) signals—16-APSK and 32-APSK—in digital satellite television systems of the Digital Video Broadcasting–Satellite2 (DVB-S2) standard made it possible to transmit 30% more data in the same frequency bands in comparison with the previous DVB-S standard. Such increases in information transmission rates impose more stringent requirements on hardware. An important role in the reception of APSK signals, as well as the signals of other coherent signal processing systems, is played by the stability of synchronization systems. The presence of operational errors can significantly reduce the quality of information reception. The aim of the present work was to analyze the effect of phase and clock synchronization errors on the reception noise immunity of APSK signals with a ring signal constellation structure.

Methods. The study used statistical radio engineering methods informed by optimal signal reception theory.

Results. The effect of phase and clock synchronization errors on the reception noise immunity of APSK signals having a signal constellation ring structure is analyzed. The dependencies of the bit error probability on the magnitude of the phase shift and the clock offset were characterized. The effect of synchronization errors on reception quality were compared with the known results for quadrature amplitude modulation (QAM) signals.

Conclusions. At an acceptable energy loss of no more than 1 dB, the critical phase error can be considered as 2°–3°, while the critical clock error is 3–4%. A coherent receiver of APSK signals is more sensitive to the phase error of reference oscillations than a similar receiver of QAM signals, whereas clock errors have the same effect on the reception quality of these signals.

Keywords: amplitude-phase shift keying, synchronization, phase error, clock error, noise immunity

• Submitted: 23.11.2022 • Revised: 14.12.2022 • Accepted: 03.03.2023

For citation: Kulikov G.V., Dang X.Kh., Kulikov A.G. Effect of synchronization system errors on the reception noise immunity of amplitude-phase shift keyed signals. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):30–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-30-37>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества и количества передаваемой информации является актуальной задачей для современных систем радиосвязи и телевидения. Так, применение многопозиционных сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией (АФМ) 16-АФМ и 32-АФМ в системах нового поколения стандарта спутникового телевидения DVB-S2 позволило передавать на 30% больше данных в тех же полосах частот по сравнению с предыдущим стандартом DVB-S¹ [1]. Такое увеличение скорости передачи информации определило более жесткие требования к аппаратному обеспечению этих систем. Для приема сигналов АФМ, как и для многих других систем, использующих когерентную обработку сигналов, важную роль играет стабильность работы систем синхронизации. Наличие погрешностей в их работе может значительно снизить качество приема информации. В [2–12] проанализировано влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов с квадратной формой сигнала созвездия (сигналы КАМ). В данной статье проведен анализ влияния погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией с кольцевой структурой сигнала созвездия.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Модель сигнала АФМ на длительности тактового интервала T_s зададим следующим образом:

$$S_i(t) = A_{cp} r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i), t \in (0, T_s], i = \overline{0, M-1}, \quad (1)$$

где A_{cp} – средняя амплитуда сигнала; ω_0 – несущая частота; r_i и φ_i – величины, определяющие амплитуду и фазу сигнальной посылки; M – позиционность сигнала.

Работу многоканального когерентного приемника АФМ-сигналов (рис. 1) [13, 14] рассмотрим при наличии белого гауссовского шума $n(t)$ с параметрами:

$$\langle n(t) \rangle = 0; \langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1),$$

где N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума; δ – дельта-функция; t_1, t_2 – моменты времени.

Корреляторы приемника вычисляют интегралы свертки

$$J_i = \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{opi}(t) dt, i = \overline{0, M-1} \quad (2)$$

принимаемого процесса $x(t) = s_i(t) + n(t)$ с опорными сигналами $s_{opi}(t)$. Сравнение полученных значений J_i и их комбинаций с порогами, заложенными в решающем устройстве (блоке выбора максимума), позволяет определить передаваемый канальный символ.

Вероятность ошибочного приема любого m -го канального символа находится при условии $J_m > \{J_i + \delta_{mi}\}; i \neq m; i, m = \overline{0, M-1}$, а именно:

$$P_{esm} = 1 - \prod_{\substack{i=0 \\ m \neq i}}^{M-1} p(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m, \quad (3)$$

где $p(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m$ – вероятность того, что выходное значение m -го коррелятора больше выходного значения любого другого i -го коррелятора при условии,

что передавался m -й символ; $\delta_{mi} = \frac{E_{s_m} - E_{s_i}}{N_0} =$

$= \frac{E_{s_{cp}}}{N_0} (r_m^2 - r_i^2) = \frac{E_b \log_2 M}{N_0} (r_m^2 - r_i^2)$ – порог принятия решения. Здесь E_b – средняя энергия сигнала, приходящаяся на 1 бит информации; E_{s_m}, E_{s_i} – энергии m -й и i -й сигнальных посылок; $E_{s_{cp}}$ – среднее значение энергии сигнальных посылок.

Вероятности $p(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m$ можно рассчитать, определив статистические характеристики распределений случайных процессов J_i и их линейных комбинаций – математические ожидания m_{mi} и дисперсии D_{mi} [15]:

$$p(I_m - I_i > \delta_i)|_m = 1 - Q\left(\frac{m_{mi}}{\sqrt{D_{mi}}}\right),$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt, \quad (4)$$

где $Q(x)$ – это Q -функция.

¹ DVB. <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>. Дата обращения 20.12.2022. / Accessed December 20, 2022.

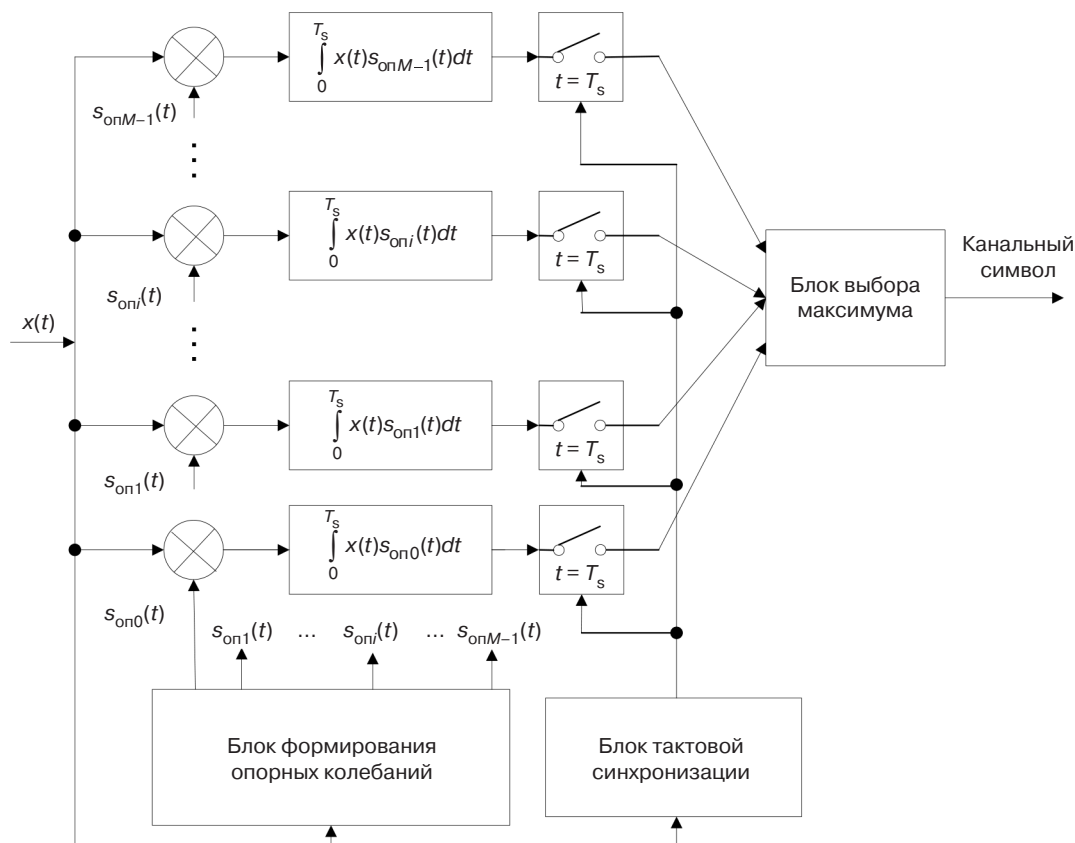


Рис. 1. Структурная схема многоканального когерентного приемника АФМ-сигналов

Для нахождения вероятности битовой ошибки при использовании кодирования Грея можно воспользоваться соотношением [13]:

$$P_{eb} = \frac{P_{es}}{\log_2 M}. \quad (5)$$

Наличие погрешностей в формировании опорных сигналов $s_{oni}(t)$ вызывает погрешности в вычислении корреляционных интегралов (2) и, как следствие, увеличение вероятностей ошибок (3) и (5).

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ БЛОКА ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Фазовая погрешность блока формирования опорных колебаний $s_{oni}(t)$ вызвана дополнительным фазовым сдвигом ϕ , например, за счет неидеальности характеристик системы автоподстройки:

$$s_{oni}(t) = A_{cp} r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \phi), \quad i = \overline{0, M-1}.$$

Пример влияния такого сдвига на форму сигнального созвездия для сигнала 16-АФМ показан на рис. 2.

В этом случае математические ожидания m_{mi} и дисперсии D_{mi} , входящие в (4), имеют вид:

$$m_{mi} = \frac{E_{scp}}{N_0} (2r_m^2 \cos \phi - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i - \phi) - r_m^2 + r_i^2),$$

$$D_{mi} = \frac{2E_{scp}}{N_0} (r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)).$$

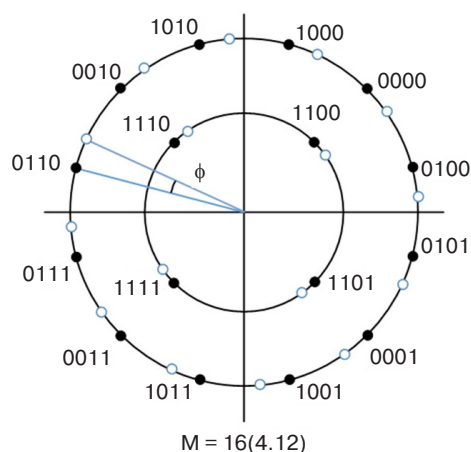
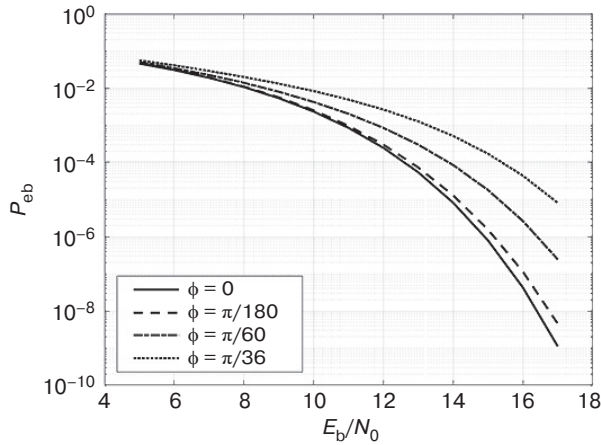
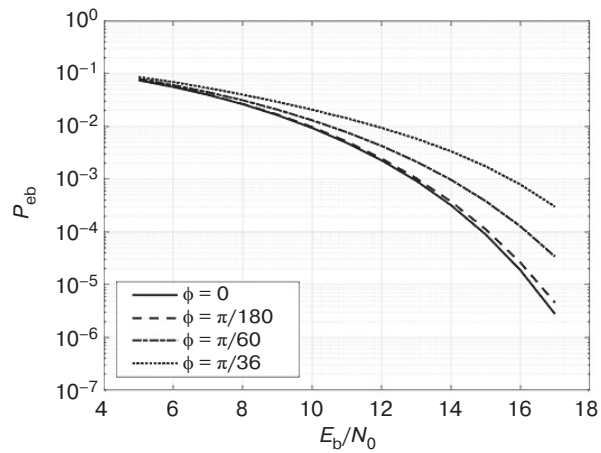


Рис. 2. Изменение сигнального созвездия 16-АФМ при наличии фазового сдвига ϕ

Расчет вероятности битовой ошибки по формулам (3)–(5) для сигналов 16-АФМ и 32-АФМ дает следующие результаты (рис. 3, 4).



(a)



(б)

Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при фазовом сдвиге ϕ опорных колебаний: (а) 16-АФМ; (б) 32-АФМ

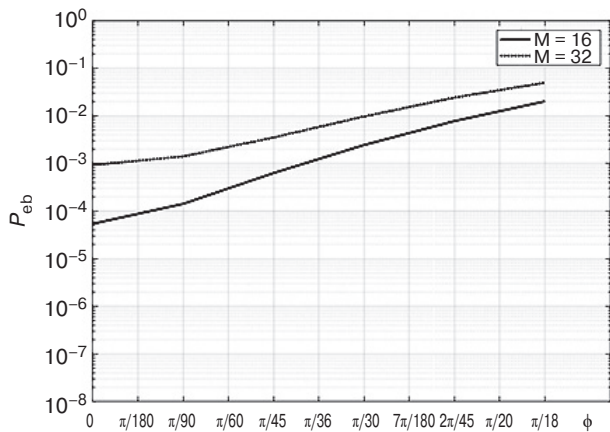


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки от фазового сдвига опорных колебаний ϕ ($E_b/N_0 = 13$ дБ)

Видно, что при наличии небольшого фазового сдвига $\phi < \pi/90$ (2 градуса) вероятность битовой ошибки снижается незначительно, но по мере его увеличения помехоустойчивость заметно ухудшается, и при $\phi > \pi/45 = 4^\circ$ величина P_{eb} может

увеличиться на порядок. Расчеты показывают, что для $P_{eb} = 10^{-4}$ при $\phi = \pi/36 = 5^\circ$ это эквивалентно энергетическим потерям около 2.5 дБ, если $M = 16$, и 3.0 дБ, если $M = 32$.

Сравнение полученных результатов с результатами, полученными в [5, 9] для сигналов КАМ, показывает, что при одинаковой позиционности когерентный прием сигналов с квадратной формой сигнала несколько более устойчив к фазовым погрешностям опорных колебаний, чем для сигналов с кольцевой формой. Так, например, при $\phi = \pi/60 = 3^\circ$ и $P_{eb} = 10^{-4}$ энергетические потери составляют 1.0 дБ и 1.2 дБ, соответственно.

ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ТАКОВЫХ МОМЕНТОВ В БЛОКЕ ТАКОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Погрешности в работе блока тактовой синхронизации могут приводить к сдвигу на некоторое значение ξ во времени тактовых импульсов, определяющих пределы интегрирования в (2).

В этом случае вычисление интегралов свертки

$$J_i = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s + \xi} x(t)r_i \cos(\omega_0 t + \phi_i) dt$$

осуществляется со следующими параметрами принимаемых и опорных сигналов:

$$s(t) = \begin{cases} A_{cp}r_i \cos(\omega_0 t + \phi_i), & t \in (\xi, T_s), \\ A_{cp}r_j \cos(\omega_0 t + \phi_j), & t \in [T_s, T_s + \xi), \end{cases}$$

$$s_{опi}(t) = A_{cp}r_i \cos(\omega_0 t + \phi_i), t \in (\xi, T_s + \xi),$$

где индекс j относится к соседнему каналному символу.

В этом случае математические ожидания m_{mi} и дисперсии D_{mi} , входящие в (4), примут вид:

$$\begin{aligned} m_{mi} = & \frac{2E_{scp}}{N_0} r_m \left(1 - \frac{\xi}{T_s}\right) (r_m - r_i \cos(\phi_m - \phi_i)) + \\ & + \frac{2E_{scp}}{N_0} r_j \frac{\xi}{T_s} (r_m \cos(\phi_j - \phi_m) - \\ & - r_i \cos(\phi_j - \phi_i)) - \frac{E_{scp}}{N_0} (r_m^2 - r_i^2), \end{aligned}$$

$$D_{mi} = \frac{2E_{scp}}{N_0} (r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\phi_m - \phi_i)).$$

Зависимости вероятности битовой ошибки при различных значениях тактового смещения показаны на рис. 5 и 6.

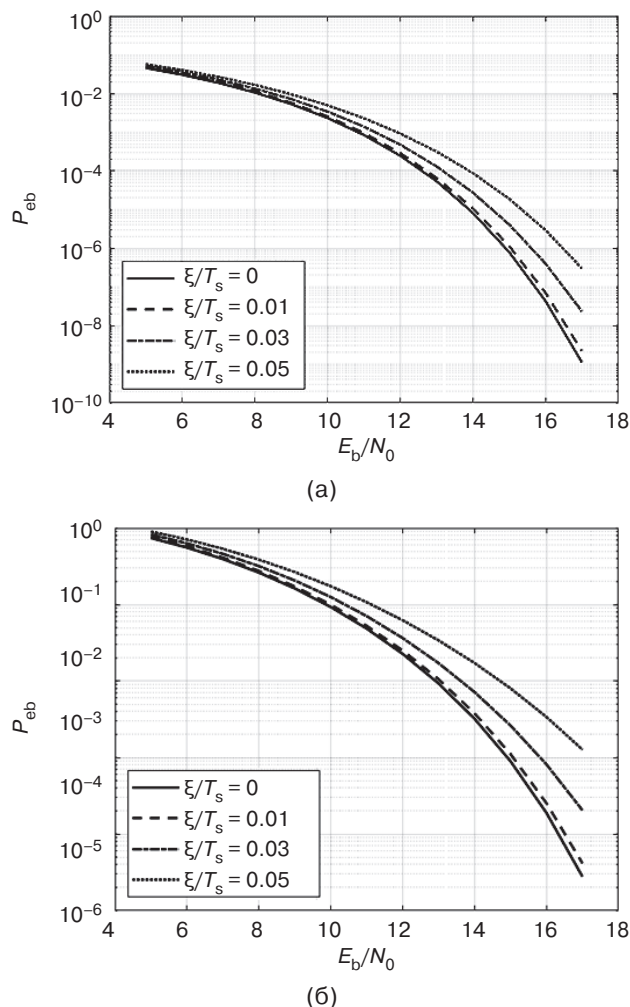


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при смещении тактовых моментов ξ/T_s : (а) 16-АФМ; (б) 32-АФМ

Видно, что большая погрешность системы тактовой синхронизации заметно снижает помехоустойчивость приема сигналов АФМ. Так, для $P_{eb} = 10^{-4}$ уже при $\xi/T_s = 0.05$ (или 5%) эквивалентные энергетические потери составляют около 1.5 дБ, если $M = 16$, и 2.0 дБ, если $M = 32$.

Аналогичный анализ для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией, выполненный в [5, 9], показал, что тактовые погрешности одинаково сказываются на качестве приема сигналов КАМ и АФМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minoli D. *Innovations in satellite communications and satellite technology: The industry implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. New York: John Wiley & Sons; 2015. 448 p. ISBN 978-1-118-98408-6

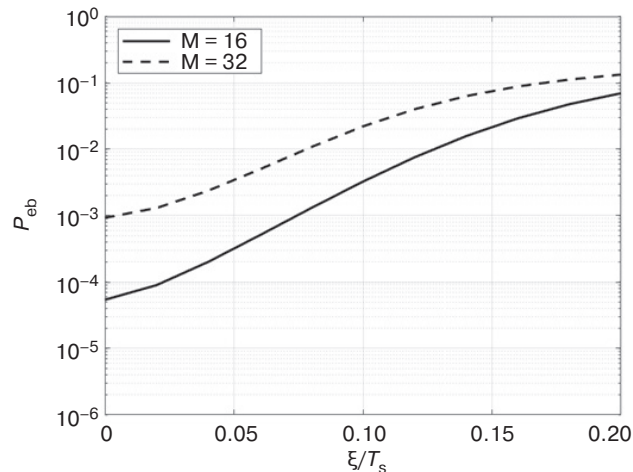


Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки от смещения тактовых моментов ξ/T_s ($E_b/N_0 = 13$ дБ)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Наличие фазового сдвига опорных колебаний при когерентном приеме сигналов АФМ может привести к заметному ухудшению помехоустойчивости. При допустимых энергетических потерях не более 1 дБ критической фазовой погрешностью можно считать величину 2–3 градуса.
2. Наличие погрешности в работе блока тактовой синхронизации при когерентном приеме сигналов АФМ также может заметно снизить помехоустойчивость. При допустимых энергетических потерях не более 1 дБ критической тактовой погрешностью можно считать величину 3–4%.
3. Когерентный приемник сигналов АФМ более чувствителен к фазовой погрешности опорных колебаний, чем аналогичный приемник сигналов КАМ, а тактовые погрешности одинаково сказываются на качестве приема этих сигналов.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

REFERENCES

1. Minoli D. *Innovations in satellite communications and satellite technology: The industry implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. New York: John Wiley & Sons; 2015. 448 p. ISBN 978-1-118-98408-6

2. Савищенко Н.В. Помехоустойчивость когерентного приема многопозиционных сигналов КАМ и ФМ при неидеальной синхронизации. *Информационно-управляющие системы*. 2010;1(44):53–63.
3. Артеменко А.А., Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в М-КАМ системах передачи данных. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2007;2:81–87.
4. Куликов Г.В., Ван Зунг Н. Влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ. *Russ. Technol. J.* 2019;7(5):47–61. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
5. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Баталов Е.В. Влияние погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Russ. Technol. J.* 2021;9(2):35–43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>
6. Довбня В.Г., Севрюков А.Е. Влияние качества функционирования системы тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема КАМ-сигналов. *Телекоммуникации*. 2016;4:43–47.
7. Saeedi-Sourck H., Sadri S., Wu Y., Bergmans J.W.M., Farhang-Boroujeny B. Sensitivity analysis of offset QAM multicarrier systems to residual carrier frequency and timing offsets. *Signal Process.* 2011;91(7):1604–1612. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.12.019>
8. Chung W., Kim B., Choi M., Nam H., Yu H., Choi S., Hong D. Synchronization error in QAM-based FBMC system. In: *2014 IEEE Military Communications Conference*. 2014. P. 699–705. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2014.122>
9. Kulikov G.V., Van Dung N., Kulagin V.P., Lelyukh A.A. Influence of synchronization errors on the noise immunity of receiving multi-position M-PSK and M-QAM signals. In: *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020:9166034. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166034>
10. Teng K., Zhang Y., Yuan X., Liu Q. Implementation of a novel M-QAM OFDM timing synchronization method with FSO RoF system. In: *2019 7th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN)*. 2019. P. 48–52. <https://doi.org/10.1109/ICICN.2019.8834953>
11. Huang Y., Song Q., Wang S., Jamalipour A. Symbol error rate analysis for M-QAM modulated physical-layer network coding with phase errors. In: *2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications – (PIMRC)*. 2012. P. 2003–2008. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2012.6362683>
12. Matta M., Cardarilli G.C., Di Nunzio L., Fazzolari R. A reinforcement learning-based QAM/PSK symbol synchronizer. In: *IEEE Access*. 2019;7:124147–124157. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938390>
13. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
14. Fuqin Xiong. *Digital modulation techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House; 2006. 1039 p.
2. Savishchenko N.V. Noise immunity of coherent reception of multi-position QAM and PSK signals in the case of non-ideal synchronization. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2010;1(44):53–63 (in Russ.).
3. Artemenko A.A., Maltsev A.A., Rubtsov A.E. Effect of the carrier-phase estimation error on the bit-error rate in M-QAM data transmission systems. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod*. 2007;2:81–87 (in Russ.).
4. Kulikov G.V., Van Dung N. Influence of synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of M-PSK signals. *Russ. Technol. J.* 2019;7(5):47–61 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
5. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Batalov E.V. Influence of phase and clock synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation. *Russ. Technol. J.* 2021;9(2):35–43 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>
6. Dovbnya V.G., Sevryukov A.E. Influence of performance quality of clock synchronization system on noise immunity of QAM signal reception. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2016;4:43–47 (in Russ.).
7. Saeedi-Sourck H., Sadri S., Wu Y., Bergmans J.W.M., Farhang-Boroujeny B. Sensitivity analysis of offset QAM multicarrier systems to residual carrier frequency and timing offsets. *Signal Process.* 2011;91(7):1604–1612. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.12.019>
8. Chung W., Kim B., Choi M., Nam H., Yu H., Choi S., Hong D. Synchronization error in QAM-based FBMC system. In: *2014 IEEE Military Communications Conference*. 2014. P. 699–705. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2014.122>
9. Kulikov G.V., Van Dung N., Kulagin V.P., Lelyukh A.A. Influence of synchronization errors on the noise immunity of receiving multi-position M-PSK and M-QAM signals. In: *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020:9166034. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166034>
10. Teng K., Zhang Y., Yuan X., Liu Q. Implementation of a novel M-QAM OFDM timing synchronization method with FSO RoF system. In: *2019 7th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN)*. 2019. P. 48–52. <https://doi.org/10.1109/ICICN.2019.8834953>
11. Huang Y., Song Q., Wang S., Jamalipour A. Symbol error rate analysis for M-QAM modulated physical-layer network coding with phase errors. In: *2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications – (PIMRC)*. 2012. P. 2003–2008. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2012.6362683>
12. Matta M., Cardarilli G.C., Di Nunzio L., Fazzolari R. A reinforcement learning-based QAM/PSK symbol synchronizer. In: *IEEE Access*. 2019;7:124147–124157. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938390>
13. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. McGraw-Hill; 2001. 1002 p.

15. Тихонов В.И. *Статистическая радиотехника*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь; 1982. 624 с.
14. Fuqin Xiong. *Digital modulation techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House; 2006. 1039 p.
15. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika (Statistical radio engineering)*. 2nd ed. Moscow: Radio i svyaz'; 1982. 624 p. (in Russ.).

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, SPIN-код РИНЦ 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Данг Суан Ханг, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dangxuankhang147@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3372-7172>

Куликов Алексей Геннадьевич, сотрудник компании CGF (105082, Россия, Москва, Бакунинская улица, д. 73, стр.1). E-mail: onemoreuser@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8241-9619>

About the authors

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, RSCI SPIN-code 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Xuan Khang Dang, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dangxuankhang147@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3372-7172>

Alexey G. Kulikov, CGF employee (73/1, Bakuninskaya ul., Moscow, 105082 Russia). E-mail: onemoreuser@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8241-9619>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 538.913
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-38-45>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Дисперсия оптических характеристик кристалла Si:PbGeO в терагерцовом диапазоне

В.Р. Билык¹,
К.А. Брехов^{1, @},
М.Б. Агранат²,
Е.Д. Мишина¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, 125412 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: brekhov_ka@mail.ru

Резюме

Цели. Успехи лазерной физики последнего десятилетия привели к созданию источников однопериодных электромагнитных импульсов длительностью порядка 1 пс, что соответствует терагерцовому (ТГц) диапазону частот, с амплитудой поля в несколько десятков МВ/см. Это позволило приложить электрическое поле к сегнетоэлектрику без электродов и наблюдать не только возбуждение когерентных фононов, но и сверхбыстрое, в субпикосекундном масштабе времени, динамическое переключение поляризации. Для обнаружения переключения поляризации используется метод накачки-зондирования, где в качестве накачки используется ТГц-импульс, а зонд является оптическим. Мерой переключения поляризации под действием ТГц-импульса служит сигнал второй оптической гармоники, поскольку ее интенсивность пропорциональна квадрату поляризации. Для оценки эффективности переключения требуются как линейные (показатель преломления и коэффициент поглощения), так и нелинейные оптические характеристики (квадратичная и кубическая восприимчивости). Знание линейных оптических характеристик необходимо также для любых применений рассматриваемых кристаллов в ТГц-диапазоне.

Методы. Использована методика ТГц-спектроскопии во временной области, в которой на вещество направляется пикосекундный ТГц-импульс, а регистрируется ТГц-импульс, прошедший через вещество, путем стробирования детектора фемтосекундным оптическим импульсом. Исследование ТГц-индуцированной динамики параметра порядка в сегнетоэлектрике проводилось путем детектирования интенсивности нелинейно-оптического сигнала на частоте второй оптической гармоники.

Результаты. На кристалле германата свинца, легированного кремнием, измерены пропускание ТГц-волны и интенсивность генерации второй гармоники во временной и спектральной областях, на основании чего рассчитаны дисперсия коэффициента поглощения и кубической нелинейной восприимчивости в диапазоне 0.5–2.0 ТГц. Обнаружено наличие области фундаментального поглощения вблизи фононных мод, а также резонансное усиление кубической нелинейной восприимчивости для двух фононных мод $\Omega_1 = 1.3$ ТГц и $\Omega_2 = 2.0$ ТГц.

Выводы. Предложенная методика эффективна для анализа дисперсии оптических характеристик сегнетоэлектрических кристаллов. Существенно улучшено спектральное разрешение, составляющее в данной работе 0.1 ТГц, а также точность определения нелинейной восприимчивости за счет детального анализа линейного и нелинейного вкладов в интенсивность второй гармоники.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, сегнетоэлектрики, спектроскопия, генерация второй оптической гармоники

• Поступила: 12.12.2022 • Доработана: 14.01.2023 • Принята к опубликованию: 24.02.2023

Для цитирования: Билык В.Р., Брехов К.А., Агранат М.Б., Мишина Е.Д. Дисперсия оптических характеристик кристалла Si:PbGeO в терагерцовом диапазоне. *Russ. Technol. J.* 2023; 11(3):38–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-38-45>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Dispersion of optical constants of Si:PbGeO crystal in the terahertz range

Vladislav R. Bilyk ¹,
Kirill A. Brekhov ^{1, @},
Mikhail B. Agranat ²,
Elena D. Mishina ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

@ Corresponding author, e-mail: brekhov_ka@mail.ru

Abstract

Objectives. Advances in laser physics over the last decade have led to the creation of sources of single-period electromagnetic pulses having a duration of about 1 ps, corresponding to the terahertz (THz) frequency range and a field amplitude of several tens of MV/cm. This allows the electrode-free application of an electric field to a ferroelectric for observing not only the excitation of coherent phonons, but also ultrafast (at the sub-picosecond timescale) dynamic polarization switching. To detect polarization switching, a pump-probe technique is used in which a THz pulse is used with an optical probe. Since its intensity is proportional to the square of the polarization, the signal of the optical second harmonic is used to measure polarization switching under the action of a THz pulse. To evaluate switching efficiency, both linear (refractive index and absorption coefficient) and non-linear optical characteristics (quadratic and cubic susceptibilities) are required. For any application of ferroelectric crystals in the THz range, knowledge of the relevant linear optical characteristics is also necessary.

Methods. The technique of THz spectroscopy in the time domain was used; here, a picosecond THz pulse transmitted through the crystal is recorded by strobing the detector with a femtosecond optical pulse. The THz-induced dynamics of the order parameter in a ferroelectric was studied by detecting the intensity of a nonlinear optical signal at the frequency of the second optical harmonic.

Results. The transmission of a THz wave and the intensity of second harmonic generation on a lead germanate crystal doped with silicon in the time and spectral domains were measured. On this basis, the absorption coefficient dispersion and cubic nonlinear susceptibility were calculated in the range of 0.5–2.0 THz. The presence of a region of fundamental absorption near the phonon modes was confirmed along with a resonant enhancement of the cubic nonlinear susceptibility for two phonon modes $\Omega_1 = 1.3$ THz and $\Omega_2 = 2.0$ THz.

Conclusions. The proposed technique is effective for analyzing the dispersion of the optical characteristics of ferroelectric crystals. The significantly improved spectral resolution (0.1 THz) increases the accuracy of determining nonlinear susceptibility due to the detailed analysis of the linear and nonlinear contributions to the second harmonic intensity.

Keywords: terahertz radiation, ferroelectrics, spectroscopy, optical second harmonic generation

• Submitted: 12.12.2022 • Revised: 14.01.2023 • Accepted: 24.02.2023

For citation: Bilyk V.R., Brekhov K.A., Agranat M.B., Mishina E.D. Dispersion of optical constants of Si:PbGeO crystal in the terahertz range. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):38–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-38-45>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллы германата свинца ($\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$, PGO) являются одноосными сегнетоэлектриками с температурой Кюри $T_C = 450$ К [1]. Эти кристаллы и кремнийсодержащие твердые растворы на их основе обладают особенностями спонтанного переключения поляризации, пьезоэлектрического и фоторефрактивного эффектов, которые могут быть использованы для различных применений. Изменением концентрации кремния в твердом растворе можно управлять точкой Кюри, переводя основные особенности в область температуры в пределах от комнатной до T_C , что существенно увеличивает области применения этих кристаллов, в т.ч. в качестве элементов пьезоприемников, сегнетоэлектрических запоминающих устройств. К настоящему времени имеется большое количество работ, посвященных строению этих материалов, их диэлектрическим, пьезо- и пьезоэлектрическим, механическим и другим свойствам, исследованным, в основном, в области низких частот [2].

Область частот 1–10 ТГц представляет большой интерес для исследований сегнетоэлектриков, поскольку именно на эту область приходится фононные моды, в т.ч. мягкая мода. До последнего времени для исследования некогерентных процессов в этой области применялась методика спектроскопии комбинационного рассеяния [3, 4].

Успехи лазерной физики последнего десятилетия привели к созданию источников однопериодных электромагнитных импульсов длительностью порядка 1 пс, что соответствует терагерцовому (ТГц) диапазону частот, с амплитудой поля в несколько десятков МВ/см. Это позволило приложить электрическое поле к сегнетоэлектрику без электродов и наблюдать не только возбуждение когерентных фононов, но и сверхбыстрое, в субпикосекундном масштабе времени, динамическое переключение поляризации. Для обнаружения переключения поляризации используется метод накачки-зондирования, где в качестве накачки используется ТГц-импульс, а зонд является либо оптическим, либо рентгеновским. Теория генерации когерентных колебаний в ТГц-спектроскопии накачки-зондирования изложена в [5].

Оптическое детектирование позволяет различать линейный и нелинейный режимы колебаний мод [6, 7] и переключение поляризации, динамическое и перманентное, если последнее имеет место [8].

Мерой переключения поляризации под действием ТГц-импульса служит сигнал второй оптической гармоники (ВГ), поскольку ее интенсивность пропорциональна квадрату поляризации. Для оценки эффективности переключения требуются как линейные (показатель преломления и коэффициент поглощения), так и нелинейные оптические характеристики (квадратичная и кубическая восприимчивости). Знание линейных оптических характеристик необходимо также для любых применений рассматриваемых кристаллов в терагерцовом диапазоне.

Для определения линейных и нелинейных оптических констант применима методика ТГц-спектроскопии во временной области (time domain spectroscopy – TDS) – спектроскопический метод, в котором на вещество направляется пикосекундный ТГц-импульс, а регистрируется ТГц-импульс, прошедший через вещество, путем стробирования детектора фемтосекундным оптическим импульсом. Схема генерации и детектирования чувствительна к воздействию образца как на амплитуду, так и на фазу регистрируемого ТГц-излучения, и поэтому позволяет получать и действительную, и мнимую части оптических констант.

К настоящему времени методика ТГц-TDS применяется для определения дисперсии оптических констант и достаточно широко используется для исследования, прежде всего, органических материалов (см. обзор [9]). Определенные успехи достигнуты и при исследовании фононных мод сегнетоэлектрических кристаллов [10, 11]. Проблема заключается в том, что в большинстве работ результаты получены на маломощных ТГц-источниках со стандартными параметрами, обеспечивающими так называемую широкополосную спектроскопию: при накачке пикосекундным импульсом область генерируемого спектра составляет 0.5–2 ТГц с центром в области 1 ТГц. При этом у многих сегнетоэлектриков фононный спектр (и особенно наиболее интересная мягкая мода) лежит в области выше 1.5 ТГц.

В этом отношении PGO является поистине уникальным материалом, т.к. при ярко выраженных сегнетоэлектрических свойствах и относительно высокой температуре фазового перехода (около 450 К) частота его мягкой моды близка к 1 ТГц, и имеется достаточно широкий диапазон фононных мод, которые попадают в рабочий диапазон настольных установок. Методом

широкополосной спектроскопии кристалл PGO был исследован нами ранее в работе [12] со спектральным разрешением 0.25 ТГц. Там же были получены спектральные зависимости электроиндуцированной ВГ.

В данной работе мы впервые используем узкополосную ТГц-спектроскопию для определения коэффициента поглощения и нелинейной (кубичной) восприимчивости кристалла PGO, легированного кремнием. Существенно улучшено спектральное разрешение, составляющее в данной работе 0.1 ТГц, а также точность определения нелинейной восприимчивости за счет детального анализа линейного и нелинейного вкладов в интенсивность ВГ.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения экспериментальных исследований использовался кристалл PGO, легированный кремнием $Pb_5(Ge_{0.74}Si_{0.26})_3O_{11}$ (кристалл был изготовлен и предоставлен А.А. Бушем, МИРЭА – Российский технологический университет, Россия). При данном стехиометрическом составе температура Кюри, по сравнению с нелегированным кристаллом, понижается до 346 К [2]. Исследуемый кристалл имеет толщину ~1.1 мм. Кристаллографическая ориентация поверхности (100), вектор поляризации при такой ориентации выровнен в плоскости поверхности. Фононный спектр исследуемого кристалла позволяет эффективно возбуждать сразу несколько частот колебаний кристаллической решетки, лежащих в диапазоне возбуждающего ТГц-излучения, в том числе частоту мягкой фононной моды [13].

Для генерации узкополосных ТГц-импульсов использовалась Сг:форстеритовая лазерная система, описанная в работе [12], с длиной волны 1240 нм, частотой повторения импульсов 10 Гц и длительностью 100 фс. Генератором ТГц-импульсов служил органический кристалл ОН1 [14].

Для генерации узкополосных ТГц-импульсов усиленный лазерный импульс разделялся на два, каждый из которых проходил через одно из плеч интерферометра типа Маха – Цендера. Варьируя задержку между этими импульсами перед их последующим сжатием в компрессоре, можно было добиться биения оптических импульсов на заданной частоте. Полученный частотно модулированный оптический чирп в конечном итоге облучал кристалл ОН1 для генерации узкополосного ТГц-излучения [15]. Энергия широкополосного импульса в 90 мкДж позволяет выделять узкополосное излучение с шириной спектра ~200 ТГц. Согласно измерениям профиля напряженности электрического поля методом ТГц-TDS, длительность таких импульсов составляет порядка 5 пс и содержит ~5 периодов. Энергия ТГц-волны измерялась ячейкой Голя и составляла в среднем 4 мкДж.

Исследование ТГц-индуцированной динамики параметра порядка в сегнетоэлектрике проводилось путем детектирования интенсивности нелинейно-оптического сигнала на частоте ВГ [12].

На рис. 1 представлены типичные временная и спектральная формы падающей ТГц-волны, ТГц-волны, прошедшей через образец, и волны ВГ, индуцированной электрическим полем ТГц-импульса.

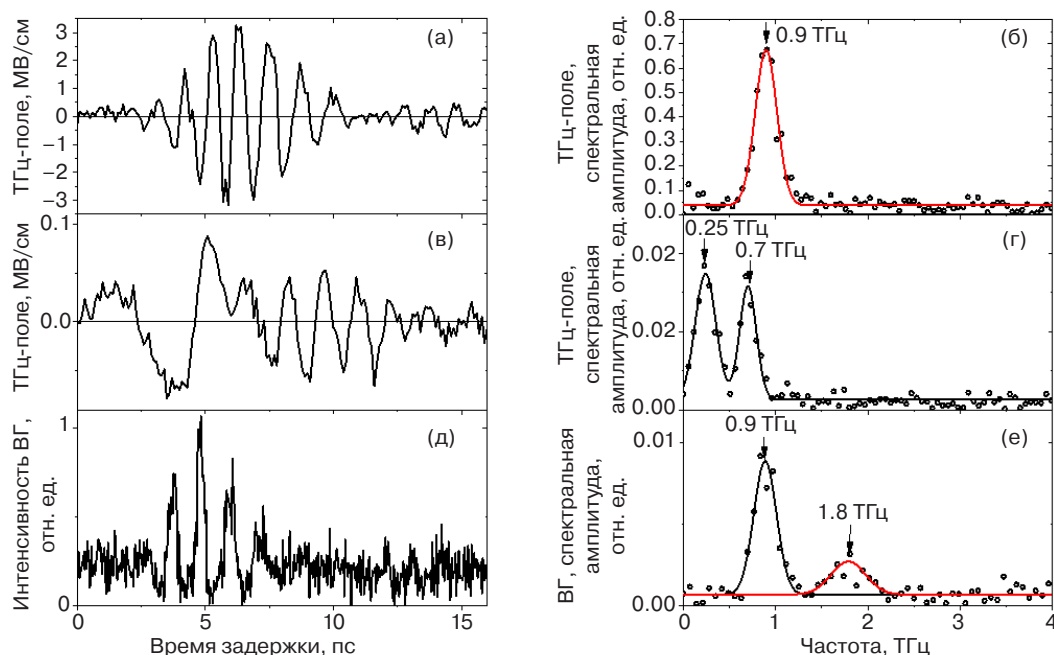


Рис. 1. Для частоты 0.9 ТГц временные (слева) и спектральные (справа) зависимости (а), (б) падающей ТГц-волны; (в), (г) ТГц-волны, прошедшей через образец; (д), (е) волны ВГ, индуцированной электрическим полем ТГц-импульса

В падающей волне при изменении ее частоты изменяется ее энергия (максимум приходится на частоту 1.2 ТГц). Во временной форме (рис. 1а) меняется только период, характер зависимости остается примерно одинаковым для всех частот в диапазоне 0.5–2.2 ТГц. Для 0.9 ТГц длительности импульса составляет ~8 пс. При попытке дальнейшего увеличения частоты сигнал становится неотличим от шума. В частотном пространстве (рис. 1б) сдвигается частота импульса, при этом его полуширина изменяется слабо в пределах 0.25–0.3 ТГц (что соответствует наблюдаемой длительности импульса).

Кристалл существенно преобразует падающий импульс. Амплитуда прошедшей волны резко падает (на частоте падающей волны 0.9 ТГц уменьшение амплитуды поля составляет 30 раз). Кроме того, во временной зависимости периодическая функция, напоминающая падающий импульс, сдвигается на половину импульса, а в его начале доминирует аperiodичный сигнал. Соответственно в спектре прошедшего ТГц-импульса проявляется частота 0.7 ТГц, т.е. уменьшенная по сравнению с частотой падающего поля. Кроме того, появляется низкочастотная компонента 0.25 ТГц. Следует отметить, что 0.9 ТГц является частотой резкого изменения характера пропускания ТГц-излучения. При меньших частотах доминирует более высокочастотный максимум, его частота приближается к частоте падающей волны. При больших частотах амплитуда импульса резко падает, и в прошедшем излучении остается только низкочастотный пик. Это соответствует границе поглощения, обнаруженной в работе [12] в широкополосном ТГц-излучении.

Интенсивность ВГ во временном пространстве повторяет поведение падающего импульса, однако в частотном пространстве проявляются две частоты: частота падающей волны и удвоенная частота падающей волны. Это соответствует квадратичной зависимости интенсивности ВГ от внешнего поля (а в сегнетоэлектриках – от поляризации) при наличии значительного неактивного по полю вклада (в сегнетоэлектриках – непереклюкаемой поляризации).

Действительно, интенсивность ВГ в ТГц-поле может быть представлена в виде разложения либо по ТГц-полю E_Ω в случае несегнетоэлектрического кристалла:

$$I^{2\omega}(E_\Omega) \propto (\chi^{(2)} + \chi_E^{(3)} E_\Omega)^2 (I^\omega)^2, \quad (1)$$

либо по поляризации $P(E_\Omega)$ в случае сегнетоэлектрического кристалла:

$$I^{2\omega}(P(E_\Omega)) \propto (P_0 + \chi_P^{(3)} P(E_\Omega))^2 (I^\omega)^2, \quad (2)$$

где $\chi^{(2)}(2\omega, \omega, \omega)$ – кристаллографическая квадратичная восприимчивость, $\chi_E^{(3)}(2\omega, \Omega, \omega, \omega)$ – кубическая восприимчивость.

Очевидно, что в случае линейной зависимости $P(E_\Omega)$, например, в слабых полях, соотношения (1) и (2) идентичны. В общем случае, для того чтобы различить (1) и (2), необходимо исследовать зависимости интенсивности ВГ от ТГц-поля.

При разложении квадрата суммы возникают два члена, зависящих от поля: линейный I_2 и квадратичный I_3 :

$$I_2 \propto \chi^{(2)} \chi_E^{(3)} E_\Omega, \quad (3a)$$

$$I_3 \propto (\chi_E^{(3)})^2 (E_\Omega)^2. \quad (3b)$$

Именно они в разложении Фурье дают, соответственно, сигналы на основной Ω и удвоенной 2Ω частотах падающей волны.

На рис. 2 представлены дисперсионные зависимости коэффициента поглощения и нелинейной восприимчивости кристалла PGO. Коэффициент поглощения (рис. 2а) растет значительно до частоты 0.7 ТГц, где точность его определения не превышает 5%.

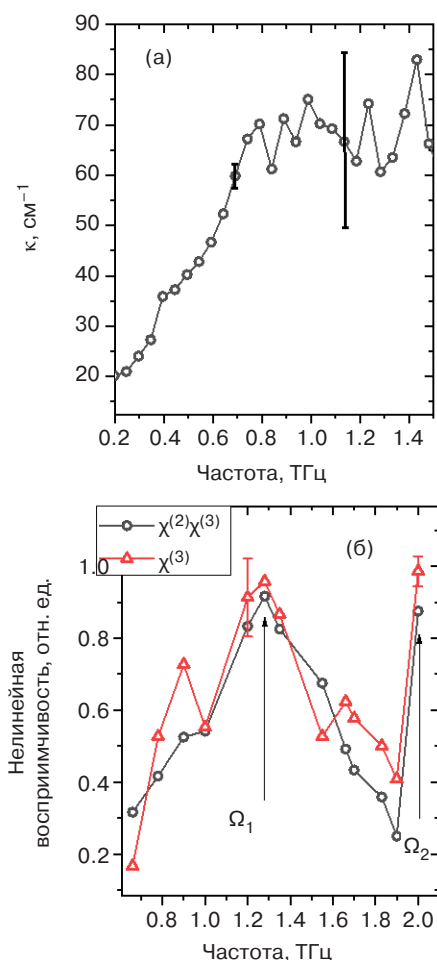


Рис. 2. Дисперсия коэффициента поглощения и нелинейной восприимчивости кристалла PGO

Это близко к значению, полученному нами ранее при использовании методики широкополосной ТГц-спектроскопии. При больших частотах погрешность существенно увеличивается. Это связано с тем, что при узкополосном зондировании спектральные линии излучения значительно деформируются при прохождении через кристалл (рис. 1г). При нахождении отношения спектральных амплитуд прошедшего и падающего излучения за пределами FWHM (full width at half maximum – длительность импульса на уровне половины амплитуды) падающей волны возникает «деление на 0», а точнее, на шумовой сигнал. Точно так же за пределами FWHM прошедшей волны в области максимума спектральной амплитуды падающей волны возникает деление шумового сигнала на ненулевую спектральную амплитуду. Можно найти также области спектра, где оба сигнала являются шумовыми. При частотах выше 1.4 ТГц сигнал не выделяется на фоне шума.

Нелинейная восприимчивость рассчитывалась на основе спектральных зависимостей интенсивности ВГ (рис. 1г) для максимумов на основной частоте по формуле (3а) и на удвоенной частоте по формуле (3б). Результат приведен на рис. 2б. Зависимости нормированы на максимум нелинейной восприимчивости. Отметим, что зависимости $\chi_E^{(2)}/\chi_E^{(3)}$ и $\chi_E^{(3)}$ практически совпадают. Это означает отсутствие спектральных особенностей в ТГц-диапазоне в кристаллографической восприимчивости $\chi^{(2)}$ (что соответствует природе этой восприимчивости, являющейся восприимчивостью электронного типа). Значит в нашей задаче $\chi^{(2)}$ является просто константой.

Кубичная восприимчивость $\chi_E^{(3)}$ отчетливо проявляет два максимума при $\Omega_1 = 1.3$ ТГц и $\Omega_2 = 2$ ТГц. К сожалению, второй максимум пока не удалось промерить более детально, однако обращаем внимание на погрешность измерения в данной точке. Наблюдаемые максимумы соответствуют фоновым модам кристалла PGO.

Наши исследования показывают, что в случае ТГц-спектроскопии в области фоновых резонансов методика генерации ВГ, индуцированной узкополосным ТГц-полем, является более информативной по сравнению с обычно применяемой методикой TDS, поскольку имеет существенно более высокое спектральное разрешение. Это связано с наличием в выражении для кубичной нелинейной восприимчивости резонансного знаменателя на частотах фоновых мод: $\chi_E^{(3)} \propto (\Omega - \Omega_0 - i\gamma\Omega)^{-1}$ [16]. Кроме того, искажение спектра при распространении ТГц-волны не играет существенной роли, поскольку резонанс сам «выбирает» частоты, на которых происходит резонансное усиление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в данной работе исследование спектральных характеристик коэффициента поглощения

и нелинейной восприимчивости на основе методов TDS и генерации индуцированной ТГц электрическим полем ВГ показало наличие области фундаментального поглощения вблизи фоновых мод, а также резонансное усиление кубичной нелинейной восприимчивости для двух фоновых мод $\Omega_1 = 1.3$ ТГц и $\Omega_2 = 2$ ТГц. Результаты согласуются как с полученными нами ранее результатами по широкополосной TDS спектроскопии (коэффициент поглощения), так и с результатами спектроскопии комбинационного рассеяния света по определению частот фоновых мод. Впервые получена спектральная зависимость кубичной нелинейной восприимчивости в ТГц-диапазоне. Полученные результаты важны для понимания физики процессов взаимодействия ТГц-излучения с сегнетоэлектрическими кристаллами. Полученные значения коэффициента поглощения могут быть использованы при создании устройств ТГц-диапазона на кристаллах PGO.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00334), а также Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-21-00043). Авторы благодарят А.А. Буша за предоставление кристалла PGO.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-12-00334) and the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 20-21-00043). The authors also thank A.A. Bush for the PGO crystal.

Вклад авторов

В.Р. Билык – проведение экспериментальных исследований ТГц-TDS кристалла PGO, обработка экспериментальных данных.

К.А. Брехов – проведение экспериментальных исследований динамики нелинейно-оптического отклика кристалла PGO.

М.Б. Агранат – определение научной концепции, написание первоначального текста статьи.

Е.Д. Мишина – определение научной концепции, написание первоначального текста статьи, обработка экспериментальных данных, расчет оптических констант кристалла PGO.

Authors' contributions

V.R. Bilyk – experimental studies of the THz-TDS of the PGO crystal; analysis of experimental data.

K.A. Brekhov – experimental studies of the PGO crystal nonlinear response dynamics.

M.B. Agranat – definition of the research concept; writing the initial text of the manuscript.

E.D. Mishina – definition of the research concept; writing the initial text of the manuscript; analysis of experimental data, calculation of the PGO crystal optical constants.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Iwasaki H., Sugii K., Yamada T., Niizeki N. $5\text{PbO} \cdot 3\text{GeO}_2$ Crystal; a new ferroelectric. *Appl. Phys. Lett.* 1971;18(10):444–445. <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1653487>
2. Bush A.A., Kamentsev K.E., Mamin R.F. Transformation of dielectric properties and appearance of relaxation behavior in $\text{Pb}_3(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_3\text{O}_{11}$ crystals. *J. Exp. Theor. Phys.* 2005;100(1):139–151. <http://link.springer.com/10.1134/1.1866206>
3. Hosea T.J.C. Raman scattering from soft modes in barium-doped lead germanate. *J. Raman Spectrosc.* 1990;21(11):717–724. <https://doi.org/10.1002/jrs.1250211104>
4. Gorelik V.S., Pyatyshev A.Y. Raman scattering from the effective soft mode in lead germanate crystal. *J. Raman Spectrosc.* 2020;51(6):969–977. <https://doi.org/10.1002/jrs.5854>
5. Udina M., Cea T., Benfatto L. Theory of coherent-oscillations generation in terahertz pump-probe spectroscopy: From phonons to electronic collective modes. *Phys. Rev. B.* 2019;100(16):165131. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.214304>
6. Melnikov A.A., Boldyrev K.N., Selivanov Y.G., Martovitskii V.P., Chekalin S.V., Ryabov E.A. Coherent phonons in a Bi_2Se_3 film generated by an intense single-cycle THz pulse. *Phys. Rev. B.* 2018;97(21):214304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.214304>
7. Kozina M., Fechner M., Marsik P., van Driel T., Glowina J.M., Bernhard C., Radovic M., Zhu D., Bonetti S., Staub U., Hoffmann M.C. Terahertz-driven phonon upconversion in SrTiO_3 . *Nat. Phys.* 2019;15(4):387–392. <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0408-1>
8. Salén P., Basini M., Bonetti S., Hebling J., Krasilnikov M., Nikitin A.Y., Shamuilov G., Tibaid Z., Zhaunerchyk V., Goryashko V. Matter manipulation with extreme terahertz light: Progress in the enabling THz technology. *Phys. Rep.* 2019;836–837:1–74. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.09.002>
9. Bawuah P., Zeitler J.A. Advances in terahertz time-domain spectroscopy of pharmaceutical solids: A review. *TrAC Trends Anal. Chem.* 2021;139(40):116272. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116272>
10. Ryu H.-C., Kwak M.-H., Kang S.-B., Jeong S.-Y., Paek M.-C., Kang K.-Y., Lee S.-J., Moon S.E., Park S.-O. A dielectric property analysis of ferroelectric thin film using terahertz time-domain spectroscopy. *Integr. Ferroelectr.* 2007;95(1):83–91. <https://doi.org/10.1080/10584580701756573>
11. Билык В.Р., Гришунин К.А. Комплексный показатель преломления титаната стронция в терагерцовом диапазоне частот. *Russ. Technol. J.* 2019;7(4):71–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>
12. Bilyk V.R., Grishunin K.A. Complex refractive index of strontium titanate in the terahertz frequency range. *Russ. Technol. J.* 2019;7(4):71–80 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>
13. Lockwood D.J., Hosea T.J., Taylor W. The complete Raman spectrum of paraelectric and ferroelectric lead germanate. *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1980;13(8):1539. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/13/8/023>
14. Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Hauri C.P. High efficiency THz generation in DSTMS, DAST and OH1 pumped by Cr:forsterite laser. *Opt. Express.* 2015;23(4):4573–4580. <https://doi.org/10.1364/OE.23.004573>
15. Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Agranat M.B., Fortov V.E., Jazbinsek M., Hauri C.P. Generation of strong-field spectrally tunable terahertz pulses. *Opt. Express.* 2020;28(23):33921–33936. <https://doi.org/10.1364/OE.405545>, <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=oe-28-23-33921>
16. Бломберген Н. *Нелинейная оптика*: пер. с англ. под ред. С.А. Ахманова и Р.В. Хохлова. М.: Мир; 1966. 424 с. [Blombergen N. *Nelineinaya optika (Nonlinear Optics)*; transl. from Engl. Akhmanov S.A., Khokhlov R.V. (Eds.). Moscow: Mir; 1966. 424 p. (in Russ.).] [Bloembergen N. *Nonlinear Optics*. Harvard University. New-York, Amsterdam: Benjamin W.A.; 1965. 220 p.]

Об авторах

Билык Владислав Романович, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, кафедра нанoeлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vrbilyk@mail.ru. ResearcherID AAN-4586-2019, Scopus Author ID 57194048515, <https://orcid.org/0000-0002-3013-8655>

Брехов Кирилл Алексеевич, к.ф.-м.н., инженер-исследователь, кафедра нанoeлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: brekhov_ka@mail.ru. ResearcherID Q-1014-2017, Scopus Author ID 55452447100, <https://orcid.org/0000-0001-9091-2609>

Агранат Михаил Борисович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: agranat2004@mail.ru. Scopus Author ID 6602697816, <https://orcid.org/0000-0001-7819-822X>

Мишина Елена Дмитриевна, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, кафедра нанoeлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mishina_elena57@mail.ru. ResearcherID D-6402-2014, Scopus Author ID 7005350309, <https://orcid.org/0000-0003-0387-5016>

About the authors

Vladislav R. Bilyk, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Junior Researcher, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vrbilyk@mail.ru. ResearcherID AAH-4586-2019, Scopus Author ID 57194048515, <https://orcid.org/0000-0002-3013-8655>

Kirill A. Brekhov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Research Engineer, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: brekhov_ka@mail.ru. ResearcherID Q-1014-2017, Scopus Author ID 55452447100, <https://orcid.org/0000-0001-9091-2609>

Mikhail B. Agranat, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (13/2, Izhorskaya ul., Moscow, 125412 Russia). E-mail: agranat2004@mail.ru. Scopus Author ID 6602697816, <https://orcid.org/0000-0001-7819-822X>

Elena D. Mishina, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mishina_elena57@mail.ru. ResearcherID D-6402-2014, Scopus Author ID 7005350309, <https://orcid.org/0000-0003-0387-5016>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 004.312.44
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-46-55>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метод синтеза логического элемента, реализующего несколько функций одновременно

С.И. Советов^{1, @},
С.Ф. Тюрин^{1, 2}

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990 Россия

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, 614068 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: fizikoz@gmail.com

Резюме

Цель. Базовый элемент программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) реализует логические функции с помощью таблиц истинности (LUT). Строение обычных LUT позволяет реализовывать только одну логическую функцию нескольких переменных в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ). При этом всегда остается часть неактивных передающих транзисторов. Использование одной LUT для одной функции усложняет масштабирование архитектуры на кристалле (SoC). Целью данной работы является разработка структуры LUT для реализации нескольких логических функций одновременно на неактивных передающих транзисторах.

Методы. Приведена эволюция структуры LUT для трех переменных, в которой увеличивается количество одновременно реализуемых функций. Для реализации дополнительных функций выполнена декомпозиция логического устройства с различным количеством переменных. Проведено моделирование структур в системе электротехнического моделирования *Multisim*.

Результаты. Продемонстрировано моделирование более двух логических функций на неактивных частях LUT, при котором отображена одновременная работа двух и четырех логических функций. Приведено сравнение сложности для разного количества переменных и количества реализованных функций.

Выводы. Результаты моделирования демонстрируют работоспособность структур LUT, в которых выполняется несколько логических функций. Таким образом, при реализации дополнительных функций в новой структуре требуется меньшее количество передающих транзисторов по сравнению с обычным LUT, что увеличивает функциональность устройства. Новое решение позволяет увеличить число одновременно реализуемых функций одних и тех же переменных, что важно при реализации, например, кодовых преобразований.

Ключевые слова: ПЛИС, LUT, передающие транзисторы, таблица истинности, логическая функция

• Поступила: 06.12.2022 • Доработана: 13.01.2023 • Принята к опубликованию: 22.02.2023

Для цитирования: Советов С.И., Тюрин С.Ф. Метод синтеза логического элемента, реализующего несколько функций одновременно. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):46–55. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-46-55>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Method for synthesizing a logic element that implements several functions simultaneously

Stanislav I. Sovetov^{1, @},
Sergey F. Tyurin^{1, 2}

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990 Russia

² Perm State University, Perm, 614068 Russia

@ Corresponding author, e-mail: fizikoz@gmail.com

Abstract

Objectives. The basic element of a field-programmable gate array is a lookup table (LUT). While in canonical normal form LUTs generally implement only one logical function for a given configuration, in this case, there is always an inactive pass transistor element. Moreover, using a single LUT for a single function reduces system-on-a-chip (SoC) scalability. Therefore, the purpose of the present work is to develop a LUT structure for implementing several logic functions simultaneously on inactive transmitting transistors.

Methods. The evolution of LUT structure is presented for three variables, in which the number of simultaneously implemented functions increases. To implement additional functions, the logical device was decomposed with a different number of variables. The structures were modeled in the *Multisim* electrical simulation system.

Results. The presented simulation of more than two logic functions on inactive parts of the LUT shows the simultaneous operation of two and four logic functions. The complexity for a different number of variables and number of implemented functions is compared.

Conclusions. The simulation results demonstrate the operability of LUT structures in which several logical functions are performed. Thus, when implementing additional functions in the new structure, a smaller number of transmitting transistors is required as compared to a conventional LUT, thus increasing device functionality. The presented solution can be used to increase the number of simultaneously implemented functions of the same variables, which can be important e.g., when implementing code transformations.

Keywords: field-programmable gate array, LUT, transmitting transistors, truth table, logic function

• Submitted: 06.12.2022 • Revised: 13.01.2023 • Accepted: 22.02.2023

For citation: Sovetov S.I., Tyurin S.F. Method for synthesizing a logic element that implements several functions simultaneously. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):46–55. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-46-55>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в электронных устройствах распространены программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), где в качестве базового элемента используется конфигурируемый логический блок. Основным элементом данного блока является таблица истинности (англ. lookup table, LUT), которая реализует некоторую логическую функцию. Современные LUT представляют собой конфигурируемые мультиплексоры для реализации логических функций с 2^n входами и одним выходом для n переменных [1, 2]. Использование существующих

LUT для n переменных требует 2^n ячеек памяти и $2^{n+1} - 2$ передающих транзисторов. При этом реализуется только одна логическая функция. Для реализации одновременно n логических функций необходимо использование такого же количества LUT. Однако при использовании одной функции в LUT вторая половина дерева передающих транзисторов в количестве 2^{n-1} остается неактивной [3, 4]. В предыдущих работах предлагалась реализация одновременно двух логических функций на одном дереве передающих транзисторов [5–7].

Дерево 3-LUT (рис. 1) состоит из трех каскадов NMOS (N-type metal-oxide-semiconductor)

проходных транзисторов¹ [8, 9]. Для любого из восьми значений на входах статической памяти с произвольным доступом (static random access memory, SRAM) включается только одна цепочка передающих транзисторов, а на оставшихся передающих транзисторах, как минимум, одна цепочка полностью неактивна.

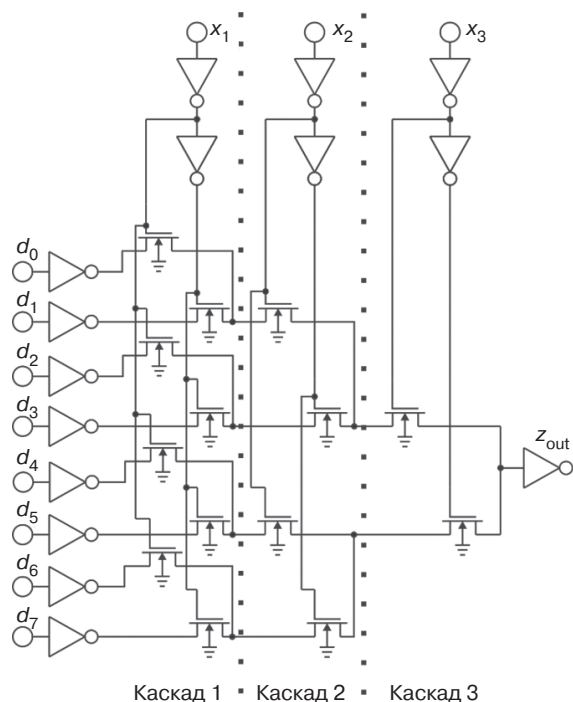


Рис. 1. Дерево LUT таблицы трех переменных

Линейное представление логической функции 3-LUT выглядит как:

$$z(x_3x_2x_1d) = d_0 \cdot \bar{x}_3\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee d_1 \cdot \bar{x}_3\bar{x}_2x_1 \vee d_2 \cdot \bar{x}_3x_2\bar{x}_1 \vee d_3 \cdot \bar{x}_3x_2x_1 \vee d_4 \cdot x_3\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee d_5 \cdot x_3\bar{x}_2x_1 \vee d_6 \cdot x_3x_2\bar{x}_1 \vee d_7 \cdot x_3x_2x_1, \quad (1)$$

где $d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7$ – данные конфигурации функции трех переменных $z(x_3x_2x_1)$. Комбинируя $d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7$, мы можем получить 2^8 функций.

При этом все LUT n переменных выполняют только одну логическую функцию из n аргументов в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) или совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ) [10, 11]. В то же время на каждой неактивной цепочке может быть активированная другая логическая функция тех же аргументов, например, функции суммирования или переноса. Комбинируя эти цепочки по ИЛИ, мы можем получить логический элемент с несколькими выходами.

В статье предлагается усовершенствованная схема, использующая неактивные ветви дерева передающих транзисторов. С помощью введения дополнительных LUT двух переменных в каскаде 2 возможно использовать дополнительные функции на неактивных цепях дерева.

Новое решение позволяет увеличить число одновременно реализуемых функций одних и тех же переменных, что важно при реализации, например, кодовых преобразований.

СИНТЕЗ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Для реализации двух функций в схему был добавлена LUT одной переменной, которая состоит из выходного инвертора и двух передающих транзисторов, выходы которых объединены и подключены к инвертору. Входы LUT одной переменной передающих транзисторов подключены к выходам второго каскада передающих транзисторов. Ко входным инверторам настройки добавлены по 2 передающих транзистора, управляемые старшей переменной, выходы которых объединены и подключены к инвертору. Таким образом получается схема LUT трех переменных с одновременным выполнением двух функций (рис. 2).

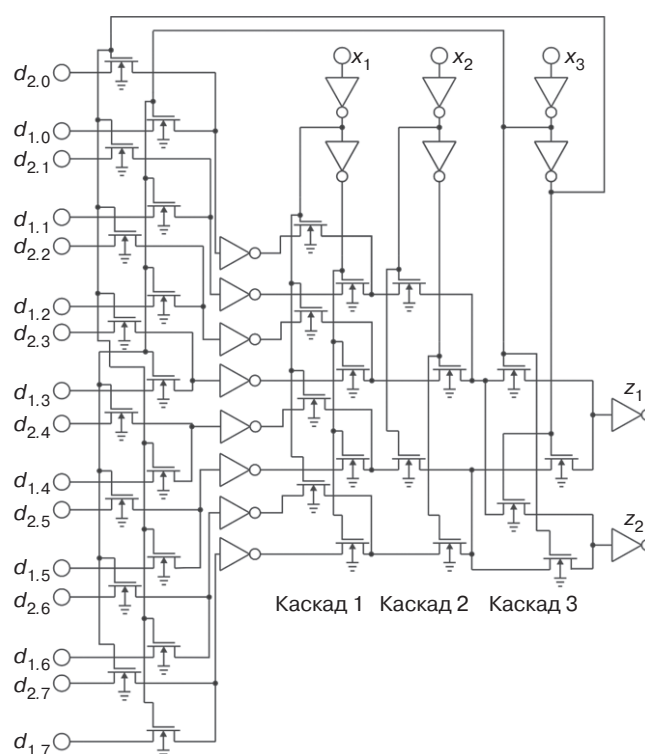


Рис. 2. Дерево LUT трех переменных, выполняющее две функции одновременно

Для реализации двух функций выполним декомпозицию логического устройства по старшей переменной (x_3):

¹ Intel® FPGAs and SoC FPGAs. <https://www.intel.in/content/www/in/en/products/details/fpga/cyclone.html>. Дата обращения 17.11.2022. / Accessed November 17, 2022.

Первая функция:

$$\begin{aligned} z_1(x_3x_2x_1d) = \\ = \bar{x}_3[d_{1.0} \cdot \bar{x}_2\bar{x}_1 \vee d_{1.1} \cdot \bar{x}_2x_1 \vee d_{1.2} \cdot x_2\bar{x}_1 \vee \\ \vee d_{1.3} \cdot x_2x_1] \vee x_3[d_{1.4} \cdot \bar{x}_2\bar{x}_1 \vee d_{1.5} \cdot \bar{x}_2x_1 \vee \\ \vee d_{1.6} \cdot x_2\bar{x}_1 \vee d_{1.7} \cdot x_2x_1]. \end{aligned} \quad (2)$$

Вторая функция:

$$\begin{aligned} z_2(x_3x_2x_1d) = \\ = x_3[d_{2.4(0)} \cdot \bar{x}_2\bar{x}_1 \vee d_{2.5(1)} \cdot \bar{x}_2x_1 \vee d_{2.6(2)} \cdot x_2\bar{x}_1 \vee \\ \vee d_{2.7(3)} \cdot x_2x_1] \vee \bar{x}_3[d_{2.0(4)} \cdot \bar{x}_2\bar{x}_1 \vee d_{2.1(5)} \cdot \bar{x}_2x_1 \vee \\ \vee d_{2.2(6)} \cdot x_2\bar{x}_1 \vee d_{2.3(7)} \cdot x_2x_1], \end{aligned} \quad (3)$$

где $d_{i,j}$; $i = 1, 2(2^v)$; $j = 1, 2, 3, 4, \dots, 2^3(2^n)$; v – количество реализуемых функций. Константа настройки задается в формате $d_{i,j(k)}$, где k определяет номер набора функции, а j – номер входа, который используется для ее подключения. В нашем случае k получается из j путем инвертирования старшей переменной. Таким образом, верхняя половина SRAM меняется местами с нижней половиной, чтобы использовать неактивную часть проходных транзисторов. В результате в данной конфигурации LUT трех

переменных получают активными две цепочки от SRAM до выходных инверторов, т.е. реализуются две функции одновременно.

Для дальнейшего увеличения количества одновременно выполняемых функций на LUT трех переменных дополнительно вводится дерево LUT двух переменных для каждой функции, входы которых подключены к выходам передающих транзисторов первого каскада. Также дополнительно вводится каскад передающих транзисторов настройки, которые управляются второй переменной (x_2). Выходы транзисторов объединены и подключены к входам первого каскада передающих транзисторов настройки. Общая схема четырехфункциональной LUT трех переменных изображена на рис. 3.

Для реализации четырех функций выполним декомпозицию логического устройства по старшей (x_3) и второй переменной (x_2):

Первая функция:

$$\begin{aligned} z_1(x_3x_2x_1d) = \\ = \bar{x}_3\bar{x}_2[d_{1.0} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{1.1} \cdot x_1] \vee \\ \vee \bar{x}_3x_2[d_{1.2} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{1.3} \cdot x_1] \vee \\ \vee x_3\bar{x}_2[d_{1.4} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{1.5} \cdot x_1] \vee \\ \vee x_3x_2[d_{1.6} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{1.7} \cdot x_1]. \end{aligned} \quad (4)$$

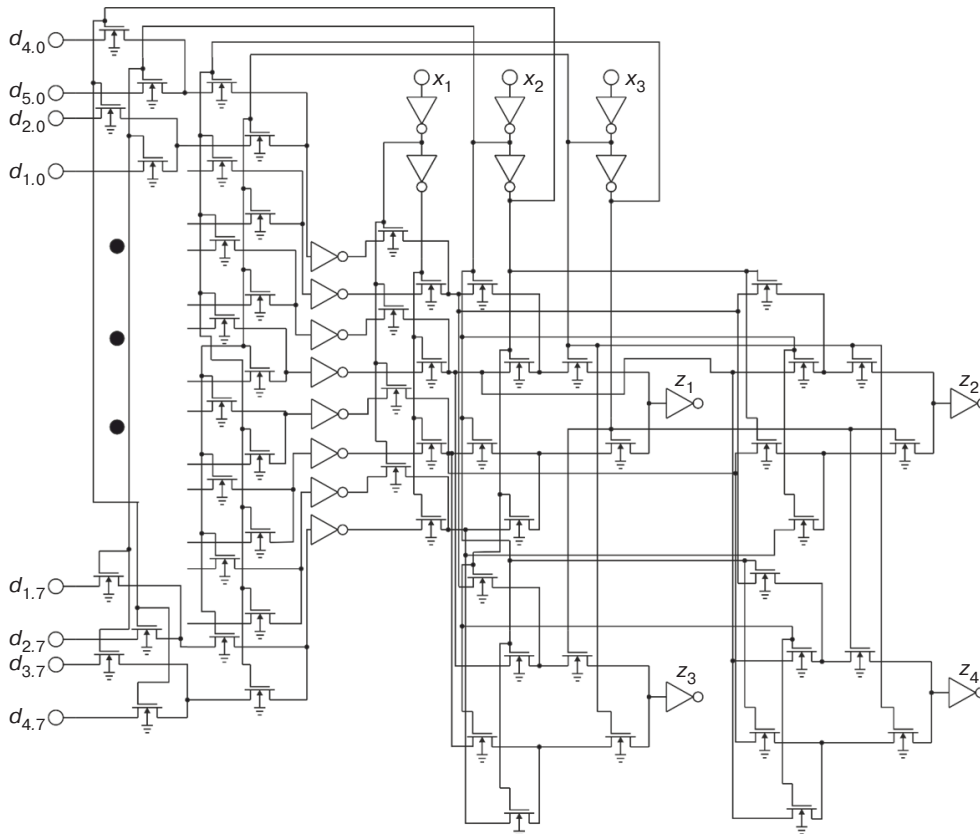


Рис. 3. Дерево LUT трех переменных, которая выполняет четыре функции одновременно

Таблица. Настройка логических уровней ячеек SRAM для LUT трех переменных, выполняющей четыре функции

Номер входа	Конфигурация для z_1	Конфигурация для z_2	Конфигурация для z_3	Конфигурация для z_4
1	0	0	1	0
2	1	1	1	1
3	1	0	1	0
4	0	0	1	0
5	1	1	0	0
6	0	1	1	0
7	0	0	1	0
8	1	1	1	0

Вторая функция:

$$\begin{aligned}
 z_2(x_3x_2x_1d) = & \\
 = \bar{x}_3x_2 \left[d_{2.2(0)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{2.3(1)} \cdot x_1 \right] \vee & \\
 \vee x_3\bar{x}_2 \left[d_{2.4(2)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{2.5(3)} \cdot x_1 \right] \vee & \quad (5) \\
 \vee x_3x_2 \left[d_{2.6(4)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{2.7(5)} \cdot x_1 \right] \vee & \\
 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2 \left[d_{2.0(6)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{2.1(7)} \cdot x_1 \right]. &
 \end{aligned}$$

Третья функция:

$$\begin{aligned}
 z_3(x_3x_2x_1d) = & \\
 = x_3\bar{x}_2 \left[d_{3.4(0)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{3.5(1)} \cdot x_1 \right] \vee & \\
 \vee x_3x_2 \left[d_{3.6(2)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{3.7(3)} \cdot x_1 \right] \vee & \quad (6) \\
 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2 \left[d_{3.0(4)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{3.1(5)} \cdot x_1 \right] \vee & \\
 \vee \bar{x}_3x_2 \left[d_{3.2(6)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{3.3(7)} \cdot x_1 \right]. &
 \end{aligned}$$

Четвертая функция:

$$\begin{aligned}
 z_4(x_3x_2x_1d) = & \\
 = x_3x_2 \left[d_{4.6(0)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{4.7(1)} \cdot x_1 \right] \vee & \\
 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2 \left[d_{4.0(2)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{4.1(3)} \cdot x_1 \right] \vee & \quad (7) \\
 \vee \bar{x}_3x_2 \left[d_{4.2(4)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{4.3(5)} \cdot x_1 \right] \vee & \\
 \vee x_3\bar{x}_2 \left[d_{4.4(6)} \cdot \bar{x}_1 \vee d_{4.5(7)} \cdot x_1 \right]. &
 \end{aligned}$$

Полученные в результате декомпозиции конфигурационные уровни четырех функций: исключающего ИЛИ (z_1), мажоритарной (z_2), дизъюнкции (z_3) и конъюнкции (z_4) – указаны в таблице.

МОДЕЛИРОВАНИЕ LUT

Моделирование многофункциональной LUT трех переменных проводилось в системе динамического моделирования *Multisim*² компании National Instruments. Для NMOS передающих транзисторов была использована модель транзистора BSIM 4.8.0^{3, 4}. Инвертор был реализован на двух полевых транзисторах, его схема приведена на рис. 4.

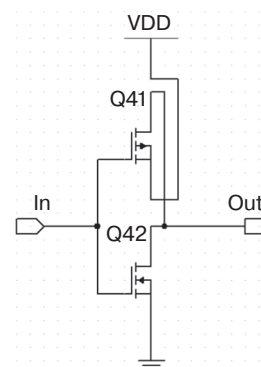


Рис. 4. Схема инвертора на полевых транзисторах.

Здесь и далее на рисунках используются обозначения, принятые в ГОСТ 2.710-81⁵

² <https://www.multisim.com/>. Дата обращения 17.11.2022. / Accessed November 17, 2022.

³ Microwind & Dsch Version 3.5. <https://www.yumpu.com/en/document/view/40386405/microwind-manual-lite-v35pdf-moodle>. Дата обращения 17.11.2022. / Accessed November 17, 2022.

⁴ Mead C.A., Conway L. *Introduction to VLSI Systems*. Reading, MA, Addison-Wesley Publishing Co.; 1980. 426 p. https://www.researchgate.net/publication/234388249_Introduction_to_VLSI_systems. Дата обращения 17.11.2022. / Accessed November 17, 2022.

⁵ ГОСТ 2.710-81. *Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах*. М.: Стандартинформ; 2008. [GOST 2.710-81. *Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams*. Moscow: Standartinform; 2008 (in Russ.).]

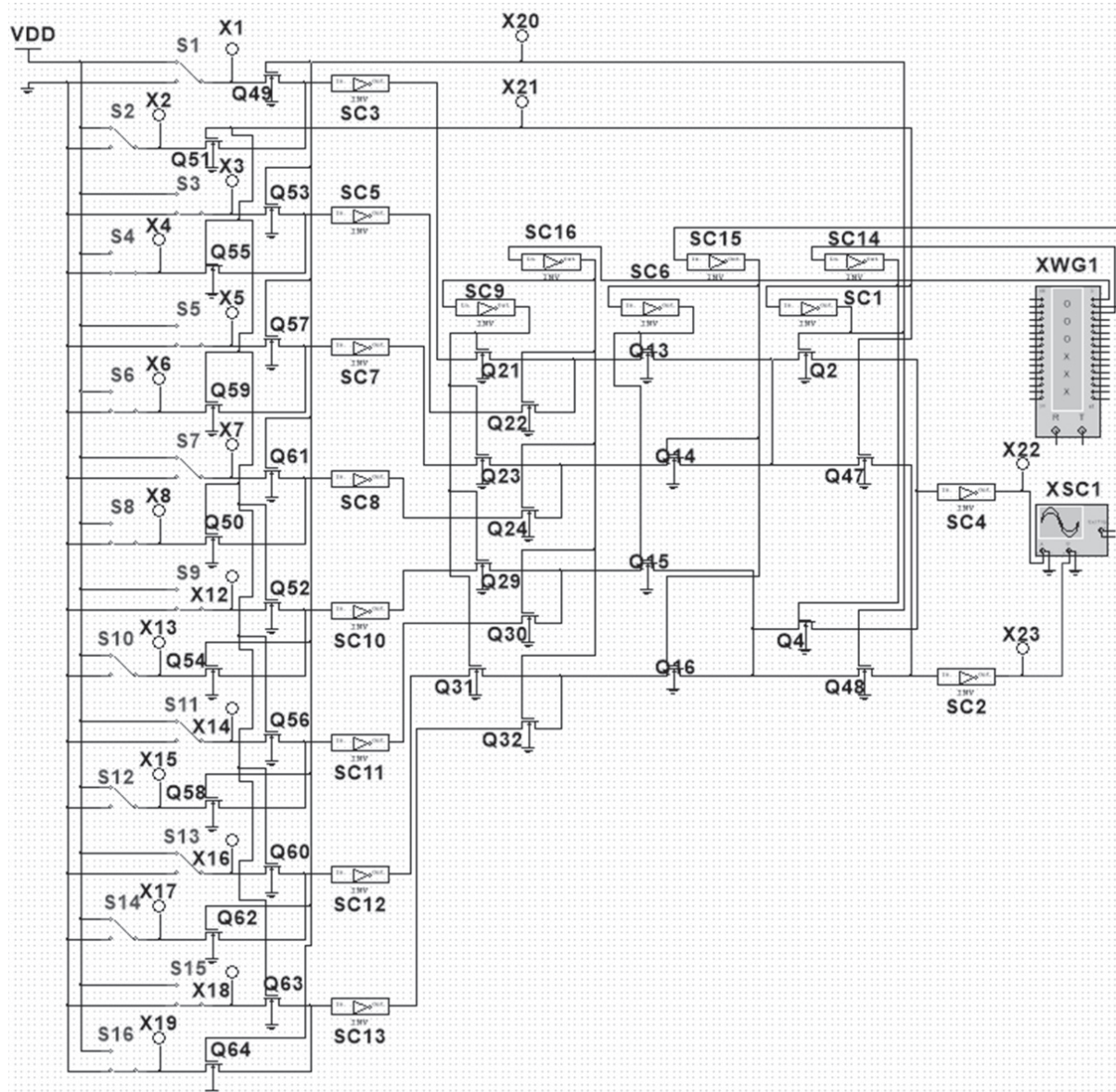


Рис. 5. Схема LUT трех переменных, выполняющая две функции одновременно

В первую очередь рассмотрим общую схему реализации LUT для двух функций (исключающего ИЛИ, мажоритарной), изображенную на рис. 5.

Модифицированная схема LUT трех переменных для выполнения четырех функций одновременно (исключающее ИЛИ, мажоритарная, дизъюнкция, конъюнкция) представлена на рис. 6 (см. с. 52).

Входной сигнал настройки ячеек SRAM задавался с помощью динамических переключателей согласно табл. 1. Высокий уровень напряжения (VDD 5V) соответствует логической единице, а низкий уровень напряжения (GND 0V) соответствует логическому нулю.

Сигналы переменных задавались с помощью *Word Generator*, в котором установлен трехбитный код Грея (рис. 7). Частота работы *Word Generator* составляет 1 кГц, таким образом, требуется 8 мс для полного прохождения заданного кода Грея.

Выходы функций подключены к осциллографу.

Результаты моделирования двух и четырех функций представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

Верхняя осциллограмма соответствует функции «исключающее ИЛИ» (z_1). Нижняя осциллограмма соответствует мажоритарной функции (z_2). Каждое временное деление осциллографа соответствует одной комбинации кода Грея.

В отличие от базовой схемы LUT трех переменных, где используется только одна половина передающих транзисторов, в предлагаемой новой схеме дополнительно используется неактивная часть при значении 2^{n-1} переменных высокого порядка.

Сложность по количеству транзисторов LUT в зависимости от количества переменных n , $n \in \mathbb{N}$ рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned} L_1(n) &= (2 + 2) \cdot 2^n + (2^{n+1} - 2) + 2n + 2 + 2 = \\ &= 2^{n+2} + 2^{n+1} + 2n + 2 = 3 \cdot 2^{n+1} + 2n + 2. \end{aligned}$$

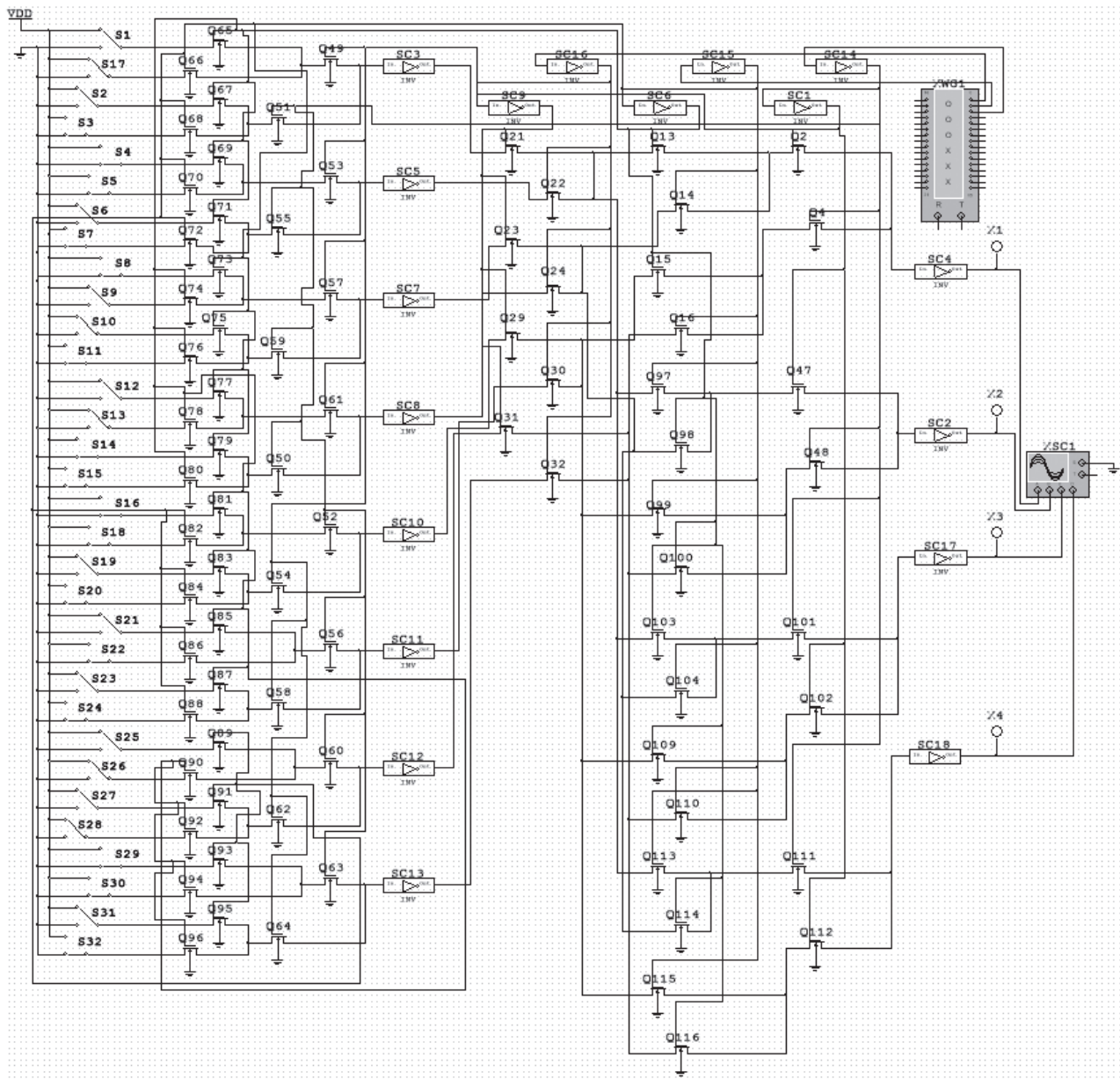


Рис. 6. Схема LUT трех переменных, выполняющая четыре функции одновременно

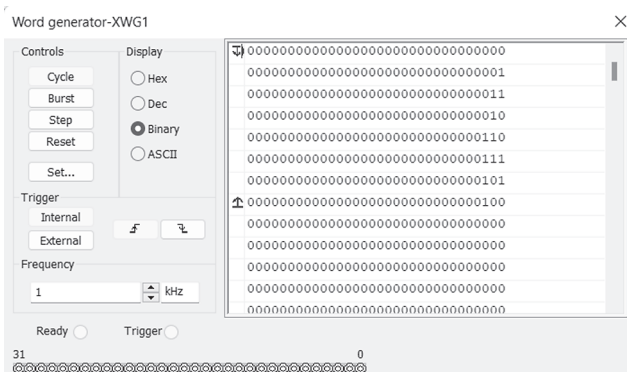


Рис. 7. Код Грея в Word Generator

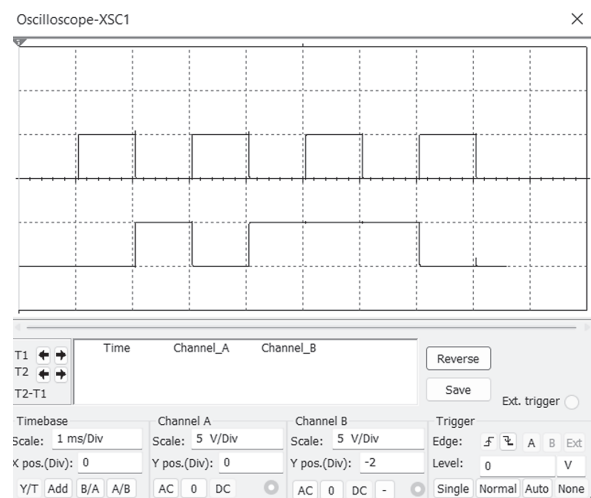


Рис. 8. Осциллограмма двух функций LUT трех переменных

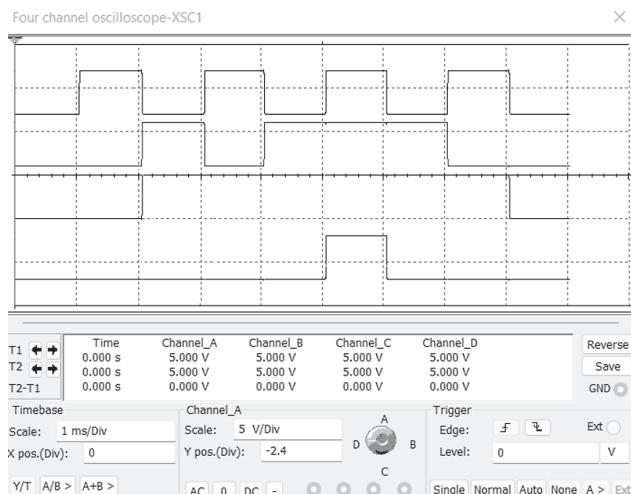


Рис. 9. Осциллограмма четырех функций LUT трех переменных

Для расчета 2^v функций в предложенной схеме получаем сложность:

$$\begin{aligned} L_v(v, n) &= \\ &= (2^{v+1} - 2 + 2) \cdot 2^n + 2^{n+1} + 2n + \\ &+ (2^{v+1} - 2)(2^v - 1) + 2(2^v - 1) = \\ &= 2^{v+1} \cdot 2^n + 2^{n+1} + 2n + 2^{v+1} \cdot (2^v - 1). \end{aligned}$$

Так, например, для реализации четырех логических функций ($v = 2$) одних и тех же переменных ($n = 4$) требуется две LUT при общем использовании 212 транзисторов, а в предлагаемой новой конструкции LUT, реализующей все четыре функции, количество необходимых транзисторов составляет 192.

Диаграммы сложности, представляющие обычную LUT $L_{v1}(v)$ и многофункциональную LUT $L_v(v)$ реализующую v логических функций с количеством переменных $n = 8$, показаны на рис. 10.

Как видно из диаграммы, имеется выигрыш в сложности по количеству транзисторов для многофункциональной LUT по отношению к соответствующему количеству для обычных LUT.

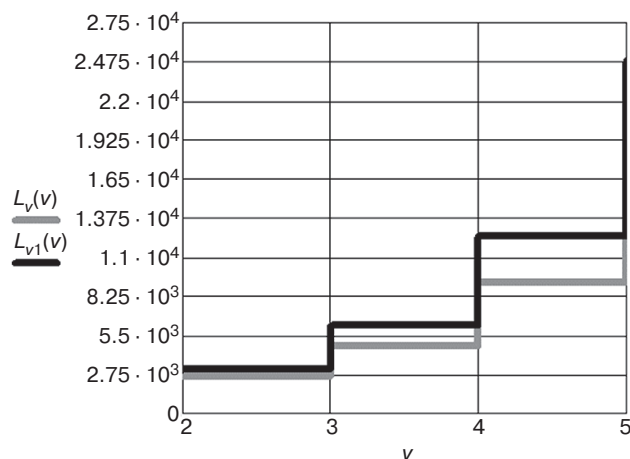


Рис. 10. Сравнение сложности обычной LUT и многофункциональной LUT

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье показана возможность одновременной реализации $2^n - 1$ логических функций на неактивных частях цепей передающих транзисторов в ПЛИС, что увеличивает функциональность устройства. Для реализации того же количества логических функций требуется $2^n - 2$ LUT. Несмотря на дополнительные затраты, существует выигрыш в сложности по сравнению с количеством необходимых транзисторов.

Вклад авторов

С.И. Советов – подготовка исследования, анализ литературы, проведение моделирования, написание текста статьи, формулировка выводов.

С.Ф. Тюрин – идея исследования, постановка целей и задач, консультации по вопросам исследования, редактирование статьи.

Authors' contributions

S.I. Sovetov – preparation of research, literature analysis, modeling, writing the text of the article, formulation of conclusions.

S.F. Tyurin – the idea of research, setting goals and objectives, consultations on research issues, editing the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drozd O., Perebeinos I., Martynyuk O., Zashcholkin K., Ivanova O., Drozd M. Hidden fault analysis of FPGA projects for critical applications. In: *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, 2020. P. 467–471. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235591>

REFERENCES

1. Drozd O., Perebeinos I., Martynyuk O., Zashcholkin K., Ivanova O., Drozd M. Hidden fault analysis of FPGA projects for critical applications. In: *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, 2020. P. 467–471. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235591>

2. Drozd O., Nikul V., Antoniuk V., Drozd M. Hidden faults in FPGA-built digital components of safety-related systems. In: *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, 2018. P. 805–809. <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336320>
3. Vikhorev R. Universal logic cells to implement systems functions. In: *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ELConRusNW)*. St. Petersburg, Russia, 2016. P. 373–375. <https://doi.org/10.1109/ELConRusNW.2016.7448197>
4. Vikhorev R. Improved FPGA logic elements and their simulation. In: *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ELConRus)*. Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018. P. 259–264. <https://doi.org/10.1109/ELConRus.2018.8317080>
5. Skorniyakova A.Yu., Vikhorev R.V. Self-timed LUT layout simulation. In: *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ELConRus)*. St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 176–179. <https://doi.org/10.1109/ELConRus49466.2020.9039374>
6. Tyurin S.F. Green logic: Green LUT FPGA concepts, models and evaluations. In: Kharchenko V., Kondratenko Y., Kacprzyk J. (Eds.). *Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2017;105: 241–261. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55595-9_12
7. Тюрин С.Ф., Прохоров А.С. Программируемое логическое устройство: Пат. 2637462 РФ. Заявка № 2016131738; заявл. 01.08.2016; опубл. 04.12.2017.
8. Tyurin S.F. LUT's sliding backup. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2019;19(1):221–225. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2019.2898724>
9. Строгонов А., Цыбин С. Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри. *Компоненты и технологии*. 2010;11(112):56–62. URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2010_11_56.pdf (дата обращения 17.11.2022).
10. Строгонов А., Городков П. Современные тенденции развития ПЛИС: от системной интеграции к искусственному интеллекту. *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2020;4(195):46–56. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.195.4.46.56>
11. Danilova E.Y. FPGAs logic checking method by genetic algorithms. In: *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ELConRus)*. St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 1787–1790. <https://doi.org/10.1109/ELConRus49466.2020.9039052>
2. Drozd O., Nikul V., Antoniuk V., Drozd M. Hidden faults in FPGA-built digital components of safety-related systems. In: *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv-Slavske, Ukraine, 2018. P. 805–809. <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336320>
3. Vikhorev R. Universal logic cells to implement systems functions. In: *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ELConRusNW)*. St. Petersburg, Russia, 2016. P. 373–375. <https://doi.org/10.1109/ELConRusNW.2016.7448197>
4. Vikhorev R. Improved FPGA logic elements and their simulation. In: *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ELConRus)*. Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018. P. 259–264. <https://doi.org/10.1109/ELConRus.2018.8317080>
5. Skorniyakova A.Yu., Vikhorev R.V. Self-timed LUT layout simulation. In: *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ELConRus)*. St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 176–179. <https://doi.org/10.1109/ELConRus49466.2020.9039374>
6. Tyurin S.F. Green logic: Green LUT FPGA concepts, models and evaluations. In: Kharchenko V., Kondratenko Y., Kacprzyk J. (Eds.). *Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2017;105: 241–261. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55595-9_12
7. Tyurin S.F., Prokhorov A.S. Programmable logic device: RF Pat. 2637462. Publ. 04.12.2017 (in Russ.).
8. Tyurin S.F. LUT's sliding backup. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2019;19(1):221–225. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2019.2898724>
9. Strogonov A., Tsybin S. Programmable switching FPGA Insights. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*. 2010;11(112):56–62 (in Russ.). Available from URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2010_11_56.pdf (accessed November 17, 2022).
10. Strogonov A., Gorodkov P. Current trends in FPGA development: from system integration to artificial intelligence. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2020;4(195): 46–56 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.195.4.46.56>
11. Danilova E.Y. FPGAs logic checking method by genetic algorithms. In: *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ELConRus)*. St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 1787–1790. <https://doi.org/10.1109/ELConRus49466.2020.9039052>

Об авторах

Советов Станислав Игоревич, аспирант, кафедра автоматики и телемеханики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (614990, Россия, Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29). E-mail: fizikoz@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-4311-1045>

Тюрин Сергей Феофентович, д.т.н., профессор, кафедра автоматики и телемеханики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (614990, Россия, Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29); профессор, кафедра «Математическое обеспечение вычислительных систем», ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (614068, Россия, Пермь, ул. Букирева, д. 15). E-mail: tyurinsergeofeo@yandex.ru. Scopus Author ID 6603805561, <https://orcid.org/0000-0002-5707-5404>

About the authors

Stanislav I. Sovetov, Postgraduate Student, Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskii pr., Perm, 614990 Russia). E-mail: fizikoz@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-4311-1045>

Sergey F. Tyurin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskii pr., Perm, 614990 Russia); Professor, Department of Software Computing Systems, Perm State University (15, Bukireva ul., Perm, 614068 Russia). E-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru. Scopus Author ID 6603805561, <https://orcid.org/0000-0002-5707-5404>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 004.942
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-56-69>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Статистическая модель оценки надежности систем неразрушающего контроля на основе решения обратных задач

А.Е. Александров, С.П. Борисов, Л.В. Бунина, С.С. Быковский[®],
И.В. Степанова, А.П. Титов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: bykovskij@mirea.ru

Резюме

Цели. Контроль износа конструктивных элементов энергоустановок, в частности трубопроводов атомных электростанций, является неотъемлемым компонентом обеспечения безопасности при их эксплуатации. Контроль путем непосредственного обследования состояния трубопровода требует, во-первых, достаточно больших трудозатрат, во-вторых, в некоторых случаях, временной остановки работы. Поэтому при проведении контрольных мероприятий предлагается использовать математическое моделирование. Цель статьи – разработка математической модели системы диагностики для оценки вероятности обнаружения дефектов на основе решения обратных задач.

Методы. Анализируются биномиальная модель оценки надежности контроля, параметрическая модель Беренса и Хови вероятности обнаружения дефектов, параметрическая модель на основе исследования тест-образцов. В качестве альтернативы данным моделям предлагается расчетный метод оценки надежности систем неразрушающего контроля на основе решения обратной задачи. Для определения параметров кривой вероятности обнаружения дефектов модель использует данные, полученные различными контролирующими бригадами за длительный период эксплуатации энергоустановки. В качестве исходных данных можно использовать плотности распределения дефектов по одной или нескольким из следующих характеристик: глубине, длине, площади сечения дефекта. С помощью предлагаемой математической модели выполнен набор тестовых расчетов на основе девяти комбинаций исходных данных. Комбинации отличаются между собой коэффициентом достоверности исходной системы контроля, параметром распределения дефектов, чувствительностью системы контроля.

Результаты. По итогам проведенных расчетов построены кривые плотности вероятности обнаруженных дефектов в зависимости от размера дефекта, определены восстановленные значения параметров распределения дефектов при различных условиях испытаний, сделана оценка погрешности восстановления параметров. Для оценки степени несовершенства системы используется кривая вероятности обнаружения дефекта конкретной системой контроля.

Выводы. С учетом ограничений, связанных с размером выборки, предлагаемая методика, во-первых, позволяет применять результаты, полученные по контролю металла, с большей уверенностью, чем методики, используемые в настоящее время, во-вторых, оценивать эффективность контроля, проводимого отдельными бригадами испытателей либо лабораториями. В перспективе это позволит рекомендовать или не рекомендовать привлечение той или иной бригады к выполнению диагностических работ.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, надежность энергетических установок, математическое моделирование, статистический анализ, обратные задачи

• Поступила: 14.10.2022 • Доработана: 28.01.2023 • Принята к опубликованию: 10.03.2023

Для цитирования: Александров А.Е., Борисов С.П., Бунина Л.В., Быковский С.С., Степанова И.В., Титов А.П. Статистическая модель оценки надежности систем неразрушающего контроля на основе решения обратных задач. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):56–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-56-69>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Statistical model for assessing the reliability of non-destructive testing systems by solving inverse problems

Alexander E. Alexandrov, Sergey P. Borisov, Ludmila V. Bunina,
Sergey S. Bikovsky[®], Irina V. Stepanova, Andrey P. Titov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: bykovskij@mirea.ru

Abstract

Objectives. The wear monitoring of metal structural elements of power plants—in particular, pipelines of nuclear power plants—is an essential means of ensuring safety during their operation. Monitoring the state of the pipeline by direct inspection requires a considerable amount of labor, as well as, in some cases, the suspension of power plant operation. In order to reduce costs during monitoring measures, it is proposed to use mathematical modeling. This work aims to develop a mathematical model of a diagnostic system for assessing the probability of detection of defects by solving inverse problems.

Methods. A binomial model for assessing the reliability of monitoring, comprising the Berens–Hovey parametric model of the probability of detection of defects and a parametric model based on studying test samples, was analyzed. As an alternative to this binomial model, a computational method for assessing the reliability of non-destructive testing systems by solving an inverse problem was proposed. To determine the parameters of the defect detection probability curve, the model uses data obtained by various monitoring teams over a long period of power plant operation. To serve as initial data, the defect distribution density over one or more of the following characteristics can be used: depth, length, and/or cross-sectional area of the defect. Using the proposed mathematical model, a series of test calculations was performed based on nine combinations of initial data. The combinations differed in the confidence coefficient of the initial monitoring system, the parameters of the distribution of defects, and the sensitivity of the monitoring system.

Results. The calculation data were used to construct curves of the probability density of detected defects as a function of the defect size, recover the values of the defect distribution parameters under various test conditions, and estimate the error of recovering the parameters. The degree of imperfection of the system was estimated using the curve of the detection probability of a defect by a certain monitoring system.

Conclusions. Under constraints on the data sample size, the proposed methodology allows the metal monitoring results to be applied with greater confidence than currently used methods at the same time as evaluating the efficiency of monitoring carried out by individual test teams or laboratories. In future, this can be used to form the basis of a recommendation of the involvement of a particular team to perform diagnostic work.

Keywords: non-destructive testing, reliability of power plants, mathematical modeling, statistical analysis, inverse problems

• Submitted: 14.10.2022 • Revised: 28.01.2023 • Accepted: 10.03.2023

For citation: Alexandrov A.E., Borisov S.P., Bunina L.V., Bikovsky S.S., Stepanova I.V., Titov A.P. Statistical model for assessing the reliability of non-destructive testing systems by solving inverse problems. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):56–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-56-69>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач при эксплуатации крупных энергетических установок является обеспечение безопасности их использования. Решение этой задачи предполагает, что конструкции атомных станций, включая трубопроводы и оборудование, должны сохранить целостность в течение всего срока эксплуатации¹. Однако имеющийся на сегодня опыт показывает, что независимо от типов АЭС и условий эксплуатации практически ежегодно обнаруживаются повреждения конструктивных элементов атомных станций, в т.ч. и трещины. Проблема в данном случае связана с недостаточной изученностью моделей и механизмов повреждений, и, соответственно, с невозможностью решения этой задачи на стадии проектирования.

Одним из направлений решения данной задачи является создание системы, обеспечивающей поддержание заданного уровня надежности за счет периодической диагностики технического состояния наиболее ответственных объектов эксплуатируемой энергетической установки, т.е. организация и проведение работ по неразрушающему контролю металла оборудования и трубопроводов. На основании текущего состояния исследуемых объектов прогнозируется ситуация в будущем и принимается решение о прекращении или продолжении дальнейшей эксплуатации объектов.

1. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Для оценки текущего состояния исследуемых объектов необходимо иметь меру надежности неразрушающего контроля. В качестве такой метрики используется кривая вероятности обнаружения дефектов, известная из литературы как кривая *PoD* (Probability of Detection) [1, 2]. Она описывает

распределение вероятности обнаружения дефектов по их размерам. Эта кривая в действительности может зависеть от множества факторов: возможностей используемой методики и аппаратуры контроля на выбранной чувствительности, местонахождения и геометрии дефекта, свойств материала. Также учитываются и человеческие факторы – усталость персонала, наличие стрессовых ситуаций, сложные условия инспекции.

В качестве экспериментальных данных для построения кривой *PoD* используются данные, полученные в результате проведенного контроля. Их получение может быть выполнено с использованием систем, подобных описанным в [3–5] и материалах Американского сообщества по неразрушающему контролю². Применяемая при этом система контроля может быть использована для обнаружения как реальных дефектов, образующихся при эксплуатации оборудования и трубопроводов энергетической установки, так и искусственно созданных дефектов с заданными размерами. Искусственно созданные дефекты³ должны содержать те же особенности, что и реальные дефекты. Наиболее подходящими являются образцы реальных объектов с реальными полученными при эксплуатации трещинами. Еще одной гранью поставленной задачи является учет типов разрушения – вязкое и хрупкое [6].

Методология аттестационных проверок, как правило, дает лишь качественные заключения о способности системы неразрушающего контроля выявлять дефекты. Большая часть работ дает результаты лишь для усредненных кривых *PoD*, полученных в результате проверок разными лабораториями одного и того же объекта. В качестве примера можно привести результаты межлабораторных

² Bouis J. NDT to evaluate crevice corrosion initiation sites in alloy pipe and tubing. *The NDT Technician*. 2022;21(1). <https://blog.asnt.org/ndt-to-evaluate-crevice-corrosion-initiation-sites-in-alloy-pipe-and-tubing/>. Дата обращения 15.12.2022. / Accessed December 15, 2022.

³ Kanzler D., Müller C., Pitkanen J., Ewert U. Bayesian approach for the evaluation of the reliability of non-destructive testing methods: combination of data from artificial and real defects. *Proceedings: 18th World Conference on Nondestructive Testing WCNDT. Special Issue. e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT)*. 2012;17(7). <http://www.ndt.net/?id=12748>. Дата обращения 15.12.2022. / Accessed December 15, 2022.

¹ Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения (НП-096-15). [Requirements for equipment and piping time management in nuclear power plants. Basic provisions (NP-096-15).]. <http://www.cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/НП-096-15.pdf>. Дата обращения 15.12.2022. / Accessed December 15, 2022 (in Russ.).

сличительных испытаний, которые были проведены в 2018–2019 гг. в организациях атомной отрасли по неразрушающим видам контроля⁴. Полученные девятью лабораториями данные не представляется возможным использовать при построении кривых PoD для отдельных лабораторий по причине малого числа измерений для одного размера дефектов. В этом случае была построена усредненная кривая PoD , полученная по результатам всех девяти лабораторий. Такая ситуация является типичной при построении кривых PoD .

Выходной характеристикой применяемой системы контроля является сигнал (пиковое напряжение или амплитуда), который сравнивается с пороговым значением и может быть интерпретирован в зависимости от размера дефекта. Сравнительный анализ между выходным сигналом системы контроля и дефектами известного размера a позволяет получить оценку кривой вероятности обнаружения $PoD(a)$. Оценка $PoD(a)$ может быть найдена по числу реализаций контроля, проведенного исходной системой для заданного размера a_i , как:

$$PoD(a_i) = \frac{n_i}{n}, \quad (1)$$

где $PoD(a_i)$ – вероятность обнаружения дефекта размером a_i ; n_i – число дефектов размером a_i , обнаруженных при контроле; n – общее число дефектов размером a_i в исследуемом образце.

Многочисленное использование формулы (1) для различных размеров дефектов a_i позволяет получить частоты обнаружения дефектов по размерам.

1.1. Биномиальная модель оценки надежности системы контроля

Предположим, что в заданной генеральной совокупности присутствует доля дефектов заданного размера. Тогда, извлекая из этой совокупности N объектов и подвергая их исследованию с помощью исходной системы контроля, можно надеяться, что с увеличением числа N будут обнаружены все дефекты заданного размера. В этом случае каждый проведенный эксперимент может рассматриваться как независимое испытание, а частота появления события $\omega = n_i/N$ может быть рассчитана по формуле Бернулли [7, 8]:

$$P\left\{\omega = \frac{n_i}{N}\right\} = \frac{N!}{n_i!(N-n_i)!} p^{n_i} (1-p)^{N-n_i}, \quad (2)$$

где p – вероятность обнаружения единичного дефекта.

Нижняя доверительная граница вероятности обнаружения при заданном значении доверительной вероятности и заданном размере выборки может быть получена в результате решения следующего уравнения:

$$P_{SC} = \sup \left\{ p : \sum_{n_i=0}^{N-1} \frac{N!}{n_i!(N-n_i)!} p^{n_i} (1-p)^{N-n_i} \geq 1-\alpha \right\}, \quad (3)$$

где $(1-\alpha)$ – нижняя доверительная граница заданной вероятности; SC – привязка к используемой системе контроля.

Имея решение уравнения (3), можно гарантировать [7], что вероятность обнаружения дефекта заданного размера выше 0.9 с заданным доверительным интервалом, равным 95%, будет обеспечена в том случае, если из 29 заданных дефектов за 29 испытаний будут найдены все 29 дефектов. Также, задавая число проверок и предполагая, что все дефекты при этом будут найдены исследуемой системой контроля, можно определить вероятность обнаружения при заданном доверительном интервале. В результате таких проверок проводится оценка исследуемой системы контроля. При этом, если нижний доверительный интервал для доли обнаруженных трещин превышает заданное значение вероятности обнаружения, то система контроля считается достаточной для проведения работ по контролю и обеспечивает необходимый уровень надежности.

Однако, как указано в работах [9, 10], использование биномиальной модели для оценки надежности системы контроля приводит к серьезным проблемам. Они возникают при получении кривой PoD при изменении размеров дефектов. В этом случае доверительные границы кривой PoD имеют очень неустойчивое поведение и зависят от выбранного метода анализа. Кроме того, для получения кривой PoD для всего диапазона изменения размеров дефектов требуется их большое количество, т.к. объем выборки для одного размера должен быть умножен на число точек, необходимых для построения самой PoD .

1.2. Параметрическая модель Беренса и Хови для кривой вероятности обнаружения PoD

В качестве альтернативы биномиальной модели была предложена параметрическая модель для построения кривой PoD . В работах Беренса

⁴ Аналитический отчет № 532/789-2019. О проведении межлабораторных сличительных испытаний по неразрушающим видам контроля в организациях атомной отрасли по программе П.МСИ.НКСС-533/009-2018. Ч. 2. М.: Росатом, АО «ВНИИИМ»; 2019. [Analytical report No. 532/789-2019 “On conducting interlaboratory comparative non-destructive tests in organizations of the nuclear industry under the program P.MSI.NKSS-533/009-2018,” Part 2. Moscow: ROSATOM, VNIINM; 2019. (in Russ.).]

и Хови [11, 12] использована другая статистическая основа для представления кривой PoD в виде математической функции. Статистическая модель, предложенная Беренсом и Хови [12], основана на представлении выходного сигнала, поступающего от системы контроля, в виде основной составляющей, связанной с изменениями среднего сигнала от одного дефекта к другому, и случайной составляющей, связанной с изменениями сигнала при проверке того же самого дефекта. Отметим, что свойства материала, расположение дефекта и его ориентация относятся к первой основной составляющей и не меняются от одного осмотра к другому. Ко второй составляющей следует отнести человеческий фактор и используемые средства контроля. В свою очередь, средства контроля включают метод контроля, методику и аппаратуру контроля на выбранной чувствительности. Возможный способ повышения достоверности, например, ультразвукового контроля изложен в [12]. Важно отметить, что человеческий фактор имеет субъективный характер и может меняться от многих причин, а средства контроля обладают объективными характеристиками, которые могут быть оценены в виде погрешности используемого метода.

В соответствии с приведенными представлениями Беренс и Хови [13] предложили статистическую модель, согласно которой ответный сигнал системы контроля разбит на отдельные компоненты. Эти компоненты могут быть записаны в виде следующей функциональной связи:

$$\hat{a} = h(a) + \delta + \varepsilon, \quad (4)$$

где $\hat{a}$ – выходной сигнал, поступающий от системы контроля; $h(a)$ – основная составляющая, характеризующая среднее изменение сигнала от размера дефекта; δ – дополнительная составляющая, обусловленная используемыми средствами контроля и определяемая в виде погрешности используемого метода; ε – дополнительная составляющая, обусловленная человеческим фактором.

Следует заметить, что согласно Беренсу и Хови величина $h(a)$ является случайной величиной со своим средним значением, а величины δ и ε – случайные величины с нулевым средним значением.

1.3. Параметрическая модель для кривой вероятности обнаружения PoD , определяемая по результатам статистической обработки тест образцов

Предлагаемая модель в уравнении (4) для построения кривой $PoD(a)$ может быть использована только в том случае, если размеры дефектов и их распределение заранее известны, т.е. сами дефекты

являются искусственно созданными в виде тест-образцов. Эти данные могут быть получены по результатам проводимых испытаний в организациях атомной отрасли по неразрушающим видам контроля [14].

Такой метод построения кривой PoD можно назвать прямым методом. Проведение и организация такого рода испытаний требуют существенных затрат. Данные, полученные по результатам проведенных проверок, являются ограниченными, и поэтому чаще всего приводятся данные только о средней PoD . В этом случае усреднение данных затрудняет их дальнейшее использование для решения практических задач и делает невозможным проведение индивидуальной оценки достоверности, полученной разными лабораториями.

Как отмечено в работе [9], это является большим недостатком, т.к. индивидуальные оценки, полученные разными лабораториями, позволяют выделить более надежные лаборатории и использовать их опыт в дальнейшей работе. С дополнительными сложностями, возникающими при построении PoD -кривых, можно ознакомиться в [15]. Отмеченные недостатки требуют поиска альтернативных методов оценки кривой PoD .

2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

В качестве альтернативы прямым методам могут быть использованы расчетные методы, основанные на решении обратных задач [16], а также средства компьютерного моделирования⁵.

Для построения кривой PoD используются данные, полученные в результате контроля реальных дефектов при проведении инспекций по контролю металлоконструкций. Существенно важной составляющей является подбор выборки исходных данных [18, 19].

Пусть для рассматриваемой конструкции, находящейся в эксплуатации в течение времени t , были обнаружены дефекты разных размеров a_i . Формируя для полученной выборки частотную характеристику дефектов по размерам (рис. 1), можно сопоставить ей плотность распределения обнаруженных дефектов – $p_j(a)$. В качестве размера дефекта a_i должен быть выбран размерный масштаб – глубина, длина, площадь сечения дефекта. Из-за несовершенства используемой

⁵ Genc K. Simulating reality: Going beyond counting pores and cracks in additive-manufactured parts. *FOCUS The NDT Technician*. 2020;19(2). 3 p. https://www.asnt.org/-/media/Files/Publications/TNT/TNT_19-2.pdf?la=en. Дата обращения 15.12.2022. / Accessed December 15, 2022.

системы контроля часть дефектов оказывается необнаруженной. Степень несовершенства системы измерения, как было показано выше, характеризуется кривой обнаружения $PoD_{SC}(a)$, где нижний индекс «SC» относится к конкретной системе контроля.

Совокупность обнаруженных и необнаруженных дефектов образует исходное случайное распределение дефектов по их размерам. Назовем это распределение действительным распределением плотности дефектов и обозначим $p_a(a)$.

В соответствии с введенными определениями запишем следующее соотношение для плотности обнаруженных дефектов:

$$p_f(a) = \frac{p_a(a)PoD_{SC}(a)}{\int_{a_0}^S p_a(a)PoD_{SC}(a)da}, \quad (5)$$

где $p_f(a)$ – распределение плотности обнаруженных дефектов с помощью исходной системы контроля; $p_a(a)$ – действительное распределение плотности дефектов в исследуемом объекте; $PoD_{SC}(a)$ – кривая вероятности обнаружения дефектов для исходной системы контроля SC; S – максимальный размер дефекта, который может находиться в исследуемом объекте; a_0 – чувствительность исходной системы контроля (минимальный размер дефекта, обнаруживаемый исходной системой); a – размерный масштаб дефекта.

Рассматривая соотношение (5), можно поставить задачу по нахождению функций $p_a(a)$ и $PoD_{SC}(a)$ по известной функции распределения $p_f(a)$. Такая задача относится к обратным [19–21]. Для ее решения необходима конкретизация вида функций $p_a(a)$ и $PoD_{SC}(a)$.

Функция распределения действительных размеров дефектов теоретически должна иметь экспоненциальный характер, поскольку с уменьшением размерного масштаба число дефектов растет. Учитывая данное предположение, запишем плотность распределения действительных дефектов в виде следующего соотношения:

$$p_a(a) = \frac{\exp(-\lambda a)}{\int_{a_0}^S \exp(-\lambda a)da}, \quad (6)$$

где λ – параметр действительного распределения дефектов.

При выборе функции $PoD_{SC}(a)$ была выбрана такая форма, которая имеет небольшое число параметров, но учитывала бы особенности статистической модели (4), предложенные Беренсом и Хови. С учетом этих требований была использована форма:

$$PoD_{SC}(a) = 1 - \exp(-r(a - a_0)), \quad (7)$$

где r – коэффициент достоверности исходной системы контроля.

Следует заметить, что коэффициент достоверности r , использованный в (7), включает как основную составляющую изменения функции $PoD_{SC}(a)$ от размера дефекта, так и дополнительную составляющую, обусловленную человеческим фактором [22], которая определяется по результатам статистической обработки исходной выборки. То же самое следует сказать и относительно параметра a_0 .

Подставляя приведенные формулы (6) и (7) в соотношение (5), получим:

$$p_f(a) = \frac{\exp(-a/\lambda)[1 - \exp(-r(a - a_0))]}{\int_{a_0}^S \exp(-a/\lambda)[1 - \exp(-r(a - a_0))]da}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что при известном распределении $p_f(a)$ необходимо найти три параметра: параметр распределения λ , коэффициент достоверности r и a_0 – чувствительность исходной системы контроля. С построением PoD -кривой по нескольким независимым переменным можно ознакомиться в [23].

2.1. Алгоритм расчета

Отметим важную особенность функции $p_f(a)$. Поскольку данная функция определяется как произведение функций $p_a(a)$ и $PoD_{SC}(a)$, причем $p_a(a)$ является монотонно убывающей функцией, а $PoD_{SC}(a)$ – монотонно возрастающей, то логично положить, что функция $p_f(a)$ должна иметь максимум. Координата максимального значения должна быть связана с параметрами функций $p_a(a)$ и $PoD_{SC}(a)$. Проведя несложные вычисления, можем записать значение абсциссы точки максимума в виде:

$$a_{\max} = a_0 - \frac{\ln\left(1 + \frac{r}{\lambda}\right)}{r}. \quad (9)$$

Если подставить в (8), значение $a_{\max}$, то получим ординату точки максимума:

$$p_f(a_{\max}) = y_{\max}. \quad (10)$$

Эти координаты $(a_{\max}, y_{\max})$ могут быть определены из экспериментально полученного распределения плотности обнаруженных дефектов (рис. 1).

Также отметим еще одну особенность выбранных функций. Если подставить в (6) значение $a_{\max}$, то получим почти ту же самую ординату точки максимума, что получилась для формулы (10), т.е.:

$$p_a(a_{\max}) = y_{\max}. \quad (11)$$

Точное совпадение значений ординат для формул (10) и (11) будет иметь место в том случае, если пределы интегрирования в используемых выражениях имеют значения от 0 до ∞ . Следует заметить, что разница значений $y_{\max}$, рассчитанных по формулам (10) и (11), зависит от величины a_0 и выбранной величины S – максимального размера дефекта в исследуемой области. Для $S > 20$ мм относительная погрешность разности этих значений не превышает величины 10^{-4} .

По сути, это означает, что функция распределения плотности вероятности $p_a(a)$ проходит через точку максимума функции распределения обнаруженных дефектов $p_f(a)$. Используя это свойство, можно записать следующее нелинейное уравнение относительно неизвестных параметров a_0 и λ :

$$F(a_0, \lambda) = y_{\max} - \frac{\exp(-\lambda a_{\max})}{S \int_{a_0}^{\infty} \exp(-\lambda a) da} = 0. \quad (12)$$

Неизвестный параметр a_0 может быть найден из экспериментально полученного распределения плотности обнаруженных дефектов как результат пересечения кривой распределения обнаруженных дефектов с осью абсцисс. Зная полученное значение a_0 и используя уравнение (12), можно найти и второй неизвестный параметр λ , рассматривая нелинейное уравнение (12) относительно только одного параметра λ .

Для нахождения параметра r использовался метод последовательных приближений. Задавая серию значений параметра r , вычислим для каждого величину параметра λ следующим образом. Разобьем исходную область размером (a_0, S) на n интервалов. Выбор числа интервалов и их размеров определяется на основе предварительного анализа исходной выборки. Согласно (6), запишем вероятность нахождения действительных дефектов размером от a до b на интервале (a, b) :

$$p_a(a, b) = \frac{\int_a^b \exp(-a/\lambda) da}{\int_{a_0}^S \exp(-a/\lambda) da}. \quad (13)$$

Если известно общее число действительных дефектов для всей области $N_{a\Sigma}$, то число действительных дефектов N_a^i для i -го интервала составит:

$$N_a^i = p_a(a_i, a_{i+1}) N_{a\Sigma}. \quad (14)$$

Если известно число обнаруженных дефектов для каждого интервала N_f^i , то общее число действительных дефектов может быть найдено из соотношения:

$$N_{a\Sigma} = \sum_{i=1}^n N_f^i \frac{1}{1 - \exp\left(-r \left(\frac{a_i + a_{i+1}}{2} - a_0\right)\right)}. \quad (15)$$

Таким образом, задавая величину r и используя соотношение (15), найдем значение $N_{a\Sigma}$. Затем, используя формулу (14), определим число действительных дефектов для каждого i -го интервала – N_a^i . Далее, используя метод линейной регрессии, по известным значениям N_a^i , найдем параметр $\lambda(r)$.

Максимально приближенное значение параметра $\lambda(r)$ к параметру λ , найденному из уравнения (12), и даст исходное значение параметра r .

2.2. Тестовые расчеты

С целью проверки правильности предложенной выше расчетной методики были проведены тестовые расчеты на моделях. Моделирование данных в рассматриваемом случае имеет важное преимущество, поскольку результаты расчетов могут быть сопоставлены с известным поведением генеральной совокупности, что невозможно сделать, сопоставляя только данные лабораторных исследований. Отдельные вопросы качества процедуры восстановления освещены в [24, 25].

В качестве исходных данных рассмотрим заданную конструкцию, в которой находятся действительные дефекты, имеющие следующие характеристики: общее число действительных дефектов $N_{a\Sigma}$; распределение действительных дефектов по размерам (предполагаем, что оно имеет показательный закон распределения с известным параметром λ). Для оценки текущего состояния конструкции используется система неразрушающего контроля с известной $PoD(a)$, имеющая заданную форму (7), с известными характеристиками: r – коэффициентом достоверности и a_0 – чувствительностью исходной системы контроля. При проведении контроля были обнаружены дефекты $N_{f\Sigma}$ разных размеров, которые могут быть отсортированы по размерам. Полученная таким образом совокупность обнаруженных дефектов $N_{f\Sigma}$ является исходной выборкой, которая

обрабатывалась согласно предложенной методике. Полученные значения сопоставлялись с исходными данными. С целью исследования влияния сочетания значений исходных параметров на восстанавливаемые характеристики исходные данные были сгруппированы для девяти серий расчетов, приведенных в табл. 1. Для всех выбранных расчетных серий общее число действительных дефектов было принято равным $N_{a\Sigma} = 1000$. Толщина стенки трубопровода была выбрана $S = 20$ мм.

Таблица 1. Исходные данные моделирования

Серия расчетов, №	Параметр a_0 , мм	Параметр λ , мм ⁻¹	Параметр r , мм ⁻¹
1	0.5	0.2	0.1
2	0.5	0.2	0.5
3	0.5	0.2	1.0
4	0.5	0.5	0.1
5	0.5	0.5	0.5
6	0.5	0.5	1.0
7	0.5	1.0	0.1
8	0.5	1.0	0.5
9	0.5	1.0	1.0

2.2.1. Определение параметра a_0

Параметр a_0 определялся в результате нахождения точки пересечения кривой плотности обнаруженных дефектов с осью абсцисс. При этом кривая плотности обнаруженных дефектов была аппроксимирована параболой, построенной по двум точкам, включая максимальное значение для исходной плотности обнаруженных дефектов. В качестве примера расчета были выбраны следующие исходные параметры четвертой серии: $\lambda = 0.5$ мм⁻¹; $r = 0.1$ мм⁻¹; $a_0 = 0.5$ мм.

Исходные параметры были использованы для построения кривой плотности действительных дефектов в соответствии с (6). Задавая число интервалов разбиения исходной области (при $n = 27$), определяем число действительных дефектов, находящихся в границах полученных интервалов, используя (14). Зная число действительных дефектов для полученных интервалов, вычислим число обнаруженных дефектов для каждого интервала, используя зависимость:

$$N_f^i = N_d^i \int_{a_i}^{a_{i+1}} (1 - \exp(-r(a - a_0))) da. \quad (16)$$

Округляя число N_f^i до целого значения, получим исходную выборку обнаруженных дефектов, сгруппированных по их размерам. Следует заметить, что округление полученных значений для обнаруженных дефектов может быть сделано по недостатку (отбрасывание дробной части целого числа) и по избытку (увеличение целого числа на единицу, если дробная часть больше 0.5), что приводит к двум различным частотным распределениям (красные и синие столбцы на рис. 1).

Для полученного распределения выберем две точки (первую и третью), включая точку с максимальным значением плотности, и проведем через них параболу. Точка пересечения параболы с осью абсцисс даст значение параметра a_0 (рис. 2). Заметим, что вычислить значение параметра a_0 можно для двух вариантов: по недостатку $a_0^- = 0.365$ и по избытку $a_0^+ = 0.309$. Среднее значение для параметра a_0 составит $a_0^s = 0.337$. Исходное значение для $a_0 = 0.5$ мм. Погрешность вычисления параметра a_0 составит $\delta a_0 = 0.326$ или 32.6%.

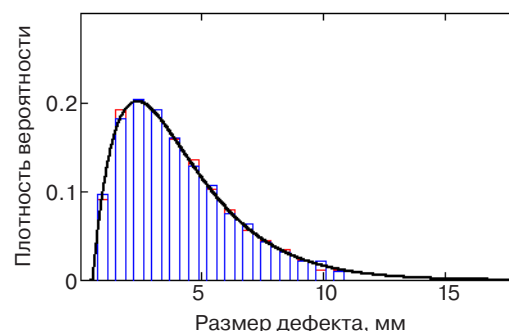


Рис. 1. Распределение обнаруженных дефектов по размерам (все серии)

Аналогично могут быть вычислены значения параметра a_0 для других исходных значений параметров: λ и r . Результаты таких расчетов приведены в табл. 2.

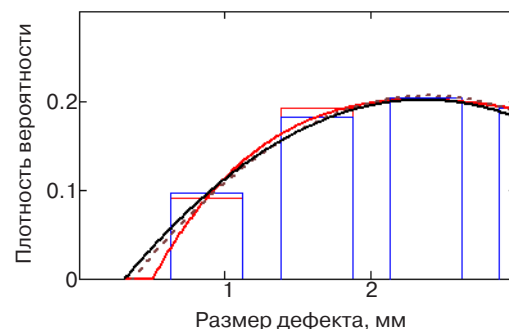


Рис. 2. Определение параметра a_0 для двух вариантов с округлением частотных характеристик по недостатку и по избытку

Таблица 2. Результаты восстановления параметра a_0^s

Исходные значения λ	Коэффициент достоверности	Восстановленное значение a_0^s	Погрешность, δa_0 , %
$\lambda = 0.2$	$r = 0.1$	0.189	62.2
	$r = 0.5$	0.303	39.4
	$r = 1.0$	0.321	35.8
$\lambda = 0.5$	$r = 0.1$	0.337	32.6
	$r = 0.5$	0.402	19.6
	$r = 1.0$	0.424	15.2
$\lambda = 1.0$	$r = 0.1$	0.468	6.4
	$r = 0.5$	0.460	8.0
	$r = 1.0$	0.446	10.0

2.2.2. Определение $\tilde{\lambda}$ – вычисленного (восстановленного) значения параметра λ

Для определения параметра $\tilde{\lambda}$ было использовано уравнение (12). Используя исходную выборку дефектов (рис. 1), находим для нее координаты максимальной точки. Зная эти координаты и используя значение параметра a_0^s из табл. 2, решаем нелинейное уравнение (12) относительно $\tilde{\lambda}$. В результате получаем искомый параметр $\tilde{\lambda}$. Результаты этих расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты восстановления параметра $\tilde{\lambda}$

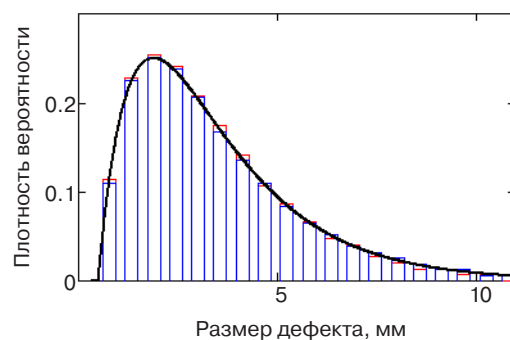
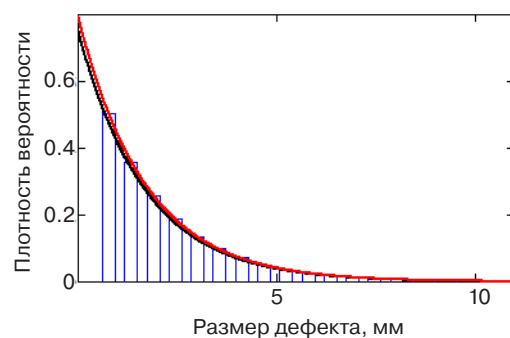
Исходные значения λ	Коэффициент достоверности	Восстановленное значение $\tilde{\lambda}$	Погрешность $\delta \tilde{\lambda}$, %
$\lambda = 0.2$	$r = 0.1$	0.199	0.5
	$r = 0.5$	0.232	16.0
	$r = 1.0$	0.235	12.5
$\lambda = 0.5$	$r = 0.1$	0.529	5.8
	$r = 0.5$	0.594	18.8
	$r = 1.0$	0.574	14.8
$\lambda = 1.0$	$r = 0.1$	0.969	6.4
	$r = 0.5$	1.084	8.4
	$r = 1.0$	1.075	7.5

Примечание: $\delta \tilde{\lambda}$ – относительная погрешность вычисленного значения параметра $\tilde{\lambda}$

2.2.3. Определение параметра r

Рассмотрим пример расчета искомого параметра r для указанных выше исходных значений пятой серии: $\lambda = 0.5 \text{ мм}^{-1}$; $r = 0.5 \text{ мм}^{-1}$; $a_0 = 0.5 \text{ мм}^{-1}$. Заданное число интервалов разбиения исходной области $n = 36$. Построенная частотная характеристика обнаруженных

дефектов для данной серии приведена на рис. 3. Задавая различные значения параметра r , для исходного частотного распределения обнаруженных дефектов были получены соответствующие им распределения действительных дефектов. Одно из полученных распределений действительных дефектов приведено на рис. 4. Результаты действительного распределения обрабатывались методом линейной регрессии, и вычислялись значения параметра λ для заданного значения r . Результаты таких расчетов для пятой серии приведены в табл. 4. Сопоставляя полученные результаты с восстановленным ранее для заданной серии параметром $\tilde{\lambda}$, равным 0.594, находим близкое соответствующее ему значение, равное 0.579, принимаем значение параметра r , равное 0.27. Заметим, что исходное значение параметра r составило 0.5, т.е. погрешность восстановления данного параметра – 46%.

**Рис. 3.** Распределение частоты и плотности обнаруженных дефектов по размерам для пятой серии**Рис. 4.** Распределение частоты и плотности действительных дефектов по размерам для пятой серии

Черная линия на рис. 4 построена по формуле (6) для вычисленных параметров пятой серии ($a_0 = 0.402$ из табл. 2, $\lambda = 0.594$ из табл. 3). Красная линия построена в результате приближения по формуле (17), полученной из линейной регрессии действительного распределения при $r = 0.27$:

$$p_a^{\text{exp}}(a) = \exp(-0.226 - 0.593a). \quad (17)$$

Таблица 4. Результаты восстановления параметра $\tilde{\lambda}$ при различных значениях коэффициента достоверности

Серия, №	Задаваемый параметр r , мм ⁻¹	Восстановленный параметр $\tilde{\lambda}$, мм ⁻¹	Степень приближения восстановленного параметра $\tilde{\lambda}$ к образцовому $\lambda_0 = 0.594$, $\Delta\lambda = \left \frac{\lambda_0 - \tilde{\lambda}}{\lambda_0} \right $
1	0.25	0.601	0.012
2	0.26	0.595	$1.7 \cdot 10^{-3}$
3	0.27	0.593	$1.684 \cdot 10^{-3}$
4	0.28	0.588	0.010
5	0.29	0.585	0.015
6	0.30	0.579	0.025
7	0.33	0.568	0.044
8	0.35	0.560	0.057
9	0.4	0.541	0.089
10	0.5	0.502	0.155

Аналогично были восстановлены значения параметра r и вычислены погрешности для остальных расчетных серий. Итоги вычислений приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты восстановления коэффициента достоверности $\tilde{r}$

Исходные значения параметра λ	Коэффициент достоверности	Значение параметра, $\tilde{r}$	Погрешность, $\delta\tilde{r}$, %
$\lambda = 0.2$	$r = 0.1$	0.095	5.0
	$r = 0.5$	0.4	20.0
	$r = 1.0$	0.9	10.0
$\lambda = 0.5$	$r = 0.1$	0.05	50.0
	$r = 0.5$	0.3	40.0
	$r = 1.0$	0.7	30.0
$\lambda = 1.0$	$r = 0.1$	0.08	20.0
	$r = 0.5$	0.55	10.0
	$r = 1.0$	0.80	20.0

Более подробно с особенностями реализации описанного алгоритма можно познакомиться в [26].

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление полученных результатов моделирования и заданных исходных значений параметров позволяет сделать следующие выводы.

При восстановлении параметра a_0 наибольшее значение погрешности было получено для расчетных серий с исходным значением $\lambda = 0.2$ (максимальная погрешность δa_0 составила 62.2% при значении параметра $r = 0.1$). С увеличением значения параметра r при значениях $r = 0.5$ и $r = 1.0$ погрешность уменьшается до значений 39.4% и 35.8%, соответственно. С увеличением параметра λ при значениях $\lambda = 0.5$ и $\lambda = 1.0$ погрешность δa_0 уменьшается – минимальное значение для $\lambda = 0.5$ составило 15.2% при $r = 1.0$; и минимальное значение для $\lambda = 1.0$ составило 6.4% при $r = 0.1$. Диапазон изменения значений погрешностей составил 6.4–62.2%.

При восстановлении параметра λ погрешность для всех расчетных серий не превысила значения 18.8%. Диапазон изменения значений погрешностей составил 0.5–18.8%.

При восстановлении параметра r максимальная погрешность составила 50% при значении исходных параметров $\lambda = 0.5$; $r = 0.1$. Минимальная погрешность составила 5% при значении исходных параметров $\lambda = 0.2$; $r = 0.1$. Диапазон изменения значений погрешностей составил 5–50%.

Полученные результаты численного моделирования показали принципиальную возможность использования разработанной методики для определения как кривой обнаружения дефектов, так и вероятностного распределения действительных дефектов по результатам проводимого контроля.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа позволила обнаружить следующие особенности предлагаемой методики:

1. Восстановление вероятностного распределения действительных дефектов основано на статистической обработке лишь той доли экспериментальных значений исходной выборки, которая определяет ее экстремальное значение.
2. Полученное экстремальное значение исходной выборки дает возможность непосредственно определить параметр действительного распределения дефектов λ , решая нелинейное уравнение.
3. При восстановлении кривой достоверности (определение параметра r) используется вся совокупность значений исходной выборки. При этом решается обратная задача. Согласно [16–18], данная задача относится к классу задач интерпретации данных наблюдений или диагностики.

Разработанная методика дает возможность использовать результаты, полученные по контролю металла, как для анализа текущего состояния оборудования и трубопроводов, так и прогнозирования их дальнейшего поведения, с большей уверенностью, чем применяемые в настоящий момент методики. Это вызвано в первую очередь тем, что

данная методика позволяет определить оценку надежности (кривую вероятности обнаружения *PoD*) для индивидуальных исполнителей непосредственно по результатам проведенных экспериментальных проверок. Индивидуальная оценка эффективности контроля, проводимого лабораторией, позволяет выявить как плохих, так и хороших исполнителей. Усреднение же результатов при построении *PoD* такую возможность исключает.

Следует заметить, что разработанная методика не заменяет существующие на настоящий момент методы аттестационных проверок, а рассматривается лишь как дополнение к ним.

Важным направлением разработанной методики является использование ее при анализе больших массивов данных, полученных в результате проводимых работ по контролю металла на энергоблоках. В этом случае могут быть сформированы группы дефектов в зависимости от различных факторов, среди которых типы конструктивных элементов, режимы эксплуатации, используемые материалы (нержавеющая сталь, черная сталь, композитные сварные

соединения), используемые системы контроля, а также качество работ, выполняемых разными бригадами дефектоскопистов.

Вклад авторов

А.Е. Александров – сбор результатов натурных измерений, разработка математической модели, общая координация работы.

А.П. Титов – разработка математической модели.

С.П. Борисов и **С.С. Быковский** – построение независимых программных реализаций математической модели.

И.В. Степанова и **Л.В. Бунина** – тестирование и верификация программной модели, непосредственное моделирование.

Authors' contributions

A.E. Alexandrov – collecting the results of field measurements, developing a mathematical model, general coordination of the work.

A.P. Titov – developing a mathematical model.

S.P. Borisov and **S.S. Bikovsky** – design of independent software implementations of a mathematical model.

I.V. Stepanova and **L.V. Bunina** – testing and verification of the software model, direct modeling.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berens A.P. *Probability of Detection (PoD) Analysis for the Advanced Retirement for Cause (RFC). Engine Structural Integrity Program (ENSIP) Nondestructive Evaluation (NDE) System Development*. V. 1. *PoD Analysis. Technical Report*. Dayton: University of Dayton, Research Institute; 2000. 88 p.
2. Berens A.P. NDE reliability data analysis. In: *ASM Metals Handbook*. V. 17. *Non-Destructive Evaluation and Quality Control: Qualitative Non-Destructive Evaluation*. 1989;17:689–701.
3. Subair S.M., Balasubramaniam K., Rajagopala P., Kumar A., Rao B.P., Jayakumar T. Finite element simulations to predict probability of detection (PoD) curves for ultrasonic inspection of nuclear components. *Procedia Engineering: 1st International Conference on Structural Integrity*. 2014;86:461–468. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.059>
4. Филинов В.В., Микаева С.А., Родюков М.С., Филинова А.В. Разработка средств неразрушающего контроля изделий из ферромагнитных сталей на основе использования магнитных шумов. *Russ. Technol. J.* 2017;5(3): 114–123. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-3-114-123>
5. Link R., Riess N. *Non-Destructive Material Testing: Surface Crack Detection*. V. 1. Hamburg: Helling GmbH; 2014.
6. Александров А.Е., Аждер Т.Б., Степанова И.В. Вероятностная модель расчета трубопроводов по механизму вязкого и хрупкого разрушения. *Информационные технологии*. 2020;26(8):443–450. <https://doi.org/10.17587/it.26.443-450>

REFERENCES

1. Berens A.P. *Probability of Detection (PoD) Analysis for the Advanced Retirement for Cause (RFC). Engine Structural Integrity Program (ENSIP) Nondestructive Evaluation (NDE) System Development*. V. 1. *PoD Analysis. Technical Report*. Dayton: University of Dayton, Research Institute; 2000. 88 p.
2. Berens A.P. NDE reliability data analysis. In: *ASM Metals Handbook*. V. 17. *Non-Destructive Evaluation and Quality Control: Qualitative Non-Destructive Evaluation*. 1989;17:689–701.
3. Subair S.M., Balasubramaniam K., Rajagopala P., Kumar A., Rao B.P., Jayakumar T. Finite element simulations to predict probability of detection (PoD) curves for ultrasonic inspection of nuclear components. *Procedia Engineering: 1st International Conference on Structural Integrity*. 2014;86:461–468. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.059>
4. Filinov V.V., Mikaeva S.A., Rodyukov M.S., Filinova A.V. Modern architecture board information and control systems of heavy vehicles. *Russ. Technol. J.* 2017;5(3):114–123 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-3-114-123>
5. Link R., Riess N. *Non-Destructive Material Testing: Surface Crack Detection*. V. 1. Hamburg: Helling GmbH; 2014.
6. Aleksandrov A.E., Azhder T.B., Stepanova I.V. A probabilistic model for calculating pipelines by the mechanism of ductile and brittle fracture. *Informatsionnye Tekhnologii = Information Technologies*. 2020;26(8): 443–450 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/it.26.443-450>

7. Casella G., Berger R. *Statistical inference*. 2nd ed. Duxbury Press; 2007. 650 p.
8. Kutner M.H., Nachtsheim C.I., Neter J., Li W. *Applied Linear Statistical Models*. 5th ed. New York: McGraw-Hill/Irwin; 2005. 1396 p.
9. Gandossi L., Annis C. *Probability of Detection Curves: Statistical Best-Practices. ENIQ report*. No. 41. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2010. 72 p.
10. Schneider C.R.A., Rudlin J.R. Review of statistical methods used in quantifying NDT reliability. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2004;46(2):77–79. <https://doi.org/10.1784/insi.46.2.77.55549>
11. Berens A.P., Hovey P.W. *Evaluation of NDE reliability characterization. AFWAL-TR-81-4160*. V. 1. Dayton: Air Force Wright-Aeronautical Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base; 1981.
12. Alain S., Badeau N. Using passive-axis focusing wedges to decrease inspection reject rates. *FOCUS The NDT Technician*. 2021;20(3). 5 p. URL: <https://ndtlibrary.asnt.org/2021/UsingPassiveAxisFocusingWedgestoDecreaseInspectionRejectRates> (дата обращения 15.12.2022).
13. Berens A.P., Hovey P.W. *Flaw detection reliability criteria*. V. 1. *Methods and results. AD-A142 001. Final technical report*. Dayton: University of Dayton, Research Institute; 1984. 175 p. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA142001
14. Гетман А.Ф., Козин Ю.Н. *Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления*. М.: Энергоатомиздат; 1997. 288 с. ISBN 5-283-03151-9
15. Annis C., Aldrin J.C., Sabbagh H.A. What is missing in nondestructive testing capability evaluation? *Mater. Eval*. 2015;73(1):1–11.
16. Александров А.Е. Оценка достоверности результатов контроля металла на основе альтернативного метода. *Информационные технологии*. 2018;8(24):529–537. <https://doi.org/10.17587/it.24.529-537>
17. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 10th ed. Wiley; 2020. 688 p. ISBN 978-1-119-72210-6
18. Annis C., Gandossi L., Martin O. Optimal sample size for probability of detection curves. *Nucl. Eng. Des.* 2013; 262:98–105. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.03.059>
19. Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., Гласко В.Б. *Математическое моделирование и метод обратных задач в машиностроении*. М.: Машиностроение; 1990. 264 с.
20. Aldrin J.C., Shell E.B., Oneida E.K., Sabbagh H.A., Sabbagh E., Murphy R.K., Mazdiyasni S., Lindgren E.A. Model-based inverse methods for sizing surface-breaking discontinuities with eddy current probe variability. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1706(1):090002_1-090002_10. <https://doi.org/10.1063/1.4940539>
21. Aldrin J.C., Oneida E.K., Shell E.B., Sabbagh H.A., Sabbagh E., Murphy R.K., Mazdiyasni S., Lindgren E.A., Mooers R.D. Model-based probe state estimation and crack inverse methods addressing eddy current probe variability. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1806(1):110013_1-110013_11. <https://doi.org/10.1063/1.4974691>
7. Casella G., Berger R. *Statistical inference*. 2nd ed. Duxbury Press; 2007. 650 p.
8. Kutner M.H., Nachtsheim C.I., Neter J., Li W. *Applied Linear Statistical Models*. 5th ed. New York: McGraw-Hill/Irwin; 2005. 1396 p.
9. Gandossi L., Annis C. *Probability of Detection Curves: Statistical Best-Practices. ENIQ report*. No. 41. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2010. 72 p.
10. Schneider C.R.A., Rudlin J.R. Review of statistical methods used in quantifying NDT reliability. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2004;46(2):77–79. <https://doi.org/10.1784/insi.46.2.77.55549>
11. Berens A.P., Hovey P.W. *Evaluation of NDE reliability characterization. AFWAL-TR-81-4160*. V. 1. Dayton: Air Force Wright-Aeronautical Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base; 1981.
12. Alain S., Badeau N. Using passive-axis focusing wedges to decrease inspection reject rates. *FOCUS The NDT Technician*. 2021;20(3):1–5. Available from URL: <https://ndtlibrary.asnt.org/2021/UsingPassiveAxisFocusingWedgestoDecreaseInspectionRejectRates> (accessed December 15, 2022).
13. Berens A.P., Hovey P.W. *Flaw detection reliability criteria*. V. 1. *Methods and results. AD-A142 001. Final technical report*. Dayton: University of Dayton, Research Institute; 1984. 175 p. Available from URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA142001
14. Getman A.F., Kozin Yu.N. *Nerazrushayushchii kontrol' i bezopasnost' ekspluatatsii sosudov i truboprovodov davleniya (Non-Destructive Testing and Safety of Operation of Pressure Vessels and Pipelines)*. Moscow: Energoatomizdat; 1997. 288 p. (in Russ.). ISBN 5-283-03151-9
15. Annis C., Aldrin J.C., Sabbagh H.A. What is missing in nondestructive testing capability evaluation? *Mater. Eval*. 2015;73(1):1–11.
16. Aleksandrov A.E. Evaluation of the reliability of metal testing results based on an alternative algorithm. *Informatsionnye Tekhnologii = Information Technologies*. 2018;8(24):529–537 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/it.24.529-537>
17. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 10th ed. Wiley; 2020. 688 p. ISBN 978-1-119-72210-6
18. Annis C., Gandossi L., Martin O. Optimal sample size for probability of detection curves. *Nucl. Eng. Des.* 2013;262:98–105. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.03.059>
19. Tikhonov A.N., Kal'ner V.D., Glasko V.B. *Matematicheskoe modelirovanie i metod obratnykh zadach v mashinostroenii (Mathematical Modeling and Method of Inverse Problems in Mechanical Engineering)*. Moscow: Mashinostroenie; 1990. 264 p. (in Russ.).
20. Aldrin J.C., Shell E.B., Oneida E.K., Sabbagh H.A., Sabbagh E., Murphy R.K., Mazdiyasni S., Lindgren E.A. Model-based inverse methods for sizing surface-breaking discontinuities with eddy current probe variability. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1706(1):090002_1-090002_10. <https://doi.org/10.1063/1.4940539>

22. Bertovic M., Given J., Rentala V.M., Lehleitner J., Kanzler D., Heckel T., Tkachenko V. Human factors in der POD – ist das möglich? *e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT): DGZfP-Jahrestagung*. 2022;7. 15 p. (in Deutsch). URL: <https://www.ndt.net/article/dgzfp2022/papers/mo.3.b.3.pdf>
23. Yusa N., Knopp J.S. Evaluation of probability of detection (POD) studies with multiple explanatory variables. *J. Nucl. Sci. Technol.* 2015;53(4):574–579. <https://doi.org/10.1080/00223131.2015.1064332>
24. Schneider C.R.A., Sanderson R.M., Carpentier C., Zhao L., Nageswaran C. Estimation of probability of detection curves based on theoretical simulation of the inspection process. *Annual Br. Conf. on NDT*. 2012. 12 p. URL: https://www.bindt.org/downloads/NDT2012_5C1.pdf
25. Aldrin J.C., Annis C., Sabbagh H.A., Knopp J.S., Lindgren E.A. Assessing the reliability of nondestructive evaluation methods for damage characterization. *AIP Conference Proceedings*. 2014;1581(1):2071–2078. <https://doi.org/10.1063/1.4865078>
26. Alexandrov A.E., Azhder T.B., Bunina L.V., Bikovsky S.S., Titov A.P. Computer program for calculating pipelines destruction probability. In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (Eds.). *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. CoMeSySo: Data Science and Intelligent Systems. Ser. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. V. 231. P. 718–733. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_59
21. Aldrin J.C., Oneida E.K., Shell E.B., Sabbagh H.A., Sabbagh E., Murphy R.K., Mazdiyasni S., Lindgren E.A., Mooers R.D. Model-based probe state estimation and crack inverse methods addressing eddy current probe variability. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1806(1):110013_1–110013_11. <https://doi.org/10.1063/1.4974691>
22. Bertovic M., Given J., Rentala V.M., Lehleitner J., Kanzler D., Heckel T., Tkachenko V. Human Factors in der POD – ist das möglich? *e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT)*. Available from URL: <https://www.ndt.net/article/dgzfp2022/papers/mo.3.b.3.pdf>
23. Yusa N., Knopp J.S. Evaluation of probability of detection (POD) studies with multiple explanatory variables. *J. Nucl. Sci. Technol.* 2015;53(4):574–579. <https://doi.org/10.1080/00223131.2015.1064332>
24. Schneider C.R.A., Sanderson R.M., Carpentier C., Zhao L., Nageswaran C. Estimation of probability of detection curves based on theoretical simulation of the inspection process. *Annual Br. Conf. on NDT*. 2012. 12 p. Available from URL: https://www.bindt.org/downloads/NDT2012_5C1.pdf
25. Aldrin J.C., Annis C., Sabbagh H.A., Knopp J.S., Lindgren E.A. assessing the reliability of nondestructive evaluation methods for damage characterization. *AIP Conference Proceedings*. 2014;1581(1):2071–2078. <https://doi.org/10.1063/1.4865078>
26. Alexandrov A.E., Azhder T.B., Bunina L.V., Bikovsky S.S., Titov A.P. Computer program for calculating pipelines destruction probability. In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (Eds.). *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. CoMeSySo: Data Science and Intelligent Systems. Ser. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. V. 231. P. 718–733. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_59

Об авторах

Александров Александр Евгеньевич, д.т.н. профессор, кафедра «Аппаратное, программное и математическое обеспечение вычислительных систем» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (107996, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20). E-mail: femsystem@yandex.ru. Scopus Author ID 57364491800, SPIN-код РИНЦ 6121-3825, <https://orcid.org/0000-0002-6104-6227>

Борисов Сергей Петрович, старший преподаватель, кафедра «Аппаратное, программное и математическое обеспечение вычислительных систем» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (107996, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20). E-mail: bsp345@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 4045-6550, <https://orcid.org/0000-0002-6043-9547>

Булдина Людмила Владимировна, старший преподаватель, кафедра «Аппаратное, программное и математическое обеспечение вычислительных систем» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (107996, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20). E-mail: ludmilabunina@mail.ru. Scopus Author ID 57218190491, SPIN-код РИНЦ 1629-1700, <https://orcid.org/0000-0002-3392-6569>

Быковский Сергей Сергеевич, старший преподаватель, кафедра «Аппаратное, программное и математическое обеспечение вычислительных систем» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (107996, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20). E-mail: bykovskij@mirea.ru. Scopus Author ID 57363858400, SPIN-код РИНЦ 1450-2101, <https://orcid.org/0000-0002-3645-3808>

Степанова Ирина Владимировна, к.г.-м.н., доцент, кафедра «Аппаратное, программное и математическое обеспечение вычислительных систем» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (107996, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20). E-mail: ivs_rrr@mail.ru. Scopus Author ID 57213161230, SPIN-код РИНЦ 7065-5203, <https://orcid.org/0000-0002-0944-3989>

Титов Андрей Петрович, к.т.н., доцент, кафедра «Аппаратное, программное и математическое обеспечение вычислительных систем» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (107996, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20). E-mail: titov_and@mail.ru. Scopus Author ID 57363858500, SPIN-код РИНЦ 3872-9708, <https://orcid.org/0000-0001-8823-2524>

About the authors

Alexander E. Alexandrov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Hardware Software and Mathematical Support of Computing System, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (20, Stromynka ul., Moscow, 107996 Russia). E-mail: femsystem@yandex.ru. Scopus Author ID 57364491800, RSCI SPIN-code 6121-3825, <https://orcid.org/0000-0002-6104-6227>

Sergey P. Borisov, Senior Lecturer, Department of Hardware Software and Mathematical Support of Computing System, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (20, Stromynka ul., Moscow, 107996 Russia). E-mail: bsp345@gmail.com. RSCI SPIN-code 4045-6550, <https://orcid.org/0000-0002-6043-9547>

Ludmila V. Bunina, Senior Lecturer, Department of Hardware Software and Mathematical Support of Computing System, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (20, Stromynka ul., Moscow, 107996 Russia). E-mail: ludmilabunina@mail.ru. Scopus Author ID 57218190491, RSCI SPIN-code 1629-1700, <https://orcid.org/0000-0002-3392-6569>

Sergey S. Bikovsky, Senior Lecturer, Department of Hardware Software and Mathematical Support of Computing System, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (20, Stromynka ul., Moscow, 107996 Russia). E-mail: bykovskij@mirea.ru. Scopus Author ID 57363858400, RSCI SPIN-code 1450-2101, <https://orcid.org/0000-0002-3645-3808>

Irina V. Stepanova, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Associate Professor, Department of Hardware Software and Mathematical Support of Computing System, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (20, Stromynka ul., Moscow, 107996 Russia). E-mail: ivs_rrr@mail.ru. Scopus Author ID 57213161230, RSCI SPIN-code 7065-5203, <https://orcid.org/0000-0002-0944-3989>

Andrey P. Titov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Hardware Software and Mathematical Support of Computing System, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (20, Stromynka ul., Moscow, 107996 Russia). E-mail: titov_and@mail.ru. Scopus Author ID 57363858500, RSCI SPIN-code 3872-9708, <https://orcid.org/0000-0001-8823-2524>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 539.3
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-70-85>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Развитие обобщенных модельных
представлений теплового удара
для локально-неравновесных процессов
переноса теплоты

Э.М. Карташов[®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: professor.kartashov@gmail.com

Резюме

Цели. Процессы переноса энергии в твердых телах и вызываемые ими тепловые нагрузки имеют широкое распространение в природе и технике. Этим объясняется исключительно важное научное и практическое значение построения теории указанных процессов, создание эффективных методов исследования развиваемых при этом модельных представлений. Цель этих исследований – установление основных закономерностей протекания достаточно сложных процессов, особенно в условиях мощных энергетических воздействий в различного рода технологических операциях. К ним можно отнести плазмохимическую обработку материалов, обработку в инфракрасных печах и гелиоустановках, интенсивный нагрев материалов лазерными или электронными лучами, применение мощных радиационных излучателей для термической закалки и упрочнения поверхности изделий. В этих случаях возникает так называемый термический удар – одна из центральных тем в термомеханике и физике прочности твердых тел, имеющая важное научное и практическое значение. Цель работы – рассмотреть открытую проблему теории теплового удара в терминах обобщенной модели динамической термоупругости в условиях локально-неравновесного процесса переноса теплоты. Модель (в зависимости от вида и кривизны граничной поверхности рассматриваемого массивного тела) позволяет исследовать проблему в трех системах координат: декартовы координаты – массивное тело, ограниченное плоской поверхностью; сферические координаты – массивное тело с внутренней сферической полостью; цилиндрические координаты – массивное тело с внутренней цилиндрической полостью. Рассматриваются три вида интенсивного нагрева: температурный, тепловой, нагрев средой. Ставится задача: получить аналитическое решение, провести численные эксперименты и дать их физический анализ.

Методы. Используются методы и теоремы операционного исчисления, теория специальных функций.

Результаты. Развита обобщенная модельная представления теплового удара в терминах динамической термоупругости для локально-неравновесных процессов переноса теплоты одновременно в трех системах координат: декартовой, сферической и цилиндрической. Наличие кривизны граничной поверхности области теплового удара обосновывает исходную постановку динамической задачи в перемещениях с использованием предложенного соответствующего уравнения «совместности».

Выводы. Предложена обобщенная динамическая модель термической реакции массивных тел с внутренними полостями одновременно в декартовой, сферической и цилиндрической системах координат в условиях интенсивного температурного нагрева, теплового нагрева, нагрева средой. Модель рассмотрена в перемещениях на основе локально-неравновесного теплопереноса. Получено аналитическое решение для напряжений, проведен численный эксперимент; описан волновой характер распространения термоупругой волны.

Проведено сравнение с классическим решением без учета локальной неравновесности. На основе операционного решения задачи предложены важные в практическом отношении расчетные инженерные соотношения для верхней оценки максимума термических напряжений.

Ключевые слова: тепловой удар, обобщенная динамическая модель, аналитическое решение, термические напряжения

• Поступила: 24.06.2022 • Доработана: 16.12.2022 • Принята к опубликованию: 03.03.2023

Для цитирования: Карташов Э.М. Развитие обобщенных модельных представлений теплового удара для локально-неравновесных процессов переноса теплоты. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):70–85. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-70-85>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Developing generalized model representations of thermal shock for local non-equilibrium heat transfer processes

Eduard M. Kartashov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: professor.kartashov@gmail.com

Abstract

Objectives. Processes of energy transfer in solids and resultant thermal loads are widespread in nature and technology. This explains the scientific and practical significance of constructing a theory of these processes, as well as developing effective methods for studying the modeled concepts developed on this basis. The purpose of such studies is to determine basic flux patterns of complex processes occurring especially under conditions of powerful energy impacts in various technological operations. These include plasma-chemical processing of materials, their processing in infrared furnaces and solar plants, intense heating of materials carried out by laser or electron beams, and the use of powerful radiation emitters for thermal hardening and hardening of the surface of products. In these cases, the phenomenon of thermal shock arises, forming one of the central topics in thermomechanics and strength physics of solids. The present work considers an open theoretical problem of thermal shock in terms of a generalized model of dynamic thermoelasticity under conditions of a locally nonequilibrium heat transfer process. Depending on the type and curvature of the boundary surface of the considered massive body, the model can be used to study the problem in three coordinate systems: cartesian coordinates—a massive body bounded by a flat surface; spherical coordinates—a massive body with an internal spherical cavity; cylindrical coordinates—a massive body with an internal cylindrical cavity. Three types of intensive heating are considered: temperature heating, thermal heating, and heating by medium. Following the development of an analytical solution, the results of conducted numerical experiments are presented along with their physical analysis.

Methods. The study applies methods and theorems of operational calculus according to the theory of special functions.

Results. Generalized model representations of thermal shock are developed in terms of dynamic thermoelasticity for locally nonequilibrium heat transfer processes simultaneously in three coordinate systems: Cartesian, spherical, and cylindrical. The presence of curvature of the boundary surface of the thermal shock area substantiates the initial statement of the dynamic problem in displacements using the proposed corresponding “compatibility” equation.

Conclusions. A generalized dynamic model of the thermal reaction of massive bodies with internal cavities simultaneously in Cartesian, spherical, and cylindrical coordinate systems under conditions of intense temperature heating, thermal heating, and heating by medium is proposed. The model is considered in terms of displacements based on local nonequilibrium heat transfer. A numerical experiment carried out according to the obtained analytical solution for stresses forms a basis for a description of the wave nature of the propagation of a thermoelastic wave. A comparison with the classical solution is made without taking into account local nonequilibrium. The calculation of engineering relations carried out on the basis of the operational solution of the problem is important in practical terms for the upper estimate of the maximum thermal stresses.

Keywords: heat stroke, generalized dynamic model, analytical solution, thermal stresses

• Submitted: 24.06.2022 • Revised: 16.12.2022 • Accepted: 03.03.2023

For citation: Kartashov E.M. Developing generalized model representations of thermal shock for local non-equilibrium heat transfer processes. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):70–85. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-70-85>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Статья продолжает исследования автора, описанные в [1, 2]. В рамках обобщенной модели динамической термоупругости изучается открытая проблема термической реакции на нагрев массивного тела, ограниченного изнутри либо плоской поверхностью (упругое полупространство в декартовой системе координат), либо цилиндрической поверхностью (упругое пространство в цилиндрической системе координат с внутренней цилиндрической полостью), либо сферической поверхностью (упругое пространство в сферической системе координат с внутренней сферической полостью).

Рассматриваются три случая интенсивного нагрева границы тела (области): температурный, тепловой и нагрев средой. Следует подчеркнуть, что развитие обобщенных моделей, затрагивающих многочисленные практические приложения – одно из направлений в теории теплового удара, не получившего своего развития до настоящего времени. Специфика такого рода исследований заключается, с одной стороны, в относительной простоте исходных математических моделей, с другой – в вычислительных трудностях при получении искомого результата и при этом – в очевидной значимости применения полученных соотношений в многочисленных практических ситуациях.

Исследование проводится в условиях локально-неравновесного процесса переноса теплоты [3–8]. Принимаются во внимание два обстоятельства. При высокоинтенсивном нагреве твердых тел, создающих тепловой удар, тепловые потоки $\bar{q}(M, t)$, где t – время в области $\Omega = \{M(x, y, z) \in D, t > 0\}$, описывающей реальное твердое тело, отстают от градиента

температуры $T(M, t)$ на величину, пропорциональную времени релаксации τ_r , связанную со скоростью распространения теплоты v_T соотношением $v_T = \sqrt{a / \tau_r}$, a – температуропроводность [9–15]:

$$\bar{q}(M, t) = -\lambda_T \text{grad} T(M, t) - \tau_r \frac{\partial \bar{q}(M, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

где λ_T – теплопроводность. Уравнение энергии для изотропных твердых тел $c \rho^* \partial T(M, t) / \partial t = \text{div} \bar{q}(M, t)$, где c – удельная теплоемкость, ρ^* – плотность и соотношение (1) приводят к уравнению переноса гиперболического типа [16, 17]:

$$\frac{\partial T(M, t)}{\partial t} = a \Delta T(M, t) - \tau_r \frac{\partial^2 T(M, t)}{\partial t^2}, \quad (2)$$

содержащему не только первую, но и вторую производную от температуры по времени. Вследствие этого уравнение (2) описывает волновые процессы, в данном случае – волновой теплоперенос. Второе обстоятельство состоит в том, что вопросы корректной постановки краевых задач для уравнения (2) рассмотрены сравнительно недавно [16], и ряд вопросов, связанных с тепловыми задачами, для уравнения (2) требует своего дальнейшего изучения.

ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРМОУПРУГОСТИ

Пусть D – конечная или частично ограниченная выпуклая область пространства $M(x, y, z)$, описывающая реальное твердое тело и находящаяся в условиях термонапряженного состояния; S – кусочно-гладкая поверхность, ограничивающая область D ;

$\bar{n} = (n_1, n_2, n_3)$ – внешняя нормаль к S (вектор, непрерывный на S); $T(M, t)$ – распределение температуры в области D при $t > 0$; T_0 – начальная температура, при которой область находится в недеформированном и ненапряженном состоянии. Пусть $\sigma_{ij}(M, t)$, $\varepsilon_{ij}(M, t)$, $U_i(M, t)$ – соответственно компоненты тензоров напряжения, деформации и вектора перемещения, удовлетворяющие основным уравнениям (несвязанной) термоупругости (в индексных обозначениях) [17]:

$$\sigma_{ij,j}(M, t) + F_i(M, t) = \rho^* U_i(M, t), \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij}(M, t) = (1/2)[U_{i,j}(M, t) + U_{j,i}(M, t)], \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}(M, t) = 2\mu\varepsilon_{ij}(M, t) + [\lambda\varepsilon_{ii}(M, t) - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T(T(M, t) - T_0)]\delta_{ij}, \quad M \in D, t > 0, \quad (5)$$

где ρ^* – плотность; λ, μ – изотермические коэффициенты Ламе; G – модуль сдвига; $\lambda = 2G\nu/(1 - 2\nu)$; ν – коэффициент Пуассона, при этом $2G(1 + \nu) = E$, где E – модуль Юнга; α_T – коэффициент линейного теплового расширения; δ_{ij} – символ Кронекера; $F_i(M, t)$ – компоненты объемной силы; $\bar{\varepsilon}(M, t) = U_{i,i}(M, t) = \varepsilon_{ii}(M, t)$ – объемная деформация, связанная с суммой нормальных напряжений $\bar{\sigma}(M, t) = \sigma_{nn}(M, t)$, $n = x, y, z$ соотношением

$$\bar{\varepsilon}(M, t) = \frac{1 - 2\nu}{E} \bar{\sigma}(M, t) + 3\alpha_T [T(M, t) - T_0]. \quad (6)$$

Термонапряженное состояние области D при $t > 0$ может возникать при различных режимах теплового воздействия на границу S , создающих термический удар. К ним можно отнести наиболее распространенные на практике случаи:

- температурный нагрев

$$T(M, t) = T_c(t), \quad M \in S, t > 0 \quad (T_c(t) > T_0, t \geq 0); \quad (7)$$

- тепловой нагрев

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_r} \int_0^t \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial n} \Big|_{M \in S} \exp\left(-\frac{t - \tau}{\tau_r}\right) d\tau = \\ = -\frac{1}{\lambda_T} q(t) S_+(t), \quad t \geq 0; \end{aligned} \quad (8)$$

- нагрев средой

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_r} \int_0^t \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial n} \Big|_{M \in S} \exp\left(-\frac{t - \tau}{\tau_r}\right) d\tau = \\ = h \{ T(M, t) \Big|_{M \in S} - [T_0 + S_+(t)(T_c - T_0)] \}, \quad t \geq 0, \end{aligned} \quad (9)$$

а также от действия внутренних источников теплоты. Здесь λ_T – теплопроводность материала; $q(t)$ – величина теплового потока; h – относительный коэффициент теплообмена; T_c – температура окружающей среды; $S_+(t) = \begin{cases} 1, & t > 0, \\ 0, & t \leq 0. \end{cases}$

В равной мере могут быть рассмотрены и случаи охлаждения твердого тела.

Входящая в (5) температурная функция $T(M, t)$ находится из решения краевой задачи нестационарной теплопроводности для уравнения (2) с граничными условиями (7)–(9). Соотношения (3)–(6) – общие соотношения динамической термоупругости, связывающие напряжения, деформации, перемещения и температуру. При переходе к конкретным случаям необходимо преобразовать (3)–(6) в так называемые уравнения совместности либо в напряжениях, либо в перемещениях, и для этих уравнений записывать соответствующую задачу динамической термоупругости. Для рассматриваемого в статье случая необходимо учесть влияние кривизны граничной поверхности твердого тела на температуру и соответствующие температурные напряжения. Здесь более удобной математической моделью является уравнение «совместности» в перемещениях, одновременно охватывающее цилиндрическую, сферическую и декартову системы координат.

Подставляя правые части (5) в (3) (без объемных сил) и используя далее (4) и (6), после ряда длительных преобразований приходим к трем уравнениям:

$$\begin{aligned} \Delta U_i(M, t) + \frac{1}{(1 - 2\nu)} \cdot \frac{\partial \bar{\varepsilon}(M, t)}{\partial i} - (\rho^*/G) \frac{\partial^2 U_i(M, t)}{\partial t^2} = \\ = \frac{2(1 + \nu)\alpha_T}{(1 - 2\nu)} \cdot \frac{\partial [T(M, t) - T_0]}{\partial i}, \quad i = x, y, z, \end{aligned}$$

которые формально можно записать в виде векторного равенства:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{U}(M, t) + \frac{1}{(1 - 2\nu)} \text{grad} [\text{div} \bar{U}(M, t)] - \\ - (\rho^*/G) \frac{\partial^2 \bar{U}(M, t)}{\partial t^2} = \\ = \frac{2(1 + \nu)}{(1 - 2\nu)} \alpha_T \text{grad} [T(M, t) - T_0], \quad M \in D, t > 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Заметим, что при обратном переходе необходимо приравнять соответствующие компоненты в векторной записи левой и правой частей в (10).

Рассмотрим далее практические случаи динамической термоупругости на основе соотношения (10). В первой случае в декартовых координатах (x, y, z) рассматривается область $z > R$, $t > 0$, ограниченная плоской поверхностью, температурное состояние которой описывается функцией $T_i(z, t)$, $i = 1, 2, 3$; при

этом $U_x = U_y = 0$, $U_z = U_z(z, t)$ и соотношение (10) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial^2 U_z(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{v_p^2} \cdot \frac{\partial^2 U_z(z, t)}{\partial t^2} = \frac{1+v}{1-v} \cdot \alpha_T \cdot \frac{\partial [T_i(z, t) - T_0]}{\partial z}, \quad z > R, t > 0. \quad (11)$$

Здесь $v_p = \sqrt{\frac{2G(1-v)}{\rho^*(1-2v)}} = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho^*}$ – скорость распространения волны расширения в упругой среде, близкая к скорости звука.

Интересующая нас компонента напряжения $\sigma_{zz}(z, t)$ связана с перемещением соотношением

$$\sigma_{zz}(z, t) = 2G \left\{ \frac{1-v}{1-2v} \cdot \frac{\partial U_z(z, t)}{\partial z} - \frac{1+v}{1-2v} \cdot \alpha_T [T_i(z, t) - T_0] \right\}. \quad (12)$$

Температурная функция удовлетворяет трем условиям нагрева

$$\frac{\partial T_i(z, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_i(z, t)}{\partial z^2} - \tau_r \frac{\partial^2 T_i(z, t)}{\partial t^2}, \quad z > R, t > 0, \quad (13)$$

$$T_i(z, t)|_{t=0} = T_0, \quad \frac{\partial T_i(z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (14)$$

$$z \geq R, |T_i(z, t)| < \infty, z \geq R, t \geq 0,$$

$$T_i(z, t)|_{z=R} = T_c, t > 0, \quad (15)$$

$$\frac{1}{\tau_r} \int_0^t \frac{\partial T_2(z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=R} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) d\tau = -\frac{1}{\lambda_T} q_0, t > 0, \quad (16)$$

$$\frac{1}{\tau_r} \int_0^t \frac{\partial T_3(z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=R} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) d\tau = \quad (17)$$

$$= h [T_3(z, t)|_{z=R} - T_c], t > 0.$$

Во втором случае в сферических координатах (ρ, φ, θ) рассматривается область $\rho > R, t > 0$ с внутренней сферической полостью при нагреве в условиях центральной симметрии $T_i = T_i(\rho, t)$, так что $U_\varphi = U_\theta = 0$, $U_\rho = U_\rho(\rho, t)$ и (12) записывается в виде:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_\rho(\rho, t)}{\partial \rho^2} + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\partial U_\rho(\rho, t)}{\partial \rho} - \\ & - \frac{2}{\rho^2} \cdot U_\rho(\rho, t) - \frac{1}{v_p^2} \cdot \frac{\partial^2 U_\rho(\rho, t)}{\partial t^2} = \\ & = \frac{1+v}{1-v} \cdot \alpha_T \cdot \frac{\partial [T_i(\rho, t) - T_0]}{\partial \rho}, \quad \rho > R, t > 0. \end{aligned} \quad (18)$$

При этом

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho\rho}(\rho, t) = 2G \left\{ \frac{1-v}{1-2v} \cdot \frac{\partial U_\rho(\rho, t)}{\partial \rho} +, \right. \\ \left. + \frac{2v}{1-2v} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot U_\rho(\rho, t) - \frac{1+v}{1-2v} \cdot \alpha_T [T_i(\rho, t) - T_0] \right\}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i(\rho, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T_i(\rho, t)}{\partial \rho^2} + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\partial T_i(\rho, t)}{\partial \rho} \right) - \\ - \tau_r \cdot \frac{\partial^2 T_i(\rho, t)}{\partial t^2}, \quad \rho > R, t > 0, \end{aligned} \quad (20)$$

$$T_i(\rho, t)|_{t=0} = T_0, \quad \frac{\partial T_i(\rho, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (21)$$

$$\rho \geq R, |T_i(\rho, t)| < \infty, \rho \geq R, t \geq 0,$$

$$T_i(\rho, t)|_{\rho=R} = T_c, t > 0, \quad (22)$$

$$\frac{1}{\tau_r} \int_0^t \frac{\partial T_2(\rho, \tau)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) d\tau = -\frac{1}{\lambda_T} q_0, t > 0, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_r} \int_0^t \frac{\partial T_3(\rho, \tau)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) d\tau = \\ = h [T_3(\rho, t)|_{\rho=R} - T_c], t > 0. \end{aligned} \quad (24)$$

В третьем случае, в цилиндрических координатах (r, φ, z) , рассматривается область $r > R, t > 0$ с внутренней цилиндрической полостью в условиях радиальной температуры $T_i = T_i(r, t)$, так что $U_\varphi = U_z = 0$, $U_r = U_r(r, t)$ и соотношение (10) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 U_r(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U_r(r, t)}{\partial r} - \\ & - \frac{1}{r^2} \cdot U_r(r, t) - \frac{1}{v_p^2} \cdot \frac{\partial^2 U_r(r, t)}{\partial t^2} = \\ & = \frac{1+v}{1-v} \cdot \alpha_T \cdot \frac{\partial [T_i(r, t) - T_0]}{\partial r}, \quad r > R, t > 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Далее:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}(r, t) = 2G \left\{ \frac{1-v}{1-2v} \cdot \frac{\partial U_r(r, t)}{\partial r} + \frac{v}{1-2v} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{r} U_r(r, t) - \frac{1+v}{1-2v} \cdot \alpha_T [T_i(r, t) - T_0] \right\}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\frac{\partial T_i(r, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T_i(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_i(r, t)}{\partial r} \right) - \tau_r \cdot \frac{\partial^2 T_i(r, t)}{\partial t^2}, \quad r > R, \quad t > 0, \quad (27)$$

$$T_i(r, t)|_{t=0} = T_0, \quad r \geq R, \quad \frac{\partial T_i(r, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (28)$$

$$r \geq R, \quad |T_i(r, t)| < \infty, \quad r \geq R, \quad t \geq 0,$$

$$T_i(r, t)|_{r=R} = T_c, \quad t > 0, \quad (29)$$

$$\frac{1}{\tau_r} \int_0^t \frac{\partial T_2(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) d\tau = -\frac{1}{\lambda_T} q_0, \quad t > 0,$$

$$\frac{1}{\tau_r} \int_0^t \frac{\partial T_3(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) d\tau = h [T_3(r, t)|_{r=R} - T_c], \quad t > 0. \quad (30)$$

Подобные случаи интенсивного нагрева поверхности области (реального тела) представляют значительный практический интерес, например, в следующих случаях: поверхностный диэлектрический нагрев; расчет термических напряжений в стенках цилиндров паровых машин и двигателей внутреннего сгорания; в теории автоматических систем регулирования температуры; при исследовании области звуковых частот металлов при высоких или очень низких температурах поверхности; многочисленные случаи резкой смены температуры поверхности космических и авиационных объектов; в машиностроительной отрасли при работе на различных экспериментальных установках для определения температурного состояния образцов и др. [6]. Несомненной практической значимостью для теории теплового удара будет представление в рамках обобщенной модели одновременно всех трех случаев в трех системах координат.

Во избежание излишней громоздкости введем следующие безразмерные переменные.
В области $z > R, t > 0$:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{v_p z}{a}, \quad \tau = \frac{v_p^2 t}{a}, \quad \xi_0 = \frac{v_p R}{a}, \quad \beta = \frac{v_p}{v_T}, \quad Bi^* = \frac{ha}{v_p}, \quad S_T = \frac{2G\alpha_T(1+\nu)}{1-2\nu}, \\ W_i(\xi, \tau) &= \frac{T_i(z, t) - T_0}{T_c - T_0}, \quad i = 1, 3; \quad W_2(\xi, \tau) = \frac{T_2(z, t) - T_0}{(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)}, \quad i = 2, \\ \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) &= \frac{\sigma_{zz}(z, t)}{S_T(T_c - T_0)}, \quad i = 1, 3; \quad \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \frac{\sigma_{zz}(z, t)}{S_T(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)}, \quad i = 2, \\ U_i(\xi, \tau) &= \frac{(1-\nu)U_z(z, t)}{(1+\nu)\alpha_T(T_c - T_0)(a / v_p)}, \quad i = 1, 3, \\ U_2(\xi, \tau) &= \frac{(1-\nu)U_z(z, t)}{(1+\nu)\alpha_T(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)^2}, \quad i = 2. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

В области $\rho > R, t > 0$:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{v_p \rho}{a}, \quad \tau = \frac{v_p^2 t}{a}, \quad \xi_0 = \frac{v_p R}{a}, \quad \beta = \frac{v_p}{v_T}, \quad Bi^* = \frac{ha}{v_p}, \quad S_T = \frac{2G\alpha_T(1+\nu)}{1-2\nu}, \\ W_i(\xi, \tau) &= \frac{T_i(\rho, t) - T_0}{T_c - T_0}, \quad i = 1, 3; \quad W_2(\xi, \tau) = \frac{T_2(\rho, t) - T_0}{(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)}, \quad i = 2, \\ \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) &= \frac{\sigma_{\rho\rho}(\rho, t)}{S_T(T_c - T_0)}, \quad i = 1, 3; \quad \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \frac{\sigma_{\rho\rho}(\rho, t)}{S_T(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)}, \quad i = 2, \\ U_i(\xi, \tau) &= \frac{(1-\nu)U_\rho(\rho, t)}{(1+\nu)\alpha_T(T_c - T_0)(a / v_p)}, \quad i = 1, 3, \\ U_2(\xi, \tau) &= \frac{(1-\nu)U_\rho(\rho, t)}{(1+\nu)\alpha_T(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)^2}, \quad i = 2. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

В области $r > R, t > 0$:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{v_p r}{a}, \tau = \frac{v_p^2 t}{a}, \xi_0 = \frac{v_p R}{a}, \beta = \frac{v_p}{v_T}, Bi^* = \frac{ha}{v_p}, S_T = \frac{2G\alpha_T(1+v)}{1-2v}, \\ W_i(\xi, \tau) &= \frac{T_i(r, t) - T_0}{T_c - T_0}, i = 1, 3; W_2(\xi, \tau) = \frac{T_2(r, t) - T_0}{(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)}, i = 2, \\ \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) &= \frac{\sigma_{rr}(r, t)}{S_T(T_c - T_0)}, i = 1, 3; \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \frac{\sigma_{rr}(r, t)}{S_T(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)}, i = 2, \\ U_i(\xi, \tau) &= \frac{(1-v)U_r(r, t)}{(1+v)\alpha_T(T_c - T_0)(a / v_p)}, i = 1, 3, \\ U_2(\xi, \tau) &= \frac{(1-v)U_r(r, t)}{(1+v)\alpha_T(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)^2}, i = 2. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ И ЕЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Запишем обобщенную модель задачи, предполагая границы области свободными от напряжений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_i(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} + \frac{2m+1}{\xi} \left[\frac{\partial U_i(\xi, \tau)}{\partial \xi} - \frac{U_i(\xi, \tau)}{\xi} \right] - \\ - \frac{\partial^2 U_i(\xi, \tau)}{\partial \tau^2} = \frac{\partial W_i(\xi, \tau)}{\partial \xi}, \xi > \xi_0, \tau > 0. \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} U_i(\xi, \tau)|_{\tau=0} = \frac{\partial U_i(\xi, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = 0, \xi \geq \xi_0, \\ |U_i(\xi, \tau)| < \infty, \xi \geq \xi_0, \tau \geq 0. \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial U_i(\xi, \tau)}{\partial \xi} + \frac{(2m+1)v}{1-v} \cdot \frac{1}{\xi} U_i(\xi, \tau) \right]_{\xi=\xi_0} = \\ = W_i(\xi, \tau) \Big|_{\xi=\xi_0}, \tau > 0. \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_i(\xi, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 W_i(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} + \xi \frac{\partial W_i(\xi, \tau)}{\partial \xi} - \\ - \beta^2 \frac{\partial^2 W_i(\xi, \tau)}{\partial \tau^2} = 0, \xi > \xi_0, \tau > 0. \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} W_i(\xi, \tau)|_{\tau=0} = 0, \xi \geq \xi_0, \frac{\partial W_i(\xi, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = 0; \\ |W_i(\xi, \tau)| < \infty, \xi \geq \xi_0, \tau \geq 0. \end{aligned} \quad (38)$$

$$W_1(\xi, \tau) \Big|_{\xi=\xi_0} = 1, \tau > 0. \quad (39)$$

$$\frac{1}{\beta^2} \int_0^\tau \frac{\partial W_2(\xi, \tau')}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_0} \exp\left(-\frac{\tau-\tau'}{\beta^2}\right) d\tau' = -1, \tau > 0. \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\beta^2} \int_0^\tau \frac{\partial W_3(\xi, \tau')}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_0} \exp\left(-\frac{\tau-\tau'}{\beta^2}\right) d\tau' = \\ = Bi^* \left[W_3(\xi, \tau) \Big|_{\xi=\xi_0} = -1 \right], \tau > 0. \end{aligned} \quad (41)$$

Здесь $i = 1$ при $m = -0.5$; $i = 2$ при $m = 0.5$; $i = 3$ при $m = 0$. Заметим, что искомое напряжение $\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)$ во всех трех случаях связано с перемещением $U_i(\xi, \tau)$ соотношением:

$$\begin{aligned} \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \frac{\partial U_i(\xi, \tau)}{\partial \xi} + \\ + \frac{(2m+1)v}{(1-v)} \cdot \frac{1}{\xi} \cdot U_i(\xi, \tau) - W_i(\xi, \tau). \end{aligned} \quad (42)$$

Решение обобщенной задачи (34)–(42) с целью изучения, например, влияния геометрии области на кинетику соответствующих термоупругих напряжений – открытая проблема теории теплового удара. Ее решение приводится ниже.

В пространстве изображений по Лапласу

$$\left. \begin{aligned} \bar{W}_i(\xi, p) &= \int_0^\infty W_i(\xi, \tau) \exp(-p\tau) d\tau, \\ \bar{U}_i(\xi, p) &= \int_0^\infty U_i(\xi, \tau) \exp(-p\tau) d\tau, \\ \bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p) &= \int_0^\infty \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) \exp(-p\tau) d\tau \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

решение тепловой задачи (37)–(41) имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{W}_i(\xi, p) = \bar{f}_i(\xi_0, p) (\xi_0 / \xi)^m K_m[\xi \bar{\mu}(p)], \\ (\bar{\mu}(p) = \sqrt{\beta^2 p^2 + p}), \end{aligned}$$

где

$$\bar{f}_i(\xi_0, p) = \begin{cases} \frac{1}{pK_m[\xi_0\bar{\mu}(p)]}, & i=1, \\ \frac{\bar{\mu}(p)}{p^2K_{m+1}[\xi_0\bar{\mu}(p)]}, & i=2, \\ \frac{Bi^*\bar{\mu}(p)}{p\{pK_{m+1}[\xi_0\bar{\mu}(p)] + Bi^*\bar{\mu}(p)K_m[\xi_0\bar{\mu}(p)]\}}, & i=3. \end{cases}$$

Здесь $K_m(z)$ – модифицированная функция Бесселя.

Соотношения (34)–(36) переведем в пространство изображений (43):

$$\frac{d^2\bar{U}_i(\xi, p)}{d\xi^2} + \frac{2m+1}{\xi} \cdot \frac{d\bar{U}_i(\xi, p)}{d\xi} - \left(p^2 + \frac{2m+1}{\xi^2} \right) \bar{U}_i(\xi, p) = \frac{d\bar{W}_i(\xi, p)}{d\xi}, \quad \xi > \xi_0. \quad (44)$$

$$\left[\frac{d\bar{U}_i(\xi, p)}{d\xi} + \frac{(2m+1)v}{(1-v)} \cdot \frac{1}{\xi} \cdot \bar{U}_i(\xi, p) \right] \Big|_{\xi=\xi_0} = \bar{W}_i(\xi, p) \Big|_{\xi=\xi_0}. \quad (45)$$

$$|\bar{U}_i(\xi, p)| < \infty, \quad \xi \geq \xi_0. \quad (46)$$

Общее решение уравнения (44) состоит из общего решения однородного и частного решения неоднородного уравнения:

$$\bar{U}_i(\xi, p) = \frac{1}{\xi^m} [C_1 K_{m+1}(\xi p) + C_2 I_{m+1}(\xi p)] + \bar{U}_{i\text{чн}}(\xi, p). \quad (47)$$

Нахождение частного решения уравнения (44) требует отдельного рассмотрения. Имеем:

$$\frac{d}{d\xi}(\Delta\bar{U}_i) = \Delta \left(\frac{d\bar{U}_i}{d\xi} \right) - \frac{2m+1}{\xi^2} \cdot \frac{d\bar{U}_i}{d\xi}. \quad (48)$$

При этом

$$\Delta\bar{U}_i = \frac{d^2\bar{U}_i}{d\xi^2} + \frac{2m+1}{\xi} \cdot \frac{d\bar{U}_i}{d\xi}, \quad \Delta\bar{W}_i = (\beta^2 p^2 + p)\bar{W}_i. \quad (49)$$

Частное решение в (47) ищем в виде $\bar{U}_{i\text{чн}}(\xi, p) = A \frac{d\bar{W}_i}{d\xi}$, где постоянную A следует найти.

Подставляя это выражение в (44) и используя (48)–(49), находим $A = \frac{1}{p^2(\beta^2 - 1) + p}$. Таким образом, общее решение уравнения (44) с учетом граничного условия (46) будет иметь вид:

$$\bar{U}_i(\xi, p) = C \left[\frac{1}{\xi^m} K_{m+1}(\xi p) \right] - \bar{\varphi}_i(\xi_0, p) (\xi_0 / \xi)^m K_{m+1}[\xi \bar{\mu}(p)], \quad (50)$$

где

$$\bar{\varphi}_i(\xi_0, p) = \begin{cases} \frac{\bar{\mu}(p)}{p^2[p(\beta^2 - 1) + 1]K_m[\xi_0\bar{\mu}(p)]}, & i=1, \\ \frac{\bar{\mu}^2(p)}{p^3[p(\beta^2 - 1) + 1]K_{m+1}[\xi_0\bar{\mu}(p)]}, & i=2, \\ \frac{Bi^*\bar{\mu}^2(p)}{p^2[p(\beta^2 - 1) + 1][pK_{m+1}(\xi_0\bar{\mu}(p)) + Bi^*\bar{\mu}(p)K_m(\xi_0\bar{\mu}(p))]}, & i=3. \end{cases}$$

Здесь было использовано соотношение

$$\frac{d}{d\xi} [\xi^{-m} K_m(\xi \bar{\mu}(p))] = -\bar{\mu}(p) \xi^{-m} K_{m+1}[\xi \bar{\mu}(p)].$$

Используя свойства функций Бесселя, находим после преобразований следующее важное соотношение, имеющее принципиальное значение для нахождения аналитического решения обобщенной проблемы (34)–(42):

$$\frac{d}{d\xi} \left[\frac{1}{\xi^m} K_{m+1}(\xi p) \right] + \frac{(2m+1)v}{(1-v)} \times \frac{1}{\xi^{m+1}} \cdot K_{m+1}(\xi p) = -\frac{1}{\xi^{m+1}} \bar{\Theta}(\xi p), \quad (51)$$

где

$$\bar{\Theta}(\xi p) = \xi p K_m(\xi p) + (2m+1) \frac{(1-2v)}{(1-v)} K_{m+1}(\xi p). \quad (52)$$

Соотношения (59)–(60) и граничное условие (50) позволяют определить постоянную величину в (55), а вместе с этим – искомое перемещение. Находим:

$$\bar{U}_i(\xi, p) = \frac{(\xi_0 / \xi)^m \bar{\Theta}[\xi_0 \bar{\mu}(p)] K_{m+1}(\xi p) \bar{\varphi}_i(\xi_0 p)}{\bar{\Theta}(\xi_0 p)} - \frac{(\xi_0 / \xi)^m K_m[\xi_0 \bar{\mu}(p)] K_{m+1}(\xi p) \bar{f}_i(\xi_0, p)}{\xi_0^{-1} \bar{\Theta}(\xi_0 p)} - (\xi_0 / \xi)^m \bar{\varphi}_i(\xi_0, p) K_{m+1}[\xi \bar{\mu}(p)].$$

Находим искомое напряжение:

$$\frac{\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p)}{(\xi_0 / \xi)^m} = \frac{(\xi_0 / \xi) \bar{\Theta}(\xi p) K_m[\xi_0 \bar{\mu}(p)] \bar{f}_i(\xi_0, p)}{\bar{\Theta}(\xi_0 p)} +$$

$$+ \frac{\bar{\varphi}_i(\xi_0, p) \bar{\Theta}[\xi \bar{\mu}(p)]}{\xi} - \frac{\bar{\varphi}_i(\xi_0, p) \bar{\Theta}[\xi_0 \bar{\mu}(p)] \bar{\Theta}(\xi p)}{\xi \bar{\Theta}(\xi_0 p)} -$$

$$- \bar{f}_i(\xi_0, p) K_m[\xi \bar{\mu}(p)].$$

Теперь можно записать для напряжений операционные соотношения для всех трех видов нагрева:

- температурный нагрев ($i = 1$)

$$\frac{\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p)}{(\xi_0 / \xi)^m} = \frac{(\xi_0 / \xi) \bar{\Theta}(\xi p)}{p \bar{\Theta}(\xi_0 p)} +$$

$$+ \frac{\bar{\mu}(p) \bar{\Theta}[\xi \bar{\mu}(p)]}{\xi p^2 [p(\beta^2 - 1) + 1] K_m[\xi_0 \bar{\mu}(p)]} - \frac{K_m[\xi \bar{\mu}(p)]}{p K_m[\xi_0 \bar{\mu}(p)]} -$$

$$- \frac{\bar{\mu}(p) \bar{\Theta}[\xi_0 \bar{\mu}(p)] \bar{\Theta}(\xi p)}{\xi p^2 [p(\beta^2 - 1) + 1] K_m[\xi_0 \bar{\mu}(p)] \bar{\Theta}(\xi_0 p)}; \quad (53)$$

- тепловой нагрев ($i = 2$)

$$\frac{\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p)}{(\xi_0 / \xi)^m} = \frac{(\xi_0 / \xi) \bar{\mu}(p) \bar{\Theta}(\xi p) K_m[\xi_0 \bar{\mu}(p)]}{p^2 \bar{\Theta}(\xi_0 p) K_{m+1}[\xi_0 \bar{\mu}(p)]} +$$

$$+ \frac{\bar{\mu}^2(p) \bar{\Theta}(\xi \bar{\mu}(p))}{\xi p^3 [p(\beta^2 - 1) + 1] K_{m+1}[\xi_0 \bar{\mu}(p)]} -$$

$$- \frac{\bar{\mu}(p) K_m[\xi_0 \bar{\mu}(p)]}{p^2 K_{m+1}[\xi_0 \bar{\mu}(p)]} -$$

$$- \frac{\bar{\mu}^2(p) \bar{\Theta}(\xi p) \bar{\Theta}[\xi_0 \bar{\mu}(p)]}{\xi p^3 [p(\beta^2 - 1) + 1] \bar{\Theta}(\xi_0 p) K_{m+1}[\xi_0 \bar{\mu}(p)]}; \quad (54)$$

- нагрев средой ($i = 3$)

$$\frac{\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p)}{(\xi_0 / \xi)^m} = \frac{(\xi_0 / \xi) \bar{\Theta}(\xi p)}{p \bar{\Theta}(\xi_0 p)} \times$$

$$\times \frac{K_m[\xi_0 \bar{\mu}(p)] Bi^* \bar{\mu}(p)}{[p K_{m+1}(\xi_0 \bar{\mu}(p)) + Bi^* \bar{\mu}(p) K_m(\xi_0 \bar{\mu}(p))] \bar{\mu}} +$$

$$+ \frac{Bi^* \bar{\mu}^2(p)}{\xi p^2 [p(\beta^2 - 1) + 1]} \times$$

$$\times \frac{\bar{\Theta}[\xi_0 \bar{\mu}(p)]}{[p K_{m+1}(\xi_0 \bar{\mu}(p)) + Bi^* \bar{\mu}(p) K_m(\xi_0 \bar{\mu}(p))]} -$$

$$- \frac{Bi^* \bar{\mu}^2(p)}{\xi p^2 [p(\beta^2 - 1) + 1]} \times$$

$$\times \frac{\bar{\Theta}[\xi_0 \bar{\mu}(p)] \bar{\Theta}(\xi p)}{[p K_{m+1}(\xi_0 \bar{\mu}(p)) + Bi^* \bar{\mu}(p) K_m(\xi_0 \bar{\mu}(p))] \bar{\Theta}(\xi_0 p)} -$$

$$- \frac{Bi^* \bar{\mu}(p) K_m[\xi_0 \bar{\mu}(p)]}{p [p K_{m+1}(\xi_0 \bar{\mu}(p)) + Bi^* \bar{\mu}(p) K_m(\xi_0 \bar{\mu}(p))]}; \quad (55)$$

Обратное преобразование в (53)–(55) оказывается весьма трудоемким и приводит к сложным и трудно обозримым выражениям. Но если учесть, что в постановке задачи (34)–(42) имеют место инерционные эффекты микросекундной длительности [17], во времена которых напряжения $\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)$ как раз и достигают максимальных значений, то можно рассмотреть малые времена τ , соответствующие в изображениях большим p , т.е. непосредственно после теплового удара. Для этого используем в (53)–(55) асимптотическое представление цилиндрических функций для больших p :

$$K_\nu(p) = \frac{\sqrt{\pi/2}}{\sqrt{p}} \exp(-p), \quad \nu \geq 0,$$

где K_ν – модифицированная функция Бесселя.

Введем далее следующие обозначения:

$$A_m(\xi) = \frac{(2m+1)(1-2\nu)}{(1-\nu)\xi}, \quad \gamma = \frac{1}{1-\beta^2}.$$

Введем также функцию для данного класса задач (функцию Карташова)

$$\bar{\chi}_m(\xi, p) = \frac{p + A_m(\xi)}{(p - \gamma)[p + A_m(\xi_0)]},$$

которую используем при нахождении оригиналов найденных изображений. Оригинал этой функции имеет вид:

$$\chi_m(\xi, \tau) = \frac{\gamma + A_m(\xi)}{\gamma + A_m(\xi_0)} \times$$

$$\times \left[\frac{A_m(\xi_0) - A_m(\xi)}{\gamma + A_m(\xi)} \exp(-A_m(\xi_0)\tau) + \exp(\gamma\tau) \right].$$

После преобразований находим:

$$\frac{\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p)}{(\xi_0 / \xi)^{m+1/2}} = -\bar{\Psi}_1(\xi, p) \exp[-(\xi - \xi_0) \bar{\mu}(p)] +$$

$$+ \bar{\Psi}_2(\xi, p) \exp[-(\xi - \xi_0) p], \quad (56)$$

где при температурном нагреве ($i = 1$):

$$\bar{\Psi}_1(\xi, p) = \left\{ \frac{\gamma \bar{\mu}(p) [\bar{\mu}(p) + A_m(\xi)]}{p^2 (p - \gamma)} + \frac{1}{p} \right\}, \quad (57)$$

$$\bar{\Psi}_2(\xi, p) = \left\{ \frac{p - \gamma}{p} \bar{\chi}_m(\xi, p) + \right.$$

$$\left. + \frac{\gamma \bar{\mu}(p) [\bar{\mu}(p) + A_m(\xi_0)] \bar{\chi}_m(\xi, p)}{p^2} \right\}; \quad (58)$$

при тепловом нагреве ($i = 2$):

$$\bar{\Psi}_1(\xi, p) = \left\{ \frac{\gamma \bar{\mu}^2(p) [\bar{\mu}(p) + A_m(\xi)]}{p^3(p - \gamma)} + \frac{\bar{\mu}^2(p)}{p^2} \right\}, \quad (59)$$

$$\bar{\Psi}_2(\xi, p) = \left\{ \frac{\bar{\mu}(p)(p - \gamma) \bar{\chi}_m(\xi, p)}{p^2} + \frac{\gamma \bar{\mu}^2(p) [\bar{\mu}(p) + A_m(\xi_0)] \bar{\chi}_m(\xi, p)}{p^3} \right\}; \quad (60)$$

при нагреве средой ($i = 3$):

$$\bar{\Psi}_1(\xi, p) = \left\{ \frac{\gamma Bi^* \bar{\mu}^2(p) [\bar{\mu}(p) + A_m(\xi)]}{p^2(p - \gamma) [p + Bi^* \bar{\mu}(p)]} + \frac{Bi^* \bar{\mu}(p)}{p[p + Bi^* \bar{\mu}(p)]} \right\}, \quad (61)$$

$$\bar{\Psi}_2(\xi, p) = \left\{ \frac{Bi^* \bar{\mu}(p)(p - \gamma) \bar{\chi}_m(\xi, p)}{p[p + Bi^* \bar{\mu}(p)]} + \frac{\gamma Bi^* \bar{\mu}^2(p) [\bar{\mu}(p) + A_m(\xi_0)] \bar{\chi}_m(\xi, p)}{p^2[p + Bi^* \bar{\mu}(p)]} \right\}. \quad (62)$$

При нахождении оригиналов в (56)–(62) следует обратить внимание на величину параметра $\beta = \nu_p / \nu_T$. Так для органического стекла $\beta = 0.4$, для кварца

и кремния $\beta = 0.7$, т.е. $\beta < 1$; для стали $\beta = 3.4$, для кристаллов и алюминия $\beta = 1.8$, т.е. $\beta > 1$. Величина параметра β играет определяющую роль в записи интервалов изменения напряжения $\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)$. Находим для напряжений:

- при $\beta < 1$:

$$\frac{\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)}{(\xi_0 / \xi)^{m+1/2}} = \begin{cases} 0, & \tau < (\xi - \xi_0)\beta, \\ -\sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau), & (\xi - \xi_0)\beta < \tau < (\xi - \xi_0), \\ -\sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) + \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau), & \tau > (\xi - \xi_0); \end{cases} \quad (63)$$

- при $\beta > 1$:

$$\frac{\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)}{(\xi_0 / \xi)^{m+1/2}} = \begin{cases} 0, & \tau < (\xi - \xi_0), \\ \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau), & (\xi - \xi_0) < \tau < (\xi - \xi_0)\beta, \\ -\sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) + \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau), & \tau > \beta(\xi - \xi_0). \end{cases} \quad (64)$$

Здесь $\sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau)$ – оригинал изображения $\bar{\Psi}_1(\xi, p) \exp \left[-(\xi - \xi_0)\beta \sqrt{p^2 + p / \beta^2} \right]$, $\sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) = \Psi_2[\xi, \tau - (\xi - \xi_0)]$.

Переходя к оригиналам, запишем аналитические соотношения для напряжений во всех трех случаях нагрева:

- температурный нагрев ($i = 1$)

$$\begin{aligned} \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) = & \gamma \left\langle \exp \{ \gamma [\tau - (\xi - \xi_0)\beta] - (\xi - \xi_0) / 2\beta \} + \right. \\ & + \frac{\xi - \xi_0}{2\beta} \int_{(\xi - \xi_0)\beta}^{\tau} \exp[\gamma(\tau - \tau') - (1/2\beta^2)\tau'] \frac{I_1 \left((1/2\beta^2) \sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2 \beta^2} \right)}{\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2 \beta^2}} d\tau' \times \eta[\tau - (\xi - \xi_0)\beta] + \\ & + \frac{\gamma A_m(\xi)}{\beta} \left\{ \int_{(\xi - \xi_0)\beta}^{\tau} \exp[\gamma(\tau - \tau') - (1/2\beta^2)\tau'] I_0 \left((1/2\beta^2) \sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2 \beta^2} \right) d\tau' \right\} \times \eta[\tau - (\xi - \xi_0)\beta] - \\ & - \frac{A_m(\xi)}{\beta} \left\{ \int_{(\xi - \xi_0)\beta}^{\tau} \exp[-(1/2\beta^2)\tau'] I_0 \left((1/2\beta^2) \sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2 \beta^2} \right) d\tau' \right\} \times \eta[\tau - (\xi - \xi_0)\beta]. \end{aligned} \quad (65)$$

$$\sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) = \Psi_2[\xi, \tau - (\xi - \xi_0)], \quad (66)$$

где

$$\Psi_2(\xi, \tau) = \gamma \chi_m(\xi, \tau) + A_m(\xi_0) \left[2\beta \int_0^{\tau} \chi_m(\xi, \tau') d\tau' \right] - \beta \int_0^{\tau} \exp[-(1/2\beta^2)(\tau - \tau')] \chi_m(\xi, \tau') d\tau'; \quad (67)$$

- тепловой нагрев ($i = 2$)

$$\begin{aligned} \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) = & \gamma\beta \exp[-(1/2\beta^2)\tau] I_0\left((1/2\beta^2)\sqrt{\tau^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}\right) \eta[\tau - (\xi - \xi_0)\beta] + \\ & + \frac{\gamma^2}{\beta} \left\{ \int_{(\xi - \xi_0)\beta}^{\tau} \exp[\gamma(\tau - \tau') - (1/2\beta^2)\tau'] I_0\left((1/2\beta^2)\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}\right) d\tau' \right\} \times \eta[\tau - (\xi - \xi_0)\beta] + \\ & + A_m(\xi) \left\{ \exp[\gamma(\tau - (\xi - \xi_0)\beta)] - 1 - [\tau - (\xi - \xi_0)\beta] \right\} \exp(-1/2\beta^2)\tau + \\ & + \frac{\xi - \xi_0}{2\beta} \int_{(\xi - \xi_0)\beta}^{\tau} [\exp \gamma(\tau - \tau') - 1 - (\tau - \tau')] \exp[-(1/2\beta^2)\tau'] \times \\ & \times \frac{I_1\left((1/2\beta^2)\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}\right)}{\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}} d\tau' \eta[\tau - (\xi - \xi_0)\beta]. \end{aligned} \quad (68)$$

$$\Psi_2(\xi, \tau) = \gamma\beta\chi_m(\xi, \tau) + \frac{\gamma[1 + 2\beta^3 A_m(\xi_0)]}{2\beta} \int_0^{\tau} \chi_m(\xi, \tau') d\tau' + \gamma A_m(\xi_0) \int_0^{\tau} (\tau - \tau') \chi_m(\xi, \tau') d\tau'; \quad (69)$$

- нагрев средой ($i = 3$). Для этого случая при нахождении оригинала используем разложение изображения $\bar{\mu}(p) = \beta p[1 + 1/(\beta^2 p)]^{1/2}$ в биномиальный ряд. Введем также ряд обозначений:

$$\begin{aligned} \gamma &= 1 + \gamma\beta^2; \gamma_1 = \frac{1}{1 + Bi^*\beta}; \gamma_2 = \frac{Bi^*}{2\beta(1 + Bi^*\beta)}; \\ A_1 &= \gamma - \frac{\gamma_1[\gamma^2 + (\gamma - 1)Bi^* A_m(\xi)]}{\gamma + \gamma_2}; \\ A_2 &= \frac{\gamma_1[\gamma^2 + (\gamma - 1)Bi^* A_m(\xi)]}{\gamma + \gamma_2} - \gamma\gamma_1 + 2\beta A_m(\xi); A_3 = -2\beta A_m(\xi); \\ A_4 &= [\gamma\gamma_1(1 + \gamma_2) - \gamma_1\gamma_2 - \gamma(1 + \gamma_1)\beta A_m(\xi_0)]. \end{aligned}$$

Находим искомые оригиналы:

$$\begin{aligned} \Psi_1(\xi, \tau) = & A_1 \left\{ \exp[\gamma(\tau - (\xi - \xi_0)\beta)] - (\xi - \xi_0) / 2\beta \right\} + \\ & + \frac{A_1(\xi - \xi_0)}{2\beta} \int_{(\xi - \xi_0)\beta}^{\tau} \exp[\gamma(\tau - \tau') - (1/2\beta^2)\tau'] \frac{I_1\left((1/2\beta^2)\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}\right)}{\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}} d\tau' \times \eta[\tau - (\xi - \xi_0)\beta] + \\ & + A_2 \left\{ \exp[-\gamma_2(\tau - (\xi - \xi_0)\beta)] - (\xi - \xi_0) / 2\beta \right\} + \frac{\xi - \xi_0}{2\beta} \int_{(\xi - \xi_0)\beta}^{\tau} \exp[-\gamma_2(\tau - \tau') - (1/2\beta^2)\tau'] \times \\ & \times \frac{I_1\left((1/2\beta^2)\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}\right)}{\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}} d\tau' \times \eta[\tau - (\xi - \xi_0)\beta] + \\ & + A_3 \times \left\{ \exp[-(1/2\beta)(\xi - \xi_0)] + \frac{\xi - \xi_0}{2\beta} \int_{(\xi - \xi_0)\beta}^{\tau} \exp[-(1/2\beta^2)\tau'] \frac{I_1\left((1/2\beta^2)\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}\right)}{\sqrt{(\tau')^2 - (\xi - \xi_0)^2\beta^2}} d\tau' \right\} \times \\ & \times \eta[\tau - (\xi - \xi_0)\beta]; \end{aligned} \quad (70)$$

$$\Psi_2(\xi, \tau) = \gamma(1 - \gamma_1)\chi_m(\xi, \tau) + 2\beta A_m(\xi_0) \int_0^{\tau} \chi_m(\xi, \tau') d\tau' + A_4 \int_0^{\tau} \exp[-\gamma_2(\tau - \tau')] \chi_m(\xi, \tau') d\tau'. \quad (71)$$

Таким образом, полученные соотношения (63)–(71) завершают решение практически важной задачи о термической реакции массивного тела с внутренними полостями. В дополнение к развитому подходу можно указать весьма эффективный способ оценки величины термических напряжений, практически не применявшийся ранее в теории теплового удара.

Как следует из операционного решения динамической задачи, наличие в (56) слагаемого $\bar{\Psi}_2(\xi, p) \exp[-(\xi - \xi_0)p]$ показывает, что можно предложить расчетную инженерную формулу для верхней оценки величины температурного напряжения через скачок напряжений в (70) на фронте термодинамической волны. Для этого используем теорему запаздывания [6] в виде:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}(\xi, p) \exp[-(\xi - \xi_0)p] \leftarrow 0, & \tau < \xi - \xi_0, \\ \Psi_2[\xi, \tau - (\xi - \xi_0)], & \tau > \xi - \xi_0, \end{cases}$$

откуда видно, что в точке $(\xi - \xi_0)$ происходит скачок функции $\Psi_2(\xi, \tau)$, величина которого рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} |\Delta| &= \lim_{\tau \rightarrow (\xi - \xi_0) + 0} \Psi_2[\xi, \tau - (\xi - \xi_0)] = \\ &= \lim_{\tau \rightarrow 0 +} \Psi_2(\xi, \tau) = \lim_{p \rightarrow \infty} \bar{\Psi}_2(\xi, p). \end{aligned}$$

Вначале находим величину скачка для напряжений $\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)$ в координатах (ξ, τ) , затем переходим к исходным напряжениям в исходных областях

(11)–(30), используя формулы перехода (31)–(33). В результате для режима температурного нагрева (58) находим:

$$\begin{aligned} |\Delta| &= |\sigma_{zz}; \sigma_{\rho\rho}; \sigma_{rr}|_{\max} = \\ &= \begin{cases} \frac{2G\gamma(1+\nu)\alpha_T|T_c - T_0|}{(1-2\nu)}, & m = -1/2; \\ \frac{(R/\rho)2G\gamma(1+\nu)\alpha_T|T_c - T_0|}{(1-2\nu)}, & m = 1/2; \\ \frac{\sqrt{R/r}2G\gamma(1+\nu)\alpha_T|T_c - T_0|}{(1-2\nu)}, & m = 0. \end{cases} \quad (72) \end{aligned}$$

Оценки (72) справедливы как при интенсивном нагреве ($T_c > T_0$), когда в фиксированном сечении $\xi = \text{const} > \xi_0$ возникают напряжения сжатия, так и при охлаждении ($T_c < T_0$) когда возникают более опасные напряжения растяжения.

ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ

На рис. 1 представлены кривые зависимости напряжения (63), (65)–(67) (температурный нагрев) от времени в фиксированном сечении $\xi = 1$ при $\xi_0 = 0.1$, $\nu = 0.3$, $\beta = 0.4$ для $m = -0.5$; 0; 0.5. На рис. 2 представлены кривые для напряжений (температурный нагрев) при тех же данных, но для $\beta = 0$, т.е. для случая классической феноменологии Фурье на основе уравнений параболического типа.

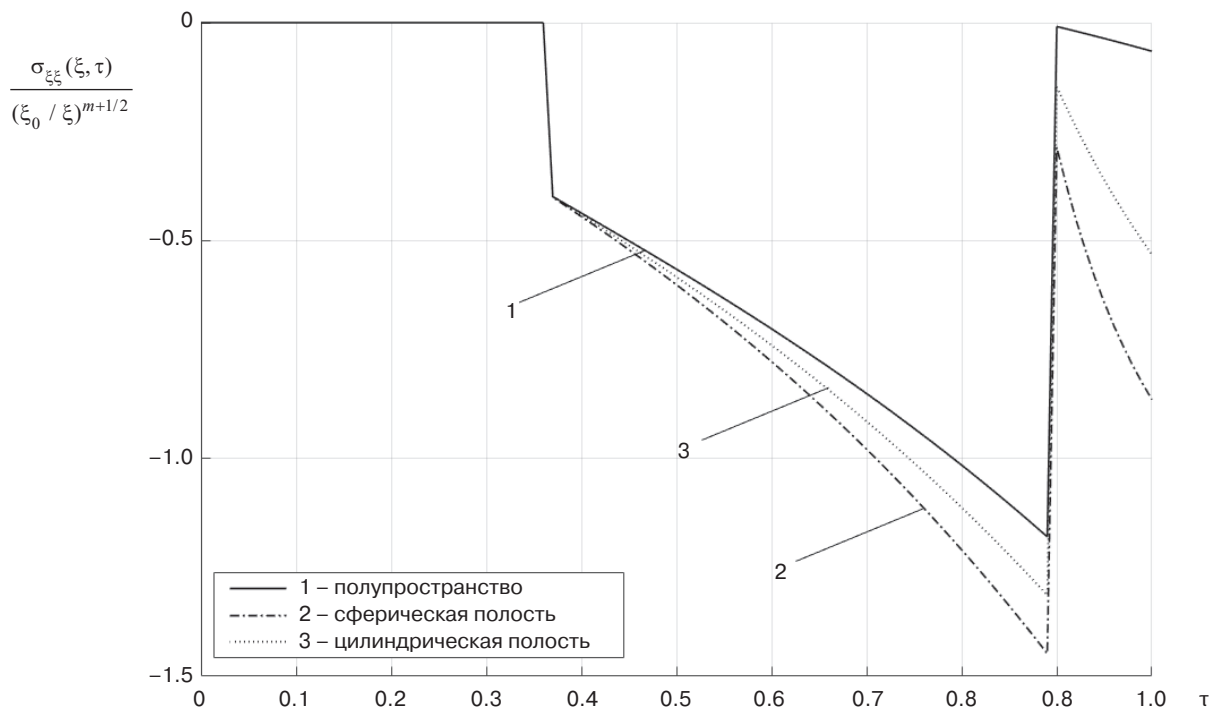


Рис. 1. Зависимость напряжения от времени в сечении $\xi = 1$ при $\xi_0 = 0.1$, $\nu = 0.3$, $\beta = 0.4$.
Рассчитано по формулам (63), (65)–(67) для $m = -0.5$ (кривая 1), $m = 0.5$ (кривая 2), $m = 0$ (кривая 3)

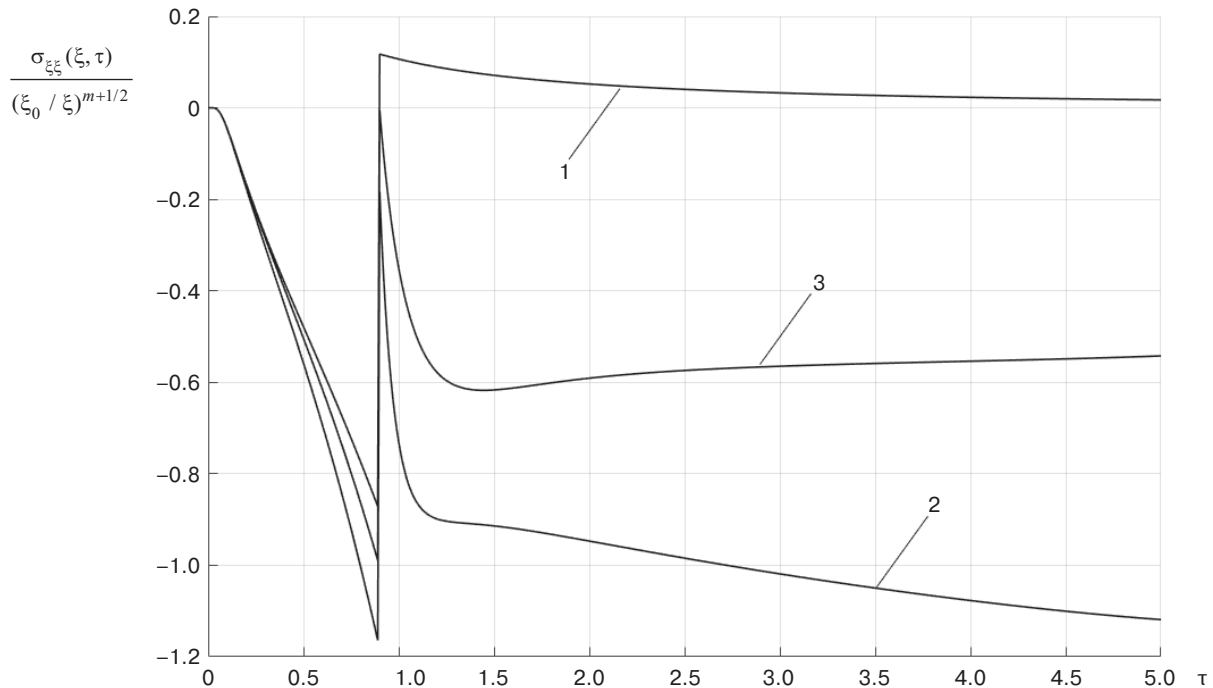


Рис. 2. Зависимость напряжения от времени в сечении $\xi = 1$ при $\xi_0 = 0.1$, $\nu = 0.3$ ($\beta = 0$).
Рассчитано по формулам (73)–(75) для $m = -0.5$ (кривая 1), $m = 0.5$ (кривая 2), $m = 0$ (кривая 3)

Представляет интерес сравнение двух указанных подходов, а именно, описание влияния гиперболическости динамической задачи (т.е. влияния локальной неравновесности в системе) на величину температурных напряжений. Выпишем решение «параболической» задачи теплового удара при температурном нагреве для всех трех описанных выше областей, учитывая, что эта часть исследований также представляет большой практический интерес и до настоящего времени также является открытой проблемой.

$$\frac{\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)}{(\xi_0 / \xi)^{m+1/2}} = \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) + \begin{cases} 0, & \tau < \xi - \xi_0, \\ \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau), & \tau > \xi - \xi_0, \end{cases} \quad (73)$$

где

$$\sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) = -\Psi_1^*(\xi, \tau); \quad \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) = \Psi_2^*[\xi, \tau - (\xi - \xi_0)];$$

$$\begin{aligned} \Psi_1^*(\xi, \tau) = & \frac{1}{2} \left\{ \exp\left[\tau - (\xi - \xi_0)\right] \Phi^*\left(\frac{\xi - \xi_0}{2\sqrt{\tau}} - \sqrt{\tau}\right) + \right. \\ & \left. + \exp\left[\tau + (\xi - \xi_0)\right] \Phi^*\left(\frac{\xi - \xi_0}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau}\right) \right\} + \\ & + A_m(\xi) \left\{ \frac{1}{2} \left[\exp(\tau - (\xi - \xi_0)) \Phi^*\left(\frac{\xi - \xi_0}{2\sqrt{\tau}} - \sqrt{\tau}\right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \exp(\tau + (\xi - \xi_0)) \Phi^*\left(\frac{\xi - \xi_0}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau}\right) \right] + \right. \\ & \left. - \frac{2\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi - \xi_0)^2}{4\tau}\right] + (\xi - \xi_0) \Phi^*\left(\frac{\xi - \xi_0}{2\sqrt{\tau}}\right) \right\}; \end{aligned} \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \Psi_2^*(\xi, \tau) = & \chi_m(\xi, \tau) + \\ & + \frac{2A_m(\xi_0)}{\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \sqrt{\tau - \tau'} \cdot \chi_m(\xi, \tau') d\tau'. \end{aligned} \quad (75)$$

Здесь

$$\Phi^*(z) = 1 - \Phi(z),$$

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-y^2) dy$$

– функция Лапласа.

Как следует из графиков, учет конечной скорости распространения теплоты приводит к существенному изменению картины динамических температурных напряжений по сравнению с данными на рис. 2. Соотношение (63) в отличие от (73) показывает наличие двух скачков напряжений: один – на фронте тепловой волны, другой – на фронте упругой волны, идущих, соответственно, со скоростями v_T и v_p .

Рассмотрим фиксированное сечение внутри области $\xi > \xi_0$. При $\beta < 1$ напряжения в сечении в начале равны нулю. В момент времени $\tau = \beta(\xi - \xi_0)$ к этому сечению приходит тепловая волна напряжений, фронт которой движется со скоростью v_T ; возникает скачком сжимающее напряжение, которое дальше возрастает. В момент времени $\tau = \xi - \xi_0$ к сечению подходит продольная упругая волна, что вызывает скачкообразное изменение напряжения и его дальнейшее уменьшение.

Кривые на рис. 1 показывают и другой интересный результат: наиболее «уязвимой» (в смысле термической реакции) является область с внутренней сферической полостью. Во всех трех случаях ($m = -0.5; 0; 0.5$) возникающие напряжения являются сжимающими. Оценки (72) отчетливо показывают, что приповерхностные слои (вблизи границы тела (области)) в наибольшей степени подвержены термическому удару. Что касается теплового удара в классическом случае (рис. 2), то здесь наибольшие напряжения сжатия характерны для массивного тела, ограниченного плоской поверхностью ($m = -0.5$). При этом после прохождения волны расширения (за счет функции $\sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau)$ в (72)) напряжение переходит в область положительных (растягивающих) значений и затем быстро убывает, достигая квазистатических значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе развиты обобщенные модельные представления теплового удара в терминах динамической термоупругости для локально-неравновесных процессов переноса теплоты. Получено аналитическое решение (открытой) обобщенной задачи термической реакции массивных тел с внутренними полостями одновременно в декартовой, цилиндрической и сферической системах координат при температурном нагреве, тепловом нагреве, нагреве средней границы твердого тела. Проведены численные эксперименты, показывающие влияние локальной неравновесности на кинетику температурных напряжений (по сравнению с классической феноменологией Фурье). Предложены важные в практическом отношении расчетные инженерные соотношения для верхней границы температурных напряжений при интенсивном температурном нагреве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карташов Э.М. Модельные представления теплового удара в динамической термоупругости. *Russ. Technol. J.* 2020;8(2):85–108. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-85-108>
2. Карташов Э.М. Новые операционные соотношения для математических моделей локально-неравновесного теплообмена. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):68–79. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-68-79>
3. Кудинов И.В., Кудинов В.А. Математическая модель локально-неравновесного теплопереноса с учетом пространственно-временной нелокальности. *Инженерно-физический журнал.* 2015;88(2):393–408.
4. Кудинов В.А., Еремин А.В., Кудинов И.В. Разработка и исследование сильно неравновесной модели теплообмена в жидкости с учетом пространственно-временной нелокальности и диссипации энергии. *Теплофизика и аэромеханика.* 2017;24(6):929–935.
5. Кирсанов Ю.А., Кирсанов А.Ю. Об измерении времени тепловой релаксации твердых тел. *Изв. РАН. Энергетика.* 2015;1:113–122.
6. Карташов Э.М., Кудинов В.А. *Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений.* М.: URSS; 2012. 1080 с. ISBN 978-5-9710-4994-4
7. Соболев С.Л. Процессы переноса и бегущие волны в локально-неравновесных системах. *Успехи физ. наук.* 1991;161(3):5–29. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0161.199103b.0005>
8. Соболев С.Л. Локально-неравновесные модели процессов переноса. *Успехи физ. наук.* 1997;167(10):1095–1106. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199710f.1095>

REFERENCES

1. Kartashov E.M. Model representations of heat shock in terms of dynamic thermal elasticity. *Russ. Technol. J.* 2020;8(2):85–108 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-85-108>
2. Kartashov E.M. New operational relations for mathematical models of local nonequilibrium heat transfer. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):68–79 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-68-79>
3. Kudinov I.V., Kudinov V.A. Mathematical simulation of the locally nonequilibrium heat transfer in a body with account for its nonlocality in space and time. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2015;88(2):406–422. <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1206-6> [Original Russian Text: Kudinov I.V., Kudinov V.A. Mathematical simulation of the locally nonequilibrium heat transfer in a body with account for its nonlocality in space and time. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal.* 2015;88(2):393–408 (in Russ.).]
4. Kudinov V.A., Eremin A.V., Kudinov I.V. The development and investigation of a strongly non-equilibrium model of heat transfer in fluid with allowance for the spatial and temporal non-locality and energy dissipation. *Thermophys. Aeromech.* 2017;24(6):901–907. <https://doi.org/10.1134/S0869864317060087> [Original Russian Text: Kudinov V.A., Eremin A.V., Kudinov I.V. The development and investigation of a strongly non-equilibrium model of heat transfer in fluid with allowance for the spatial and temporal non-locality and energy dissipation. *Teplofizika i Aeromekhanika.* 2017;24(6):929–935 (in Russ.).]

9. Кудинов И.В., Котова Е.В., Кудинов В.А. Метод получения аналитических решений краевых задач на основе определения дополнительных граничных условий и дополнительных искоемых функций. *Сиб. журн. вычисл. математ.* 2019;22(2):153–165. <https://doi.org/10.15372/SJNM20190203>
10. Кудинов В.А., Еремин А.В., Кудинов И.В., Жуков В.В. Исследование сильнонеравновесной модели теплового воспламенения с учетом пространственно-временной нелокальности. *Физика горения и взрыва.* 2018;54(6):25–29. <https://doi.org/10.15372/FGV20180603>
11. Формалев В.Ф. *Уравнения математической физики.* М.: URSS; 2021. 648 с. ISBN 978-5-9710-8380-1
12. Kudinov I.V., Eremin A.V., Kudinov V.A., Dovgalo A.I., Zhukov V.V. Mathematical model of damped elastic rod oscillations with dual-phase-lag. *Int. J. Solids Struct.* 2020; 200–201:231–241. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.018>
13. Zhukov V.V. Study of analytical solution of the thermal conductivity equation considering relaxation phenomena under the third class boundary conditions. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1889:022027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022027>
14. Zhukov V.V., Kudinov I.V., Kutsev N.M., Mikheeva G.V., Klebleev R.M. Determination of quasi-static and residual stresses in the course of the thermoplastic hardening in a boundary layer of the material. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;709(3):033078. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033078>
15. Eremin A.V., Kudinov V.A., Kudinov I.V., Zhukov V.V., Trubitsyn K.V. Mathematical model of fuel heat ignition considering space-time nonlocality. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;552(1):012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/552/1/012003>
16. Карташов Э.М. Аналитические решения гиперболических моделей теплопроводности. *Инженерно-физ. журн.* 2014;87(5):1072–1081.
17. Карташов Э.М., Кудинов В.А. *Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости.* М.: URSS; 2012. 670 с. ISBN 978-5-397-02750-2
5. Kirsanov Yu.A., Kirsanov A.Yu. About measuring the thermal relaxation time of solid body. *Izvestiya RAN. Energetika.* 2015;1:113–122 (in Russ.).
6. Kartashov E.M., Kudinov V.A. *Analyticheskie metody teorii teploprovodnosti i ee prilozhenii (Analytical Methods of the Theory of Heat Conduction and its Applications).* Moscow: URSS; 2012. 1080 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9710-4994-4
7. Sobolev S.L. Transport processes and traveling waves in systems with local nonequilibrium. *Sov. Phys. Usp.* 1991;34: 217. <https://doi.org/10.1070/PU1991v034n03ABEH002348> [Original Russian Text: Sobolev S.L. Transport processes and traveling waves in systems with local nonequilibrium. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* 1991;161(3):5–29 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0161.199103b.0005>]
8. Sobolev S.L. Local non-equilibrium transport models. *Phys. Usp.* 1997;40(10):1043. <https://doi.org/10.1070/PU1997v040n10ABEH000292> [Original Russian Text: Sobolev S.L. Local non-equilibrium transport models. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* 1997;167(10):1095–1106 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199710f.1095>]
9. Kudinov I.V., Kotova E.V., Kudinov V.A. A method for obtaining analytical solutions to boundary value problems by defining additional boundary conditions and additional sought-for functions. *Numer. Analys. Appl.* 2019;12(2):126–136. <https://doi.org/10.1134/S1995423919020034> [Original Russian Text: Kudinov I.V., Kotova E.V., Kudinov V.A. A method for obtaining analytical solutions to boundary value problems by defining additional boundary conditions and additional sought-for functions. *Sibirskii Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki.* 2019;22(2):153–165. <https://doi.org/10.15372/SJNM20190203>]
10. Kudinov V.A., Eremin A.V., Kudinov I.V., Zhukov V.V. Strongly nonequilibrium model of thermal ignition with account for space–time nonlocality. *Combust. Explos. Shock Waves.* 2018;54(6):649–653. <https://doi.org/10.1134/S0010508218060035> [Original Russian Text: Kudinov V.A., Eremin A.V., Kudinov I.V., Zhukov V.V. Strongly nonequilibrium model of thermal ignition with account for space–time nonlocality. *Fizika Goreniya i Vzryva.* 2018;54(6):25–29 (in Russ.). <https://doi.org/10.15372/FGV20180603>]
11. Formalev V.F. *Uravneniya matematicheskoi fiziki (Equations of mathematical physics).* Moscow: URSS; 2021. 648 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9710-8380-1
12. Kudinov I.V., Eremin A.V., Kudinov V.A., Dovgalo A.I., Zhukov V.V. Mathematical model of damped elastic rod oscillations with dual-phase-lag. *Int. J. Solids Struct.* 2020; 200–201:231–241. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.018>
13. Zhukov V.V. Study of analytical solution of the thermal conductivity equation considering relaxation phenomena under the third class boundary conditions. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1889:022027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022027>
14. Zhukov V.V., Kudinov I.V., Kutsev N.M., Mikheeva G.V., Klebleev R.M. Determination of quasi-static and residual stresses in the course of the thermoplastic hardening in a boundary layer of the material. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;709(3):033078. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033078>

15. Eremin A.V., Kudinov V.A., Kudinov I.V., Zhukov V.V., Trubitsyn K.V. Mathematical model of fuel heat ignition considering space-time nonlocality. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;552(1):012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/552/1/012003>
16. Kartashov É.M. Analytical solutions of hyperbolic heat-conduction models. *J. Eng. Phys. Thermophy.* 2014;87(5):1116–1125. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1113-2>
[Original Russian Text: Kartashov E.M. Analytical solutions of hyperbolic heat-conduction models. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*. 2014;87(5):1072–1081 (in Russ.).]
17. Kartashov E.M., Kudinov V.A. *Analiticheskaya teoriya teploprovodnosti i prikladnoi termouprugosti (Analytical theory of thermal conductivity and applied thermoelasticity)*. Moscow: URSS; 2012. 670 p. (in Russ.). ISBN 978-5-397-02750-2

Об авторе

Карташов Эдуард Михайлович, д.ф.-м.н., Заслуженный деятель науки РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Почетный работник науки и техники РФ, Почетный профессор МИТХТ им. М.В. Ломоносова, Лауреат Золотой медали АН Беларуси по теплофизике, профессор, кафедра высшей и прикладной математики Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: professor.kartashov@gmail.com. Scopus Author ID 7004134344, ResearcherID Q-9572-2016, <https://orcid.org/0000-0002-7808-4246>

About the author

Eduard M. Kartashov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Honored Scientist of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Honorary Professor of the Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technology, Laureate of the Golden Medal of the Academy of Sciences of Belarus in Thermophysics, Professor, Department of Higher and Applied Mathematics, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia). E-mail: professor.kartashov@gmail.com. Scopus Author ID 7004134344, ResearcherID Q-9572-2016, <https://orcid.org/0000-0002-7808-4246>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 539.3
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-86-103>



ОБЗОР

Численное моделирование экспериментов по взаимодействию мощных ультрафиолетовых лазерных импульсов с конденсированными мишенями

И.Г. Лебо[®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: lebo@mirea.ru

Резюме

Цели. Цель исследования – обзор и анализ результатов работ, посвященных численному моделированию экспериментов по взаимодействию мощных ультрафиолетовых (УФ) лазерных импульсов с конденсированными мишенями. Натурные эксперименты были выполнены в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН на мощном криптон-фтор (KrF) лазере «ГАРПУН». Актуальность исследований связана с тем, что эксимерные УФ-лазеры являются одним из основных претендентов на драйвер в термоядерном реакторе. Физика взаимодействия такого излучения с плазмой имеет свою специфику. Обсуждается возможность использования мишеней в виде встречных конусов в таком ядерно-термоядерном реакторе.

Методы. Для моделирования лазер-плазменных процессов используются физико-математические модели, лагранжевы и эйлеровы методики, двумерные программы в цилиндрических и сферических координатах.

Результаты. Представлены результаты численного моделирования трех типов экспериментов: а) прожигание УФ-лазером алюминиевых фольг различной толщины; б) изучение развития гидродинамической неустойчивости при ускорении тонких полимерных пленок мощным УФ-импульсом и особенностей формирования турбулентного слоя; в) взаимодействие мощных УФ-импульсов с двухслойными мишенями (алюминий + оргстекло) и исследование «тонких» структур, формирующихся в веществе. На основании численных расчетов показано, что в гибридном реакторе с УФ-лазерным драйвером могут применяться мишени в виде двухсторонних встречных конусов.

Выводы. Разработаны физико-математические модели и апробированы двумерные программы в эйлеровых и лагранжевых координатах на натурных экспериментах, позволяющие описывать физику взаимодействия мощных УФ-лазерных импульсов с мишенями различной конструкции. Это дает возможность прогнозировать эксперименты реакторного масштаба.

Ключевые слова: численное моделирование, взаимодействие мощных УФ-лазеров с плазмой, гибридные реакторы с лазерным инициированием

• Поступила: 22.06.2022 • Доработана: 07.12.2022 • Принята к опубликованию: 12.03.2023

Для цитирования: Лебо И.Г. Численное моделирование экспериментов по взаимодействию мощных ультрафиолетовых лазерных импульсов с конденсированными мишенями. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):86–103. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-86-103>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Mathematical modeling of experiments on the interaction of a high-power ultraviolet laser pulse with condensed targets

Ivan G. Lebo [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: lebo@mirea.ru

Abstract

Objectives. The paper aimed to review and analyze the results of works devoted to numerical modeling of experiments on the interaction of high-power ultraviolet (UV) laser pulses with condensed targets. The experiments were carried out at GARPUN, the powerful KrF-laser facility at the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow). The relevance of the research is related to the use of excimer UV lasers as a driver for a thermonuclear reactor. Physical aspects of laser–plasma interaction, including those related to the possibility of using two-sided cone target in a fission–fusion reactor, are discussed.

Methods. The research is based on physico-mathematical models, including Euler and Lagrange.

Results. The mathematical modeling of three types of natural experiments is presented: (1) burning through different thicknesses of Al foils by high-power UV laser; (2) studying hydrodynamic instability development at the UV laser acceleration of thin polymer films and features of turbulent zone formation; (3) interaction of high-power UV laser pulses with two-layer targets (Al + Plexiglas) and study of fine structures. Numerical modeling showed that a hybrid reactor with UV laser driver can use targets in the form of two-sided counter cones.

Conclusions. Physico-mathematical models are developed along with 2D codes in Lagrangian and Eulerian coordinates as confirmed in the results of natural experiments. The models can be used to describe the physics of high-power UV laser pulses interacting with various targets and forecast the results of reactor-scale experiments.

Keywords: numerical modeling, high-power UV laser pulse interaction with plasma, hybrid reactor with laser initiation

• Submitted: 22.06.2022 • Revised: 07.12.2022 • Accepted: 12.03.2023

For citation: Lebo I.G. Mathematical modeling of experiments on the interaction of a high-power ultraviolet laser pulse with condensed targets. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):86–103. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-86-103>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) ведутся в нашей стране и за рубежом с 60-х годов прошлого века [1]. С помощью мощных лазерных импульсов нагреваются и сжимаются мишени, содержащие дейтерий-тритиевую (ДТ) смесь. В результате в сжатом горючем происходят термоядерные реакции (подробнее о физике лазерного термоядерного синтеза можно прочитать в [2, 3]). На лазер («драйвер») накладывается ряд важных требований: энергия в импульсе должна равняться нескольким мегаджоулям, интенсивность излучения на поверхности мишени – 10^{15} – 10^{16} Вт/см²

в видимом или ультрафиолетовом диапазоне длин волн, длительность лазерного импульса 10–100 нс, причем с заданным временным «профилированием» интенсивности, хорошая однородность облучения мишени, чтобы уменьшить влияние развития неустойчивости в процессе сжатия горючего. Для создания термоядерного реактора, наряду с высокой эффективностью термоядерной вспышки (коэффициент усиления $G = E_f/E_{\text{las}} \gg 1$, где E_f – выделившаяся термоядерная энергия, E_{las} – поглощенная плазмой энергия лазерного импульса), требуется, чтобы драйвер мог работать в частотном режиме (1–10 Гц) с большим ресурсом и высоким КПД ($\eta \approx 1$ –10%).

В нашей стране [4] и за рубежом¹ [5–11] строятся мощные лазерные установки для инициирования термоядерных микровзрывов и проведения исследований в этой области знаний. С 2012 г. функционирует лазерная установка NIF (National Ignition Facility, Ливерморская национальная лаборатория им. Э. Лоуренса, США), построенная в целях ЛТС. На этой установке в августе 2021 г. достигнут рекордный выход термоядерных нейтронов $Y_n = (4-5) \cdot 10^{17}$, что соответствует $\approx 0.7G$ [6]². Указанные выше строящиеся установки (УФЛ-2М – Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Россия; Laser Mégajoule³ – Франция; ShenGuang-II⁴ – КНР) и NIF являются твердотельными Nd-лазерами⁵. Они на сегодняшний день представляются наиболее перспективными устройствами с точки зрения демонстрации единичных термоядерных микровзрывов. Однако применительно к созданию драйвера для ядерно-термоядерного реактора у этого типа лазеров имеются серьезные недостатки. Газовый эксимерный лазер имеет ряд преимуществ – функционирование непосредственно в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, возможность работы с частотой повторения импульсов более 1 Гц, широкая полоса частоты генерации и, возможно, ряд других достоинств. Естественно, у таких типов лазеров также есть и недостатки.

Для того чтобы сделать правильный выбор при принятии решения о строительстве драйвера для реактора, требуются систематические исследования, поскольку стоимость драйвера будет составлять порядка 10 млрд долл. США. В Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) функционирует установка «ГАРПУН» для получения горячей плотной плазмы. Это эксимерный KrF-лазер с энергией

в импульсе $E_L \approx 100$ Дж, длительностью импульса $\tau = 100$ нс, длиной волны $\lambda = 0.248$ мкм. Для интерпретации данных экспериментов были развиты физико-математические модели и программы, позволяющие решить задачи взаимодействия мощных лазерных импульсов с конденсированными и газовыми мишенями и прогнозировать новые конструкции мишеней для ЛТС.

Ниже приведен обзор работ по математическому моделированию трех серий экспериментов, выполненных на установке «ГАРПУН», и исследованию перспективных для целей ЛТС мишеней в виде встречных конусов.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ДВУМЕРНЫХ ПРОГРАММ ATLANT И NUTSU

Программный комплекс *Atlant* [12] состоит из программ, моделирующих динамику и перенос энергии в лазерной плазме в сферической (версия *Atlant_Sp*: координаты $\tilde{r}$ – модуль радиус-вектора; θ , t – время) и цилиндрической (версия *Atlant_C*: координаты r , z , t – время) геометриях.

Уравнения, описывающие эволюцию лазерной мишени в двухтемпературном приближении, имеют вид:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \operatorname{div} \bar{\mathbf{u}}, \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\bar{\mathbf{u}}}{dt} = -\rho \operatorname{grad} P, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\bar{\mathbf{g}}}{|\bar{\mathbf{g}}|}, \nabla \right) \bar{\mathbf{g}} = K \bar{\mathbf{g}}, \quad (3)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon_e}{dt} = -P_e \operatorname{div} \bar{\mathbf{u}} + \operatorname{div} W_e - Q - R_{\text{изл}} + \operatorname{div} \bar{\mathbf{g}}, \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon_i}{dt} = -P_i \operatorname{div} \bar{\mathbf{u}} + \operatorname{div} W_i + Q, \quad (5)$$

$$W_e = \alpha_e \operatorname{grad} T_e, \quad (6)$$

$$W_i = \alpha_i \operatorname{grad} T_i, \quad (7)$$

$$Q = Q_0 \frac{T_e - T_i}{T^{3/2}} \rho^2, \quad (8)$$

$$P_e = P_e(\rho, T_e), P_i = P_i(\rho, T_i), \quad (9)$$

$$\frac{dZ_i}{dt} = Z_i \cdot (\varphi_i - \varphi_r - \varphi_{\text{fr}}), \quad (10)$$

$$\varepsilon_e = \varepsilon_e(\rho, T_e), \varepsilon_i = \varepsilon_i(\rho, T_i), \\ R_{\text{изл}} = R_{\text{изл}}(\rho, T_e), P = P_i + P_e, \quad (11)$$

¹ Kritcher A. and HIBRYD-E ICF team. Initial results from HYBRID-E DT experiment N210808 with >1.3 MJ yield. *IFSA Virtual Meeting*. September 2021. LLNL-PRES-826367. P. 16. <https://www.aps.org/units/maspg/meetings/upload/obenschain-11172021.pdf>. Дата обращения 07.02.2023. / Accessed February 07, 2023.

² В декабре 2022 г. в Интернете появились сообщения, что на установке NIF в США получен $G \approx 1.5$! [In December 2022, reports appeared on the Internet that $G \approx 1.5$ was obtained at the NIF facility in the United States!]

³ <https://www-lmj.cea.fr/>. Дата обращения 07.02.2023. / Accessed February 07, 2023.

⁴ <https://lssf.cas.cn/en/facilities-view.jsp?id=ff8080814ff56599014ff5a31abb004a>. Дата обращения 07.02.2023. / Accessed February 07, 2023.

⁵ Nd-лазер генерирует излучение в инфракрасном диапазоне $\lambda = 1.06$ мкм, и требуются сложные дорогостоящие устройства для преобразования во 2-ю и 3-ю гармоники. [The Nd-laser generates radiation in the infrared range $\lambda = 1.06$ μm , and expensive complex devices are required to convert to 2nd and 3rd harmonics.]

$$\alpha_e = \alpha_e(\rho, T_e), \alpha_i = \alpha_i(\rho, T_i), K = K(\rho, T_e),$$

$$Q_0 = Q_0(\rho, T_e),$$

где P_e, P_i, T_e, T_i – электронное и ионное давления и температуры; ρ – плотность вещества; $\vec{u}$ – вектор гидродинамической скорости; P – полное давление; P_e, P_i – электронное и ионное давления; $\varepsilon_e, \varepsilon_i$ – электронная и ионная удельные внутренние энергии; α_e, α_i – коэффициенты электронной и ионной теплопроводности; $\vec{Q}$ – поток лазерного излучения; K – коэффициент поглощения; Q – обменный член; $R_{изл}$ – поток энергии за счет собственного излучения плазмы; Z_i – среднее значение заряда ионов в лагранжевой ячейке; $\phi_i, \phi_r, \phi_{fr}$ – скорости тройной ионизации, тройной и фоторекомбинаций.

На внешней границе задается давление и нулевой поток тепла. На оси вращения ($\theta = 0$ в сферической системе координат, $r = 0$ – в цилиндрической) и плоскостях симметрии задаются нулевые потоки тепла и нулевые составляющие скорости в направлении, нормальном к границе. Начальные условия могут быть произвольными.

Решение уравнений (1)–(11) производится численно с помощью схем аддитивного учета физических процессов.

Комплекс программ *Atlant* разрабатывался в течение последних четырех десятилетий и состоит из нескольких программ, имеющих следующие особенности: 1) в основе физической модели лежит плотная высокотемпературная лазерная плазма, 2) используется двумерная лагранжева система координат, 3) модульный принцип написания программы, 4) все программы написаны на языке ФОРТРАН. Более подробную информацию о комплексе программ *Atlant* можно найти в [12, 13].

Программа *NUTCY* [12] позволяет численно решать уравнения газовой динамики в двумерной цилиндрической (r, z, t – время) геометрии в эйлеровых координатах [12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r \rho u}{\partial r} + \frac{\partial r \rho \omega}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial r \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r \rho u^2}{\partial r} + \frac{\partial r \rho u \omega}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial r \rho \omega}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r \rho u \omega}{\partial r} + \frac{\partial r \rho \omega^2}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r u (e + p)}{\partial r} + \frac{\partial (e + p) \omega}{\partial z} = -\text{div } q_T - \text{div } q_L.$$

Здесь ρ – плотность; p – давление; $V_r = u, V_z = \omega$ – компоненты вектора скорости $\mathbf{V}$; $e = \rho \left(\varepsilon + \frac{\mathbf{V}^2}{2} \right) -$

полная энергия; $q_T = -\alpha_e \text{ grad } T$ – поток электронной теплопроводности; q_L – поток лазерного излучения.

Используется однотемпературное приближение, т.е. полагается, что время релаксации между электронной и ионной компонентами мало по сравнению с типичным временем изменения основных термодинамических величин. Система уравнений (12) дополнена уравнением состояния $p = (\gamma - 1) \rho \varepsilon$, где ε – удельная внутренняя энергия, γ – показатель адиабаты, и уравнением непрерывности для каждой компоненты газа (всего n компонент):

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \text{div } \rho_i \mathbf{V} = 0, \text{ где } i = \overline{1, n-1}. \quad (13)$$

Если газ содержит две компоненты, то удобно решать уравнение непрерывности для смеси (верхнее уравнение системы (12)) и уравнение для одной из компонент (13). Далее определяется концентрация первого компонента C , а концентрация второго компонента равняется $(1 - C)$.

В этой программе также используются модульный (блоковый) принцип написания программы и язык программирования ФОРТРАН.

Для решения уравнений (12), (13) применяются TVD-разностные⁶ схемы повышеного порядка аппроксимации (блок газовой динамики) и неявные схемы для учета электронной теплопроводности [13]. Методы решения таких задач развивались в Институте математического моделирования и Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН [12, 14, 15] при непосредственном участии автора.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПРОЖИГАНИЮ ФОЛЬГ

На установке «ГАРПУН» были выполнены эксперименты по прожиганию алюминиевых фольг [16]. Интенсивность излучения, падающего на мишень, равнялась $I \approx 6 \cdot 10^{12}$ Вт/см², а параметр эффективности взаимодействия с плазмой $(I \cdot \lambda^2) \approx 3.4 \cdot 10^{13}$ (Вт/см²)·мкм².

При фиксированных параметрах падающего на алюминиевую фольгу (мишень) лазерного потока варьировались толщины этой фольги. За фольгой помещался экран. Измерялось время задержки между появлением свечения на экране и временем появления свечения плазмы на передней поверхности мишени (рис. 1).

В экспериментах наблюдалось прогорание алюминиевых фольг вплоть до 300 мкм за время действия лазерного импульса.

⁶ TVD – total variation diminishing (уменьшение общей вариации).

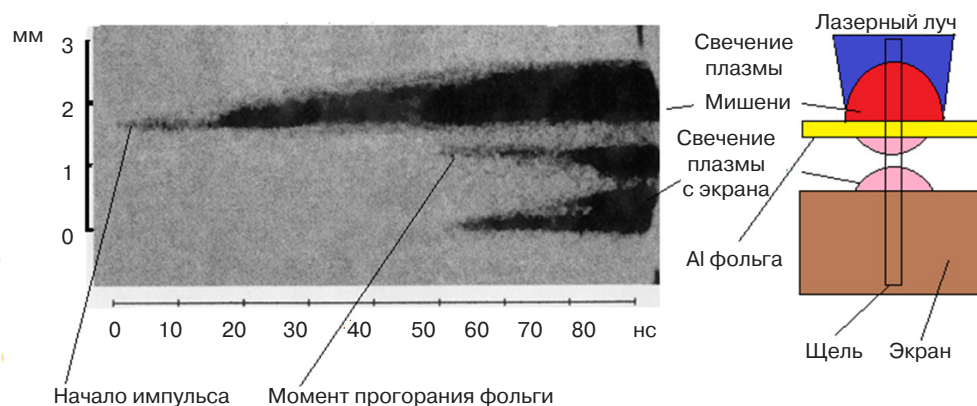


Рис. 1. Свечение плазмы, полученное через щель с помощью фотоэлектронного регистратора в зависимости от времени (слева); схема эксперимента (справа) [12]

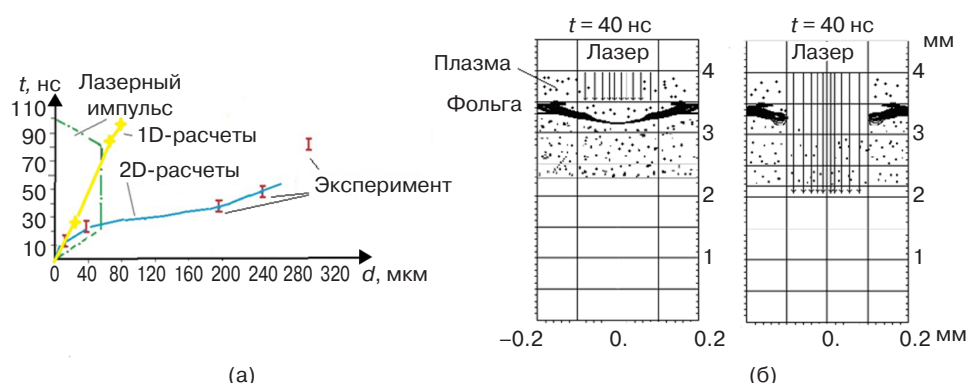


Рис. 2. Временная форма лазерного импульса и результаты одномерных (1D) и двумерных (2D) расчетов и данных экспериментов (а); изолинии плотности на моменты времени $t = 40$ нс (до момента прогорания фольги) и $t = 45$ нс (момент прогорания) (б) [12]

На рис. 2а показана временная форма лазерного импульса и сравнение результатов численных расчетов, выполненных с помощью программы *NUTCY* (сплошные кривые) с данными экспериментов (вертикальные красные засечки). Желтая кривая – квазиодномерные расчеты (когда распределение интенсивности излучения в поперечном направлении задавалось в виде постоянной величины). Синяя линия – результаты полностью двумерных расчетов, где интенсивность задавалась следующим образом: $I(r, t) = I_1(t) \cdot I_r(r)$, причем поперечное распределение интенсивности имело вид $I_r = C_0 / \exp(r/R_f)^2$. Здесь C_0 – нормировочная константа, такая, чтобы $2\pi \int_0^{R_0} I_r r dr = 1$, R_0 – поперечный радиус расчетной области, $R_f = 49$ мкм. В обоих вариантах усредненная по пятну фокусировки интенсивность лазерного излучения была одинаковой. I_1 – временная зависимость лазерного импульса. Она имела форму трапеции с моментами времени у вершин $t_1 = 0$ нс, $t_2 = 20$ нс, $t_3 = 80$ нс, $t_4 = 100$ нс. $\int_0^\infty I_1(t) dt = E_{\text{las}}$ – поглощенная лазерная энергия.

На рис. 2б показаны изолинии плотности фольги. Начальная толщина алюминиевой фольги в этом расчете равнялась 200 мкм (начальная плотность $\rho = 2.7$ г/см³).

Видно хорошее согласие двумерных расчетов с экспериментальными данными по времени «проникновения» и значительное расхождение с результатами одномерных расчетов (рис. 2а). Причина в том, что наряду с испарением внешних слоев навстречу падающему излучению (непосредственно, процесс прожигания) важную роль в таком «сверлении» фольги играет эффект расходящихся конусообразных ударных волн (УВ), которые формируются вблизи вершины кратера. Они «раздвигают» холодные плотные слои и увеличивают глубину проникновения лазерного излучения [16].

В рассматриваемом случае расстояние L_{SW} , которое проходит ударная волна (shock wave, SW) за время действия лазерного импульса (скорость УВ $V_{\text{SW}} \sim 5$ км/с, $t \sim 100$ нс, тогда $L_{\text{SW}} \sim 500$ мкм), значительно больше, чем размер пятна фокусировки ($2R_f \approx 100$ мкм).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗВИТИЮ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛОЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ УСКОРЕНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

При прохождении ударных волн через контактные поверхности двух газов или плазмы развивается неустойчивость типа Рихтмайера – Мешкова [17, 18]. Такая неустойчивость приводит к быстрой эволюции

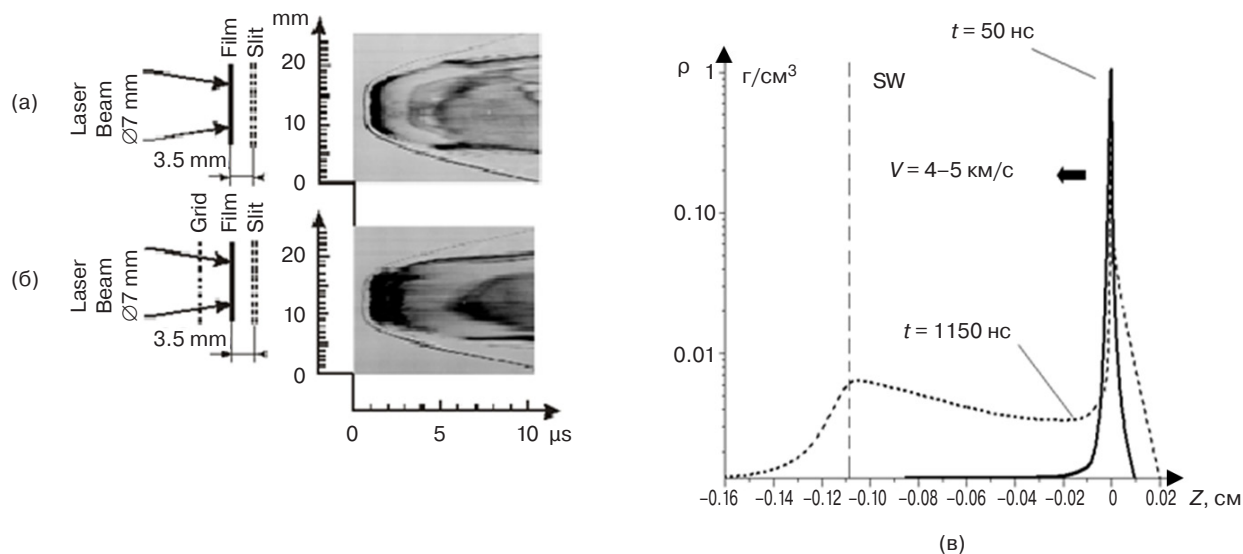


Рис. 3. Схема экспериментов (слева) и изображения ускоренного слоя, полученных при щелевой развертке в случае однородного (а) и неоднородного (б) облучения, $\varnothing$ – сторона квадратного сечения лазерного пучка; результаты численных расчетов распределения плотности вдоль оси OZ на моменты времени $t = 50$ нс и $t = 1150$ нс (в) [20]

первоначально малых возмущений поверхности раздела двух сред к формированию и развитию турбулентного слоя. Исследование закономерностей развития турбулентности является чрезвычайно важной задачей в инерциальном термоядерном синтезе (например, в [2]), в физике экстремального состояния вещества, в космологии и астрофизике.

С помощью мощных лазерных импульсов удается ускорить плотные неиспаренные слои до скоростей ~ 10 – 100 км/с. Было предложено ускорять такие слои в специальных прозрачных ячейках, заполненных газом или двумя газами, разделенными тонкой пленкой. В таких «лазерных ударных трубах» [19] можно изучать особенности развития гидродинамических неустойчивостей возмущений контактной границы и перехода в турбулентное состояние.

Во второй серии экспериментов на установке «ГАРПУН» изучалось развитие турбулентного слоя при лазерном ускорении тонких лавсановых пленок толщиной 1–50 мкм. Мишени помещались внутри вакуумной камеры, заполненной воздухом или аргоном с начальным давлением 0.0002–1.0 бар. Лазерное излучение фокусировалось в квадратное пятно размером 7×7 мм² с помощью призменного раstra, что позволило обеспечить однородность облучения не хуже 1–2%. Интенсивность лазерного излучения на поверхности мишени варьировалась $I = 0.1$ – 1.0 ГВт/см² посредством ослабления мощности падающего светового пучка. Щель электронного фотохронографа была параллельной поверхности пленки и располагалась на различных расстояниях за ней. На рис. 3а, б показаны «регистраграммы» при облучении пленки с начальной толщиной $d = 5$ мкм лазером с интенсивностью $I = 0.55$ – 0.65 ГВт/см² в воздухе при атмосферном давлении. Щель располагалась

на расстоянии 3.5 мм за начальным положением пленки. На рис. 3а на поверхность мишени падало однородное излучение, на рис. 3б излучение проходило через проволочную сетку с размером ячеек 0.7×0.7 мм², помещенную перед пленкой на расстоянии ~ 1 см. Это обеспечивало заданный масштаб неоднородности интенсивности. Во втором случае толщина плотного слоя, пролетавшего мимо щели, была в 3–4 раза больше, чем в первом. Рис. 3в иллюстрирует профили плотности, полученные в численных расчетах на моменты времени $t = 50$ нс и $t = 1150$ нс. Максимумы плотности были совмещены в одной точке для удобства сравнения. Вертикальная штриховая линия – фронт ударной волны на момент времени $t = 1150$ нс.

Процесс лазерного ускорения пленки моделировался с помощью цилиндрической версии программного комплекса *Atlant*. Было показано, что численные расчеты хорошо воспроизводят динамику полета пленки. Скорость составляла ~ 3 – 4 км/с к моменту пролета плотного слоя мимо щели⁷. Начальная плотность пленки равнялась 1 г/см³. Следует отметить, что в процессе полета плотность слоя уменьшалась со временем из-за теплового расширения, а также из-за чисто геометрического фактора увеличения поверхности границы слоя. К моменту времени $t = 1150$ нс (когда слой достигал расстояния 3.5 мм от начального положения) максимум плотности равнялся 0.1 г/см³. К этому моменту увеличилась ширина

⁷ К моменту $t = 50$ нс граница слоя «воздух–СН» ускорялась до 4–5 м/с. Затем плотный слой двигался по инерции, постепенно уширяясь и передавая часть энергии окружающей среде. [By the time $t = 50$ ns, the boundary of the air–CH layer accelerated to 4–5 m/s. Then the dense layer moved by inertia, gradually expanding and transferring part of the energy to the environment.]

плотного слоя по сравнению с начальной (рис. 3в). К дополнительному увеличению толщины пленки приводит развитие турбулентного перемешивания при лазерном ускорении и торможении слоя окружающим воздухом. Так при скорости полета слоя ~ 3 км/с и времени пролета мимо щели ~ 0.5 мкс ширина слоя составляла 1.5 мм, в то время как в расчете без учета турбулентного перемешивания она была на порядок меньше (рис. 3в). Следует отметить, что в экспериментах с возмущенным лазерным потоком (рис. 3б) толщина слоя была в 3–5 раз больше.

Для моделирования турбулентности была использована модель турбулентного перемешивания, описанная в [21, 22]. В этой модели предполагается, что турбулентный слой развивается по законам диффузии, но с эмпирическими коэффициентами, полученными из натуральных экспериментов. Таким образом, уравнение турбулентной диффузии имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_m \frac{\partial \rho}{\partial z} \right), \quad (14)$$

где ρ – плотность, D_m – коэффициент турбулентного перемешивания,

$$D_m = l_p^2 \omega_t, \quad \omega_t = \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial z} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{0.5}. \quad (15)$$

Здесь ω_t – инкремент развития гидродинамической неустойчивости, выведенный в [22], $L_p = 1 / \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial z} \right)$ – масштаб градиента плотности, $l_p(xl)$ – размер турбулентной пульсации и зависит от ширины зоны турбулентности xl .

Авторы [21] предположили, что

$$l_p = \alpha L_{\text{mix}}, \quad (16)$$

где L_{mix} – текущий размер турбулентной зоны ($L_{\text{mix}} \approx xl$ в эксперименте на рис. 3а), а величину α необходимо было задавать *a priori*.

Была написана программа, с помощью которой решалось уравнение (14), (15) с учетом (16). Усредненные значения ускорения слоя $g = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$ и L_p были взяты из результатов численных расчетов с помощью программы *Atlant_C*.

Заметим, что для случая контакта двух несжимаемых сред (ρ_1 и ρ_2) в поле постоянного ускорения g (ускорение направлено со стороны менее плотной среды в сторону более плотной) в [21] была сделана оценка $L_{\text{mix}} \approx \alpha^4 \ln(\rho_1/\rho_2) g t^2$.

Существует две стадии ускорения пленки: 1) при воздействии лазерного импульса слой ускоряется за счет реактивного и теплового давления со стороны испаренной плазмы, $g = +(3-4) \cdot 10^{12}$ см/с² – на лицевой стороне; 2) торможение слоя в атмосфере, $g = -(1-2) \cdot 10^{11}$ см/с² – на тыльной стороне слоя. Данные взяты из численных расчетов в программе *Atlant_C*.

В численных расчетах варьировалось значение α (*alfa*) так, чтобы к моменту пролета плотного слоя у щели его ширина ΔL (*delta_L*) равнялась значению, измеренному в эксперименте [20].

Рис. 4 иллюстрирует «уширение» за счет турбулентного перемешивания ускоренных лазерным импульсом слоев в случае первого и второго типов облучения пленки. Приведен момент времени $t = 1150$ нс, когда слой «был виден» через щель.

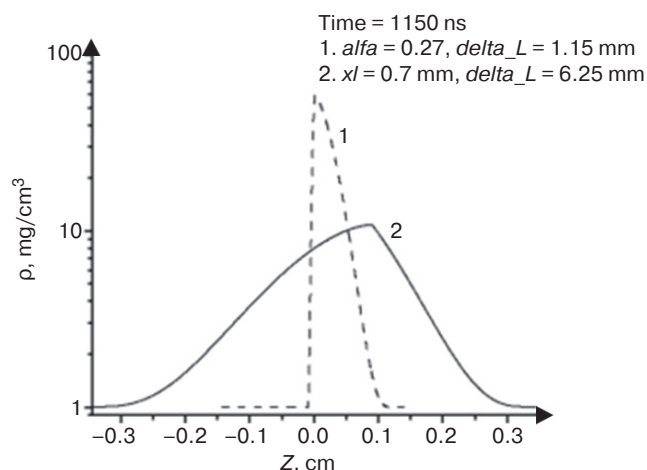


Рис. 4. Плотность ускоренных слоев, полученных в расчетах:

- 1 – в случае, когда пленка облучалась лазерным потоком без внесения возмущения потока,
- 2 – в случае внесения возмущения потока с помощью сетки, xl – размер ячейки сетки, $l_p = xl$ [20]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБЛУЧЕНИЮ ДВУХСЛОЙНЫХ МИШЕНЕЙ И ФОРМИРОВАНИЮ «ТОНКИХ СТРУКТУР»

В третьей серии экспериментов облучались двухслойные мишени в виде алюминиевого слоя толщиной 100 мкм за которым располагался слой оргстекла толщиной ~ 5 мм. Лазерный луч падал со стороны алюминия. Радиус пятна фокусировки на поверхности мишени был равен 50–70 мкм. В оргстекле наблюдались протяженные кратеры длиной около 1 мм, а у его вершины формировались один или два узких канала протяженностью более 100–600 мкм (рис. 5) [16, 23].

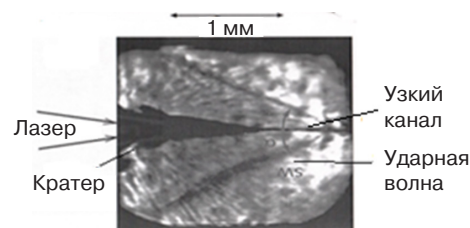


Рис. 5. Изображение двухслойной мишени после облучения лазером. Слева падает лазерный пучок [23]

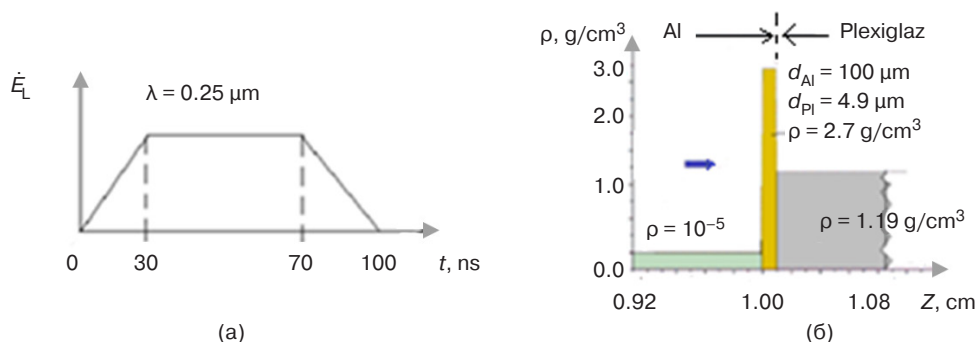


Рис. 6. Постановка задачи: временная форма лазерного импульса (а); параметры мишени (б) [23]

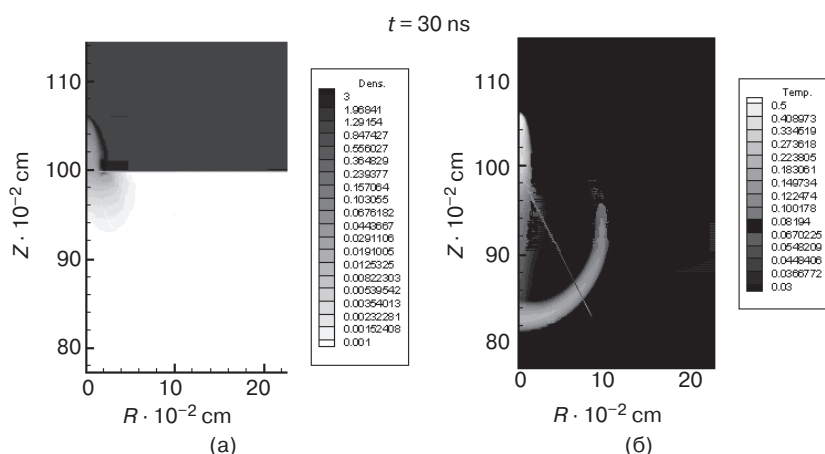


Рис. 7. Поля плотности $\rho(R, Z)$ в г/см³ (а) и температуры $T(R, Z)$ в 10² эВ (б), полученные в расчете на момент времени $t = 30$ нс [23]

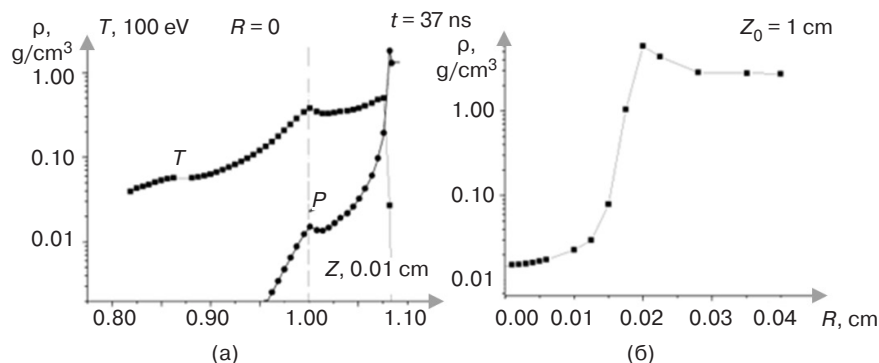


Рис. 8. Распределение плотности ρ и температуры T в плазме вдоль оси OO_1 ($R = 0$) в момент времени $t = 37$ нс (а); зависимость плотности ρ от радиуса R на этот момент при $Z_0 = 1$ см (б) [23]

Были проведены расчеты взаимодействия лазерных импульсов с мишенями с помощью программы *NUTCY*. В расчетной области лазерные лучи распространялись строго вдоль оси OZ , рефракция и самофокусировка световых пучков не учитывались. На рис. 6 показана постановка задачи для моделирования экспериментов.

Использованы следующие параметры: радиус пятна фокусировки $R_f = 50$ мкм при гауссовом распределении интенсивности в пятне; поглощенная энергия лазерного импульса 40 Дж; алюминиевая фольга толщиной 100 мкм и начальной плотностью 2.7 г/см³, а за ней – оргстекло с начальной

плотностью 1.19 г/см³; расчетная область – цилиндр с радиусом $R_0 = 0.5$ мм и длиной $OZ = 1.5$ см.

На рис. 7 показаны двумерные распределения плотности и температуры вещества, полученные в расчетах в программе *NUTCY*. Масштаб длины (R и Z) приведен в единицах 10⁻² см. Масштаб температуры взят в единицах 100 эВ. Соответствующие интервалы плотности и температуры показаны в таблицах справа и отражены в виде тональности на рисунке (белый – серый – черный).

На рис. 8 показаны распределения плотности и температуры плазмы вдоль оси OZ и распределение плотности вдоль радиуса при $Z_0 = 1$ см (начальное

положение границы «конденсированное вещество – плазма»).

Расчеты в программе *NUTCY* позволяют моделировать процессы формирования разлетающейся плазмы и протяженного кратера в конденсированной мишени. Однако для объяснения появления узких каналов в оргстекле требуется привлечь дополнительные соображения и разработать физико-математическую модель.

Первопричиной формирования узких каналов в оргстекле явилось развитие самофокусировки лазерного пучка в плазме за счет теплового механизма. При наличии протяженной плазмы из-за малых возмущений интенсивности лазерного пучка у оси возникает область повышенной температуры, что приводит к «выдавливанию» плазмы в поперечном направлении. Из-за рефракции лучи собираются к оси, что, в свою очередь, приводит к дальнейшему формированию малоплотного канала в плазме. В случае малых возмущений в [24] дана оценка порогового (threshold) значения интенсивности I_{th} для теплового механизма (в единицах 10^{14} Вт/см²):

$$I_{th} \geq 2 \cdot 10^5 (\rho_{cr}/\rho)^3 \frac{T^5 \lambda^2}{Z_i^2 L_{pl}^2}. \quad (17)$$

Здесь температура T взята в единицах кэВ (~11.6 млн градусов), масштаб продольного канала плазмы L_{pl} и длина волны излучения λ взяты в мкм, Z_i – средний заряд ионов. Для условий обсуждаемых экспериментов типичные параметры плазмы: $Z_i = 4-6$, $L_{pl} = 1000$ мкм, $T = 0.1$ кэВ и $\lambda = 0.25$ мкм, откуда $I_{th} \geq 2 \cdot 10^{10}$ Вт/см².

Возможен также стрикционный (пондеромоторный) механизм самофокусировки, когда из-за действия пондеромоторной силы в плазме формируется канал пониженной плотности, в который фокусируются лучи. Однако порог возмущения интенсивности в этом случае на два порядка величины больше, чем в случае тепловой самофокусировки.

Для более аккуратного учета упомянутых выше эффектов в неоднородной плазме требуется использование методов математического моделирования и разработка новых программ, позволяющих рассчитывать уравнения плазмодинамики совместно с нелинейными уравнениями Максвелла⁸.

⁸ В [25] приведены результаты численного моделирования тепловой самофокусировки лазерного пучка в плазме на 3-й гармонике Nd-лазера ($\lambda = 0.35$ мкм), где для описания распространения лазерных лучей в слабо неоднородной среде ($\lambda \ll L_p$) была использована модель геометрической оптики, но без параксиального приближения и гипотезы о квазистационарности пучка. [The numerical modeling results of thermal self-focusing of the laser beam in plasma at the 3rd harmonic of Nd-laser ($\lambda = 0.35 \mu m$) are given in [25] where the geometric optics model is used for describing the propagation of laser beams in a weakly heterogeneous medium ($\lambda \ll L_p$), but without paraxial approximation and hypothesis of the beam quasi-stationarity.]

В [26] приведены результаты численного моделирования самофокусировки лазерного пучка по упрощенной модели эволюции лазерного пучка в проводящей среде. Суть этой модели в том, что предполагается «гауссово» распределение интенсивности излучения в цилиндрическом пучке

$E^2(r, z) = E_0^2 \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{a^2(z)}\right)$; E – электрическая напряженность в лазерном пучке; $a(z)$ – эффективный радиус, который меняется по мере распространения излучения вдоль оси OZ .

В предположении, что диэлектрическая проницаемость зависит по закону (параксиальное приближение):

$$\varepsilon(z, r) = \varepsilon_0(z) + \beta(z) \cdot r^2, \quad \beta = \frac{\partial \varepsilon}{\partial (r^2)} \Big|_{r=0}, \quad (18)$$

можно получить уравнение для описания безразмерного радиуса пучка $f = \frac{a(z)}{a_0}$ (подробнее в [27, 28]):

$$\varepsilon_0 \frac{df}{dz^2} + \frac{1}{2} \frac{d\varepsilon_0}{dz} \frac{df}{dz} = \frac{c^2}{\omega^2 a_0^4 f^3} - \beta(z) f. \quad (19)$$

Первый член справа в уравнении (19) описывает дифракцию пучка, второй – самофокусировку.

В случае стрикционного механизма:

$$\beta(z) = \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \frac{\alpha I_0}{f^2 a_0^2} e^{-\alpha I_0}, \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{e^2}{8m_e \cdot \omega^2 T_e}, \quad I_0 = E_0^2 \sqrt{\frac{\varepsilon_0(0)}{\varepsilon_0(z)}}.$$

В случае теплового механизма:

$$\beta(z) = \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \cdot \frac{\sigma E_0^2}{8\chi_0 T_e^{3.5}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_0(0)}{\varepsilon_0(z)}} \cdot \frac{1}{f^2} =$$

$$= \frac{9}{16} \cdot \frac{v_{ei}^2}{\omega^2 T_e^2} \cdot I_0,$$

где σ – высокочастотная электропроводность, v_{ei} – эффективная частота электрон-ионных столкновений.

Уравнения (18)–(21) решались численно на заданных профилях плотности $\rho(z)$ и фиксированного значения электронной температуры $T(z)$.

Параметры лазерного излучения и плазмы взяты из [23]: $I = 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см², $\rho_{cr} = 0.1354$ г/см³, $T(z) = 0.1$ кэВ, заряд ионов $Z_i = 6$, протяженность плазмы $0 \leq z \leq 0.1$ см. Был задан экспоненциальный профиль плотности: $\rho = \rho_{cr} \cdot \exp(-B(0.1 - z))$, $B = 40$ см⁻¹.

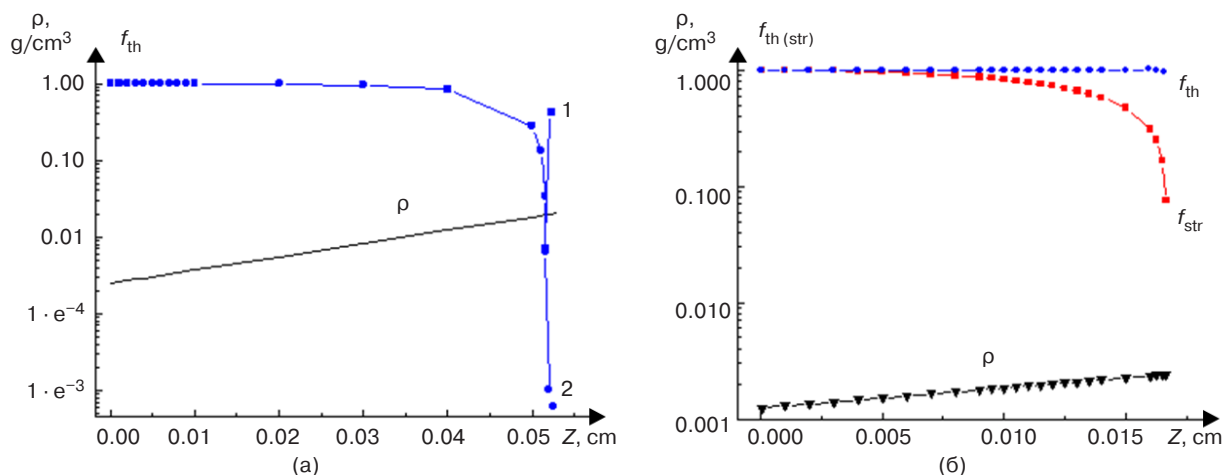


Рис. 9. Изменение безразмерного радиуса пучка на экспоненциальном профиле плотности плазмы: тепловой механизм – синие линии; стрикционный механизм – красная линия; профиль плотности – черная линия. (а) $I = 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см², (б) $I = 5 \cdot 10^{16}$ Вт/см² [26]

На рис. 9а показана эволюция безразмерного радиуса пучка f_{th} вдоль оси OZ для начальных радиусов пучка $a_0 = 35$ (1) и 100 мкм (2). В обоих случаях наблюдается самофокусировка световых пучков за счет теплового механизма. Стрикционный механизм не проявляется ($f_{str} > 1$).

Пучок с начальным радиусом 100 мкм уменьшился до размеров $f < 10^{-3}$. Расчет был прекращен. Пучок с начальным радиусом 35 мкм стал увеличиваться в сечении после того как достиг минимального значения $f = 2 \cdot 10^{-3}$. Первый фокус возникает при плотности плазмы $\rho = 0.00243$ г/см³, т.е. $\rho/\rho_{cr} \approx 0.2$.

Развитие тепловой самофокусировки лазерного пучка в плазме кратера, образовавшегося при облучении мощным лазером конденсированной мишени, приводит к повышению интенсивности на 2–3 порядка величины. Далее уже может преобладать стрикционный механизм вблизи критической поверхности.

На рис. 9б показана эволюция пучка в случае развития пондеромоторной (стрикционной) самофокусировки. Начальный радиус пучка $a_0 = 10$ мкм, $I = 5 \cdot 10^{16}$ Вт/см². В этой серии расчетов: $\rho_{cr} = 0.0677$ г/см³, $T(z) = 1$ кэВ, заряд ионов $Z_i = 12$. Видно, что самофокусировка за счет стрикционного механизма (красная линия) в этом случае нарастает гораздо быстрее, чем за счет тепловой (синяя линия).

При выполнении условия $I \cdot \lambda^2 > 10^{14}$ (Вт/см²)·мкм² вблизи критической поверхности возникнут «горячие пятна», где формируются потоки надтепловых электронов [2, 3]. Эти электроны проникнут вглубь холодного конденсированного вещества, чей след наблюдается в обсуждаемых экспериментах у вершины кратера (рис. 5).

Описанные выше физико-математические модели и численные программы прошли апробацию в экспериментах, выполненных на мощной

KrF-лазерной установке «ГАРПУН», и дают возможность с хорошей степенью точности воспроизвести опытные данные с различными типами мишеней и в различных условиях натурных экспериментов. Эти обстоятельства позволяют относиться с доверием к предсказаниям результатов численного моделирования планируемых крупно масштабных экспериментов (на уровне поглощенной лазерной энергии ~1 МДж).

О ВОЗМОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ МИШЕНИ В ВИДЕ ДВУХСТОРОННЕГО КОНУСА ДЛЯ ЭКСИМЕРНОГО ДРАЙВЕРА

Условно можно выделить четыре основных направления перспективного применения термоядерных микровзрывов, инициируемых лазерными импульсами. Это: 1) моделирование в лабораторных условиях поведения вещества при очень высокой концентрации энергии и последствий ядерных взрывов, тестирование соответствующих численных программ, а также другие прикладные задачи; 2) ядерная энергетика и разработка новых типов реакторов; 3) моделирование астрофизических явлений; 4) разработка ракетных двигателей для межпланетных полетов [2]. Вообще говоря, требования к драйверам для каждого из этих направлений могут существенно отличаться. В настоящей статье обсуждается только второе направление.

Во введении было сказано, что к настоящему моменту не сделан окончательный выбор в пользу типа драйвера для лазерного термоядерного реактора. По-видимому, на первой стадии реакторы будут функционировать по гибридной схеме, когда основная энергия будет получена за счет деления ядер тяжелых элементов (урана), а управление этим процессом будет осуществляться потоками нейтронов от термоядерных

микровзрывов, инициируемых вспышками лазеров [29, 30]. Такой тип реакторов более безопасен, чем реактор, основанный только на реакциях деления ядер, т.к. его «сборки» будут подкритическими, а по мере накопления делящихся элементов в бланкетах, частота лазерных выстрелов может уменьшаться. Горючее таких реакторов не требует предварительного обогащения урана, и его энергетический цикл может стартовать с природного урана U^{238} . Поскольку сам драйвер может размещаться в соседнем здании на расстоянии порядка 10 м от реактора, то цепные реакции деления можно быстро заглушить отключением лазера. Можно организовать режим наработки делящихся элементов таким образом, чтобы их извлечение было чрезвычайно редкой процедурой и осуществлялось бы непосредственно на территории станции либо в другом специально оборудованном месте. Таким образом, вероятность захвата этих запасов террористами была бы сведена к минимуму, а помещения, где хранятся радиоактивные элементы, надежно защищены от бомбовых ударов.

В процессе ядерных реакций будут возникать уникальные элементарные частицы, включая нейтрино и позитроны. Внешние магнитные поля позволят провести селекцию заряженных частиц и их временное хранение [2].

Ранее уже упоминалось, что для достижения больших коэффициентов усиления в единичном термоядерном микровзрыве ($G \gg 1$ – «ignition») планируется использовать твердотельный Nd-лазер. Для достижения больших значений G требуется сжимать горючее до плотностей в 1000 раз больше, чем плотность жидкой ДТ смеси, чтобы инициировать волну термоядерного горения. Из-за развития гидродинамической неустойчивости и перемешивания [2] обеспечить такие условия в мишенях инерциального термоядерного синтеза до сих пор не удается. С другой стороны, достижение $G \sim 1$ является самостоятельной целью, имеющей важное практическое значение. Действительно, на рис. 10 показана схема ядерно-термоядерной энергетической станции с лазерным возбуждением термоядерных микровзрывов [30]. Здесь: η – КПД лазера; β – КПД преобразования тепловой энергии в электрическую; ϕ – доля энергии, которая идет на обеспечение работы реактора; f – частота лазерных выстрелов; E_L – энергия в лазерном импульсе; $W_t = fKE_L$ – тепловая мощность, вырабатываемая в реакторе; W_n – мощность, которая идет потребителю (нетто-мощность); $K = (0.2 + 0.8M)G$ – коэффициент усиления энергии в реакторе; M – коэффициент умножения энергии в урановом бланкете реактора; $(1/\eta - 1)f \cdot E_L$ – потери энергии при накачке лазера. Чтобы «замкнуть» энергетический цикл требуется выполнение неравенства:

$$(1 - \phi)\beta(0.2 + 0.8M)G > 1/\eta. \quad (22)$$

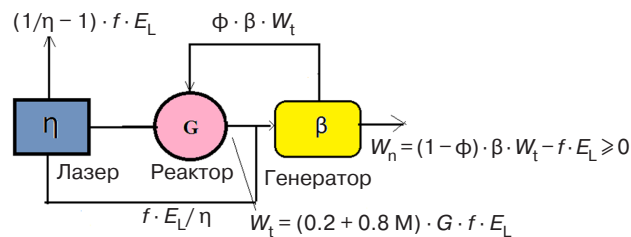


Рис. 10. Структурная схема гибридной ядерно-термоядерной станции [32, 33]

Из (22) следует, что при $\phi = 0.2$, $\beta = 0.4$, $\eta = 0.05$, $M = 60$ коэффициент усиления должен быть $G \geq 1$. В [31] предложено использовать конические мишени и KrF-лазер в качестве драйвера гибридного реактора. Лазерный импульс состоял бы из двух частей – длинный (ускоряющий) импульс с $\tau_1 \approx 100$ нс и серия коротких импульсов с $\tau_2 \approx 0.01$ – 0.1 нс. Из-за деформации стенок конуса сильными ударными волнами, формирующимися у его вершины, в такой конструкции мишени практически невозможно достигнуть сжатий горючего до плотностей, которые значительно превышают нормальную плотность стенок (т.е. 10 – 20 г/см³), но для выхода на коэффициенты усиления $G \sim 1$ этого и не требуется. Короткие лазерные импульсы, которые вводятся через специальные отверстия вблизи вершины конуса, осуществляли бы локальное удержание и дополнительный нагрев сжатого горючего.

На рис. 11 показана схема двухсторонней конической мишени и ее облучение лазерными лучами, взятая из [32, 33]. В верхней части рис. 11а показан осевой разрез мишени. Ударник (внешний радиус R_0) состоит из полимерного материала 2 и малоплотного вещества (пены, аэрогеля) 3, которое требуется для «выглаживания» возмущений абляционного давления на начальной стадии ускорения ударника. Малоплотный слой снижает влияние мелкомасштабных возмущений лазерного потока, которые могут развиваться в протяженной плазме из-за самофокусировки и вынужденного рассеяния Мандельштама – Брюэллена (ВРМБ) и повлиять на устойчивость полета. Следующий – тонкий слой из золота 4, далее 5 – вакуум и 6 – слой конденсированного ДТ-горючего. Тонкий золотой слой в ударнике увеличивает степень сжатия горючего (в одномерных расчетах). Использование криогенного ДТ-горючего также позволяет повысить степень сжатия⁹.

На рис. 11б показана общая схема мишени в виде встречных конусов, отдельно на рис. 11в – ее центральная часть. У вершины конуса между тонким

⁹ Непосредственно в расчетах влияние развития самофокусировочной и гидродинамической неустойчивостей не учитывались. [The impact of the development of self-focusing and hydrodynamic instabilities is not considered directly in calculations.]

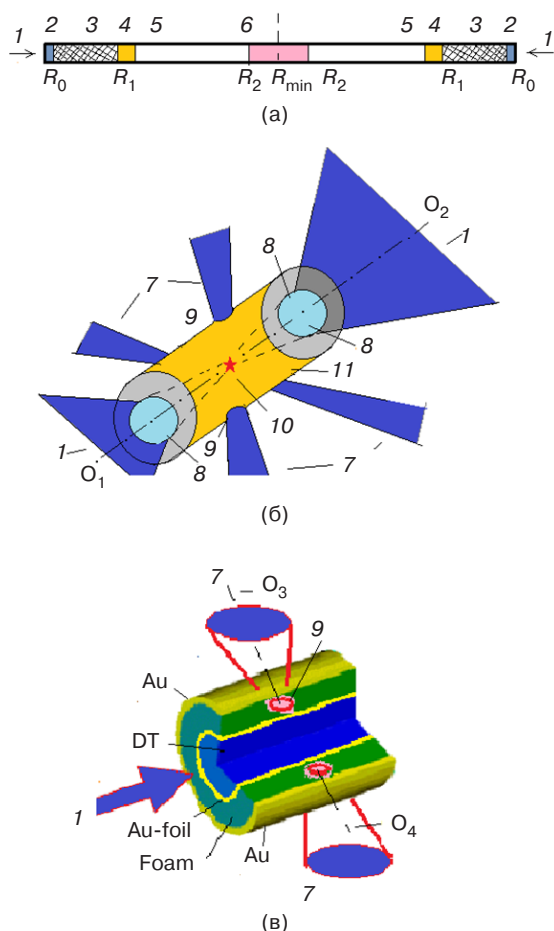


Рис. 11. Схема двухсторонней конической мишени (а) и ее облучения длинными + короткими лазерными импульсами, O_1O_2 – ось симметрии (б); (в) центральная часть мишени.
1 – ускоряющие ударник лазерные лучи (длинные импульсы), 2 – плотный слой ударника, 3 – пенообразный слой, 4 – тонкий золотой слой, 5 – вакуумный промежуток, 6 – слой криогенного ДТ-горючего, 7 – короткие лазерные импульсы, 8 – оболочка-ударник, 9 – отверстия для ввода коротких импульсов, 10 – термоядерный микровзрыв, 11 – золотая камера мишени с конусообразными каналами вдоль оси O_1O_2 ; O_3O_4 – ось, проходящая через центр мишени в плоскости, перпендикулярной оси симметрии O_1O_2 [32, 33]

внутренним золотым слоем и внешней камерой мишени располагается слой малоплотного вещества (foam – на рис. 11в), который «выглаживает» возмущения абляционного давления коротких импульсов.

Для выхода на уровень $G \sim 1$ достаточно сжимать конденсированное горючее в 30–50 раз по сравнению с плотностью жидкой ДТ смеси. Весь процесс сжатия происходит, в основном, на падающей и отраженной ударной волне, и в этих условиях можно рассчитывать, что перемешивание не приведет к катастрофической ситуации (т.е. к уменьшению нейтронного выхода на порядки величины по сравнению с результатами одномерных расчетов).

В [32] приведены результаты расчетов, выполненные в сферической версии программы *Atlant_Sp*, в [33] – в программе «СНД», разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ [34, 35]. Следует отметить, что сравнительные расчеты, которые были проведены ранее с помощью программ *Atlant_Sp* и «СНД», при одинаковых постановках физических задач показали близкие результаты [36].

Численные расчеты показали, что в такой конструкции мишени с использованием импульсов в режиме «длинный + короткие» на уровне поглощенной лазерной энергии ~ 1 МДж можно достичь термоядерного выхода $G \sim 1$.

В расчетах предполагалось, что стенки конуса являются абсолютно упругими и теплонепроницаемыми. Формирование пограничного слоя «оболочка-стенка» не учитывается в расчетах. В задаче имеется идеальная симметрия относительно вершины усеченного конуса (на рис. 11в показана ось O_3O_4 , через которую проходит плоскость симметрии, перпендикулярная оси O_1O_2). Процесс сжатия и инициирования термоядерных реакций в такой мишени можно условно разбить на две стадии. На первой стадии длинный лазерный импульс ускоряет ударник, который движется к вершине конуса и сжимает ДТ-горючее. Когда ударная волна достигла вершины усеченного конуса и отразилась, серия коротких импульсов (суммарная длительность порядка ~ 0.1 нс, суммарная энергия $\sim 10\%$ от основного греющего импульса) вводится через отверстия в мишень в плоскости, перпендикулярной оси O_1O_2 . Цель этих импульсов – обеспечить динамическое удержание сжатого горючего и его дополнительный нагрев (вторая стадия).

Были выполнены две серии расчетов сжатия мишени длинным импульсом КгF-лазера различной временной формы: 1) в виде треугольника с моментами времени при вершинах $t_1 = 0$, $t_2 = 100$ нс и $t_3 = 101$ нс; 2) в виде криволинейной трапеции с затянутым передним плавно нарастающим фронтом ($t_2 - t_1 = 12$ нс) и с последующим прямоугольным импульсом ($t_3 - t_2 = 10$ нс). Мишени имели вид усеченных конусов с аспектными отношениями $R_0/R_{\min} = 10-20$ (рис. 11а). Коэффициент усиления $G > 1$.

Таким образом, с помощью УФ-лазерных импульсов с энергией ≈ 2 МДж и мишеней в виде встречных усеченных конусов можно обеспечить «термоядерную вспышку»¹⁰.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По отдельности основные элементы обсуждаемой в настоящей статье схемы опробованы в маломасштабных натурных и численных экспериментах.

¹⁰ Под «вспышкой» будем понимать $G = 2-3$. [We shall mean $G = 2-3$ by “flash.”]

Эксперименты с коническими лазерными мишенями проводились в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН на твердотельном инфракрасном лазере и описаны в обзоре работ [37].

Усиление пикосекундных импульсов, которые генерировались Ti:сапфировым лазером совместно с длинным УФ-импульсом, опробовано на установке «ГАРПУН-МТВ» (ФИАН, Россия) [38, 39].

Остается недостаточно изученным вопрос о влиянии гидродинамической неустойчивости и взаимодействия со стенкой при лазерном ускорении ударника в коническом канале, а также развитие самофокусировки и ВРМБ в протяженной плазме. На основе численных расчетов и натурных экспериментов на различных лабораторных стендах разрабатываются полуэмпирические физико-математические модели и комплексы программ для описания этих процессов [40–44]. Прямое математическое моделирование этих явлений требует использования высокопроизводительных суперкомпьютеров и параллельных алгоритмов вычислений. Такие работы ведутся, в частности, в МИРЭА – Российском технологическом университете [45].

В США заявлена программа «ELECTRA» по созданию мощной установки для исследований по ЛТС на основе KrF-лазера, работающей в частотном режиме [46–51].

Физико-математические модели и программы, описанные выше, адекватным образом моделируют данные экспериментов, выполненных на лазерной установке «ГАРПУН». Это обстоятельство позволяет проектировать конструкции мишеней для будущих крупномасштабных экспериментов реакторного масштаба.

На рис. 12 показан предполагаемый сценарий развития исследований лазерного термоядерного синтеза применительно к созданию энергетической станции: первая ступень – научно-исследовательские работы (НИР), вторая ступень – опытно-конструкторские разработки (ОКР), третья ступень – разработка опытного реактора (РОР), четвертая ступень – разработка коммерческого реактора (РКР). По оси абсцисс отложены предполагаемые затраты на преодоление этих ступеней.

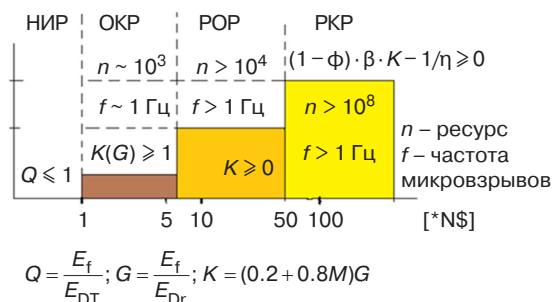


Рис. 12. Предполагаемый сценарий развития исследований инерциального термоядерного синтеза. *N\$ – капитальные затраты. Энергия драйвера $E_{Dr} = E_L$ (энергия лазерного импульса) (рисунок автора)

Существует несколько критериев для характеристики эффективности термоядерного синтеза:

- 1) $Q = E_f/E_{DT} = 1$ – «физический порог термоядерных реакций», когда выделившаяся термоядерная энергия E_f сравнивается с энергией, вложенной в ДТ-плазму от стороннего источника E_T ;
- 2) $G = E_f/E_{Dr}$, «gain» – выигрыш или «критерий вспышки». Как правило, этот коэффициент на порядок величины меньше, чем Q при одинаковых E_f , т.к. значительная часть энергии «теряется» с испаренным инертным веществом мишени и не попадает в сжатое горючее.
- 3) $K = (0.2 + 0.8M)G$ – коэффициент усиления в реакторе, который учитывает также усиление энергии M за счет реакций деления;
- 4) $C_E = (1 - \phi)BK - 1/\eta$ – параметр «энергетической эффективности станции».

На стадии научно-технических исследований (НИР) основная задача – это физический порог термоядерных реакций. Американским ученым на установке NIF удалось достичь этого¹¹ [7] и приблизиться к значению $G \sim 1$. Можно сказать, что они готовы перейти на вторую ступень – ступень опытно-конструкторских разработок.

Для преодоления этой ступени потребуется обеспечить частоту повторения лазерных импульсов на уровне $f \sim 1$ Гц и, соответственно, с такой же частотой – подачу мишеней в фокус лазерных лучей, а также обеспечить «ресурс n », т.е. бесперебойное функционирование всей системы хотя бы в течение часа.

На этой стадии потребуется обеспечить $K(G) \geq 1$, т.е. проверить возможность функционирования бланкета в частотном режиме нагрузок, а также «некий ресурс» $n \sim 10^3$, т.е. функционирование всего реактора в течении определенного времени без остановки и прерывания операций.

На следующей ступени – разработка опытного реактора – потребуется уже выйти на уровень «замыкания» энергетического цикла реактора ($C_E > 0$) и обеспечения ресурса $n > 10^4$, т.е. возможности работы такого опытного реактора без остановки в течение нескольких часов (возможно и суток).

Верхняя ступень – разработка коммерческого реактора. Такой реактор мог бы работать без остановки на протяжении нескольких десятков лет и был бы экономически выгодным по сравнению с другими источниками энергии.

¹¹ Kritcher A. and HIBRYD-E ICF team. Initial results from HYBRID-E DT experiment N210808 with >1.3 MJ yield. *IFSA Virtual Meeting*. September 2021. LLNL-PRES-826367. P. 16. <https://www.aps.org/units/maspg/meetings/upload/obenschain-11172021.pdf>. Дата обращения 07.02.2023. / Accessed February 07, 2023.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках программы Национального центра физики и математики «Газодинамика и физика взрыва», тема «Исследование физических процессов при управляемом термоядерном синтезе и в звездных системах».

ACKNOWLEDGMENTS

The study was performed within the National Center for Physics and Mathematics, Gas Dynamics and Explosion Physics Program on the topic “Investigation of Physical Processes during Controlled Thermonuclear Fusion and in Stellar Systems.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов Н.Г., Крохин О.Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора. *ЖЭТФ*. 1964;46(1):171–175.
2. Басов Н.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б. *Физика лазерного термоядерного синтеза*. М.: Знание; 1988. 176 с.
3. Atzeni S. Laser driven inertial fusion: The physical basis of current and recently proposed ignition experiments. *Plasma Phys. Control Fusion*. 2009;51(12):124029. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/12/124029>
4. Гаранин С.Г., Бельков С.В., Бондаренко С.В. Концепция построения лазерной установки УФЛ-2М. В сб.: *Доклады XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу*. Звенигород; 2012. С. 17.
5. Moses E.I. and NIC Collaboration. The National Ignition Campaign: status and progress. *Nucl. Fusion*. 2013;53(10):104020. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/10/104020>
6. Ebrardt J., Chapt J.M. LMJ on its way to fusion. *J. Phys: Conf. Ser.* 2010;244(3):032017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/244/3/032017>
7. Le P.S., Hopkins B.L.F., Divol L., et. al. Fusion energy output greater than the kinetic energy of an imploding shell at the National Ignition Facility. *Phys. Rev. Lett.* 2018;120(24):245003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.245003>
8. Clery D. Laser-powered fusion effort near ‘ignition’. *Science*. 2021;373(6557):841. <https://doi.org/10.1126/science.373.6557.841>
9. Clark D.S., Casey D.T., Weber C.R., et al. Exploring implosion designs for increased compression on the National Ignition Facility using high density carbon ablation. *Phys. Plasmas*. 2022;29(5):052710. <https://doi.org/10.1063/5.0087052>
10. He X.T., Zhang W.Y., and Chinese ICF Team. Advances in the national inertial fusion program in China. *EPJ Web of Conference*. 2013;59:001009. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135901009>
11. Zhen W., Wei X., Zhu Q., Jing F., et al. Laser performance of the SG-III laser facility. *High Power Laser. Sci. Eng.* 2016;4:e21. <https://doi.org/10.1017/hpl.2016.20>
12. Лебо И.Г., Тишкин В.Ф. *Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза*. М.: Физматлит; 2006. 304 с. ISBN 5-9221-0683-X

REFERENCES

1. Basov N.G., Krokhin O.N. Conditions for heating up of a plasma by the radiation from an optical generator. *Sov. Phys. JETP*. 1964;19(1):123–126. Available from URL: http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_019_01_0123.pdf
2. Basov N.G., Lebo I.G., Rozanov V.B. *Fizika lazernogo termoyadernogo sinteza (Physics of Laser Thermonuclear Fusion)*. Moscow: Znanie; 1988. 172 p. (in Russ.).
3. Atzeni S. Laser driven inertial fusion: The physical basis of current and recently proposed ignition experiments. *Plasma Phys. Control Fusion*. 2009;51(12):124029. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/12/124029>
4. Gararin S.G., Bel'kov S.A., Bondarenko C.V. The concept of building a laser installation UFL-2M. In: *Doklady 39 Mezhdunarodnoi (Zvenigorodskoi) konferentsii po fizike plazmy i upravlyаемому termoyadernomu sintezu (Proc. 39th Intern. (Zvenigorod) Conf. on Plasma Physics and Control. Thermonuclear Fusion)*. Zvenigorod; 2012. P. 17 (in Russ.).
5. Moses E.I. and NIC Collaboration. The National Ignition Campaign: status and progress. *Nucl. Fusion*. 2013;53(10):104020. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/10/104020>
6. Ebrardt J., Chapt J.M. LMJ on its way to fusion. *J. Phys: Conf. Ser.* 2010;244(3):032017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/244/3/032017>
7. Le P.S., Hopkins B.L.F., Divol L., et. al. Fusion energy output greater than the kinetic energy of an imploding shell at the National Ignition Facility. *Phys. Rev. Lett.* 2018;120(24):245003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.245003>
8. Clery D. Laser-powered fusion effort near ‘ignition’. *Science*. 2021;373(6557):841. <https://doi.org/10.1126/science.373.6557.841>
9. Clark D.S., Casey D.T., Weber C.R., et al. Exploring implosion designs for increased compression on the National Ignition Facility using high density carbon ablation. *Phys. Plasmas*. 2022;29(5):052710. <https://doi.org/10.1063/5.0087052>
10. He X.T., Zhang W.Y., and Chinese ICF Team. Advances in the national inertial fusion program in China. *EPJ Web of Conference*. 2013;59:001009. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135901009>
11. Zhen W., Wei X., Zhu Q., Jing F., et al. Laser performance of the SG-III laser facility. *High Power Laser. Sci. Eng.* 2016;4:e21. <https://doi.org/10.1017/hpl.2016.20>

13. Кузенов В.В., Лебо А.И., Лебо И.Г., Рыжков С.В. *Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2015. 327 с. ISBN 978-5-7038-4183-9
14. Самарский А.А. *Теория разностных схем*. М.: Наука; 1990. 616 с. ISBN 5-02-014576-9
15. Самарский А.А., Попов Ю.П. *Разностные методы решения задач газовой динамики*. М.: Наука; 1992. 422 с. ISBN 5-02-014577-7
16. Zvorykin V.D., Lebo I.G. Laser and target experiments on KrF GARPUN laser installation at FIAN. *Laser Part. Beams*. 1999;17(1):69–88. <https://doi.org/10.1017/S0263034699171064>
17. Richmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. *Commun. Pure Appl. Math.* 1960;13(2):297–319. <https://doi.org/10.1002/cpa.3160130207>
18. Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. *Известия АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа*. 1969;5:151–158. URL: <https://mzg.ipmnet.ru/ru/get/1969/5/151-158>
19. Зворыкин В.Д., Лебо И.Г. Применение мощного KrF-лазера для исследования сверхзвуковых течений газа и развития гидродинамических неустойчивостей в слоистых средах. *Квантовая электроника*. 2000;30(6):540–544.
20. Lebo I.G., Zvorykin V.D. The study of turbulent mixing zone development in laser shock tube experiments. *Phys. Scr.* 2008;2008(T132):014018. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2008/T132/014018>
21. Беленький С.З., Фрадкин Е.С. Теория турбулентного перемешивания. *Труды ФИАН*. 1965;29:207–233.
22. Фрадкин Е.С. Исследование устойчивости произвольного одномерного гидродинамического течения. *Труды ФИАН*. 1965;29:250–256.
23. Zvorykin V., Lebo I., Shutov A., Ustinovskii N. Self-focusing of UV radiation in 1 mm scale plasma in a deep ablative crater produced by 100 ns, 1 GW KrF laser pulse in the context of the ICF. *Matter Radiat. Extremes*. 2020;5(30):03540. <https://doi.org/10.1063/1.5142361>
24. Craxton R.S., Anderson K.S., Boehly T.R., et al. Direct drive inertial confinement fusion: A review. *Phys. Plasmas*. 2015;22(1):110501. <https://doi.org/10.1063/1.4934714>
25. Craxton R.S., McCrory R.L. Hydrodynamics of thermal self-focusing in laser plasmas. *J. Appl. Phys.* 1984;56(1):108. <https://doi.org/10.1063/1.333742>
26. Лебо И.Г. О моделировании самофокусировки светового пучка в плазме при облучении мишеней мощным ультрафиолетовым лазером. *Russ. Technol. J.* 2021;9(1):79–86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-79-86>
27. Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде. *УФН*. 1967;93(1):19–70. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0093.196709c.0019>
28. Sodha M.S., Tripathi V.K. Nonlinear penetration of an inhomogeneous laser beam in an overdense plasma. *Phys. Rev. A*. 1977;16(5):2101–2104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.16.2101>
29. Lebo I.G., Tishkin V.F. *Issledovanie gidrodinamicheskoi neustoiichivosti v zadachakh lazernogo termoyadernogo sinteza* (Investigation of Hydrodynamic Instability in Problems of Laser Thermonuclear Synthesis). Moscow: Fizmatlit; 2006. 304 p. (in Russ.). ISBN 5-9221-0683-X
30. Kuzenov V.V., Lebo A.I., Lebo I.G., Ryzhkov S.V. *Fiziko-matematicheskie modeli i metody rascheta vozdeistviya moshchnykh lazernykh i plazmennyykh impul'sov na kondensirovannye i gazovye sredy* (Physical-Mathematical Models and Numerical Methods of Simulation of High Power laser and Plasma Pulses Interaction with Condense and Gas Medias). Moscow: BMSTU; 2015. 327 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7038-4183-9
31. Samarskii A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* (Difference Scheme Theory). Moscow: Nauka; 1990. 616 p. (in Russ.). ISBN 5-02-014576-9
32. Samarskii A.A., Popov Yu.P. *Raznostnye metody resheniya zadach gazovoi dinamiki* (Difference methods for solving problems of gas dynamics). Moscow: Nauka; 1992. 422 p. (in Russ.). ISBN 5-02-014577-7
33. Zvorykin V.D., Lebo I.G. Laser and target experiments on KrF GARPUN laser installation at FIAN. *Laser Part. Beams*. 1999;17(1):69–88. <https://doi.org/10.1017/S0263034699171064>
34. Richmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. *Commun. Pure Appl. Math.* 1960;13(2):297–319. <https://doi.org/10.1002/cpa.3160130207>
35. Meshkov E.E. The instability of two gases surface, which accelerated by shock wave. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*. 1969;5:151–158 (in Russ.). Available from URL: <https://mzg.ipmnet.ru/ru/get/1969/5/151-158>
36. Zvorykin V.D., Lebo I.G. Application of a high power KrF laser for the study of supersonic gas flows and the development of hydrodynamic instability in layered media. *Quantum Electron.* 2000;30(6):540–544. <https://doi.org/10.1070/QE2000v030n06ABEH001761> [Original Russian Text: Zvorykin V.D., Lebo I.G. Application of a high power KrF laser for the study of supersonic gas flows and the development of hydrodynamic instability in layered media. *Kvantovaya Elektronika*. 2000;30(6):540–544 (in Russ.).]
37. Lebo I.G., Zvorykin V.D. The study of turbulent mixing zone development in laser shock tube experiments. *Phys. Scr.* 2008;2008(T132):014018. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2008/T132/014018>
38. Belen'kii S.Z., Fradkin E.S. Theory of turbulent mixing. *Trudy FIAN = Proceedings of the Lebedev Physics Institute*. 1965;29:207–233 (in Russ.).
39. Fradkin E.S. The investigation of the arbitrary 1D hydrodynamic flow stability. *Trudy FIAN = Proceedings of the Lebedev Physics Institute*. 1965;29:250–256 (in Russ.).
40. Zvorykin V., Lebo I., Shutov A., Ustinovskii N. Self-focusing of UV radiation in 1 mm scale plasma in a deep ablative crater produced by 100 ns, 1 GW KrF laser pulse in the context of the ICF. *Matter Radiat. Extremes*. 2020;5(30):03540. <https://doi.org/10.1063/1.5142361>
41. Craxton R.S., Anderson K.S., Boehly T.R., et al. Direct drive inertial confinement fusion: A review. *Phys. Plasmas*. 2015;22(1):110501. <https://doi.org/10.1063/1.4934714>

29. Басов Н.Г., Субботин В.И., Феоктистов Л.П. Ядерный реактор с лазерным термоядерным источником нейтронов. *Вестник Российской академии наук*. 1993;63(10):787–884.
30. Басов Н.Г., Белоусов Н.И., Гришунин П.А., Калмыков Ю.К., Лебо И.Г., Розанов В.Б., Склизков Г.В., Субботин В.И., Финкельштейн К.И., Харитонов В.В., Шерстнев К.Б. Гибридный реактор на основе лазерного термоядерного синтеза. *Квантовая электроника*. 1987;14(10):2068–2081.
31. Зворыкин В.Д., Лебо И.Г., Розанов В.Б. О возможности создания источника термоядерных нейтронов на основе KrF-лазера. *Краткие сообщения по физике*. 1997;9(10):20–29.
32. Лебо И.Г., Исаев Е.А., Лебо А.И. Двухсторонняя лазерная коническая мишень для нейтронного источника ядерно-термоядерного реактора. *Квантовая электроника*. 2017;47(2):106–110.
33. Долголева Г.В., Лебо И.Г. К вопросу о разработке нейтронного источника для ядерно-термоядерного реактора с лазерным возбуждением. *Квантовая электроника*. 2019;49(8):796–800.
34. Долголева Г.В. Методы расчета движения двухтемпературного излучающего газа. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики*. 1983;2(13):29–33.
35. Бельков С.А., Долголева Г.В. Модель среднего иона для расчета кинетики ионизации, населенностей возбужденных уровней и спектральных коэффициентов переноса излучения в программе СНДП. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики*. 1992;1:59–61.
36. Долголева Г.В., Лебо А.И., Лебо И.Г. Моделирование сжатия термоядерных мишеней на уровне энергии лазера порядка 1 МДж. *Матем. моделирование*. 2016;28(1):23–32.
37. Красюк И.К., Семенов А.Ю., Чарахчян А.А. Использование конических мишеней в исследованиях по инерциальному термоядерному синтезу. *Квантовая электроника*. 2005;35(9):769–777. URL: <https://www.mathnet.ru/links/a64472a2c6918f95785286b47b113907/qe6128.pdf>
38. Zvorykin V.D., Didenko N.V., Ionin A.A., et al. GARPUN-MTW: A hybrid Ti:Sapphire/KrF laser facility for simultaneous amplification of subpicosecond/nanosecond pulses relevant to fast-ignition ICF concept. *Laser Part. Beams*. 2007;25(3):435–451. <https://doi.org/10.1017/S0263034607000559>
39. Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Устиновский Н.Н. Усиление субпикосекундных УФ импульсов в многокаскадной лазерной Ti:сапфир–KrF-системе ГАРИУН-МТВ. *Квантовая электроника*. 2010;40(5):381–385.
40. Неуважаев В.Е. *Математическое моделирование турбулентного перемешивания*. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ; 2007. 160 с. URL: https://math.csu.ru/new_files/students/lectures/ur_mat_fiz/neuvajae_v_mat_model.pdf
41. Невмержицкий Н.В. *Гидродинамические неустойчивости и турбулентное перемешивание веществ. Лабораторное моделирование*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; 2018. 245 с. ISBN 978-5-9515-0377-0
25. Craxton R.S., McCrory R.L. Hydrodynamics of thermal self-focusing in laser plasmas. *J. Appl. Phys.* 1984;56(1):108. <https://doi.org/10.1063/1.333742>
26. Lebo I.G. About the modeling of light beam self-focusing in plasma at the irradiation of the target by power UV laser. *Russ. Technol. J.* 2021;9(1):79–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-79-86>
27. Akhmanov S.A., Sukhorukov A.P., Khokhlov R.V. Self-focusing and diffraction of light in nonlinear medium. *Sov. Phys. Usp.* 1968;10(3):609–636. <https://doi.org/10.1070/PU1968v010n05ABEH005849> [Original Russian Text: Akhmanov S.A., Sukhorukov A.P., Khokhlov R.V. Self-focusing and diffraction of light in nonlinear medium. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 1967;93(1):19–70 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0093.196709c.0019>]
28. Sodha M.S., Tripathi V.K. Nonlinear penetration of an inhomogeneous laser beam in an overdense plasma. *Phys. Rev. A*. 1977;16(5):2101–2104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.16.2101>
29. Basov N.G., Subbotin V.I., Feoktistov L.P. Nuclear reactor with laser fusion neutron source. *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 1993;63(10):787–884 (in Russ.).
30. Basov N.G., Belousov N.I., Grishunin P.A., et al. Hybrid reactor based on laser thermonuclear fusion. *Sov. J. Quantum Electronics*. 1987;17(10):1324–1332. <https://doi.org/10.1070/QE1987v017n10ABEH010765> [Original Russian Text: Basov N.G., Belousov N.I., Grishunin P.A., Kalmykov Yu.K., Lebo I.G., Rozanov V.B., Sklizkov G.V., Subbotin V.I., Finkel'shtein K.I., Kharitonov V.V., Sherstnev K.B. Hybrid reactor based on laser thermonuclear fusion. *Kvantovaya Elektronika*. 1987;14(10):2068–2081 (in Russ.).]
31. Zvorykin V.D., Lebo I.G., Rozanov V.B. On the feasibility of the production of a source of the thermonuclear neutrons on the basis of a KrF laser. *Bulletin of the Lebedev Physical Institute*. 1997;9:15–22. [Original Russian Text: Zvorykin V.D., Lebo I.G., Rozanov V.B. On the feasibility of the production of a source of the thermonuclear neutrons on the basis of a KrF laser. *Kratkie Soobshcheniya po Fizike*. 1997;9(10):20–29 (in Russ.).]
32. Lebo I.G., Isaev E.A., Lebo A.I. Two-sided conical laser target for a neutron source of a hybrid nuclear-thermonuclear reactor. *Quantum Electronics*. 2017;47(2):106–110. <https://doi.org/10.1070/QEL16277> [Original Russian Text: Lebo I.G., Isaev E.A., Lebo A.I. Two-sided conical laser target for a neutron source of a hybrid nuclear-thermonuclear reactor. *Kvantovaya Elektronika*. 2017;47(2):106–110 (in Russ.).]
33. Dolgoleva G.V., Lebo I.G. On the issue of neutron source development for a nuclear-thermonuclear reactor. *Quantum Electronics*. 2019;49(8):796–800. <https://doi.org/10.1070/QEL16953> [Original Russian Text: Dolgoleva G.V., Lebo I.G. On the issue of neutron source development for a nuclear-thermonuclear reactor. *Kvantovaya Elektronika*. 2019;49(8):796–800 (in Russ.).]
34. Dolgoleva G.V. Methods of simulation of two temperature irradiated gas. *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Ser. Metodiki i Programmy Chislennogo Resheniya Zadach Matematicheskoi Fiziki*. 1983;2(13):29–33 (in Russ.).

42. Янилкин Ю.В., Стаценко В.П., Козлов В.И. *Математическое моделирование турбулентного перемешивания в сжимаемых средах*: в 2-х т. Т. 1. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; 2019. 357 с. ISBN 978-5-9515-0421-0
43. Янилкин Ю.В., Стаценко В.П., Козлов В.И. *Математическое моделирование турбулентного перемешивания в сжимаемых средах*: в 2-х т. Т. 2. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; 2020. 407 с. ISBN 978-5-9515-0458-6
44. Разин А.Н. *Моделирование турбулентного перемешивания в газовых слоях*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; 2020. 290 с. ISBN 978-5-9515-0434-0
45. Лебо И.Г., Обручев И.В. Моделирование двумерных вихревых течений в цилиндрическом канале с помощью параллельных вычислений на суперкомпьютере. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):60–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-60-67>
46. Obenschain S., Lehmler R., Kehne D., et al. High-energy krypton-fluoride laser for inertial fusion. *Appl. Opt.* 2015;54(31):F103–F122. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.54.00F103>
47. Sethian J., Obenschain S. Fusion energy with krypton fluoride lasers and direct drive targets. *Fusion Sci. Technol.* 2012;61(1T):41–46. <https://doi.org/10.13182/FST12-A13394>
48. Wolford M.F., Sethian J.D., Myers M.C., Hegeler F., Giuliani J.L., Obenschain S.P. Krypton fluoride (KrF) laser for inertial fusion energy. *Fusion Sci. Technol.* 2013;64(2):179–186. <https://doi.org/10.13182/FST12-502>
49. Bodner S.E. The path to electrical energy using laser fusion. *High Power Laser Science and Engineering*. 2019;7:e63. <https://doi.org/10.1017/hpl.2019.51>
50. Schmitt A.J., Obenschain S.P. The importance of laser wavelength for driving inertial confinement fusion targets. I. Basic physics. *Phys. Plasmas*. 2023;30(1):012701. <https://doi.org/10.1063/5.0118080>
51. Schmitt A.J., Obenschain S.P. The importance of laser wavelength for driving inertial confinement fusion targets. II. Target design. *Phys. Plasmas*. 2023;30(1):012702. <https://doi.org/10.1063/5.0118093>
35. Bel'kov S.A., Dolgoleva G.V. The model of average ion for the simulation of ionization kinetics, excited levels and spectral radiation transfer coefficients in SNDP program. *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Ser. Metodiki i Programmy Chislennogo Resheniya Zadach Matematicheskoi Fiziki*. 1992;1:59–61 (in Russ.).
36. Dolgoleva G.V., Lebo A.I., Lebo I.G. Simulation of a thermonuclear target drive at the 1 MJ laser energy level. *Math. Models Comput. Simul.* 2016;8(4):438–445. <https://doi.org/10.1134/S2070048216040062> [Original Russian Text: Dolgoleva G.V., Lebo A.I., Lebo I.G. Simulation of a thermonuclear target drive at the 1 MJ laser energy level. *Matematicheskoe Modelirovanie*. 2016;28(1):23–32 (in Russ.).]
37. Krasnyuk I.K., Semenov A.Yu., Charakhch'yan A.A. Use a conic targets in Inertial confinement fusion. *Quantum Electronics*. 2005;35(9):769–777. <https://doi.org/10.1070/QE2005v035n09ABEH006128> [Original Russian Text: Krasnyuk I.K., Semenov A.Yu., Charakhch'yan A.A. Use a conic targets in Inertial confinement fusion. *Kvantovaya Elektronika*. 2005;35(9):769–777 (in Russ.).]
38. Zvorykin V.D., Didenko N.V., Ionin A.A., et al. GARPUN-MTW: A hybrid Ti:Sapphire/KrF laser facility for simultaneous amplification of subpicosecond/nanosecond pulses relevant to fast-ignition ICF concept. *Laser Part. Beams*. 2007;25(3):435–451. <https://doi.org/10.1017/S0263034607000559>
39. Zvorykin V.D., Levchenko A.O., Ustinovskii N.N. Amplification of subpico second UV pulses in the multistage GARPUN-MTW Ti:sapphire–KrF-laser system. *Quantum Electronics*. 2010;40(5):381–385. <https://doi.org/10.1070/QE2010v040n05ABEH014241> [Original Russian Text: Zvorykin V.D., Levchenko A.O., Ustinovskii N.N. Amplification of subpico second UV pulses in the multistage GARPUN-MTW Ti:sapphire–KrF-laser system. *Kvantovaya Elektronika*. 2010;40(5):381–385 (in Russ.).]
40. Neuvazhaev V.E. *Matematicheskoe modelirovanie turbulentnogo peremeshivaniya (The mathematical modeling of turbulent mixing)*. Snezhinsk; 2007. 160 p. (in Russ.). Available from URL: https://math.csu.ru/new_files/students/lectures/ur_mat_fiz/nevazhaev_mat_model.pdf
41. Nevmerzhitskii N.V. *Gidrodinamicheskie neustoiichivosti i turbulentnoe peremeshivanie veshchestv. Laboratornoe modelirovanie (Hydrodynamic instability and turbulent mixing of matters. The laboratory modeling)*. Sarov; 2018. 245 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9515-0377-0
42. Yanilkin Yu.V., Statsenko V.P., Kozlov V.I. *Matematicheskoe modelirovanie turbulentnogo peremeshivaniya v szhimaemykh sredakh (The mathematical modeling of turbulent mixing in compressed matters)*: in 2 v. V. 1. Sarov; 2019. 357 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9515-0421-0
43. Yanilkin Yu.V., Statsenko V.P., Kozlov V.I. *Matematicheskoe modelirovanie turbulentnogo peremeshivaniya v szhimaemykh sredakh (The mathematical modeling of turbulent mixing in compressed matters)*: in 2 v. V. 2. Sarov; 2020. 407 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9515-0458-6
44. Razin A.N. *Modelirovanie turbulentnogo peremeshivaniya v gazovykh sloikakh (The modeling of turbulent mixing in gas layers)*. Sarov; 2020. 290 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9515-0434-0

45. Lebo I.G., Obruchev I.V. The modeling of two-dimensional vortex flows in a cylindrical channel using parallel calculation on a supercomputer. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):60–67 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-60-67>
46. Obenschain S., Lehmberg R., Kehne D., et al. High-energy krypton-fluoride laser for inertial fusion. *Appl. Opt.* 2015;54(31):F103–F122. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.54.00F103>
47. Sethian J., Obenschain S. Fusion energy with krypton fluoride lasers and direct drive targets. *Fusion Sci. Technol.* 2012;61(1T):41–46. <https://doi.org/10.13182/FST12-A13394>
48. Wolford M.F., Sethian J.D., Myers M.C., Hegeler F., Giuliani J.L., Obenschain S.P. Krypton fluoride (KrF) laser for inertial fusion energy. *Fusion Sci. Technol.* 2013;64(2):179–186. <https://doi.org/10.13182/FST12-502>
49. Bodner S.E. The path to electrical energy using laser fusion. *High Power Laser Science and Engineering.* 2019;7:e63. <https://doi.org/10.1017/hpl.2019.51>
50. Schmitt A.J., Obenschain S.P. The importance of laser wavelength for driving inertial confinement fusion targets. I. Basic physics. *Phys. Plasmas.* 2023;30(1):012701. <https://doi.org/10.1063/5.0118080>
51. Schmitt A.J., Obenschain S.P. The importance of laser wavelength for driving inertial confinement fusion targets. II. Target design. *Phys. Plasmas.* 2023;30(1):012702. <https://doi.org/10.1063/5.0118093>

Об авторе

Лебо Иван Германович, д.ф.-м.н., профессор, кафедра высшей математики Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lebo@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 9416-5542, <https://orcid.org/0000-0001-8341-9453>

About the author

Ivan G. Lebo, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Higher Mathematics, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lebo@mirea.ru. RSCI SPIN-code 9416-5542, <https://orcid.org/0000-0001-8341-9453>

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 378.147:372.881.1
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-104-116>



REVIEW ARTICLE

Technology for determining non-humanities university students' cognitive-and-psychological characteristics

Nadezhda I. Chernova[@], Ekaterina A. Ivanova, Nadezhda B. Bogush,
Nataliya V. Katakhova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: chernova@mirea.ru

Abstract

Objectives. The purpose of this work was to create a special entrance test for first-year students starting to learn a new foreign language. To achieve the research objective, the study analyzed data on testing language/linguistic proficiency and motivation for learning a foreign language. A range of test parameters identifying both abilities and motivation to learn a foreign language in general, but not related to learning a specific language, were highlighted. The identified parameters were used to inform a questionnaire tested on a group of students, whose level of abilities and motivation had already been ascertained. The findings about students were compared with the already known empirical data to support the improvement of test items.

Methods. To describe a special entrance test for first-year students starting to learn a new foreign language in a non-humanities higher education institution, a test technology for identifying certain cognitive, psychological, intellectual, motivational characteristics of a student's language personality was created. The developed test parameters served as the basis for constructing several heterogeneous test blocks.

Results. The initial version of the test obtained was verified by pilot testing first-semester-first-year students. Expert assessments of the foreign language potential learning on the part of students were used to evaluate the reliability and validity of the test. A subsequent correction of tasks and responses was carried out in light of the verification results.

Conclusions. A recommendation to conduct this kind of testing prior to the first semester with the aim of forecasting the success of foreign-language educational activities of students enrolled in the foreign language study group from the "starter" level is formulated. The results of such diagnostics can be used to draw up personified adaptive training programs within the educational process.

Keywords: testing, entrance test, learning a foreign language from scratch, language skills, abilities

• Submitted: 21.11.2022 • Revised: 09.12.2022 • Accepted: 09.03.2023

For citation: Chernova N.I., Ivanova E.A., Bogush N.B., Katakhova N.V. Technology for determining non-humanities university students' cognitive-and-psychological characteristics. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):104–116. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-104-116>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Технология определения когнитивно-психологических особенностей студентов негуманитарного вуза

Н.И. Чернова[@], Е.А. Иванова, Н.Б. Богуш, Н.В. Катахова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: chernova@mirea.ru

Резюме

Цель. Цель исследования – разработка специального входного теста для студентов-первокурсников, начинающих изучать новый для них иностранный язык. Для достижения этой цели был проведен анализ научных работ по проблемам, касающимся тестирования языковых/лингвистических способностей, мотивации к обучению иностранному языку; очерчен круг параметров тестирования, не связанных с изучением конкретного языка, однако дифференцирующих способности и мотивацию к его изучению; составлен вопросник на основе выявленных параметров. Полученный тест апробирован в группе студентов, уровень способностей и мотивированности которых определен. По итогам результатов тестирования и уже известных эмпирических знаний о студентах скорректированы тестовые задания, верифицированные по уровню и направлению подготовки обучающихся.

Методы. Для описания специального входного теста для студентов-первокурсников, приступающих к изучению нового иностранного языка в негуманитарном вузе, создана тестовая технология выявления когнитивных, психологических, интеллектуальных, мотивационных характеристик языковой личности обучающихся, на основании которой разработаны параметры тестирования, созданы вариативные разноуровневые блоки вводного теста.

Результаты. В логике заявленного эксперимента проведена верификация исходного варианта теста, его апробация в группах студентов-первокурсников по окончании обучения в первом семестре. Оценивание их потенциала в изучении иностранных языков рассматривалось в качестве экспертной оценки для определения надежности и валидности теста. С учетом верификации проведена последующая коррекция как самих тестовых заданий, так и ответов на них.

Выводы. При прогнозировании успешности иноязычной учебной деятельности студентов, зачисленных в группы по изучению иностранного языка с нулевого уровня, считаем целесообразным и продуктивным проведение подобного рода тестирования перед началом первого семестра. По итогам предложенной диагностики весьма актуальной представляется разработка персонализированных адаптивных программ иноязычной подготовки таких студентов в неязыковом вузе.

Ключевые слова: тестирование, входной тест, изучение иностранного языка с нуля, языковые способности

• Поступила: 21.11.2022 • Доработана: 09.12.2022 • Принята к опубликованию: 09.03.2023

Для цитирования: Chernova N.I., Ivanova E.A., Bogush N.B., Katakhova N.V. Technology for determining non-humanities university students' cognitive-and-psychological characteristics. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):104–116. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-104-116>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

1. INTRODUCTION

Traditional methods for foreign language teaching at non-humanities universities do not always produce the necessary results to support the future professional activity of students. One common problem faced by teachers is the need to establish a basic level of knowledge, skills and abilities of a number of students in order to bring them to the level required for their subsequent advancement through the curriculum, which greatly complicates the educational process of teaching a foreign language.

Currently, numerous studies aimed at developing innovative technologies in the field of foreign language training of students are being carried out. Adaptive, personalized technologies for teaching foreign languages are being introduced [1–3]. Since each applicant has a different initial knowledge base and background, opportunities for mastering educational material vary considerably. Therefore, there is a need to focus on a student's personal characteristics, helping him or her to build an individual trajectory for successful language acquisition [4, 5]. At the same time, this approach need not violate the boundaries of an integral system of educational standards, curricula, and learning objectives.

In order to determine the initial level of foreign language proficiency of those entering a university, some kind of entrance lingua-didactic testing is typically carried out to form language groups having the corresponding level of language preparation. Along with the various test forms (input, current, intermediate, final) to determine the level of students' knowledge, there is a considerable amount of published scientific literature on the issue [6–9].

For this reason, entrance testing becomes an important initial stage in the formation of a student's portfolio, forming the basis on which their further educational activities can be planned. In the pedagogical literature, however, the question of how entrance tests are used to determine the initial level of language training obtained in a secondary school is still under discussion [10–14].

The practice of teaching a foreign language at a technical university demonstrates that students entering a university with existing knowledge of one foreign language sometimes have to learn another foreign language from scratch. In this context, existing entry tests are not applicable. In order to implement an adaptive approach, it is necessary to divide the groups of students into subgroups in accordance with their potential for learning a foreign language. Thus, there is a need to develop a special test within the framework of adaptive technologies that cover the most important personal characteristics: psychological, cognitive and linguistic along with the level of motivation in language learning.

To date, a relatively small number of researchers are developing the issue from the above-described perspective. The following studies are closest to the matter under consideration [15–17]. Some researchers recommend that the testing of language abilities should be carried out in the process of foreign language activity, that is, if a student does not know the basics of foreign language acquisition, then the identification of his or her innate language abilities becomes problematic [18–20]. However, other researchers consider that linguistic understanding is formed prior to targeted language acquisition [21, 22], on which the existing psychological tests for identifying language abilities are based¹ [23–30]. In this work, we use such described tests as a section of the questionnaire.

The purpose of the present study was to create a special entrance test for first-year students who are beginning to learn a new foreign language. To achieve the goal of the study, the following theoretical research methods were applied and the subsequent problems were solved:

- 1) analyze the scientific literature on the issues related to testing linguistic abilities and motivation to learn a foreign language;
- 2) outline a range of testing parameters, which are not related to the study of a particular language, but instead reveal the ability and motivation to study it;
- 3) design a questionnaire based on the identified parameters;
- 4) try out the obtained test on a group of students, whose level of abilities and motivation is already known, in order to compare test results with already known empirical (expert) knowledge about the students;
- 5) adjust test items if necessary.

In investigating the psychological, personal, psychophysiological characteristics of applicants, the present work considered the entrance testing of students prior to enrolling them in a group for studying a foreign language from scratch. The theoretical significance of this work is due to the lack of a single test relating to the lingua-didactic type for applicants' preliminary testing. The practical relevance of the work is determined by the need to obtain certain preliminary personalized data about students who begin to learn a foreign language from scratch.

2. MATERIAL AND METHODS

The study was carried out within the scope of an adaptive approach, requiring the development of technologies for individualization of learning. The material for this comprised a special entrance test designed for diagnosing

¹ As well as: Tarasova E. *Test na lingvisticheskuyu intuitsiyu (Linguistic intuition test)*. <https://subscribe.ru/group/obo-vsyomponemnogu/15246393/>. Accessed January 31, 2022 (in Russ.).

the particular cognitive, psychological, linguistic and motivational characteristics of students setting out to learn a new foreign language at a non-linguistic university. As part of the experimental methodology, the test was tried out on the first-year students whose language abilities had already been assessed by teachers. The methodology included a comparison of the results of the entrance test with the expert assessments of students' knowledge and capabilities to serve as a basis for adjusting test tasks and interpreting answers to them.

3. THEORETICAL BACKGROUND

3.1. Individual psychological characteristics and their diagnosis

In addition to tests examining the level of students' knowledge in terms of their foreign language competence, tests are used to determine the general level of language proficiency and speech activity, as well as to identify linguistic abilities [6, 8, 10, 21, 31, 32]. Within the framework of adaptive technologies, the development of tests aimed at identifying applicants' individual psychological characteristics, [33, 34] namely memory, attention, motivation, thought processes, and emotional states, are of great importance.

Many tests have been developed and designed to investigate human cognitive abilities related to language learning. However, a number of researchers point to various inadequacies in the available tests, which cannot be used to evaluate intellectual abilities in general, but only some intellectual skills and thinking features (in the epistemological sense [35]) formed at the time of testing.

Tests for "the success of the verbal functioning of an individual in the society" include the following questions:

- firstly, on general intelligence ("the ability to logical reasoning, planning, problem solving, abstract thinking, the ability to understand complex ideas, the speed of learning and the ability to benefit from the experience gained," linguistic, spatial abilities);
- secondly, on verbal abilities (definition of concepts, mental analysis and synthesis in verbal form, the establishment of verbal similarities and differences) [36, p. 127].

Also of interest in this connection are the Wexler scales to detect mental abilities, including verbal and nonverbal, which are used to define various features of memory, thinking, attention, and visual perception [33, 37].

The tests developed by John B. Carroll and Stanley Sapon aimed at identifying special cognitive abilities—mechanical associative memory (rote associational memory), the ability to recognize and derive rules (inductive ability), phonetic coding ability, and the perception of grammatical relations (grammatical sensitivity)—are also relevant [23, 24].

Tests for studying the motivational sphere of personality [38–40] have also been created. However, such tests, which are mainly designed for schoolchildren and job seekers, are underapplied to university students [41].

3.2. Language abilities and their diagnostics

The issue of determining linguistic abilities and giftedness has been repeatedly raised in the psycholinguistic literature [18, 23, 36, 42–46]. However, while various indicators of the general giftedness of learners [20, 33, 47, etc.] and conditions for assessing linguistic abilities [19, 31, 48, 49] have been described in detail, a universal common approach is yet to be developed.

Linguistic ability/giftedness is also diagnosed by the following verbal-semantic methods: free associative experiment [50], associative-translation method² [20], the word semantics method [15, 16, 51], and the remote associates test³ [52, 53].

Linguistic tasks for new interpreters [17] combine linguistic, mathematical and logical methods of language research in one task that allows a subject's understanding of the language structure and the laws of its functioning to be evaluated. This collection of tests determines linguistic abilities along with the ability to apply logical reasoning and linguistic thinking.

Paul Pimsleur's *language aptitude battery* [28] is aimed at identifying potentially underperforming students before they start learning foreign languages. Pimsleur highlights three factors that determine the success of mastering foreign languages: (1) the level of speech development, determined by using the "Vocabulary" test (individual lexicon in one's native language); (2) motivation and interest in learning a foreign language; (3) sound difference and quasi-signal-based communication.

L.A. Khokhlova's complex psychological and diagnostic approach to the study of students' language abilities is based on the hypothesis of M.M. Gohlerner and G.V. Eiger [21], showing that speech transformations, interverbal connections, and generalizations are formed faster and easier in the presence of linguistic talent [21, 54].

There is also a psychophysiological instrumental method for determining linguistic talent (using functional magnetic resonance imaging along with neurolinguistic programming), which has its own specifics [31, 54].

² As well as: Romanovskaya N.V. *Yazykovaya sposobnost' kak determinanta ponimaniya inoyazychnogo teksta* (Language ability as a determinant of understanding a foreign language text). Abstract of thesis. Tver; 2004 (in Russ.).

³ Remote Associates Test (RAT) test as adapted by T.V. Galkina, L.G. Alekseeva, L.G. Khusnutdinova; for adults, by A.N. Voronin.

Thus, the tests available today are typically used to diagnose a person's characteristics from only one point of view, which means that they are homogeneous. As such, there is still no unified multi-component test for preliminary testing of applicants enrolling in a group for beginner learners of a foreign language. In their work when developing the test, the present authors have analyzed and taken into account achievements of domestic and foreign researchers who have studied various aspects of the linguistic personality.

4. STUDY AND RESULTS

The development stages of the test considered in this paper correlate with the standard stages of any professional test compilation [55–57]:

1. **Determination of the testing goals**, i.e., diagnosing the linguistic potential of an applicant who enrolled in a group for learning a foreign language from scratch.
2. **Selection of the educational material content.** For this purpose, an analysis of the cognitive, psychological, motivational, some intellectual and individual characteristics of a student's personality, needed for the successful mastering a foreign language was carried out.
3. **Compilation and assignment of test items.** **Test examination**—the compiled test is heterogeneous; the developed tasks are assembled into several blocks referring to various aspects of the applicant's linguistic and intellectual abilities; an independent expertise is carried out by the teachers of the Foreign Languages Department of the RTU MIREA to evaluate the qualitative characteristics of the test items in accordance with certain parameters.
4. **Approbation of test tasks**, i.e., after the design of the developed test tasks, a single multi-component test was offered to first-year students.
5. **Determination and calculation of quality indicators for the test items**, which implies testological investigation of both individual test items and the test as a whole, statistical processing of approbation results, establishing quantitative values of the characteristics of the tasks proposed and the definition of a normal distribution.
6. **Task rejection and preparation of the test**—tasks that caused severe difficulties for the majority of subjects or, on the contrary, were successfully and quickly passed by all the test takers, were replaced by other ones or excluded from the test.
7. **Second approbation and preparation of the final version of the test.**

The content of the developed test corresponds to the scheme of any closed-type test and includes:

- 1) instruction for test takers, which includes information about the number of questions and time to complete the test, score per each answer, etc.;
- 2) test questions;
- 3) correct answers (at the teacher's disposal);
- 4) evaluation parameters.

When developing the test, the authors sought to comply with the necessary requirements for the test, such as:

- 1) validity;
- 2) sufficient reliability;
- 3) compactness.

When writing the test, attention was paid to the possibility of conducting it under certain conditions. An important component in the content of the test was a system for objective evaluation in scoring, as well as considering the test's rationality and complexity.

The developed test is aimed at identifying the psychological and cognitive characteristics of a student, on which basis a model is then created in the individual trajectory of each student learning the foreign language from scratch [58].

The questionnaire consists of several blocks affecting various aspects of the linguistic personality and general learning competence of students. The included questions are aimed at defining:

- 1) level of development of language abilities;
- 2) responsiveness to a given practical task;
- 3) ability to analyze, synthesize, generalize and compare, establish logical relationships, select elements from a whole;
- 4) individual memory features required for language learning;
- 5) level of student's motivation in language learning.

The amount of time to complete the test has also to be taken into account.

The first block contains tasks aimed at identifying the ability to work with linguistic signs and concepts, for example, decipher anagrams, find synonyms and antonyms for the given words, and fill in gaps in words, in texts, and proverbs. Despite the fact that the test questions relate to the Russian language, the correctness of the answers to them demonstrates general linguistic abilities.

Here are some examples.

Fill in the missing words in the text:

For centuries, people have been sure that a magnet must be a metal. Even a quarter ... ago, hardly ... could assume that such ... can ... others ... They ... did not think about it—they do not exist in nature. Moreover, the idea to synthesize magnets ... be ... fantastic.

Ferromagnetic substances can ... into magnetically soft and magnetically hard ones, depending on how they ... or retain their magnetic properties.

A soft magnetic substance is the substance made of ferromagnetic material, which ... in that it loses its magnetic properties after magnetization and ... from the external magnetic field. Magnetically soft material requires pure iron and low carbon steel.

A hard magnetic substance is the substance ... of ferromagnetic material, which differs in that after ... it retains its magnetic properties for a long time after removal from the external magnetic field of the magnet. Hard magnetic materials are, for example, permanent magnets (Sm—samarium, Nd—neodymium).

Solve the anagrams and eliminate the extra word:

ALETB ECGINLI RHCIA DRAWOBRE

The second block contains tasks that test the lexical potential of a particular student, including his ability to put the right word in a certain context. These tasks include identifying an extra concept, selecting suitable words, hyponyms, and hypernyms, defining concepts, and describing polysemantic words. For example, a task like this:

Replace the dots with a word that would mean the same as the words outside the brackets:

Kind of sport (...) a container

Find the word that is different in meaning from the rest:

Laurel
Triumph
Vertex
Fiasco

Choose synonyms or antonyms for the words:

amorphous—reduced / defined / limited / hostile

Which series has a negative value?

- 1) hell, angry, illegal, ex-president
- 2) importance, antimony, invisible, reduction
- 3) encourage, uncertain, inversion, indifferent
- 4) countertops, irrigation, unpaid, demilitarize

Generalize and restrict concepts, i.e., find a more general concept (hypernym) and a more specific one (hyponym) for each given concept:

Adverb (part of speech; syntax; adverb measures; speech; verb)

In the following tasks, analyze the concepts, i.e., identify essential and random features:

Human anatomy (academic subject, science, boring lesson, complex science, studies a person, part of natural science)

The word 'garden' is given and the words in parentheses (plants, gardener, dog, fence, land). From the words in brackets, you need to choose words that denote the main features (without which a given concept cannot exist).

Find pairs of concepts that are in causal relationships with each other:

Ice formation, north, frost, weather, snow

For each concept, select such concepts that are in a functional relationship with it:

Drawing — ...; lake — ...; bee — ...; number — ...; task — ...

The third block presents in our opinion the most characteristic tasks to a certain extent reflecting some intellectual abilities of a subject. This included tasks for establishing logical connections, determining common semantic and lexical and grammatical characteristics between words, identifying errors, establishing language patterns, etc.

After analyzing the chain of letters, you need to find the missing letter:

W, T, P, M, I, ...

After analyzing the chain of letters, you need to insert the missing letter:

A	D	G
D	H	L
H	M	?

Insert the missing word:

BOOKS (KIDS) DIG

SIEGE (...) MAY

Which series consists of internationalism words?

- 1) revolution, sport, science, nation
- 2) electric, ferment, molecule, experiment
- 3) exhibition, atom, today, actor
- 4) insert, automobile, computer, word

Which of the following statements represents a point of view?

Life has a beginning and an end.

Cucumber is 90% water.

Artificial fibres worsen our lives.

The oceans cover two-thirds of the Earth's surface.

Which word does not refer to the other two?

think, see, hear

When developing questions regarding the definition of memory features, we relied on the methods available in psychological science.

In particular, simple introspective questions were asked, such as *Do you have a good memory? Do you memorize poems easily? After reading a one-page story, can you retell it in detail?*

We used the method of preliminary diagnosing short-term memory by the known method of ten words, as well as memorizing sentences related and unrelated to each other for 15–30 s.

Long-term memory was diagnosed using the same 10 words and sentences, but written by the subjects after 40–60 min of testing on other tasks and without repeating them.

The fifth block of questions concerned the applicants' motivation in foreign language learning. This block included introspective questions such as: *what is more important for you grades or knowledge?*, *Specific questions about the personal goal of language learning—I will need French: 1) for traveling and / or communicating with French-speaking friends;*

2) *in the future profession*; 3) *to be an educated person*; 4) *speak another language is just great*; 5) *I do not think I will need it, I have no choice, I have to study a foreign language at the university, otherwise I won't get a diploma*; 6) *Maybe I do not need French, but I just got tired of learning a foreign language that I had at school*; 7) *... I may not need it, but I really like French*; 8) *I need a foreign language because I prefer to watch foreign films and read books in the original*).

General questions were asked in a veiled form to affect the latent character traits, but relate to the motivational aspects of the subject's behaviour.

(In my behaviour at my future job, I need to follow the principles:

1) *I need to move up the career ladder*; 2) *Work is a forced necessity in order to live*; 3) *The most important thing is gaining credibility and recognition*; 4) *It is necessary to strive to comfortable environment*; 5) *It is important to find something exciting at work*; 6) *One should constantly improve in his work*).

The amount of time spent by a subject to complete the test is not a separate block, but is included in the study and evaluated using a scoring system. Here, it is hypothesized that the faster and more successfully a test is passed by the subject, the higher that subject's linguistic potential; the more time spent on passing the test when it was not very successful, the less the linguistic potential. There are cases of successful test completion by subjects who spent more time than was allocated. The explanations for such results can include natural slowness, search for information from extraneous sources due to an inability to do the test from memory, increased distraction and attention deficit.

While the listed factors do not contribute to the successful acquisition of a foreign language within the narrow framework of the curriculum at a technological university, they affect the number of points received.

There are examples of quick but unsuccessful completions of a test, which can be explained by a student's frivolous attitude to the matter at hand, which also does not contribute to the success of learning of a foreign language.

All five blocks of the test are combined into a single test presented to students. The amount of time spent on its execution is measured. Points are summed up. For a single entrance test, one can get up to 100 points: those who score 70–100 points go to the advanced subgroup of the experimental group, those who score 55–69 points go to the middle subgroup, and those who score less than 55 points join the third subgroup for weak students.

5. DISCUSSION

The predictive test under consideration was constructed by teachers of English and French for the preliminary diagnosis of the psychological and

cognitive potential of students who had just entered RTU MIREA (Institute of Information Technologies, Institute of Artificial Intelligence, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, Institute of Management Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics). This contingent of students was enrolled to study a foreign language from the starting level. At the time of admission to the university and the beginning of classes, teachers know neither the students' cognitive and psychological characteristics nor their linguistic abilities. For the successful language mastering, it is advisable to conduct preliminary diagnostic of a linguistic personality.

Prior to testing applicants, the final version of the developed test was tested on first-year students at the end of the first semester, when the level of their language potential becomes obvious.

The test was offered to 71 first-year students of RTU MIREA. 22 students received high scores, 32—average scores, while 17 were awarded low scores.

In order to process the results and determine the validity of the test for its further use among applicants, the differentiating power of test items was analyzed based on the correlation coefficient of each item with the final score obtained for the entire test. This coefficient, if it is more than 0.5, distinguishes between *advanced* and *lagging* students.

Having compared and analyzed the results of testing and the abilities of students demonstrated in foreign language classes, we can conclude that, in general, the diagnostic results were to be expected. However, there were some discrepancies—the number of students who studied well turned out to be slightly larger than the number of students who received higher test scores. This can be explained by the fact that applicants who studied the foreign language at the institute for two or three years had enrolled to study it from scratch. This contingent of students mastered the program faster and more successfully. This can be explained by the fact that students of non-linguistic universities are subject to different language proficiency requirements than those for students of language universities.

We would like to pay special attention to the block of the test concerning motivation. The test results showed that the motivation to learn a foreign language is often determined by pragmatic social factors: getting a higher education, obtaining good employment, etc. In such cases, a student's progress in learning activities at various stages of language learning will obviously be less successful.

Diagnostics of some intellectual abilities of RTU MIREA first-year students under testing shows that, in general, students have a normal and sometimes a reduced level of development of linguistic and general intelligence.

6. CONCLUSIONS

The created diagnostic technology for studying the general intellectual, linguistic, and motivational components of a first-year student's linguistic personality is aimed at predicting the success of foreign language learning activities, developing and implementing personalized adaptive training programs and using them in the educational process based on diagnostic results.

Statistical calculations were carried out with respect to the normal distribution, standard deviation, variance, degree of difficulty and correctness of tasks and answers to them, as well as correlations and homogeneity within individual test blocks, considering the reliability and validity of each block. The initial version of the test was adjusted in accordance with the results of calculations. Thus, the results of the conducted research support the belief that the final version of the test, aimed at preliminary diagnosis of linguistic abilities and motivation of applicants, was sufficiently accurate to reflect the characteristics of the linguistic personality in order to adequately distribute the students by rank. This means that the obtained test results can be used to personify foreign language teaching from starter level at a non-linguistic university.

Alongside the actual practice of conducting classes in such groups, the test results demonstrate that the language learning process is greatly facilitated by the presence of at least minimal existing knowledge, skills and abilities on the part of a student studying a foreign language from scratch. On this basis, we believe that when forming student groups, it is advisable to determine both the subject's score for predictive testing and the presence of at least minimal knowledge, abilities and skills in a chosen foreign language. If an applicant has certain knowledge, abilities and skills, but received an average score on the main test, he or she should, nevertheless, be taken in the strong student group. If a student receives a low score for testing, it is necessary to conduct diagnostics in the

corresponding foreign language in order to determine the level of his knowledge, abilities, and skills. This fact is important, since it is known from teaching experience that the level of foreign language proficiency remains quite low even after ten years of learning a foreign language, never mind a period of two-three years of language learning in a secondary school.

The results of the pre-diagnostic testing in the framework of the adaptive learning technologies at the very initial stage of teaching a foreign language to non-linguistic students support certain conclusions on the organization of further language learning. Although the results cannot be claimed to comprise an absolute criterion of effectiveness in mastering the foreign language, carrying out such assessments of the psychological and cognitive characteristics of future students in terms of their personal potential and motivation to learn a language will certainly contribute to the improved quality of foreign language teaching at a technological university starting from the first semester.

Authors' contributions

N.I. Chernova – justification for the study concept, research findings synthesis.

E.A. Ivanova – analysis and synthesis of the literature, drafting the manuscript.

N.B. Bogush – study of domestic and foreign publications on the issue, developing the experimental work algorithm.

N.V. Katakova – formulation of the conclusions, interpretation of the study results.

Вклад авторов

Н.И. Чернова – обоснование концепции исследования, обобщение результатов исследования.

Е.А. Иванова – анализ и обобщение данных литературы, оформление рукописи.

Н.Б. Богущ – исследование отечественных и зарубежных публикаций по проблеме, построение алгоритма опытно-экспериментальной работы.

Н.В. Катахова – формулировка выводов, интерпретация результатов исследования.

REFERENCES

1. Baeva I.V. Adaptive and integrative approach in foreign higher education. *Molodoi Uchenyi = Young Scientist*. 2020;13(303):207–210 (in Russ.). Available from URL: <https://moluch.ru/archive/303/68412/> (accessed February 28, 2021).
2. Vilkova K.A., Lebedev D.V. *Adaptivnoe obuchenie v vysshem obrazovanii: za i protiv (Adaptive Learning in Higher Education: Pros and Cons)*. Moscow: National Research University Higher School of Economics, Institute of Education; 2020. 36 p. (Series: Modern Analytics of Education. 2020;7(377)) (in Russ.).
3. Krechetov I.A., Romanenko V.V. Implementing the adaptive learning techniques. *Voprosy obrazovaniya = Educational Studies*. 2020;2:252–277 (in Russ.). <https://doi.org/10.17323/1814-9545-2020-2-252-277>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баева И.В. Адаптивно-интегративный подход в высшем иноязычном образовании. *Молодой ученый*. 2020;13(303):207–210. URL: <https://moluch.ru/archive/303/68412/> (дата обращения 28.02.2022).
2. Вилкова К.А., Лебедев Д.В. *Адаптивное обучение в высшем образовании: за и против*. М.: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Институт образования; 2020. 36 с. (Серия: Современная аналитика образования. 2020;7(377)).
3. Кречетов И.А., Романенко В.В. Реализация методов адаптивного обучения. *Вопросы образования = Educational Studies*. 2020;2:252–277. <https://doi.org/10.17323/1814-9545-2020-2-252-277>

4. Kudzh S.A., Golovanova N.B. On improving training mechanisms teaching staff and prospects for targeted learning in the interests of universities. *Russ. Technol. J.* 2020;8(4):112–128 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-112-128>
5. Savka O.G. Influence of the humanitarian environment on improving the quality of training of specialists in a technical university. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):95–101 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-95-101>
6. Kokkota V.A. *Lingvodidakticheskoe testirovanie (Linguodidactic testing)*. Moscow: Vysshaya shkola; 1989. 130 p. (in Russ.). ISBN 5-06-000219-5
7. Lerner I.Ya. Indicators of the system of educational and cognitive tasks. *Novye issledovaniya v pedagogicheskikh naukakh = New Research in Educational Sciences*. 1990;2(56):3–74 (in Russ.).
8. Ershova O.N. University linguo-didactic testing: Theoretical and methodological review. In: *Problemy upravleniya vsotsial'no-gumanitarnykh, ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemakh: materialy Vserossiiskoi (zaочноi) nauchno-prakticheskoi konferentsii (Problems of Management in Social, Humanitarian, Economic and Technical Systems: Materials of the All-Russian (Correspondence) Scientific and Practical Conference)*. In 2 v. Tver: TSTU; 2016. V. 2. P. 179–186 (in Russ.).
9. Rusinova E.A. Input control as a mechanism for managing pedagogical systems (based on the materials of the discipline “Foreign languages”). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Problemy vysshego obrazovaniya = Bulletin of the Voronezh State University. Series: Problems of Higher Education*. 2002;2:39–40 (in Russ.). Available from URL: <https://rucont.ru/efd/518533> (accessed December 19, 2021),
10. Avanesov V.S. The problem of connection of learning and testing. *Narodnoe obrazovanie = National Education*. 2016;(7–8):32–140 (in Russ.).
11. Batunova I.V. Testing as one of the most effective methods of control in students training process among students of non-linguistic specialties. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2017;05(59):8–10 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.59.005>
12. Mineeva O.A., Klopova Yu.V., Oladyshkina A.A. Test control in English in the non-linguistic high school. *Gumanitarnye nauchnye issledovaniya = Humanities Scientific Research*. 2017;2 (in Russ.). Available from URL: <https://human.snauka.ru/2017/02/20723> (accessed February 25, 2022).
13. Scrivener J. *Learning teaching*. Oxford: Macmillan; 2005. 418 p. ISBN 978-3190-125-760
14. Tatarnitseva S.N., Konoplyuk N.V. Entrance testing in English for students of non-linguistic specialties as a factor in improving the effectiveness of training. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pedagogika, psikhologiya = Science Vector of Togliatti State University. Series: Pedagogy, Psychology*. 2017;2:53–58 (in Russ.). <https://doi.org/10.18323/2221-5662-2017-2-53-58>
15. Mandrikova G.M. Lexical lacunarity as an indicator of the level of development of the language personality of the applicant. *Filosofiya obrazovaniya = Philosophy of Education*. 2005;3:237–247 (in Russ.).
16. Lukashevich E.V. Diagnostics of the state of the semantic level of the language ability of a modern student. *Estestvennaya pis'mennaya russkaya rech': issledovatel'skii i obrazovatel'nyi aspekty*. Ch. 1. *Problemy pis'mennoi rechi i razvitiya yazykovogo chuvstva*: Materialy konferentsii
4. Кудж С.А., Голованова Н.Б. О совершенствовании механизмов подготовки научно-педагогических кадров и перспективы целевого обучения в интересах вузов. *Russ. Technol. J.* 2020;8(4):112–128. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-112-128>
5. Савка О.Г. Влияние гуманитарной среды на повышение качества подготовки специалистов в техническом вузе. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):95–101. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-95-101>
6. Коккота В.А. *Лингводидактическое тестирование*. М.: Высшая школа; 1989. 130 с. ISBN 5-06-000219-5
7. Лернер И.Я. Показатели системы учебно-познавательных заданий. *Новые исследования в педагогических науках*. 1990;2(56):3–74.
8. Ершова О.Н. Лингводидактическое тестирование в вузе: теоретико-методологический обзор. *Проблемы управления в социально-гуманитарных, экономических и технических системах: материалы Всероссийской (заочной) научно-практической конференции*; под общ. ред. И.И. Павлова. В 2 ч. Тверь: ТГТУ; 2016. Ч. 2. С. 179–186.
9. Русинова Е.А. Входной контроль как механизм управления педагогическими системами (на материалах дисциплины «Иностранные языки»). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Проблемы высшего образования*. 2002;2:39–40. URL: <https://rucont.ru/efd/518533> (дата обращения 19.12.2021).
10. Аванесов В.С. Проблема соединения тестирования с обучением. *Народное образование*. 2016;(7–8):132–140.
11. Батунова И.В. Тестирование как один из наиболее эффективных методов контроля при обучении студентов неязыковых специальностей иностранному языку. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;05(59):8–10. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.59.005>
12. Минеева О.А., Клопова Ю.В., Оладышкина А.А. Тестовый контроль по дисциплине «Английский язык» в неязыковом вузе. *Гуманитарные научные исследования*. 2017;2. URL: <https://human.snauka.ru/2017/02/20723> (дата обращения 25.02.2022).
13. Scrivener J. *Learning teaching*. Oxford: Macmillan; 2005. 418 p. ISBN 978-3190-125-760
14. Татарничева С.Н., Коноплюк Н.В. Входное тестирование по английскому языку студентов неязыковых специальностей как фактор повышения эффективности обучения. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия: Педагогика, психология*. 2017;2:53–58. <https://doi.org/10.18323/2221-5662-2017-2-53-58>
15. Мандрикова Г.М. Лексическая лакуарность как показатель уровня развития языковой личности абитуриента. *Философия образования*. 2005;3:237–241.
16. Лукашевич Е.В. Диагностика состояния семантического уровня языковой способности современного школьника. *Естественная письменная русская речь: исследовательский и образовательный аспекты*. Ч. 1. *Проблемы письменной речи и развития языкового чувства*: Материалы конференции. Барнаул: Алтайский университет, 2002. С. 27–36.
17. Шимановская Л. А. *Лингвистические задачи для начинающих переводчиков*. Казань: КГТУ4; 2005. 47 с. URL: <https://rucont.ru/efd/292519> (дата обращения 12.04.2022).
18. Игна О.Н. Подходы к выявлению лингвистической одаренности и способностей к иностранным язы-

- (*Natural Written Russian Speech: Research and Educational Aspects. Part 1. Problems of Written Speech and the Development of Language Sense: Materials of the conference*). Barnaul: AltGU; 2002. P. 27–36 (in Russ.).
17. Shimanovskaya L.A. *Lingvisticheskie zadachi dlya nachinayushchikh perevodchikov (Linguistic Tasks for Beginner Translators)*. Kazan: KGTU; 2005. 47 p. (in Russ.). Available from URL: <https://rucont.ru/efd/292519> (accessed April 12, 2022).
 18. Igna O.N. Approaches to the identification of linguistic talent and ability to foreign languages. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta (Vestnik TGPU) = Tomsk State Pedagogical University Bulletin (TSPU Bulletin)*. 2013;3(131):115–119 (in Russ.). Available from URL: https://vestnik.tspu.edu.ru/files/vestnik/PDF/articles/igna_o_n_115_119_3_131_2013.pdf (accessed April 12, 2022).
 19. Shcherbatykh L.N. Theoretical and applied aspects of the identifying linguistically gifted pupils. *Nauka i shkola = Science and School*. 2013;4:36–39 (in Russ.).
 20. Yakovchenko E.V. Experimental study of the language ability formation (based on metaphor). In: *Aktual'nye problemy issledovaniya yazyka: teoriya, metodika, praktika obucheniya: Mezhevuzovskii sbornik nauchnykh trudov*. Kursk: Kursk State University; 2003. P. 60–61 (in Russ.).
 21. Gohlerner M.M., Eiger G.V. The psychological mechanism of the language sense. *Voprosy Psikhologii*. 1983;4:137–142 (in Russ.).
 22. Teplov B.M. Ability and talent. *Vestnik moskovskogo universiteta. Seriya 20: Pedagogicheskoe obrazovanie = Bulletin of Moscow University. Ser. 20: Pedagogical Education*. 2014;4:99–105 (in Russ.).
 23. Carroll J.B. Psychometric approaches to the study of language abilities. In: Fillmore C.J., Kempler D., Wang W.S.-Y. (Eds.). *Individual Differences in Language Ability and Language Behavior*. New York, San-Francisco, London: Academic Press; 1979. P. 13–32. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-255950-1.50008-1>
 24. Carroll J.B., Sapon S.M. *The modern language aptitude test (MLAT)*. San Antonio, TX: Psychological Corporation; 1959. 27 p.
 25. Cattell R.B., Eber H.W., Tatsuoka M.M. *Handbook of the Sixteen Personality Factor Questionnaire (16 PF)*. Champaign: Institute for Personality and Ability Testing; 1970. 388 p.
 26. Eysenck H.J. *Prover'ite svoi sposobnosti (Test your IQ)*. St. Petersburg: Lan', Soyuz; 1996. 158 p. (in Russ.).
 27. Patitina V.N. Diagnostics of abilities to foreign languages. *Vestnik Vostochno-Sibirskoi Otkrytoi Akademii*. 2013;7:12–16 (in Russ.). Available from URL: <http://vsoa.esrae.ru/pdf/2013/7/723.pdf> (accessed February 25, 2022).
 28. Pimsleur P.A. Language aptitude testing. In: Davies A. (Ed.). *Language Testing Symposium: A Psycholinguistic Approach*. London: Oxford University Press; 1968. P. 98–106.
 29. Siewert H. *Vash koeffitsient intellekta. Testy. (Your IQ. Tests)*: transl. from Germ. Moscow: Intereksper; 1997. 138 p. (in Russ.).
 30. Tunik E.E. *Test intellekta Amthauera. Analiz i interpretatsiya dannykh (Amthauer's intelligence test. data analysis and interpretation)*. St. Petersburg: Rech'; 2009. 96 p. (in Russ.).
 31. Kabardov M.K. *Yazykovye sposobnosti: psikhologiya, psikhofiziologiya, pedagogika (Language Abilities: Psychology, Psychophysiology, Pedagogy)*. Moscow: Smysl; 2013. 400 p. (in Russ.).
 32. Kormos J. New conceptualizations of language aptitude in second language attainment. In: Granena G., Long M. (Eds.). *Sensitive periods, language aptitude, and ultimate*
 33. Kormos J. New conceptualizations of language aptitude in second language attainment. In: Granena G., Long M. (Eds.). *Sensitive periods, language aptitude, and ultimate*
 34. Хохлова Л.А., Дерягина Л.Е. Влияние индивидуально-психологических особенностей на успешность в овладении иностранными языками. *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова*. 2010;18(1):124–130.
 35. кам. *Вестник Томского государственного педагогического университета (TSPU Bulletin)*. 2013;3(131): 115–119. URL: https://vestnik.tspu.edu.ru/files/vestnik/PDF/articles/igna_o_n_115_119_3_131_2013.pdf (дата обращения 12.04.2022).
 36. Щербатых Л.Н. Теоретические и прикладные аспекты выявления лингвистически одаренных школьников. *Наука и школа*. 2013;4:36–39.
 37. Яковченко Е.В. Экспериментальное исследование формирования языковой способности (на материале метафоры). *Актуальные проблемы исследования языка: теория, методика, практика обучения: Межевuzовский сборник научных трудов*. Курск: Изд-во Курск. гос. ун-та; 2003. С. 60–61.
 38. Гохлернер М.М., Ейгер Г.В. Психологический механизм чувства языка. *Вопросы психологии*. 1983;4: 137–142.
 39. Теплов Б.М. Способности и одаренность. *Вестник московского университета. Серия 20: Педагогическое образование*. 2014;4:99–105.
 40. Carroll J.B. Psychometric approaches to the study of language abilities. In: Fillmore C.J., Kempler D., Wang W.S.-Y. (Eds.). *Individual Differences in Language Ability and Language Behavior*. New York, San-Francisco, London: Academic Press; 1979. P. 13–32. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-255950-1.50008-1>
 41. Carroll J.B., Sapon S.M. *The modern language aptitude test (MLAT)*. San Antonio, TX: Psychological Corporation; 1959. 27 p.
 42. Cattell R.B., Eber H.W., Tatsuoka M.M. *Handbook of the Sixteen Personality Factor Questionnaire (16 PF)*. Champaign: Institute for Personality and Ability Testing; 1970. 388 p.
 43. Айзенк Г.Ю. *Проверьте свои способности*: пер. с англ. СПб.: Лань, Союз; 1996. 158 с.
 44. Патитина В.Н. Диагностика способностей к иностранным языкам. *Вестник Восточно-Сибирской открытой академии*. 2013;7:12–16. URL: <http://vsoa.esrae.ru/pdf/2013/7/723.pdf> (дата обращения 12.04.2022).
 45. Pimsleur P.A. Language aptitude testing. In: Davies A. (Ed.). *Language Testing Symposium: A Psycholinguistic Approach*. London: Oxford University Press; 1968. P. 98–106.
 46. Зиверт Х. *Ваш коэффициент интеллекта. Тесты*: пер. с нем. М.: АО Интерэксперт; 1997. 138 с.
 47. Туник Е.Е. *Тест интеллекта Амтхауэра. Анализ и интерпретация данных*. СПб.: Речь; 2009. 96 с.
 48. Кабардов М.К. *Языковые способности: психология, психофизиология, педагогика*. М.: Смысл; 2013. 400 с.
 49. Kormos J. New conceptualizations of language aptitude in second language attainment. In: Granena G., Long M. (Eds.). *Sensitive periods, language aptitude, and ultimate L2 attainment*. Amsterdam, Philadelphia: John Benjamins; 2013. P. 131–152. <https://doi.org/10.1075/llt.35.05kor>
 50. Chan E., Skehan P., Gong G. Working memory, phonemic coding ability and foreign language aptitude: Potential for construction of specific language aptitude tests — the case of Cantonese. *A Journal of English Language, Literature in English and Cultural Studies*. 2011;1(60):45–73. <https://doi.org/10.5007/2175-8026.2011n60p045>
 51. Хохлова Л.А., Дерягина Л.Е. Влияние индивидуально-психологических особенностей на успешность в овладении иностранными языками. *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова*. 2010;18(1):124–130.

- L2 attainment*. Amsterdam, Philadelphia: John Benjamins; 2013. P. 131–152. <https://doi.org/10.1075/llt.35.05kor>
33. Chan E., Skehan P., Gong G. Working memory, phonemic coding ability and foreign language aptitude: Potential for construction of specific language aptitude tests — the case of Cantonese. *A Journal of English Language, Literature in English and Cultural Studies*. 2011;1(60):45–73. <https://doi.org/10.5007/2175-8026.2011n60p045>
 34. Khokhlova L.A., Deryagina L.E. Influence of individual psychological peculiarities in successful languages mastering. *Rossiiskii mediko-biologicheskii vestnik imeni akademika I.P. Pavlova = I.P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2010;18(1):124–130 (in Russ.).
 35. Molchanov K.V. The dialectic study of the English language in the light of the work “Science of logic” by Hegel: New Dialectic Cognition, Dialectical Programming, and the Processes of Thinking. *Russ. Technol. J.* 2019;7(2):74–82 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-74-82>
 36. Voronin A.N., Kochkina O.M. Discursive and linguistic abilities in the structure of human intelligence. *Psikhologiya. Zhurnal Vysshei shkoly ekonomiki = Psychology. Journal of the Higher School of Economics*. 2008;5(2):124–132 (in Russ.).
 37. Vladimirova S.G. David Wechsler’s scale: Present and future in solving the problem of intelligence measurement. *Yaroslavskii pedagogicheskii vestnik = Yaroslavl Pedagogical Bulletin*. 2016;2:122–126 (in Russ.). Available from URL: http://vestnik.yspu.org/releases/2016_2/24.pdf (accessed February 25, 2022).
 38. Milman V.E. Method for studying the motivational sphere of personality. In: *Praktikum po psikhodiagnostike. Psikhodiagnostika motivatsii i samoregulyatsii (Workshop on Psychodiagnostics. Psychodiagnostics of Motivation and Self-regulation)*. Moscow: MSU; 1990. P. 23–43 (in Russ.).
 39. Pakulina S.A., Ketko S.M. Diagnostics method of learning motivation in pedagogical university students. *Psikhologicheskaya nauka i obrazovanie = Psychological Science and Education*. 2010;2(1) (in Russ.). Available from URL: https://psyjournals.ru/journals/psyedu/archive/2010_n1/psyedu_2010_n1_26655.pdf (accessed February 25, 2022).
 40. Rukhlova T.S. Some ways to determine the level of motivation of teenagers to learn a foreign language. *Psikhologiya i pedagogika: metodika i problemy prakticheskogo primeneniya = Psychology and Pedagogy: Methods and Problems of Practical Application*. 2012;28:315–317 (in Russ.).
 41. Emel’yanova N.A. *Motivatsiya ovladeniya inostrannym yazykom: struktura i formirovaniye (Motivation for mastering a foreign language: structure and formation)*. Nizhnii Novgorod: HSE; 2013. 145 p. (in Russ.).
 42. Ansimova O.K. Language ability: the theoretical foundations of learning. Science and education: modern trends. In: *Nauka i obrazovanie: sovremennye trendy: kollektivnaya monografiya*. Cheboksary: Interactive Plus; 2015. P. 7–29 (in Russ.). Available from URL: <https://interactive-plus.ru/e-articles/124/Action124-11081.pdf> (accessed December 19, 2021).
 43. Gavrilova E.V. Linguistic abilities and its cognitive determinants: contemporary research perspectives. *Sovremennaya zarubezhnaya psikhologiya = J. Modern Foreign Psychology*. 2015;4(4):30–38 (in Russ.). <https://doi.org/10.17759/jmfp.2015040405>
 44. Khokhlova L.A. Psychological approach to the investigation of foreign language abilities. *Sovremennye issledovaniya sotsial’nykh problem = Modern Research*
 45. Молчанов К.В. Диалектическое изучение английского языка в свете труда «Наука логики» Гегеля: новодиа- лектическое познание, диалектическое программи- рование и процессы мышления. *Russ. Technol. J.* 2019;7(2): 74–82. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-74-82>
 46. Воронин А.Н., Кочкина О.М. Дискурсивные и лингви- стические способности в структуре интеллекта чело- века. *Психология. Журнал Высшей школы экономики*. 2008;5(2):124–132.
 47. Владимиров С.Г. Шкала Давида Векслера: настоящее и будущее в решении проблемы измерения интел- лекта. *Ярославский педагогический вестник*. 2016;2: 122–126. URL: http://vestnik.yspu.org/releases/2016_2/24.pdf (дата обращения 25.02.2022).
 48. Мильман В.Э. Метод изучения мотивационной сферы личности. *Практикум по психодиагностике. Психодиагностика мотивации и саморегуляции*. М.: МГУ; 1990. С. 23–43.
 49. Пакулина С.А., Кетько С.М. Методика диагностики мотивации учения студентов педагогического вуза. *Психологическая наука и образование*. 2010;2(1). URL: https://psyjournals.ru/journals/psyedu/archive/2010_n1/psyedu_2010_n1_26655.pdf (дата обращения 25.02.2022).
 50. Рухлова Т.С. Некоторые способы определения уровня мотивации подростков к изучению иностранного язы- ка. *Психология и педагогика: методика и проблемы практического применения*. 2012;28:315–317.
 51. Емельянова Н.А. *Мотивация овладения иностран- ным языком: структура и формирование: моногра- фия*. Нижний Новгород: Издательский дом Высшей школы экономики; 2013. 145 с.
 52. Ансимова О.К. Языковая способность: теорети- ческие основы изучения. В кн.: *Наука и образо- вание: современные тренды: коллективная мо- нография*. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс»; 2015. С. 7–29. URL: <https://interactive-plus.ru/e-articles/124/Action124-11081.pdf> (дата обращения 19.12.2021).
 53. Гаврилова Е.В. Лингвистические способности и их когнитивные детерминанты: современные перспек- тивы исследований. *Современная зарубежная пси- хология*. 2015;4(4):30–38. <https://doi.org/10.17759/jmfp.2015040405>
 54. Хохлова Л.А. Психолого-диагностический подход к исследованию языковых способностей. *Современ- ные исследования социальных проблем*. 2012;1(09): 790–799. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/psihologo-diagnosticheskiy-podhod-k-issledovaniyu-yazykovyh-sposobnostey> (дата обращения 25.02.2023).
 55. Ушакова Т.Н. Двойственность природы речезыко- вой способности человека. *Психологический журнал*. 2004;25(2):5–16.
 56. Воронова Н.Г. Языковая способность в контек- сте психологии способностей. *Вестник Башкир- ского университета*. 2014;19(4):1407–1412. URL: http://bulletin-bsu.com/arch/files/2014/4/54_4670_Voronova_1407-1412.pdf (дата обращения 25.02.2022).
 57. Матюшкин А.М. Концепция творческой одаренности. *Вопросы психологии*. 1989;6:29–33. URL: <http://www.voppsy.ru/issues/1989/896/896029.htm> (дата обращения 25.02.2022).
 58. Хованская Е.А. Исследование языковой способности: психолого-педагогический и методические аспекты. *Вестник Кемеровского государственного универси- тета*. 2014;(3–1):184–188.

- of *Social Problems*. 2012;1(09):790–799 (in Russ.). Available from URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/psihologo-dagnosticheskiy-podhod-k-issledovaniyu-yazykovykh-sposobnostey> (accessed February 25, 2022).
45. Ushakova T.N. Duality of human language ability nature. *Psikhologicheskii zhurnal = Psychological Journal*. 2004;25(2):5–16 (in Russ.).
46. Voronova N.G. Language ability in the context of psychology of abilities. *Vestnik Bashkirskogo universiteta = Bulletin of Bashkir University*. 2014;19(4):1407–1412 (in Russ.). Available from URL: http://bulletin-bsu.com/arch/files/2014/4/54_4670_Voronova_1407-1412.pdf (accessed February 25, 2022).
47. Matyushkin A.M. Creative giftedness concept. *Voprosy Psihologii*. 1989;6:29–33 (in Russ.). Available from URL: <http://www.voppsy.ru/issues/1989/896/896029.htm> (accessed February 25, 2022).
48. Khovanskaya E.A. Study of the language ability: Psycho-pedagogical and methodological aspects. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Kemerovo State University*. 2014;(3–1):184–188 (in Russ.).
49. Kudinova I.M. Conceptual provisions and a model of linguistic gift assessment. *Chelovecheskii kapital = Human Capital*. 2020;3(135):149–155 (in Russ.).
50. Lukashevich E.V. *Teoriya yazykovogo razvitiya v kognitivno-diskursivnoi paradigme (Theory of Language Development in the Cognitive-Discursive Paradigm)*. Barnaul: Altai State University; 2006. 39 p. (in Russ.).
51. Lukashevich E.V. Language ability of the student in aspect of cognitive and communicative activity. In: *Russkii yazyk i kul'tura rechi kak distsiplina gosudarstvennykh obrazovatel'nykh standartov vysshego professional'nogo obrazovaniya: opyt, problemy, perspektivy (Russian language and culture of speech as a discipline of state educational standards of higher professional education: Experience, problems, prospects)*. Barnaul: Altai State University; 2003. P. 105–117 (in Russ.).
52. Mednick S.A. The remote associates test. *Journal of creative behavior*. 1968;2(3):213–214. <https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.1968.tb00104.x>
53. Bowden E.M., Jung-Beeman M. Normative data for 144 compound remote associate problems. *Behavior Research Methods, Instrumentation, and Computer*. 2003;35(4): 634–639. <https://doi.org/10.3758/BF03195543>
54. Khokhlova L.A. *Psikhofiziologicheskie svyazi v strukture inoyazychno-rechevykh sposobnostei (Psychophysiological connections in the structure of foreign language and speech abilities)*. St.-Petersburg: 7 STUDIYa RIK; 2014. 255 p. (in Russ.).
55. Chelyshkova M.B. *Teoriya i praktika konstruirovaniya pedagogicheskikh testov (Theory and practice of designing pedagogical tests)*. Moscow: Logos; 2002. 432 p. (in Russ.).
56. Maiorov A.N. *Teoriya i praktika sozdaniya testov dlya sistemy obrazovaniya (Theory and practice of creating tests for the education system)*. Moscow: Intellekt-Tsentr; 2002. 352 p. (in Russ.).
57. McNamara T. *Language testing*. Oxford: Oxford University Press; 2000. 140 p.
58. Martin F., Markant D. Adaptive learning modules. In: David M.E., Amey M.J. (Eds.). *The SAGE Encyclopedia of Higher Education*. London: Sage; 2020. P. 2–4. <http://dx.doi.org/10.4135/9781529714395.n31>
49. Кудинова И.М. Концептуальные положения и модель оценки лингвистической одаренности. *Человеческий капитал*. 2020;3(135):149–155.
50. Лукашевич Е.В. *Теория языкового развития в когнитивно-дискурсивной парадигме*. Барнаул: Издательство Алт. гос. университета; 2006. 39 с.
51. Лукашевич Е.В. Языковая способность студента в аспекте когнитивной и коммуникативной деятельности. *Русский язык и культура речи как дисциплина государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования: опыт, проблемы, перспективы*. Барнаул: Издательство Алт. гос. университета; 2003. Р. 105–117.
52. Mednick S.A. The remote associates test. *Journal of Creative Behavior*. 1968;2(3):213–214. <https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.1968.tb00104.x>
53. Bowden E.M., Jung-Beeman M. Normative data for 144 compound remote associate problems. *Behavior Research Methods, Instrumentation, and Computer*. 2003;35(4): 634–639. <https://doi.org/10.3758/BF03195543>
54. Хохлова Л.А. *Психофизиологические связи в структуре иноязычно-речевых способностей*. СПб.: Изд-во 7 СТУДИЯ РИК; 2014. 255 с.
55. Челышкова М.Б. *Теория и практика конструирования педагогических тестов*. М.: Логос; 2002. 432 с.
56. Майоров А.Н. *Теория и практика создания тестов для системы образования*. М.: Интеллект-Центр; 2002. 352 с.
57. McNamara T. *Language testing*. Oxford: Oxford University Press; 2000. 140 p.
58. Martin F., Markant D. Adaptive learning modules. In: David M.E., Amey M.J. (Eds.). *The SAGE Encyclopedia of Higher Education*. London: Sage; 2020. P. 2–4. <http://dx.doi.org/10.4135/9781529714395.n31>

About the authors

Nadezhda I. Chernova, Dr. Sci. (Pedagog.), Professor, Head of Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: chernova@mirea.ru. Scopus Author ID 57194042371, RSCI SPIN-code 7391-4040, <https://orcid.org/0000-0002-5685-9733>

Ekaterina A. Ivanova, Cand. Sci. (Philolog.), Assistant Professor, Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ivanova@mirea.ru. Scopus ID 57216646627, RSCI SPIN-code 8980-5591, <https://orcid.org/0000-0001-6891-4966>

Nadezhda B. Bogush, Cand. Sci. (Philolog.), Assistant Professor, Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bogouchn@mirea.ru. RSCI SPIN-code 9258-6672, <https://orcid.org/0000-0003-0332-1136>

Nataliya V. Katakhova, Cand. Sci. (Pedagog.), Associate Professor, Foreign Languages Department, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: katakhova@mirea.ru. Scopus Author ID 57204175929, RSCI SPIN-code 2552-5380, <https://orcid.org/0000-0002-9416-5011>

Об авторах

Чернова Надежда Ивановна, д.пед.н., профессор, заведующий кафедрой иностранных языков Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: chernova@mirea.ru. Scopus Author ID 57194042371, SPIN-код РИНЦ 7391-4040, <https://orcid.org/0000-0002-5685-9733>

Иванова Екатерина Александровна, к.филол.н, доцент, кафедра иностранных языков Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ivanova@mirea.ru. Scopus ID 57216646627, SPIN-код РИНЦ 8980-5591, <https://orcid.org/0000-0001-6891-4966>

Богущ Надежда Борисовна, к.филол.н, доцент, кафедра иностранных языков Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bogouchn@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 9258-6672, <https://orcid.org/0000-0003-0332-1136>

Катахова Наталия Владимировна, к.пед.н., доцент, кафедра иностранных языков Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: katakhova@mirea.ru. Scopus Author ID 57204175929, SPIN-код РИНЦ 2552-5380, <https://orcid.org/0000-0002-9416-5011>

The text was submitted by the authors in English

Edited for English language and spelling by Thomas A. Beavitt

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 31.05.2023 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 14.5.

Тираж 100 экз. Заказ № 305.

Подписку на печатную версию

Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.

Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.

Signed to print May 31, 2023.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 14.5.

100 copies. Order No. 305.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

