

Издательский дом «Юр-ВАК»

ISSN 2313-223X Print
ISSN 2587-9693 Online

COMPUTATIONAL NANOTECHNOLOGY

Том / Vol. 7, № 2, 2020 г.

г. Москва

**ЖУРНАЛ "COMPUTATIONAL NANOTECHNOLOGY"
(ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ)**

Научный рецензируемый журнал

ISSN 2313-223X Print
ISSN 2587-9693 Online

Том 7, № 2, 2020

Концепция журнала

Журнал Computational nanotechnology публикует рецензируемые научно-исследовательские работы по математическому моделированию процессов при создании наноструктурированных материалов и устройств. Разработка устройств наноэлектроники, нанопроцессов нуждается в привлечении квантовых вычислений, позволяющих проводить прогнозирование структуры вещества. Работа над нанопроцессами требует разработки квантовых компьютеров с принципиально новой архитектурой.

Основные разделы журнала

- Атомистическое моделирование – алгоритмы и методы
- Квантовые структуры и квантовое моделирование
- Биоинформатика, наномедицина и создание новых лекарств и их доставка в необходимые области нейронов
- Разработка архитектуры квантовых компьютеров на новых принципах, создание нового квантового программирования
- Разработки новых энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии
- Проблемы синтеза наноструктурированных материалов для создания новых сверхкомпактных схем для суперкомпьютеров
- Особенности разработки новых устройств на основе наноструктурированных материалов
- Разработка функциональных наноматериалов, на основе наночастиц и полимерных наноструктур
- Многомасштабное моделирование для управления и обработки информации
- Информационные системы создания функциональных наноматериалов

В соответствии с решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 29.05.2017 г. журнал «Computational nanotechnology» включен в **Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук** (<http://vak.ed.gov.ru/>) по следующим специальностям:

- 05.02.00 Машиностроение и машиноведение
- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление
- 05.14.00 Энергетика

Научное цитирование журнала: Российский Индекс Научного Цитирования (РИНЦ), East View Information Services, EBSCO, Ulrichsweb Global Periodicals Directory, CrossRef, MathNet.

Редакционная политика Издательского дома «Юр-ВАК» основывается на принципах, сформулированных в Декларации Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) «Этические принципы научных публикаций».

Рецензирование

Все статьи, публикуемые в журнале, проходят двойное рецензирование, а также проверяются программой Антиплагиат.

Главный научный редактор, председатель редакционной коллегии – *Попов Александр Михайлович*, доктор физико-математических наук, Заслуженный профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, действительный член РАЕН по отделению «Прикладная математика и управление», член Американского Физического общества, Лауреат Ломоносовской премии первой степени, г. Москва, Российская Федерация

Главный редактор, директор по маркетингу – *Ястребова Елена Владимировна*, канд. физ.-мат. наук, г. Москва, Российская Федерация

Компьютерная верстка номера – *Попова Н.А.*

Перевод текста – *Кожалиева А.Е.*

Дизайн обложки – *Иванов О.И.*

Журнал выпускается при участии: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан

Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Журнал издается с 2014 г. Свидетельство о регистрации Средства массовой информации: ПИ № ФС77-58561 от 14.07.2014
ISSN	ISSN 2313-223X Print ISSN 2587-9693 Online
Периодичность	4 раза в год
Учредитель и издатель	«Издательский дом «Юр-ВАК», г. Москва, Российская Федерация
Типография	ТИРАЖИ.RU г. Москва, ул. Правды, д. 24, стр. 5, тел. (495) 585-08-95
Сайт	http://www.urvak.ru
Адрес учредителя и издателя	121069, г. Москва, ул. Поварская, д. 23А/21
E-Mail	cn@urvak.ru
Телефон редакции	8-495-932-47-09, 8-916-393-18-27
Подписка и распространение	Журнал распространяется только по подписке. Индекс по каталогу агентства «Пресса России»: 70854 «Computational nanotechnology». Свободная цена. Агентство «Урал-Пресс», http://www.ural-press.ru
Тираж	500 экз. (1 завод 140 экз.) Формат 60 × 84 1/8. Печать офсетная. Бумага офсетная № 1. Печ. л. 5,75
Подписано к печати	30.06.2020

COMPUTATIONAL NANOTECHNOLOGY

Scientific peer-reviewed journal

ISSN 2313-223X Print

ISSN 2587-9693 Online

Vol. 7, No. 2, 2020

Journal concept

“Computational nanotechnology” journal publishes peer-reviewed scientific research works on mathematical modeling of processes while creating nanostructured materials and devices. The development of nanoelectronics devices, nanoproceses needs to involve quantum computing allowing prediction of the structure of matter. Work on nanoproceses requires the development of quantum computers with a fundamentally new architecture.

Subject heading list

- Atomistic Simulations – Algorithms and Methods
- Quantum and Molecular Computing, and Quantum Simulations
- Bioinformatics, nanomedicine and the creation of new drugs and their delivery to the necessary areas of neurons
- Development of the architecture of quantum computers based on new principles, creating new quantum programming
- Development of new energy units based on renewable kinds of energy
- Problems of synthesis of nanostructured materials to create new ultra-compact schemes for supercomputers
- Peculiarities of the development of devices based on nanostructured materials
- Development of functional nanomaterials based on nanoparticles and polymer nanostructures
- Multiscale modeling for information control and processing
- Information systems of development of functional nanomaterials

In accordance with the decision of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of Russia dated 29.05.2017, the journal “Computational Nanotechnology” is **included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate and doctor of sciences should be published** (<http://vak.ed.gov.ru/>).

The journal publishes peer-reviewed scientific articles on the following scientific specialties:

- 05.02.00 Mechanical engineering
- 05.13.00 Informatics, computer facilities and management
- 05.14.00 Energetics

Scientific indexing: Russian Science Citation Index (RSCI), East View Information Services, EBSCO, Ulrichsweb Global Periodicals Directory, CrossRef, MathNet.

The editorial policy of the “Yur-VAK” Publishing House is based on the principles formulated by the Association of Science Editors and Publishers (ASEP) Declaration “Ethical Principles of Scientific Publications”..

Peer review

All articles published in the journal undergo double peer review, and are also checked by the Anti-Plagiarism program.

Editor-in-chief – *Alexander M. Popov*, the Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor of the Lomonosov Moscow State University, the full member of the Russian Academy of Natural Sciences on department “Applied mathematics and management”, the member of the American Physical society, Moscow, Russian Federation

Deputy Editor-in-Chief – *Elena V. Yastrebova*, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Publishing House “Yur-VAK”, Moscow, Russian Federation

Computer layout of the number – *Popova N.A.*

Translator – *Kozhalieva A.E.*

Cover Design – *Ivanov O.I.*

The journal is published with the participation of: Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation), Materials Science Institute Khabarovsk scientific center of Far East office of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk, Russian Federation), Physical-technical Institute, “Physics-Sun”, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Tashkent, Uzbekistan)

Name of the authority that registered the publication	The publication is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor). Media Registration Certificate: PI № FS77-58561 dated 14.07.2014
ISSN	ISSN 2313-223X Print ISSN 2587-9693 Online
Publication Frequency	4 times a year
Founder	“Yur-VAK” Publishing House, Moscow, Russian Federation
Printing House	ТИРАЖИ.RU Moscow, Pravda str., 24, bld. 5, phone: (495) 585-08-95
Web-site	http://www.urvak.ru
Postal address	23A/21, Povarskaya str., Moscow, 121069, Russian Federation
E-Mail	cn@urvak.ru
Tel.	8-495-932-47-09, 8-916-393-18-27
Subscription	The journal is distributed by subscription only. Index according to the catalog of the «Pressa Russia»: 70854 «Computational nanotechnology». Free price
Circulation	500 copies (1 plant 140 copies.) Format 60 × 84 1/8. Offset printing. Offset paper No. 1 Pr. sh. 5,75
Signed for printing	30.06.2020

СОСТАВ РЕДКОЛЛЕГИИ И РЕДСОВЕТА ЖУРНАЛА “COMPUTATIONAL NANOTECHNOLOGY”

**Главный научный редактор,
председатель редакционной коллегии журнала**

Попов Александр Михайлович – д-р физ.-мат. наук, Заслуженный профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, действительный член РАЕН по отделению «Прикладная математика и управление», член Американского Физического общества, Лауреат Ломоносовской премии первой степени, г. Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абдикеев Нияз Мустякимович – д-р техн. наук, профессор, директор института промышленной политики и институционального развития, Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва, Российская Федерация

Андреев Валерий Филиппович – д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской Академии Наук, г. Москва, Российская Федерация

Афонин Андрей Николаевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Российская Федерация

Бестугин Александр Роальдович – д-р техн. наук, декан Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, заведующий кафедрой микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Воеводин Владимир Валентинович – д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корр РАН, зам. директора НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, зав. кафедрой суперкомпьютеров и квантовой информатики, г. Москва, Российская Федерация

Грушо Александр Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корр Академии криптографии РФ, ИПИ ФИЦ ИУ РАН, ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Днестровский Юрий Николаевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, академик РАЕН, ведущий научный сотрудник Национального Исследовательского центра «Курчатовский институт» (Институт ядерного синтеза), лауреат Государственной премии СССР (1981), лауреат Ломоносовской премии МГУ I-й степени (1976), лауреат Курчатовской премии РНЦ «Курчатовский институт» (2001), г. Москва, Российская Федерация

Елизаров Георгий Сергеевич – д-р техн. наук, директор ФГУП НИИ «Квант», лауреат Ленинской премии, г. Москва, Российская Федерация

Заводинский Виктор Григорьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской Академии Наук, г. Хабаровск, Российская Федерация

Крук Евгений Аврамович – д-р техн. наук, профессор, лауреат премии правительства Санкт-Петербурга, Заслуженный деятель науки РФ, директор Института информационных систем и защиты информации (СПбГУАП), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Левин Владимир Константинович – действительный член РАН, член Бюро Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, д-р техн. наук, профессор, научный руководитель ФГУП НИИ «Квант», лауреат Ленинской премии и Государственной премии, г. Москва, Российская Федерация

Лившиц Александр Валерьевич – д-р технических наук, профессор, проректор по научной работе Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

THE EDITORIAL BOARD AND THE EDITORIAL COUNCIL OF “COMPUTATIONAL NANOTECHNOLOGY” JOURNAL

Chairman of an editorial board

Alexander M. Popov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor of the Lomonosov Moscow State University, the full member of the Russian Academy of Natural Sciences on Department of Applied mathematics and management, the member of the American Physical Society, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Niyaz M. Abdikeev – Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute for Industrial Policy and Institutional Development of the Finance University the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

Valery F. Andreyev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), senior research associate of Institute of Problems of Safe Development of Nuclear Power of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Andrej N. Afonin – Dr. Sci. (Eng.), professor, Department of Materials Science and Nanotechnologies of the Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation

Alexander R. Bestugin – Dr. Sci. (Eng.), the dean of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, to the Head of the Department Mikro- and Nanotechnologies of Space Instrument Making, St. Petersburg, Russian Federation

Vladimir V. Voevodin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, deputy director of SRCC Lomonosov Moscow State University, chair of Department of Supercomputers and Quantum Informatics, Moscow, Russian Federation

Aleksandr A. Grusho – Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Javascript Cryptography, Federal Research Center of Informatics and Management of the Russian Academy of Sciences, professor of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Yury N. Dnestrovsky – Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, academician of the Russian Academy of Natural Sciences, leading researcher of the National Research Center “Kurchatov Institute” (Institute of Nuclear Synthesis), Moscow, Russian Federation

Georgiy S. Yelizarov – Dr. Sci. (Eng.), the director of Federal State Unitary Enterprise Scientific Research Institute “Kvant”, Moscow, Russian Federation

Victor G. Zavodinsky – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of Materials Science Institute Khabarovsk Scientific Center of Far East Office of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

Yuri G. Kabaldin – Dr. Sci. (Eng.), Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Evgeny A. Kruk – Dr. Sci. (Eng.), Professor, the Honored worker of science of the Russian Federation, the director of Institute of Information Systems and Information Security (St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation), St. Petersburg, Russian Federation

Vladimir K. Levin – Dr. Sci. (Eng.), the corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor, the deputy director of Federal State Unitary Enterprise Scientific Research Institute “Kvant”, Moscow, Russian Federation

Alexander V. Livshits – Dr. Sci. (Eng.), Professor, the vice rector for scientific work the Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Мельников Александр Владимирович – д-р физ.-мат. наук, заместитель руководителя отделения токамаков Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт», профессор кафедры физики плазмы Национального ядерного университета МИФИ, г. Москва, Российская Федерация

Молотков Сергей Николаевич – д-р физ.-мат. наук, член-корр. Академии Криптографии РФ, главный научный сотрудник Института физики твердого тела РАН, г. Москва, Российская Федерация

Неелов Игорь Михайлович – д-р физ.-мат. наук, зав. международной лабораторией моделирования биополимеров и биосистем института биоинженерии, профессор кафедры информационных технологий топливно-энергетического комплекса (ИТТЭК) Университета информационных технологий, механики и оптики ИТМО, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Никонов Владимир Глебович – д-р техн. наук, член президиума РАЕН, народный художник России, г. Москва, Российская Федерация

Суетин Николай Владиславович – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор по науке и исследованиям ИТ кластер Фонд «Сколково», г. Москва, Российская Федерация

Чубраева Лидия Игоревна – член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, зав. кафедрой «Информационные технологии в электромеханике и робототехнике» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП), директор НИИ инновационных технологий в электромеханике и электроэнергетике ГУАП, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Фетисов Владимир Андреевич – д-р техн. наук, профессор, директор института аэрокосмических приборов и систем ГУАП, зав. кафедрой системного анализа и логистики ГУАП, научный консультант комитета по транспорту ассоциации Северо-западных субъектов РФ и Законодательного собрания Санкт-Петербурга, Действительный член Международной академии информатизации, д-р Будапештского технического университета, д-р техн. наук АН Венгрии, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Шмелев Алексей Борисович – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник МГУ ВМК, Исполнительный директор группы компаний РСК (Российские суперкомпьютеры) КГАУ, г. Москва, Российская Федерация

РЕСПУБЛИКА УЗБЕКИСТАН

Муминов Рамизулла Абдуллаевич – д-р физ.-мат. наук, академик Академии наук Республики Узбекистан, Физикотехнический институт, Институт Материаловедения Научнопроизводственное объединение «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент

Рахимов Рустам Хакимович – д-р техн. наук, Институт Материаловедения Научно-производственное объединение «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент

Арипов Мерсаид – д-р физ.-мат. наук, профессор Факультета Информатики и Прикладного программирования Национального Университета Узбекистана, Заслуженный ученый Узбекистана, г. Ташкент

Имамов Эркин Зиннунович – д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор Ташкентского университета информационных технологий, г. Ташкент

Захидов Эркин Агзамович – д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор Ташкентского университета информационных технологий, Национальный координатор от Узбекистана программ научно-технического сотрудничества Европейского Союза, г. Ташкент

Раджапов Сали Аширович – д-р физ.-мат. наук, профессор, ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент

Alexander V. Melnikov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), the Deputy Head of the Tokamak Department, National Research Centre “Kurchatov Institute”, professor of the Plasma Physics Chair of the National Nuclear Research University MEPhI, Moscow, Russian Federation

Sergey N. Molotkov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Corresponding Member of the Cryptography Academy of the Russian Federation, chief researcher, Institute of Physics of Solid Body of RAS, Moscow, Russian Federation

Igor M. Neyelov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), chief of International Laboratory of Biopolymers and Biosystems Modeling, Bioengineering Institute, professor of the University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Moscow, Russian Federation

Vladimir G. Nikonov – Dr. Sci. (Eng.), member of the Natural Sciences Academy, People’s Artist of Russia, Moscow, Russian Federation

Nikolai V. Suetin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of Science and Research IT Cluster Fund “Skolkovo”, Moscow, Russian Federation

Lidiya I. Chubrayeva – Dr. Sci. (Eng.), the corresponding member of the Russian Academy of Sciences, the Department Chair “Information Technologies in Electromechanics and a Robotics” St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, the director of scientific research Institute of Innovative Technologies in Electromechanics and GUAP Power Industry, St. Petersburg, Russian Federation

Vladimir A. Fetisov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, the director of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation GUAP, the Department Chair of the System Analysis and GUAP Logistics, the scientific consultant of Committee for Transport of Association of Northwest Territorial Subjects of the Russian Federation and Legislative Assembly of St. Petersburg, the Full member of the International Academy of Informatization, the doctor of the Budapest Technical University, the Doctor of Engineering of Hungarian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Alexey B. Shmelyov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior research associate, Moscow State University, executive director RSK group of companies (the Russian supercomputers), Moscow, Russian Federation

REPUBLIC OF UZBEKISTAN

Ramizulla A. Muminov – Dr. Sci. (Eng.), Academic, Physical-Technical Institute, SPA “Physics-Sun”, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent

Rustam Kh. Rakhimov – Dr. Sci. (Eng.), head of “Physics-Sun”, Institute of Materials Science Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent

Mersaid Aripov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Informatics and Applied Programming Department, the National University of Uzbekistan, Honored scientist of Uzbekistan, Tashkent

Erkin Z. Imamov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Physics Department TUIT, professor of the Tashkent University of Information Technologies, Tashkent

Erkin A. Zahidov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Tashkent University of Information Technologies, the national coordinator of Uzbekistan programs scientific-technical cooperation with European Union

Sali A. Rajapov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Institute of Materials Science, “Physics- Sun”. Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

Нурсултанов Ерлан Даутбекович – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой «Математики и информатики» Казахстанского филиала МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Нур-Султан

США

Yueqiang Liu – д-р физ.-мат. наук, General Atomics, Сан-Диего, Калифорния

ГЕРМАНИЯ

Peter John – д-р техн. наук, докт. экон. наук, директор RPE InfraTherm GmbH, г. Лихтенберг

Хьюберт Йегер – д-р техн. наук, профессор, Институт легкой техники и технологии полимеров (ILK), Технический университет Дрездена, президент и главный исполнительный директор Carbon Composites, г. Дрезден

БЕЛЬГИЯ

Онгена Джозеф – д-р техн. наук, заместитель директора лаборатории физики плазмы Королевской военной академии Бельгии, партнер трехстороннего кластера Euregio (TEC), г. Брюссель

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Андронов Иван Николаевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой механики, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация

Быков Игорь Юрьевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой Машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация

Григораш Олег Владимирович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Российская Федерация

Емельянов Владимир Ильич – д-р физ.-мат. наук, профессор, физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Караев Алан Канаатович – д-р техн. наук, канд. физ.-мат. наук, профессор, гл.н.с. Финансового университета при Правительстве РФ, г. Москва, Российская Федерация

Кабалдин Юрий Георгиевич – д-р техн. наук, профессор Нижегородского государственного университета, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Оськин Сергей Владимирович – профессор, зав. кафедрой Электрические машины и электропривод Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Российская Федерация

Хапаев Михаил Михайлович – д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Чистяков Владимир Всеволодович – канд. техн. наук, профессор, главный редактор Издательского дома «Юр-ВАК»

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Erlan D. Nursultanov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, department chair “Mathematics and Information Scientists” Kazakhstan branch of Lomonosov Moscow State University, Nur-Sultan

USA

Yueqiang Liu – PhD (Phys.-Math.), Principle Scientist, General Atomics, San Diego, California

GERMANY

John Peter – Dr. Sci. (Eng.). Dr. Sci. (Oec.), RPE InfraTherm GmbH, Lichtenberg

Jäger Hubert – PhD, Professor, Institute of Lightweight Engineering and Polymer Technology (ILK), Technische Universität Dresden, President and chief executive officer Carbon Composites, Dresden

BELGIUM

Ongena Josef – PhD., President of Belgian Physical Society, Research Director of Plasma Physics Laboratory, Belgian Royal Military School, Brussels

EDITORIAL COUNCIL

Ivan N. Andronov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, department chair of Mechanics, the Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation

Igor Y. Bykov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, department chair of Cars and Equipment of the Oil and gas Industry, the Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation

Oleg V. Grigorash – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department Electrician, Heating Engineer and Renewables of Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

Vladimir I. Emelyanov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, Physics Department of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Alan K. Karaev – Doctor of Engineering, Professor, Chief researcher, Department of Public Finance, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

Sergey V. Oskin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, head of the department Electrical Machines and Electric Drive of Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

Mikhail M. Khapaev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, CMC Department of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Vladimir V. Chistyakov – Cand.Sci. (Eng.), Professor, Editor-in-chief of Publishing House Yur-VAK, Moscow, Russian Federation

СОДЕРЖАНИЕ

Computational nanotechnology

июнь 2020

92 страницы

Том 7, № 2

ISSN 2313-223X (print)
ISSN 2587-9693 (online)

ПЛАЗМЕННЫЕ, ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ, МИКРОВОЛНОВЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В.Ф. Андреев, д-р физ.-мат. наук,

А.М. Попов, д-р физ.-мат. наук, проф.

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫМ РАЗРЯДОМ
В ТОКАМАКЕ С ЖЕЛЕЗНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ 11

С.А. Раджапов, д-р физ.-мат. наук, *Р.Х. Рахимов*, д-р техн. наук,

Б.С. Раджапов, *М.А. Зуфаров*

РАСЧЕТ ЭТАПОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ППД-ДЕТЕКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЬЮТЕРНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И ИЗГОТОВЛЕНИЕ АЛЬФА РАДИОМЕТРА НА ИХ ОСНОВЕ 21

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Нгуен Хак Тунг, *А.А. Жиленков*, канд. техн. наук, доцент,

Данг Бинь Хак

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТИЖИМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ
ПРИ СИНТЕЗЕ РОБАСТНОГО ДИСКРЕТНОГО УПРАВЛЕНИЯ
С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ
В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ 29

В.Г. Никонов, д-р техн. наук, проф., *А.И. Зобов*

КОМБИНАТОРНЫЕ ПОЛИНОМИАЛЬНО ВЫЧИСЛИМЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДСТАНОВОК И ИХ СВОЙСТВА 34

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ НА НОВЫХ ПРИНЦИПАХ, СОЗДАНИЕ НОВОГО КВАНТОВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

В.В. Кишкан, *К.В. Сафонов*, д-р физ.-мат. наук, проф.

БЕСТУПИКОВЫЙ АЛГОРИТМ РАСШИРЕННОГО СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К ЯЗЫКАМ ПРОГРАММИРОВАНИЯ
ДЛЯ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ 42

Д.Е. Иванов, *А.С. Семенов*, канд. техн. наук

АЛГОРИТМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ
ТИПА «ЧЕРНАЯ ДЫРА» В ОРИЕНТИРОВАННОМ ГРАФЕ
ПРИ ПОМОЩИ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА 49

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Э.З. Имамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,

Р.А. Муминов, д-р физ.-мат. наук, акад., *Р.Х. Рахимов*, д-р техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
АТМОСФЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОЙСТВА СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ 58

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Р.М. Саидов, канд. техн. наук, *Р.Х. Рахимов*, д-р техн. наук,
Б.Д. угли Юсупов, *М.К.Б. угли Холдорев*

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУШКИ И ПРОКАЛКИ
СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ПЕЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КЕРАМИКИ (НФК)..... 64**

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

В.П. Еремин, *А.А. Больших*, *М.В. Шкурин*

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО ОБЛИКА
ТРАНСМИССИОННЫХ ВАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ
С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 71**

ПРИКЛАДНАЯ ЛИНГВИСТИКА

М.А. Черепнёв, д-р физ.-мат. наук, доцент, *А.Н. Швец*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЗАИМСТВОВАНИЯ ИНОСТРАННЫХ СЛОВ РУССКОГО ЯЗЫКА
КАК ОТРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССА ИСТОРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
РУССКИХ С ИНОСТРАНЦАМИ 79**

О ЖУРНАЛЕ.

**ПРАВИЛА РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ АВТОРСКИХ ЭКЗЕМПЛЯРОВ СТАТЕЙ,
ПОСТУПАЮЩИХ В ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ЮР-ВАК»
(В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «COMPUTATIONAL NANOTECHNOLOGY»).
ПРАВА И ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ. ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИЯМ.
ПОРЯДОК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ПУБЛИКАЦИЮ 90**

CONTENT

Computational nanotechnology

June 2020

92 pages

Vol. 7, No. 2

ISSN 2313-223X (print)
ISSN 2587-9693 (online)

PLASMA, HIGH-FREQUENCY, MICROWAVE AND LASER TECHNOLOGY

V.F. Andreev, A.M. Popov

INVERSE PROBLEMS OF PLASMA DISCHARGE CONTROL
IN A TOKAMAK WITH IRON CORE 11

S.A. Radzhapov, R.Kh. Rakhimov, B.S. Radzhapov, M.A. Zufarov

CALCULATION OF STAGES OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS
OF MANUFACTURE OF PPD DETECTORS
USING COMPUTER MATHEMATICAL MODELING
AND PRODUCTION OF ALPHA RADIOMETER ON THEIR BASIS 21

MULTISCALE MODELING FOR INFORMATION CONTROL AND PROCESSING

Nguyen Khac Tung, A.A. Zhilenkov, Dang Binh Khac

ENSURING REACH ABILITY AND STABILITY IN THE SYNTHESIS
OF ROBUST DISCRETE MODEL PREDICTIVE CONTROL
IN CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION 29

V.G. Nikonov, A.I. Zobov

COMBINATORIAL POLYNOMIALLY COMPUTABLE CHARACTERISTICS
OF SUBSTITUTIONS AND THEIR PROPERTIES 34

DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE OF QUANTUM COMPUTERS BASED ON NEW PRINCIPLES, CREATING NEW QUANTUM PROGRAMMING

V.V. Kishkan, K.V. Safonov

DEADLOCK ALGORITHM FOR ADVANCED SYNTACTICAL ANALYSIS
AND ITS APPLICATION TO PROGRAMMING LANGUAGES
FOR QUANTUM COMPUTERS 42

D.E. Ivanov, A.S. Semenov

TOPOLOGICAL APPROACH TO BLACKHOLES ANOMALY DETECTION
IN DIRECTED NETWORKS 49

DEVELOPMENT OF NEW ENERGY UNITS BASED ON RENEWABLE KINDS OF ENERGY

E.Z. Imamov, R.A. Muminov, R.Kh. Rakhimov

MATHEMATICAL MODELING OF OPTIMAL PARAMETERS
OF ATMOSPHERIC INFLUENCE ON THE PROPERTIES
OF THE SOLAR MODULE 58

DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL NANOMATERIALS BASED ON NANOPARTICLES AND POLYMER NANOSTRUCTURES

R.M. Saidov, R.Kh. Rakhimov, B.D.ugli Yusupov, M.K.B.ugli Kholdorov

EFFICIENCY OF DRYING AND CALCINING OF WELDING ELECTRODES IN FURNACES USING RADIATION FROM NANOSTRUCTURED FUNCTIONAL CERAMICS (NFC) 64

COMPOSITE MATERIALS AND CONSTRUCTION

V.P. Eremin, A.A. Bolshikh, M.V. Shkurin

PCOMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL METHOD FOR DETERMINING THE STRUCTURAL APPEARANCE OF TRANSMISSION SHAFTS MADE USING COMPOSITE MATERIALS 71

APPLIED LINGUISTICS

M.A. Cherepniov, A.N. Shvetz

MATHEMATICAL MODELING OF RESULTS OF BORROWING FOREIGN WORDS OF THE RUSSIAN LANGUAGES A REFLECTION OF THE PROCESS OF HISTORICAL INTERACTION BETWEEN RUSSIANS AND FOREIGNERS 79

ПЛАЗМЕННЫЕ, ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ, МИКРОВОЛНОВЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PLASMA, HIGH-FREQUENCY, MICROWAVE AND LASER TECHNOLOGY

05.13.18

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ
MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS
AND COMPLEX PROGRAMS**

05.14.03

**ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ,
ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ
И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ
NUCLEAR POWER STATIONS**

DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-11-20

Обратные задачи управления плазменным разрядом в токамаке с железным сердечником

В.Ф. Андреев^a ©, А.М. Попов^b ©

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

^a E-mail: vfandreev@gmail.com

^b E-mail: professorpopov@gmail.com

Аннотация. Разработана математическая модель для расчета сценария разряда и программного режима в установке токамак с учетом нелинейного поведения железного сердечника. Модель включает в себя решение двумерных задач равновесия, а эволюция интегральных параметров плазмы описывается уравнениями Кирхгофа. Предложен и реализован эффективный численный алгоритм, позволяющий решить некорректную обратную задачу равновесия, когда по заданной геометрии и параметрам плазмы находятся удерживающие токи, обеспечивающие это равновесие. На примере установки Т-15 рассчитаны равновесия и программный режим.

Ключевые слова: железный сердечник, термоядерная установка токамак, сценарий разряда, программный режим, обратная задача

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Андреев В.Ф., Попов А.М. Обратные задачи управления плазменным разрядом в токамаке с железным сердечником // Computational nanotechnology. 2020. Т. 7. № 2. С. 11–20. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-11-20

Inverse problems of plasma discharge control in a tokamak with iron core

V.F. Andreev^a ©, A.M. Popov^b ©

Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation

^a E-mail: vfandreev@gmail.com

^b E-mail: professorpopov@gmail.com

Abstract. A mathematical model has been developed to calculate the discharge scenario and program regime in the tokamak with taking into account the nonlinear behavior of the iron core. The model includes the solution of two-dimensional equilibrium problems, and the evolution of the integral parameters of the plasma is described by the Kirchhoff equations. An effective numerical algorithm is proposed that allows one to solve the incorrect inverse equilibrium problem when holding currents are found for a given geometry and plasma parameters to ensure this equilibrium. On the example of the tokamak T-15, the equilibria and the program regime are calculated.

Keywords: iron core, thermonuclear device токамак, discharge scenario, program regime, inverse problem

FOR CITATION: Andreev V.F., Popov A.M. Inverse problems of plasma discharge control in a tokamak with iron core. *Computational nanotechnology*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 11–20. (In Russ.) DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-11-20

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее значительные успехи в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу достигнуты на установках типа токамак. Новые строящиеся установки предназначены для работы с плазмой в термоядерных режимах. Эксперименты на них характеризуются высокой стоимостью и большой сложностью управления. Поэтому проектирование и строительство больших установок токамак с реакторными параметрами требует создание надежных систем управления плазменными процессами, основанных на хорошо проработанных математических моделях.

При разработке математических моделей выделяют два основных типа процессов, которые являются наиболее существенными для исследования свойств плазмы и управления ею.

Первый тип – МГД-процессы, которые развиваются с микросекундными временами (альфвеновскими). На этих временах изучается МГД-равновесие плазмы и исследуется возможность пассивной стабилизации ее неустойчивости.

Второй тип – диффузионные процессы, которые имеют длительность на 5–6 порядков больше альфвеновских времен. На этих временах происходит изменение интегральных параметров плазмы и, соответственно, анализируется эволюция равновесия. При этом стабилизация неустойчивости плазменного шнура должна осуществляться с помощью активных обратных связей.

В современных больших установках время существования плазмы много больше альфвеновских времен (разница превышает 7–8 порядков). Во время разряда удержание плазменного шнура осуществляется внешним магнитным полем, создаваемым тороидальными проводниками с токами.

Магнитная система токамака образуется трансформатором, первичной обмоткой которого служит индуктор, создающий переменный магнитный поток, который индуцирует ток в плазме. С целью предупреждения контакта горячей плазмы со стенками камеры формируется равновесие плазмы заданной формы поперечного сечения, для чего используется специальная система управляющих витков [1].

Для достижения реакторных параметров на токамаках необходимо было увеличить длительность разряда и полный ток в плазме, что потребовало значительного повышения начального магнитного потока и, соответственно, привело к использованию в установках ферромагнетика [2–6]. Таким образом, железный сердечник в токамаке является одним из ключевых элементов для дальнейшего прогресса в области управляемого термоядерного синтеза.

Однако наличие ферромагнетика значительно усложняет системы управления плазмой, так как в этом случае магнитные поля, удерживающие плазменный шнур в равновесии, нелинейным образом зависят как от тока плазмы, так и от токов во всех управляющих проводниках. При насыщении железа часть магнитного потока выталкивается из магнитопровода в вакуум и поля в области, занятой плазмой меняются, что приводит к необходимости учета ферромагнетика при нахождении равновесия [7–11]. В результате возникает сложная нелинейная задача управления плазменным шнуром в течение разряда.

Отметим, что в процессе разряда особенно важно обеспечить устойчивость плазмы, так как в токамаке с железным сердечником при любом смещении плазменного шнура появляется сила притяжения к магнитопроводу, стремящаяся увеличить данное смещение [12–14]. Эта проблема впервые

Андреев В.Ф., Попов А.М.

была сформулирована в [13], в которой было показано, что плазменный виток с током в присутствии ферромагнетика полностью неустойчив. Такая неустойчивость может быть стабилизирована только сочетанием пассивных и активных обратных связей [12; 14].

Таким образом, использование ферромагнетика в токамаке с одной стороны решает очень важную задачу – увеличение длительности разряда, однако, с другой стороны, существенно усложняет разработку систем управления и математических моделей, необходимых для расчета сценария разряда и программного режима работы. Так как в этом случае необходимо удерживать плазму, равновесие которой является неустойчивым, а модели становятся сильно нелинейными.

Многообразие процессов происходящих в плазме токамака, значительное различие в их характерных временах приводит к необходимости создания иерархии моделей для описания эволюции плазменного разряда, которые различаются по степени их подробности. На основе модели эволюции плазмы каждого уровня рассматриваются различные системы управления разрядом.

В первую очередь необходима разработка надежных математических моделей и численных алгоритмов для расчета сценария разряда и программного режима в токамаке с железным сердечником. При этом модели должны быть достаточно простыми для их реализации на компьютерах, непосредственно используемых для управления плазменным разрядом.

Следует отметить, что задача расчета сценария разряда и программного режима является обратной задачей. Как правило, сценарий разряда определяется временной зависимостью полного тока в плазме. Также существуют дополнительные условия, например, для задачи равновесия – плазма должна находиться в центре камеры и ее геометрия должна быть заданной. При этом требуется найти управляющие токи и напряжения в полоидальных витках, чтобы обеспечить равновесие плазмы в каждый момент времени для выбранного сценария разряда. Также существуют ограничения на токи в управляющих обмотках, а именно, они не должны превышать некоторых максимальных значений. Еще необходимо учесть, что напряжения, подаваемые на эти управляющие обмотки, ограничены мощностью источников питания.

Таким образом, возникает многопараметрическая обратная задача, которая требует как корректной ее постановки, так и выбора соответствующих методов регуляризации и численных алгоритмов их реализации.

В данной работе остановимся на постановке и решении обратной задачи равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником и формулировке на ее основе расчета сценария разряда и программного режима.

Работа построена следующим образом. В первом параграфе дается краткий обзор постановок двумерных задач равновесия в токамаке с ферромагнетиком. Во втором параграфе формулируется двумерная постановка задачи расчета равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником. В третьем параграфе обсуждаются сложности ее численного решения и методы регуляризации при решении обратной задачи. В четвертом параграфе приводятся примеры расчета нескольких равновесий для токамака T-15.

В пятом параграфе формулируется постановка задачи расчета сценария разряда и программного режима на основе решения двумерной задачи равновесия. Приводится пример расчета сценария разряда для токамака T-15.

В обсуждении рассматриваются основные проблемы и сложности данного подхода к решению задачи расчета сценария разряда и программного режима в токамаке с железным сердечником и предлагаются возможные пути их решения.

В конце статьи приводятся основные выводы работы.

1. ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ С ЖЕЛЕЗНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Модель временного развития разряда и расчет программного режима разрабатывается на следующей основе. Считается, что в каждый момент времени плазма находится в равновесии, а эволюция интегральных параметров описывается уравнениями Кирхгофа. То есть осуществляется разделение моделей по соответствующим временам: модель МГД-равновесия и модель диффузионных процессов. Поэтому, в первую очередь, необходимо решить задачу МГД-равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником.

Отметим, что задача о равновесии плазмы в установках токамак является трехмерной и ее решение представляет большие трудности, а также требует значительных затрат времени для расчета одного равновесия. В тоже время для расчета сценария разряда и программного режима требуется многократное решение задачи равновесия плазмы.

Поэтому возникает необходимость редукции трехмерной задачи равновесия к более простой двумерной задаче, что, во-первых, позволит значительно сократить время расчета одного равновесия, а, во-вторых, является регуляризацией исходной сложной трехмерной задачи, так как уменьшает размерность системы и количество определяемых параметров.

При отсутствии ферромагнетика достаточно хорошим приближением будет предположение, что плазма является аксиально-симметричной по большому радиусу токамака. Для аксиально-симметричной плазмы уравнение равновесия представляет собой двумерное квазилинейное эллиптическое уравнение Грэда–Шафранова [15].

Введем полоидальный магнитный поток Ψ , определяющий вектор магнитной индукции

$$\mathbf{B} = \mathbf{e}_\varphi \frac{I_B(\Psi)}{r} + \frac{1}{r} [\nabla \Psi, \mathbf{e}_\varphi], \quad (1)$$

где $I_B(\Psi) = rB_\varphi$ – функция, характеризующая распределение продольной компоненты индукции B_φ . Тогда уравнение Грэда–Шафранова, записанное для магнитного потока Ψ , имеет вид:

$$\Delta^* \Psi \equiv r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \begin{cases} j_\varphi(r, \Psi), & \Psi \geq \Psi_p(S_p); \\ -r \sum_{j=1}^N I_j \delta(r - r_j, z - z_j), & \Psi < \Psi_p(S_V), \end{cases} \quad (2)$$

где S_p – область плазмы; S_V – вакуумная область; $j_\varphi(r, \Psi)$ – распределение плотности продольного тока по магнитным поверхностям; r_j, z_j, I_j – координаты и сила тока в j -м управляющем проводнике.

К уравнению (2) необходимо добавить условие на границе области, которое формируется исходя из конкретной физической задачи. Тогда при заданных внешних токах решение задачи (2) дает равновесное положение плазмы.

Гораздо более сложной является задача о равновесии плазменного шнура, если в установке используется железный сердечник. Обычно сердечник токамака состоит из центрального цилиндрического ядра и отдельных магнитопроводов, поэтому задача о равновесии плазмы является существенно трехмерной. Рассмотрим несколько способов ее редукции к более простой двумерной аксиально-симметричной задаче.

Один из возможных способов редукции был развит в работе [12], в которой для потенциала магнитного поля ψ_μ в области S_μ , занятой железом, записывается уравнение:

$$\Delta_\mu^* \psi_\mu \equiv r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r\mu} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right], \quad (S_\mu), \quad (3)$$

где μ – магнитная проницаемость железа и

$$\mu = \mu(|\mathbf{B}|) = \mu \left(\sqrt{\left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)^2} \right).$$

На границе вакуум-железо ставится условие непрерывности тангенсальной составляющей магнитного поля. Данная двумерная задача позволяет рассчитать аксиально-симметричное равновесие плазмы в токамаке с железным сердечником.

В работе [7] равновесие плазмы в токамаке рассчитывалось как точное решение уравнения Грэда–Шафранова (2). При этом использовался вариационный подход к решению уравнения равновесия. Значение полоидального потока на границе плазмы ψ_p определялось касанием плазменного шнура диафрагмы

$$\psi_p = \max_{\Gamma_d} \psi,$$

где $\psi(r, z)$ – решение задачи; Γ_d – заданная линия, играющая роль диафрагмы.

Отметим, что внутри диафрагмы плазма могла принимать любую форму. Внешние токи подбирались из условия сшивки на границе плазмы тангенсальных компонент магнитного поля в среднеквадратичном смысле.

Однако использование вариационного подхода требует мощных вычислительных машин. Заложенный в модель принцип влияния диафрагмы на равновесие не подходит для других установок. Данная постановка задачи также не позволяет понять, как поведет себя плазменный шнур при изменении величины одного из полоидальных токов.

Другая модель была предложена в [8] для расчета равновесия плазмы в токамаке T-15. При численном моделировании двенадцать дискретно расположенных стоек магнитопровода аппроксимировались кольцевой оболочкой с несколько увеличенным радиусом, а плазменный шнур заменялся набором кольцевых нитей с токами. В [8; 9] расчет равновесия проводился следующим образом. При заданной форме плазмы, величине β_j – отношения газокINETического давления к давлению магнитного поля и величины управляющих токов разыскивается равновесие плазмы как точное решение уравнения Грэда–Шафранова.

Условие равновесия сводилось к постоянству функции полоидального магнитного поля $\psi = \text{const}$ вдоль границы плазмы в шести симметрично расположенных точках. В итерационном процессе подбора управляющих токов учитывалась заданная зависимость магнитной проницаемости от индукции и продольной плотности тока в плазме от функции потока.

Основным недостатком этой модели является то, что каждое равновесие определяется в результате серии расчетов прямых задач, осуществляемых в диалоговом режиме. Такой подбор токов при нахождении программного режима разряда очень трудоемок.

Другая модель расчета равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником предложена в наших работах [11; 16; 17]. Дискретные магнитопроводы заменялись более тонким, но распределенным непрерывно по углу φ магнитопроводом. В результате получается двумерная аксиально-симметричная модель. В [11; 16; 17] на основе метода сеток решается прямая задача расчета равновесия плазмы с учетом ферромагнетика для установки T-15. Предлагаемые итерационные алгоритмы вычисления удерживающих токов позволяют сформировать плазму с требуемыми параметрами в заданном месте.

Данная постановка задачи имеет значительные преимущества перед вышеизложенными моделями. Она позволяет получать плазму с произвольными заданными параметрами и учитывать влияние на равновесие плазменного шнура изменения удерживающих токов, а также рассчитывать получающиеся при этом равновесные конфигурации. Такой расчет осуществляется автоматически.

Перейдем к постановке задачи для расчета равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ С ЖЕЛЕЗНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

На рис. 1 изображена схема установки T-15 (все размеры указаны в метрах). Система удерживающих проводников состоит из 166 витков с токами I_j , которые соединены в четыре пары секций. Первая с суммарным током I_1 (36 витков) создает дипольную составляющую вертикального удерживающего поля. Вторая и третья пары с токами I_2 (32 витка), I_3 (44 витка) создают квадрупольную составляющую удерживающего поля. Четвертая I_4 (54 витка) представляет собой индуктор.

Введем цилиндрическую систему координат r, φ, z с осью z вдоль главной оси тора. Железо установки состоит из центрального ядра и 12-ти магнитопроводов, которые дискретно расположены по углу φ (рис. 1, б). Реальные размеры поперечного сечения установки показаны пунктиром на рис. 1, а. Железное ядро трансформатора не обладает аксиальной симметрией и задача о равновесии плазмы трехмерна. Используем двумерную модель, близкую по свойствам к трехмерной модели [11; 16; 17]. Прямоугольное сечение верхней балки заменим гиперболическим и уменьшим толщину внешней вертикальной стойки. В результате внешние дискретные магнитопроводы заменим более тонким, но распределенным непрерывно по углу φ магнитопроводом. Новая граница ферромагнетика выбирается из условия сохранения полного количества железа соответствующих сечений магнитопроводов (рис. 1, а).

Двумерная задача о равновесии плазмы в токамаке с железным сердечником формулируется следующим образом. Обозначим через S_p область сечения плазменного шнура, S_μ – сечение области железного сердечника плоскостью $\varphi = \text{const}$ с внешней границей Γ и внутренней границей γ , через S_v – область вакуума.

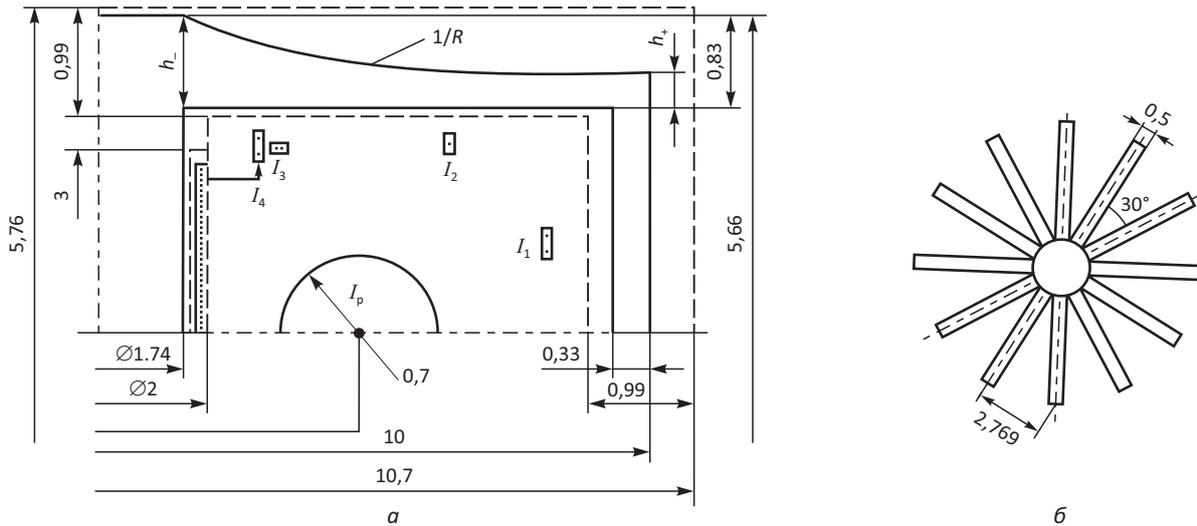


Рис. 1. Схема установки Т-15:

а – пунктир – реальные размеры железа, сплошная кривая – границы железа в двумерной задаче равновесия; б – вид сверху

Уравнение равновесия плазмы для функции ψ запишется следующим образом:

$$\Delta^* \psi = \begin{cases} -\frac{8\pi^2}{c} r j_\phi(r, \psi), & \psi \geq \psi_p, (S_p); \\ -\frac{8\pi^2}{c} r \sum_{j=1}^N I_j \delta(r-r_j, z-z_j), & \psi < \psi_p, (S_v), \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta_\mu^* \psi_\mu = 0, (S_\mu), \quad (5)$$

где

$$\Delta^* \psi \equiv r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}, \quad (6)$$

$$\Delta_\mu^* \psi_\mu \equiv r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r \mu(|\mathbf{B}|)} \frac{\partial \psi_\mu}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu(|\mathbf{B}|)} \frac{\partial \psi_\mu}{\partial z} \right].$$

Значение ψ_p соответствует границе плазмы Γ_p . На границе γ должны выполняться условия сшивки:

$$\psi_\mu|_\gamma = \psi|_\gamma, \quad \frac{1}{\mu(|\mathbf{B}|)} \cdot \frac{\partial \psi_\mu}{\partial n} \Big|_\gamma = \frac{\partial \psi}{\partial n} \Big|_\gamma. \quad (7)$$

Условие на внешней границе железа:

$$\psi|_\Gamma = 0. \quad (8)$$

Условие (8) означает, что пренебрегаем рассеянным магнитным полем из железа в вакуумной области вне границы Γ . В задаче (4)–(8) произвольная, вообще говоря, функция

$$j_\phi(r, \psi) = rA(\psi) + B(\psi)/r$$

определяет распределение плотности продольного тока по магнитным поверхностям. В (4) плотность тока $j_\phi(r, \psi)$ выбирается в виде:

$$j_\phi(r, \psi) = I_p [r\beta_j/N_p + (1-\beta_j)/rN_j] (\psi - \psi_p)^\alpha, \quad (9)$$

где I_p – полный ток в плазме; β_j – бета полоидальное; параметр α определяет профиль плотности тока в плазме; I_j , r_j , z_j – токи в полоидальных проводниках и их координаты; $\delta(r, z)$ – дельта функция Дирака; $\mu(|\mathbf{B}|)$ – магнитная проницаемость

железного сердечника; N_p и N_j – нормировочные множители.

$$N_p = \int_{S_p} r (\psi - \psi_p)^\alpha ds, \quad N_j = \int_{S_j} (\psi - \psi_p)^\alpha / r ds,$$

Таким образом, при заданных внешних токах I_j , токе плазмы I_p , β_j , параметре α и потенциале ψ_p на границе плазмы (4)–(9) дает равновесие плазмы в токамаке, если оно возможно при данных значениях.

Система (4)–(9) записана в виде, удобном для численного решения. Пусть заданы масштабы: L_0 – длины, $I_{p0} = 1$ МА – полного тока в плазме, $\mu_0 = 1$ – магнитной проницаемости. Тогда масштабы для других величин определяются однозначно:

$$P_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{4I_p}{cL_0} \right)^2, \quad H_0 = \frac{4\pi}{cL_0}, \quad B_0 = \mu_0 I_{p0} \frac{4\pi}{cL_0}, \quad \psi_0 = 2\pi B_0 L_0^2.$$

Перейдем к изложению численного метода решения задачи о равновесии плазмы в токамаке с железным сердечником.

3. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ С ЖЕЛЕЗНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Прежде чем описать численный метод решения задачи равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником обсудим основные проблемы и сложности, которые при этом возникают.

Первая проблема состоит в том, что при заданных управляющих токах и токе плазмы необходимо решить прямую задачу равновесия. Основная сложность здесь заключается в присутствии нелинейного элемента – ферромагнетика. Так небольшое изменение в решении ψ приводит к изменению магнитного поля \mathbf{B} , что в свою очередь, приводит к изменению магнитной проницаемости μ (сильно нелинейная функция магнитного поля), а, следовательно, и к силе притяжения плазмы к ферромагнетику и равновесие плазменного шнура начинает смещать из исходного положения. Это означает, что численное решение задачи является неустойчивым. Это означает, что для ее решения необходимо использовать регуляризацию и устойчивые численные алгоритмы.

Вторая проблема состоит в том, что для расчета сценария разряда и программного режима необходимо решить обратную задачу о равновесии плазмы в токамаке с железным сердечником. В этом случае заданы условия на равновесие (положение, геометрия и т.д.) и требуется найти управляющие токи в полоидальных обмотках, чтобы эти условия выполнялись. Некорректность состоит в том, что решение может быть неединственным. Поэтому необходимо сформулировать алгоритмы решения данной обратной задачи и методы регуляризации, которые позволили выделить единственное решение и обеспечить сходимость используемых численных алгоритмов.

Как уже отмечалось выше, плазменный шнур в присутствии ферромагнетика является неустойчивым. Это означает, что физическая неустойчивость должна проявляться и при решении задачи равновесия, то есть поставленная задача равновесия (4)–(9) является неустойчивой, т.е. некорректной.

На практике неустойчивость плазмы в микросекундном диапазоне обычно стабилизируется или проводящим кожухом или специальными пассивными обмотками, в которых при смещении плазменного шнура наводится ток, стабилизирующий это смещение. Если неустойчивость в микросекундном диапазоне стабилизирована, то в дальнейшем развивается неустойчивость плазмы в миллисекундном диапазоне, которая должна стабилизироваться системой активных обратных связей.

Отметим, что стабилизации неустойчивости плазмы – это временная задача, так как управляющие токи корректируются по результатам смещения плазмы в предыдущий момент времени. Однако в постановке задачи равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником (4)–(9) нет времени. Это означает, что если управляющие равновесные токи были выбраны неточно, то задача равновесия может не иметь устойчивого решения, так как в постановке задачи нет обратных связей для стабилизации неустойчивости.

Таким образом, необходима разработка специальных методов регуляризации исходной некорректной задачи равновесия (4)–(9), чтобы обеспечить устойчивое решение задачи равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником в фиксированный момент времени.

Для численного решения нелинейной задачи (4)–(9) был разработан метод «сшивки», который заключается в следующем. Вначале проведем редукцию уравнения (4), т.е. будем искать решение ψ в виде суммы:

$$\psi = \psi_1 + \psi_{st}, \quad (10)$$

где ψ_{st} – потенциал поля стационарных управляющих проводников с токами, который определяемый формулой:

$$\psi_{st} = \sum_{j=1}^N I^j G(r, z, r_j, z_j). \quad (11)$$

Здесь через $G(r, z, r_j, z_j)$ обозначена функция Грина:

$$G(r, z, r_j, z_j) = \frac{2\sqrt{rr_j}}{k} [(2-k^2)K(k) - 2E(k)]; \quad (12)$$

$$k^2 = \frac{4rr_j}{(r+r_j)^2 + (z-z_j)^2}, \quad K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}}, \quad (13)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta} d\theta.$$

где $K(k)$ и $E(k)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода.

На каждой итерации с номером s решаются две первые краевые задачи. Задача для уравнения (4) в области S_p и S_γ :

$$\Delta^* \psi_1^s = - \begin{cases} F(r, \psi_1^s + \psi_{st}), & \psi_1^s > \psi_p - \psi_{st}; \\ 0, & \psi_1^s < \psi_p - \psi_{st}. \end{cases} \quad (14)$$

С граничным условием

$$\psi_1^s|_\gamma = \varphi^s - \psi_{st} \quad (15)$$

и задача для уравнения в железе (область S_μ)

$$\Delta_\mu^* \psi_\mu^s = 0 \quad (16)$$

с граничным условием

$$\psi_\mu^s|_\gamma = \varphi^s. \quad (17)$$

Решения ψ_1^s и ψ_μ^s изменяются в процессе итераций в зависимости от граничной функции φ^s , которая определяется из условия:

$$\frac{\varphi^{s+1} - \varphi^s}{\tau_s} = -r \left[\frac{1}{\mu(|\mathbf{B}|^s)} \frac{\partial \varphi_\mu^s}{\partial n} - \frac{\partial (\psi_1^s + \psi_{st})}{\partial n} \right]. \quad (18)$$

Условие (18) имеет физический смысл введения искусственной конечной проводимости границы γ в процессе итераций (тонкий кожух конечной проводимости), а правая часть есть фиктивный поверхностный ток, τ_s^{-1} – пропорциональна проводимости границы. Проведение итераций по формуле (18) приводит к диссипации фиктивного поверхностного тока.

Таким образом, была проведена следующая редукция (регуляризация) исходной обратной задачи о равновесии плазмы в токамаке с железным сердечником и, соответственно, обеспечена устойчивость численного алгоритма.

Во-первых, задачу представили в виде двух независимых задач, каждая из которых решается отдельно в своей области и является устойчивой. При этом внутренние итерации для каждой из задач идут при фиксированных внешних условиях, как от железа, так и от управляющих проводников.

Во-вторых, связь между решениями этих двух задач выделили отдельно, сформулировав ее в виде некоторого физического условия – введение «кожуха» конечной проводимости на границе между областями.

В-третьих, обеспечили устойчивое численное решение задачи в области плазмы, так как равновесие плазмы в проводящем кожухе является устойчивым.

Таким образом, эллиптическую задачу (4)–(9) заменили на квази-временную задачу равновесия (10)–(18), в которой при смещении плазменного шнура в «кожухе» наводится стабилизирующий данное смещение ток. То есть физическое условие для устойчивости плазмы, трансформировали в математическое условие. Что, фактически, является методом регуляризации, который позволил обеспечить устойчивость задачи равновесия плазмы в микросекундном диапазоне.

Численные расчеты по алгоритму (14)–(18) показывают сходимость итераций, т.е. сходимость последовательности $\{\psi_1^s + \psi_{st}\}$ к ψ и последовательности $\{\psi_\mu^s\}$ к ψ_μ – соответствующим решениям задач при определенных ограничениях на итерационный параметр τ_s . Для того чтобы производные в формуле (18) сжились с точностью $O(h^2)$ (h – размер шага сетки) τ_s требуется выбирать по формуле:

$$\tau_s = - \frac{2h\mu}{3(1+\mu)}.$$

Андреев В.Ф., Попов А.М.

Если $3 < \mu < 1400$, то $0,1 < |\tau_s| < 0,133$. Методические расчеты показали, что τ_s можно увеличить до 0.36.

Для решения каждой из задач (14)–(15) и (16)–(17) использовалась продольно-поперечная схема с дополнительными итерационными алгоритмами позволяющими выделить единственное решение (14)–(15), а именно, нормировка на полный ток плазмы (9).

Таким образом, решение задачи (14)–(17) проводится с помощью трех итерационных процессов. Два независимых внутренних процесса: первый для задачи (14)–(15), второй для задачи (16)–(17), а третий – внешний итерационный процесс для расчета граничного условия с использованием формулы (18).

Одним из тестов правильности решения задачи (14)–(17) являлось вычисление токов по численно найденному решению с помощью интегральной формы уравнений Максвелла:

$$\oint_L \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu} d\mathbf{l} \right) = \frac{4\pi}{c} \sum_j I_j,$$

которое в расчетах выполнялось с точностью не более 3%.

Для численного нахождения равновесия плазмы с требуемыми параметрами используется алгоритм, который заключается в изменении удерживающих токов в процессе итераций. В этом случае решается обратная задача, когда требуется найти внешние управляющие токи, чтобы равновесие имело определенные физические параметры и заданную геометрию.

Численный алгоритм заключается в следующем: если в ходе итераций центр плазмы смещается с заданного места, то ток в проводнике, отвечающем за положение плазменного шнура по горизонтали, изменяется. Аналогично происходит подстройка токов в обмотках, отвечающих за эллиптичность и потенциал на границе плазмы. При этом потенциал на границе плазмы находится из условия $\psi_p = \max(\psi_L, \psi_R)$, где ψ_L – потенциал на заданной левой границе плазмы, а ψ_R – на правой.

Пусть ΔI_k^s – изменение силы тока в k -м управляющем проводнике, которое обусловлено сдвигом магнитной оси по r . Тогда формулу обратной связи будем использовать в виде:

$$I_k^{s+1} = I_k^s + C_1 (R^s - R^0) + C_2 (R^s - R^{s-1}). \quad (19)$$

Здесь R_0 – желаемое положение магнитной оси по r ; R^s – ее положение на s -й итерации. Значения констант C_1 и C_2 выбираются из условия сходимости итерационного процесса. Аналогичное условие обратной связи используется для изменения ψ_p при итерациях с целью получения нужного диаметра плазмы или для изменения управляющих токов с целью получения плазмы нужной эллиптичности.

Этот алгоритм, фактически, является аналогом активной обратной связи, которая необходима для стабилизации плазмы в миллисекундном диапазоне. В результате такого выбора управляющих токов получаем устойчивое решение задачи равновесия.

Таким образом, проведенная регуляризация исходной задачи равновесия, а также разработанные методы и численные алгоритмы ее решения позволили решить задачу о равновесии плазмы в токамаке с железным сердечником.

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-15

Используемый в установке Т-15 ферромагнетик имеет магнитную проницаемость μ , которая аппроксимируется кусочно-линейными функциями и изменяется в диапазоне:

при полностью ненасыщенном железе $\mu = 1400$, а при насыщенном $\mu = 3$ (сталь Э-330, Т-15):

$$\mu(|\mathbf{B}|) = \exp \begin{cases} m_1, & |\mathbf{B}| > B_s; \\ \frac{(m_2 - m_1)|\mathbf{B}| + m_1 B_H - m_2 B_s}{B_H - B_s}, & B_H < |\mathbf{B}| < B_s; \\ m_2, & |\mathbf{B}| < B_H. \end{cases} \quad (20)$$

Здесь $m_1 = \ln \mu_1$; $m_2 = \ln \mu_2$; $\mu_1 = 3$ ($m_1 = 1,1$); $\mu_2 = 1400$ ($m_2 = 7,2$); $B_s = 2,6$ Тл; $B_H = 1,2$ Тл.

На рис. 2 приведены зависимости магнитной проницаемости μ в логарифмическом масштабе от индукции B для стали марки Э-330.

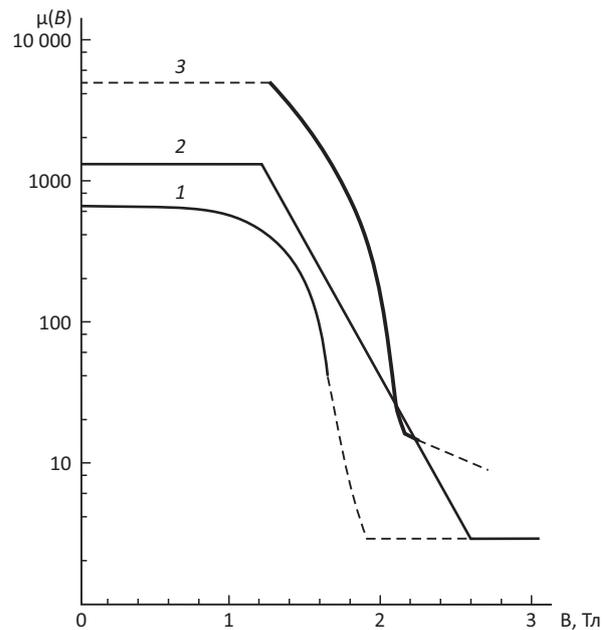


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости $\mu(B)$ в логарифмическом масштабе от индукции B для стали марки Э-330:

1 – измерения на макете; 2 – характеристика, даваемая заводом-изготовителем; 3 – зависимость, использованная в работе [9]

Приведем расчеты равновесия для установки Т-15, у которой большой радиус плазмы $R_0 = 2,43$ м, малый радиус $a = 0,7$ м, максимальный ток $I_p = 1,4$ МА.

На рис. 3 показаны линии уровня $\psi = const$ в равновесии на начальной стадии подъема тока в плазме. Ток в индукторе еще велик и совпадает по направлению с током плазмы: $I_p = 0,28$ МА, $I_1 = -0,0877$ МА, $I_2 = -0,04$ МА, $I_3 = -0,285$ МА, $I_4 = 1,4$ МА, $\beta_j = 0,06$. Расчет соответствует квазипараболическому распределению тока в плазме (9). Железный сердечник трансформатора находится в насыщении $\mu \sim 5$, а внешняя часть магнитопровода является полностью ненасыщенной с $\mu \sim 1400$, поэтому магнитное состояние ферромагнетика определяется в основном полем индуктора. На рисунке хорошо видно, что магнитные поля выходят из области ненасыщенного железа и попадают в область плазмы и тем самым влияют на ее равновесие.

На рис. 4 приведены линии уровня $\psi = const$ в равновесии на стационарной стадии разряда, когда $I_p = 1,4$ МА, $I_1 = -0,45$ МА, $I_2 = -0,343$ МА, $I_3 = -0,3$ МА, $I_4 = -0,5$ МА, $\beta_j = 0,3$. В этом случае, так как сумма всех токов приблизительно равна нулю, внешняя часть магнитопровода

по-прежнему является ненасыщенной $\mu \sim 1400$. Также на рисунке видно, как магнитные поля выходят из области ненасыщенной части железного сердечника и попадают в область плазмы и, соответственно, влияют на ее равновесие.

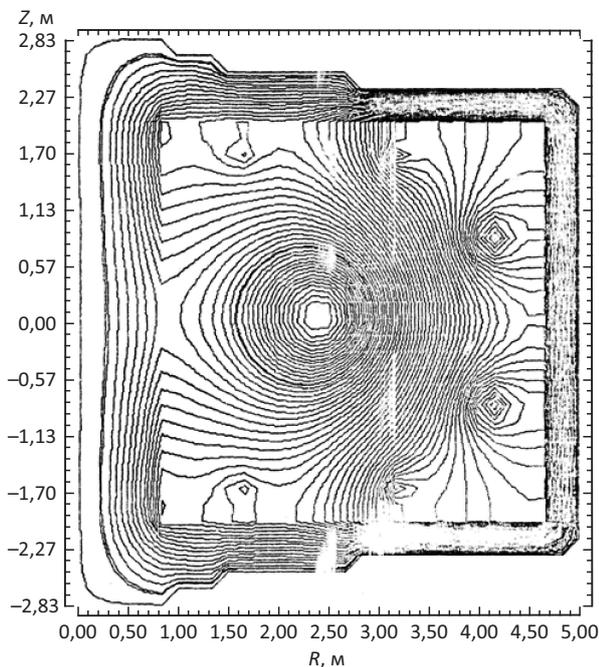


Рис. 3. Линии уровня $\psi = \text{const}$ в равновесии на стадии подъема тока в плазме при $I_p = 0,28$ MA, $I_1 = -0,087$ MA, $I_2 = -0,04$ MA, $I_3 = -0,285$ MA, $I_4 = 1,4$ MA, $\beta_j = 0,06$

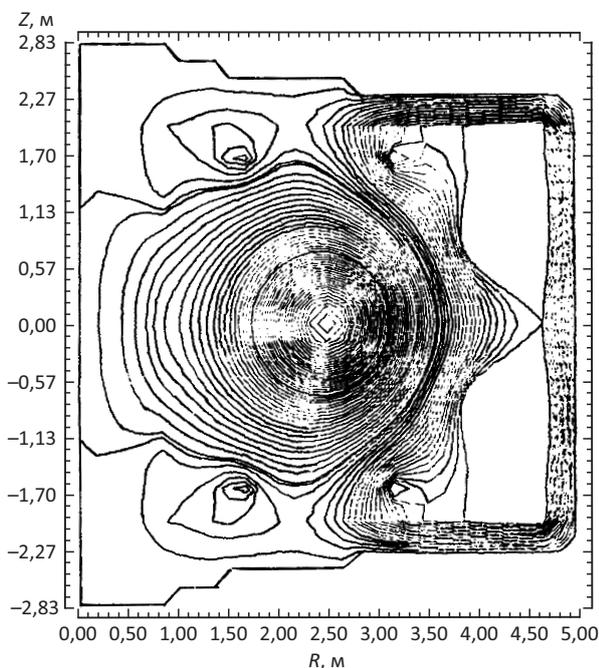


Рис. 4. Линии уровня $\psi = \text{const}$ в равновесии на стационарной стадии разряда, когда $I_p = 1,4$ MA, $I_1 = -0,45$ MA, $I_2 = -0,343$ MA, $I_3 = -0,30$ MA, $I_4 = -0,40$ MA, $\beta_j = 0,3$

Таким образом, решение задачи о равновесии плазмы в токамаке с железным сердечником позволяет перейти к формулировке модели расчета сценария разряда и программного режима.

5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА СЦЕНАРИЯ РАЗРЯДА В ТОКАМАКЕ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ РАВНОВЕСИЯ

Для расчета сценария разряда и программного режима необходимо иметь последовательность равновесных плазменных конфигураций. Очевидно, что эти равновесия должны быть связаны между собой. Для взаимосвязи равновесий между собой используются уравнения Кирхгофа, записанные для всех токов, в том числе и для плазменного витка:

$$\frac{d}{dt}(LI) + RI = \epsilon, \quad (21)$$

где L – матрица коэффициентов взаимной индуктивности всех проводников и плазмы; R – активное сопротивление; ϵ – внешнее напряжение, приложенное к каждой цепи (для плазмы $\epsilon_p \equiv 0$).

В уравнение для плазменного шнура (21) входит сопротивление плазмы R_p , которое определяется процессами переноса в плазме. Если уравнение Кирхгофа для плазмы получено из уравнений Максвелла и закона Фарадея усреднением по внутренним распределениям, то для вычисления R_p необходимо использовать более высокие моменты – диффузионные уравнения для электронной и ионной температуры $T_{e,i}$, полоидального магнитного поля B , плотности тока в плазме j_ϕ , плотности электронов и ионов $n_{e,i}$ и т.д. Система этих уравнений образует транспортную модель для описания эволюции распределенных характеристик плазмы [18], решение которой определяет интегральные параметры плазменного шнура, в том числе и $R_p(t)$.

Таким образом, согласованная модель временного развития разряда в токамаке должна включать в себя двумерную задачу равновесия, систему уравнений Кирхгофа и транспортную модель. В результате получается достаточно громоздкая и сложная модель, непригодная для разработки на ее основе задач управления плазменным разрядом.

Соответственно, для того чтобы построить модель расчета сценария разряда, которую можно использовать на практике, необходимо провести редукцию полной модели. Редукция состоит в уменьшении размерности системы, а именно, переход от анализа эволюции распределенных параметров плазмы к интегральным ее параметрам, что является регуляризацией задачи.

Сформулируем модель расчета сценария разряда и программного режима, в которой редукция осуществлена следующим образом. В постановке задачи будем считать, что все интегральные параметры плазмы, которые находятся из уравнений транспортной модели, являются известными и заданными функциями времени. То есть не будем решать транспортную модель для определения интегральных параметров плазмы, а задавать их из анализа экспериментальных данных.

Пусть заданы, как функция времени: полный ток плазмы $I_p(t)$, напряжение на обходе плазменного шнура $U_p(t)$, параметр $\beta_j(t)$ и внутренняя индуктивность $l_i(t)$. Тогда под сценарием разряда будем понимать токи в управляющих проводниках и соответствующие им источники напряжения для некоторой временной последовательности точек

$$t_1, t_2, \dots, t_K, \quad t_0 < t < T (K \approx 10-20), \quad (22)$$

которые обеспечивают равновесие и заданную форму плазмы.

Андреев В.Ф., Попов А.М.

Один из возможных алгоритмов расчета сценария разряда по 2D-модели равновесия плазмы заключается в следующем:

1) Согласно уравнению

$$d\Phi_p / dt = -U_p, \quad t > t_0, \quad \Phi_p(t_0) = \Phi_p^0 \quad (23)$$

и находим зависимость $\Phi_p = \Phi_p(t)$.

2) В каждый момент времени t_k решаем нелинейную двумерную задачу равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником (10)–(18) при дополнительных условиях:

а) поток на границе плазмы ψ_p равен $\psi_p = \psi(t_k) = \Phi_p(t_k) / 2\pi$ и центр плазмы находится в заданной точке $r = R_0$;

б) малый радиус плазмы равен a_0 ;

в) отношение полуосей сечения плазмы $l_z / l_r \sim 1$.

В ходе численного решения находим управляющие токи $I_i(t_k)$ в обмотках полоидального поля.

Как было отмечено выше, при численной реализации алгоритма необходимо использовать три итерационные процедуры подбора токов i , соответственно, многократно решать двумерную задачу (10)–(18).

После определения токов, напряжения в цепях $u_i(t)$ могут быть найдены из разностной формы уравнений Кирхгофа:

$$u_i(t_k) = N_i \frac{\Phi_i(t_k) - \Phi_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} + \frac{I_i(t_k)}{N_i} R_i, \quad (24)$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

где Φ_i – магнитный поток, проходящий через контур i -го проводника [В · с]; I_i [МА], u_i [В], R_i – омическое сопротивление i -го проводника [мкОм]; N_i – число витков в i -м проводнике.

На рис. 5 приведен пример расчета сценария разряда на основе последовательного решения двумерных задач равновесия.

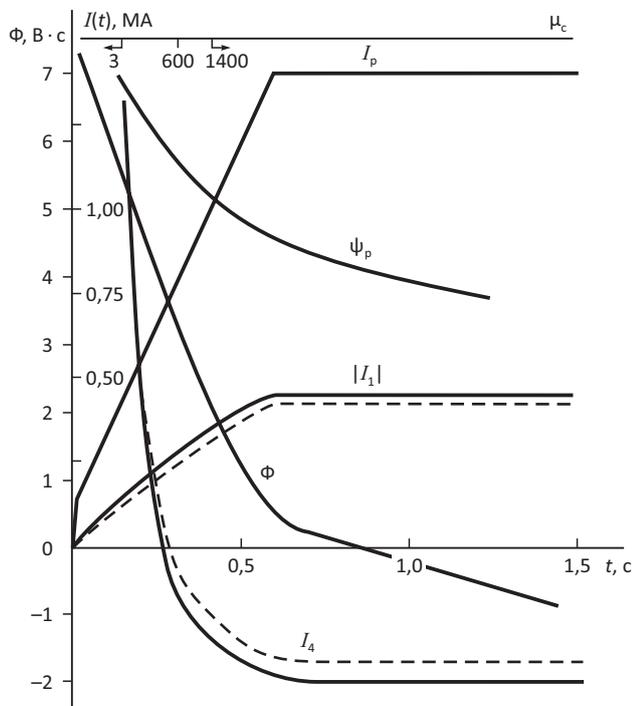


Рис. 5. Ток в плазме $I_p(t)$ и магнитный поток $\Phi(t)$ через сердечник в меридиональной плоскости от времени. Токи в управляющих проводниках $|I_1|$ и индукторе I_4 найдены при расчетах. Пунктир соответствует расчетам, приведенным в [9]. На верхней оси отмечены значения магнитной проницаемости в сердечнике μ

Таким образом, разработанная модель позволяет рассчитать сценарий разряда и соответствующий ему программный режим в токамаке с железным сердечником. Обсуждение основных проблем и сложностей предложенной модели, а также возможные варианты других подходов будут обсуждаться дальше.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Хотя двумерная модель равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником и предложенный численный алгоритм позволяет рассчитать сценарий разряда для плазменного шнура, как с круглым, так и с вытянутым поперечным сечением, однако она имеет определенные недостатки.

1. Значительное время расчета каждого равновесия с железным сердечником из-за большой сложности численного решения задачи о равновесии плазмы (присутствие сильно нелинейного элемента). При этом используется несколько итерационных процедур для ее решения, которые требуют аккуратного подбора итерационных параметров для сходимости численного алгоритма.
2. Возможны случаи, когда найденные управляющие токи в обмотках полоидального поля или напряжения выходят за рамки имеющихся ограничений. В этом случае требуется заново пересчитывать задачу равновесия, для чего необходимо сформулировать дополнительные алгоритмы, по которым должны согласованно изменяться все управляющие токи.
3. При увеличении числа управляющих проводников задача о равновесии плазмы становится плохо обусловленной и требует дополнительной регуляризации, так как число управляющих токов будет заметно превосходить количество необходимых ограничений на геометрию плазмы.
4. При резком изменении параметров плазмы, например, при дополнительном нагреве, требуется согласованно изменять все управляющие токи, что является сложной задачей и требует отдельного изучения.

Таким образом, приходим к необходимости разработки другого подхода для постановки задачи расчета сценария разряда и программного режима в токамаке с железным сердечником.

Основная идея нового подхода состоит в дальнейшей редукции задачи, а именно в переходе от расчета двумерного равновесия плазмы к интегральным соотношениям, то есть в переходе от двумерных постановок к нульмерным. Соответственно и модели управления необходимо формулировать для управления интегральными параметрами плазмы. В этом случае можно перейти к постановке задачи оптимального управления, что является, по сути, основной требуемой задачей при расчете сценария разряда и программного режима. Этот подход будет описан в нашей следующей работе.

7. ВЫВОДЫ

В работе задача расчета сценария разряда и программного режима в токамаке сформулирована в виде решения двумерных задач равновесия, связанных между собой данной зависимостью магнитного потока через плазму.

Создана двумерная модель расчета равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником, которая сформулирована в виде обратной задачи. Разработаны численные алгоритмы, позволяющие осуществить регуляризацию данной обратной задачи. Рассчитаны равновесия плазмы в токамаке с Т-15.

Сформулирована задача расчета сценария разряда и программного режима и приведен пример расчета сценария разряда для установки Т-15.

Обсуждены трудности данной постановки задачи для расчета сценария разряда и программного режима в токамаке с железным сердечником и намечены дальнейшие пути ее усовершенствования.

Литература

1. Муховатов В.С., Шафранов В.Д. Равновесие плазмы в токамаке // Ядерный синтез. 1971. Т. 11. С. 705–748.
2. Tokamak Fusion Test Reactor Reference Design Report // First Draft Report. 1976. PPPL-1312, RH-R-004, Now. 42 p.
3. Бондарчук Э.Н., Дойников Н.Н., Мингалев В.С. и др. Электромагнитная система демонстрационного термоядерного реактора-токамака Т-20 (состояние разработки). Препринт НИИЭФА Б-0317. Л., 1976. 21 с.
4. Aymar R. et al. Technical description of the design proposal TORUS II. Part 2 // Rapport EUR-CEA-FC-824. June 1976.
5. Blum J., Cissoko G., Dei Cas R. // Rapport IAEA CN37F6. 1978. 38 p.
6. Аликаев В.В., Глухих В.А., Чураков Г.Ф. Основные инженерные вопросы реконструкции установки Т-10. Препринт НИИЭФА Б-0320. Л., 1983. 34 с.
7. Blum J., Le Fall J., Thooris B. The self-consistent equilibrium and diffusion code SCED. Preprint EUR-CEA-FC-1120. 1981. 29 p.
8. Бондарчук Э.Н., Дойников Н.И., Мингалев Б.С. Численное моделирование равновесия плазмы в токамаке с учетом эффектов насыщения ферромагнетика // ЖТФ. 1977. Т. 47. С. 521–526.
9. Бондарчук Э.Н., Дойников Н.И., Шмалько Г.И. Анализ системы полоидальных полей установки Т10М. Препринт № П-Б-0430, НИИЭФА. Л., 1979. 13 с.
10. Aymar R., Leloup G., Pariente M. Equilibrium field and current determination for tokamak // EUR-CEA-FC-821. 1977. 32 p.
11. Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П., Попов А.М., Цаун С.В. Квазистатическое моделирование разряда в токамаке с железным сердечником. Препринт ИАЭ-3510/7. М., 1981. 39 с.
12. Bont A. et al. Technical description of JET poloidal field system // IAEA Techn. Comm. Meeting on Large Tokamak Exper. Princeton. 26.11-01.12.1976. Pp. 115–21.
13. Муховатов В.С. Токамаки. В кн.: Итоги науки и техники / под ред. В.Д. Шафранова. Сер. Физика плазмы. М., 1980. Т. 1. Ч. 1. С. 6–118.
14. Беляков В.А., Васильев В.И., Кочин А.Г. и др. Исследование полоидальных магнитных полей на установке Туман-3. Препринт НИИЭФА П-Г-0555. Л., 1982. 20 с.
15. Шафранов В.Д. Равновесие плазмы в магнитном поле. В кн.: Вопросы теории плазмы / под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 2. С. 92–131.
16. Андреев В.Ф., Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П., Попов А.М., Цаун С.В. Численное моделирование равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником. Препринт ИАЭ-4056/7. М., 1984. 43 с.
17. Андреев В.Ф., Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П., Попов А.М., Цаун С.В. Математические модели равновесия плазмы в токамаке с железным сердечником // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 4. С. 387–396.
18. Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П. Математическое моделирование плазмы. М.: Наука. 1982. 320 с.

Статья поступила в редакцию 12.05.2020, принята к публикации 20.06.2020
The article was received on 12.05.2020, accepted for publication 20.06.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреев Валерий Филиппович, доктор физ.-мат. наук; факультет Вычислительной математики и кибернетики Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова. Москва. Российская Федерация. E-mail: vfandreev@gmail.com

Попов Александр Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор; факультет Вычислительной математики и кибернетики Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова. Москва. Российская Федерация. E-mail: professorpopov@gmail.com

References

1. Mukhovatov V.S., Shafranov V.D. Plasma equilibrium in tokamak. Nuclear synthesis. 1971. T. 11. Pp. 705–748. (In Russ.)
2. Tokamak Fusion Test Reactor Reference Design Report. First Draft Report. 1976. PPPL-1312, RH-R-004, Now. 42 p.
3. Bondarchuk E.N., Doinikov N.N., Mingalev V.S. and others. Electromagnetic system of the demonstration thermonuclear reactor-tokamak T-20 (state of development). Preprint NIIIEFA, Б-0317. Leningrad, 1976. 21 p.
4. Aymar R. et al. Technical description of the design proposal TORUS II. Part 2. Rapport EUR-CEA-FC-824. June 1976.
5. Blum J., Cissoko G., Dei Cas R. Rapport IAEA CN37F6. 1978. 38 p.
6. Alikae V.V., Glukhykh V.A., Churakov G.F. The main engineering issues of the reconstruction of the plant T-10. Preprint NIIIEFA, Б-0320. Leningrad, 1983. 34 p.
7. Blum J., Le Fall J., Thooris B. The self-consistent equilibrium and diffusion code SCED. Preprint EUR-CEA-FC-1120. 1981. 29 p.
8. Bondarchuk E.N., Doinikov N.I., Mingalev B.S. Numerical modeling of plasma equilibrium in tokamak taking into account the effects of saturation of ferromagnetics. ZHTF. 1977. T. 47. C. 521–526. (In Russ.)
9. Bondarchuk E.N., Doinikov N.I., Shmalko G.I. Analysis of the poloidal field system of the plant T10M. Preprint No. P-B-0430, NIIIEFA. Leningrad, 1979. 13 p.
10. Aymar R., Leloup G., Pariente M. Equilibrium field and current determination for tokamak. EUR-CEA-FC-821. 1977. 32 p.
11. Dnestrovskij Yu.N., Kostomarov D.P., Popov A.M., Tsaun S.V. Quasi-static modeling of the discharge in a tokamak with an iron core. Preprint, ИАЭ-3510/7. Moscow, 1981. 39 p.
12. Bont A. et al. Technical description of JET poloidal field system. IAEA Techn. Comm. Meeting on Large Tokamak Exper. Princeton. 26.11-01.12.1976. Pp. 115–121.
13. Mukhovatov V.S. Tokamaks. In book: Results of science and technology. V.D. Shafranov (ed.). Ser.: Physics of Plasma. Moscow, 1980. Vol. 1. Part 1. Pp. 6–118.
14. Belyakov V.A., Vasiliev V.I., Kochin A.G. and others. Investigation of poloidal magnetic fields at the Mist-3. Preprint NIIIEFA П-Г-0555 installation. Leningrad, 1982. 20 p.
15. Shafranov V.D. Plasma equilibrium in the magnetic field. In book: Questions of plasma theory. M.A. Leontovich (ed.). Moscow: Gosatomizdat, 1963. Is. 2. Pp. 92–131.
16. Andreev V.F., Dnestrovskij Yu.N., Kostomarov D.P., Popov A.M., Tsaun S.V. Numerical modeling of plasma equilibrium in a tokamak with an iron core. Preprint ИАЭ-4056/7. Moscow, 1984. 43 p.
17. Andreev V.F., Dnestrovskij Yu.N., Kostomarov D.P., Popov A.M., Tsaun S.V. Mathematical models of plasma equilibrium in a tokamak with an iron core. Plasma Physics. 1986. T. 12. No. 4. Pp. 387–396. (In Russ.)
18. Dnestrovskij Yu.N., Kostomarov D.P. Mathematical modeling of plasma. Moscow: Science, 1982. 320 p.

ABOUT THE AUTHORS

Andreev Valery Filippovich, Dr. Sci. (Phys.–Math.); Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University. Moscow. Russian Federation. E-mail: vfandreev@gmail.com

Popov Alexander Mikhailovich, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor; Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University. Moscow. Russian Federation. E-mail: professorpopov@gmail.com

Расчет этапов технологического процесса изготовления ППД-детекторов с использованием компьютерного математического моделирования и изготовление альфа радиометра на их основе

С.А. Раджапов^a ©, Р.Х. Рахимов^b ©,
Б.С. Раджапов^c ©, М.А. Зуфаров^d ©

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

^a E-mail: rsafti@mail.ru

^b E-mail: rustam-shsul@yandex.com

^c E-mail: rsafti@mail.ru

^d E-mail: marsuz@rambler.ru

Аннотация. В статье приводится описание разработанного радиометра для экспрессного измерения альфа излучения радиоактивных элементов на базе кремниевого детектора большого диаметра. Основной элемент ППД-детектора изготовлен с использованием компьютерного математического моделирования всех этапов технологического процесса изготовления детекторов, учитывающих на каждом этапе степень влияния свойств исходного кремния на электрофизические и радиометрические характеристики детектора. Детекторы изготавливаются под определенные типы приборов. Разработанный радиометр предназначен для измерения альфа излучений естественных изотопов (^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Bi и т.д.) в различных средах. Также показан принцип работы прибора, приводится структурная схема измерительного комплекса, описаны электронные узлы радиометра, а также блок схемы. Преобразования сигналов (перенос спектра, фильтрация, накопление) реализуется программно на базе модуля цифровой обработки. Прибор позволяет обнаружить наличие конкретных элементов в различных средах, а также защитить людей от вредного воздействия неблагоприятного излучения и может использоваться как в полевых условиях, так и стационарно.

Ключевые слова: кремний, полупроводниковые детекторы, компьютерное математическое моделирование, радиометр, альфа-излучение, усилитель, микросхема, транзистор, зарядочувствительный усилитель, микроконтроллер

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта ФА-Атех-2018-233 прикладных исследований.

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Раджапов С.А., Рахимов Р.Х., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А. Расчет этапов технологического процесса изготовления ППД-детекторов с использованием компьютерного математического моделирования и изготовление альфа радиометра на их основе // Computational nanotechnology. 2020. Т. 7. № 2. С. 21–28. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-21-28

Calculation of stages of the technological process of manufacture of PPD detectors using computer mathematical modeling and production of alpha radiometer on their basis

S.A. Radzhapov^a ©, R.Kh. Rakhimov^b ©, B.S. Radzhapov^c ©, M.A. Zufarov^d ©

Physical-technical Institute, SPA «Physics-Sun», Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

^a E-mail: rsafti@mail.ru

^b E-mail: rustam-shsul@yandex.com

^c E-mail: rsafti@mail.ru

^d E-mail: marsuz@rambler.ru

Abstract. The article describes the developed radiometer for Express measurement of alpha radiation of radioactive elements based on a large-diameter silicon detector. The main element of the PPD detector is made using computer mathematical modeling of all stages of the technological process of manufacturing detectors, taking into account at each stage the degree of influence of the properties of the initial silicon on the electrophysical and radiometric characteristics of the detector. Detectors are manufactured for certain types of devices. The developed radiometer is designed to measure alpha radiation of natural isotopes (²³⁸U, ²³⁴U, ²³²Th, ²²⁶Ra, ²²²Rn, ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, etc.) in various environments. It also shows the principle of operation of the device, provides a block diagram of the measuring complex, describes the electronic components of the radiometer, as well as the block diagram. Signal transformations (spectrum transfer, filtering, accumulation) are implemented programmatically on the basis of a digital processing module. The device can detect the presence of specific elements in various environments, as well as protect people from the harmful effects of adverse radiation and can be used both in the field and stationary.

Keywords: silicon, semiconductor detectors, computer mathematical modeling, radiometer, alpha radiation, amplifier, microcircuit, transistor, charge-sensitive amplifier, microcontroller

Acknowledgements. The research was carried out under the FA-Ateh-2018-233 project.

FOR CITATION: Radzhapov S.A., Rakhimov R.Kh., Radzhapov B.S., Zufarov M.A. Calculation of stages of the technological process of manufacture of PPD detectors using computer mathematical modeling and production of alpha radiometer on their basis. *Computational nanotechnology*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 21–28. (In Russ.) DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-21-28

ВВЕДЕНИЕ

Решение многих проблем современной науки и техники и в первую очередь экспериментальной ядерной физики требует создания новых и усовершенствования уже существующих приборов для регистрации ядерных излучений. Из всех задач спектроскопии ядерного излучения наиболее актуальной является создание специализированных приборов для контроля облучения при работе с радиоактивными изотопами. При работе с радиоактивными изотопами и другими источниками ионизирующей радиации является сведение уровня облучения человека к возможному минимуму. При этом требуются компактные и точные приборы, работающие как в счетном, так и спектрометрическом режимах. Такие приборы разрабатываются с учетом конкретных условий, предполагают оптимальные технологические решения. На предприятиях современным направлением является наиболее полная автоматизация производственных процессов и контроль технологических показателей, внедрение новой

техники, обеспечивающей более высокую производительность труда и позволяющей значительно увеличить наработку продукции на существующих производственных площадях и мощностях. В связи с этим эффективная деятельность любого производства невозможна без исследовательской работы, с использованием приборов новых поколений, позволяющих проводить исследования с высокой точностью, избирательностью и чувствительностью.

Целью работы обусловлена необходимостью создания нового прибора для экспресс измерения альфа излучения естественных изотопов (²³⁸U, ²³⁴U, ²³²Th, ²²⁶Ra, ²²²Rn, ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb и т.д.) в различных средах. Это позволит не только обнаружить наличие конкретных элементов, но и защитить людей от вредного воздействия неблагоприятного излучения. Прибор должен быть компактным, безопасным. В настоящее время определение содержания альфа излучения естественных изотопов в технологических средах и растворах подземного выщелачивания производится главным образом с использованием титраторов (титриметрическим методом)

или спектрофотометров (фотометрическим методами). Существующие приборы стационарны, т.е. устанавливаются в специально оснащенных лабораториях. Анализ производится в лаборатории, куда пробы доставляются с технологических участков. При этом требуется специальная пробоподготовка растворов, использование квалифицированного труда лаборантов.

Особенностью подхода в данном случае является разработка детекторов с большой чувствительной областью и рабочим объемом из кремния диаметром ~50 мм, что в мировой практике используется очень мало. Использование таких детекторов большого диаметра позволяет изготовить радиометр (прибор), измеряющий заряженные частицы in direct, т.е. измерять непосредственно в измеряемой ячейке. Данный метод позволяет избежать осаждения активного вещества различными методами на измерительные фильтры и соответственно упрощает пробоподготовку. При этом чувствительность, разрабатываемого радиометра альфа излучения будет соответствовать международным стандартам.

Конечной целью данной работы является создание измерительного комплекса регистрации альфа-излучения с использованием современных достижений в управлении, математической обработке и визуализации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРОВ

Современные полупроводниковые детекторы изготавливаются в основном на пластинах монокристаллического кремния по технологиям, применяемым в микроэлектронике, и это определяет их широкое применение благодаря высокой степени разработанности технологий и повторяемости результатов.

Основной элемент ППД-детектор изготовлен с использованием компьютерного математического моделирования всех этапов технологического процесса изготовления детекторов, учитывающих на каждом этапе степень влияния свойств исходного кремния на электрофизические и радиометрические характеристики детектора. Детекторы изготавливаются под определенные типы приборов.

Разработка и оптимизация технологии изготовления, численные расчеты и компьютерное математическое моделирование, кремниевых детекторов больших размеров проведенных нами показано в работах [3–12]. В работах описана стабильная выпрямляющая структура, полученная медленным вакуумным напылением химически чистого германия на поверхность Si с последующим нанесением металлического контакта. Эти результаты положены в основу настоящей разработки.

Технология создания детектора на базе гетероперехода Si–Ge описывается на примере изготовления конкретного ΔE-детектора.

РАСЧЕТ СТРУКТУРЫ

Исходя за заданной толщины чувствительной области детектора ~ 500 мкм и величины рабочего напряжения ~ 200 В, находим из номограммы необходимое удельное сопротивление $\rho \approx 2$ кОм · см. Время жизни неосновных носителей, достаточное для полного собирания заряда ~ 10 нс.

Расчетная емкость детектора:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} = \frac{12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,5 \cdot 10^{12}}{5 \cdot 10^{-2}} = 30 \text{ пФ.} \quad (1)$$

Энергетический эквивалент шумов:

$$\Delta W = 1,4 \sqrt{c} \approx 7,5 \text{ кэВ.} \quad (2)$$

Энергетическое разрешение:

$$R \approx 3\Delta W \approx 20 \text{ кэВ.} \quad (3)$$

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАМЕРЫ С K = 12 CM

Это означает, что для получения слоя при напылении толщиной в 300 Å (30 нм) необходима навеска германия.

$$m = 2 \cdot 3,14 \cdot 144 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 5,35 = 0,146 \text{ г,}$$

$$m = 146 \text{ мг.}$$

Скорость испарения подбирается таким образом, чтобы испарение навески происходило в течение 3–4 мин.

НАПЫЛЕНИЕ АЛЮМИНИЯ

Напыление алюминиевого контакта производится через сублиматор после напыления германия. Камера для напыления алюминия идентична описанной выше.

Обработка алюминиевых навесок осуществлялась по следующей методике: навески в виде проволоки подвергались механической очистке (соскабливался верхний слой алюминия и обрезались торцы), промывались в спирте и толуоле, протравливались в H₂O : HF (1 : 1) в течение 20 с, промывались деионизированной водой не менее 5 минут, сушились под лампой и помещались в бокс со спиртом. Масса навески рассчитывалась таким образом, чтобы толщина напыленного слоя не превышала 300 Å (30 нм) [1–12].

Детекторы изготовлены из p-Si диаметром 40–80 мм с удельным сопротивлением $\rho = 0,5–1$ кОм · см, $\tau \geq 300$ нс, вырезанные в виде шайб толщиной ~ 600 мкм. На пластины проводилась диффузия на глубину 30 мкм при температуре $t = 420$ °С по технологии, показанной в [7]. Дрейф ионов лития проводился при температуре $t = 80–90$ °С и напряжении $U = 60–150$ В, с последующим низкотемпературным ($t = 60$ °С, $U = 200$ В) импульсным выравнивающим дрейфом в соответствии с режимом, предложенными в работе [8]. После проведения полной компенсации *i*-области, весь кристалл подвергался специально химико-технологической обработке в целях обеспечения минимальных толщин «мертвых» слоев «входного» и «выходного» окон, а толщину кристаллов доводили до 70–100 мкм. Затем методом вакуумного напыления при давлении $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. на пластины наносили контакты на основе аморфного αSi (300 Å) и Al (300 Å), и на обратную тыловую сторону из Au (~200 Å)

Также был разработан метод контроля параметров кремниевых детекторов. Данный метод анализа детекторов дает возможность определить отклонения в технологическом процессе от расчетных, а также проводить более точную корректировку технологических процессов для конкретного типа детекторов.

ЭЛЕКТРОННАЯ ЧАСТЬ РАДИОМЕТРА

Для реализации этой задачи необходимо было оптимизировать алгоритм управления процесса измерения исходя из технических возможностей и доступности радиоэлементов. Был выбран метод регистрации альфа излучения (радон) путем использования кремниевого детектора с большой площадью активной поверхности. Была выбрана следующая методика и алгоритм первичной обработки и накопления регистрируемой информации:

- анализируемый воздух с помощью внешнего управляемого воздухозаборника по гибким шлангам нагнетается в рабочую камеру, представляющей собой герметичный цилиндр и находящимися внутри него детектором; [5; 14];
- информация, регистрируемая детектором, преобразуется в импульсы напряжения, которые усиливаются, сепарируются и накапливаются в накопительном устройстве;
- далее накопленная информация передается в персональный компьютер с установленным уникальным программным обеспечением, осуществляющего математическую обработку и визуализацию результатов измерения;

Структурная схема измерительного комплекса приведена на рис. 1. В его состав входят следующие функциональные элементы:

- рабочая камера;
- узел усиления и селекции информации (аналоговый узел);
- микроконтроллерный узел (цифровой узел);
- узел вторичного электропитания;
- узел воздухозаборника;
- персональный компьютер с установленным программным обеспечением.

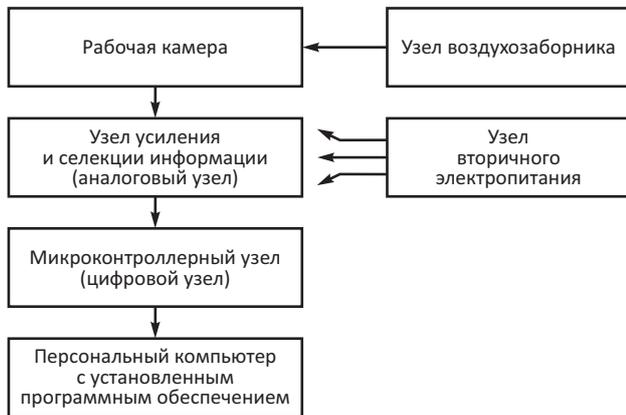


Рис. 1. Блок схема устройства (радиометра)

Fig. 1. Block diagram of the device (radiometer)

В процессе была выполнена следующая работа:

- разработана геометрия рабочей камеры [14];
- разработано техническое задание на проектирование программного обеспечения для микроконтроллера и устанавливаемого в персональный компьютер;
- разработаны, рассчитаны и изготовлены элементы аналоговых узлов;
- разработаны, спроектированы и изготовлены элементы цифровых узлов;
- разработано программное обеспечение для микроконтроллера и для компьютера;

РАБОЧАЯ КАМЕРА

Рабочая камера представляет собой пустотелый цилиндр, внутри которого в геометрическом центре, на подвесках укреплен детектор. Расположение в геометрическом центре обусловлено тем, что детектор, в принципе представляющий собой круглую пластину, чувствителен к регистрации альфа-частиц с двух сторон. На корпусе цилиндра также укреплены штуцеры для подключения к системе воздухозабора и разъем для подключения детектора к элементам питания и усиления.

Детектором является кремниевый детектор с диаметром чувствительной области 60 мм. Питание детектора обеспечивается напряжением 24–30 В через RC-цепи от вторичного преобразователя напряжения, расположенным в конструкции совместно с зарядочувствительным предусилителем (рис. 2).

Схемотехнически преобразователь напряжения представляет собой генератор на микросхеме триггера Шмидта CD40106 с последующим каскадом учетверения напряжения. Постоянная времени фильтрующей цепочки R_2C_6 на выходе источника выбрана большой, что обеспечивает плавное нарастание напряжения детектора при включении устройства.

Для минимизации помех, создаваемых преобразователем на работу предусилителя, он защищен электромагнитным экраном, а подача первичного напряжения и также выходного напряжения осуществляется через проходные конденсаторы.

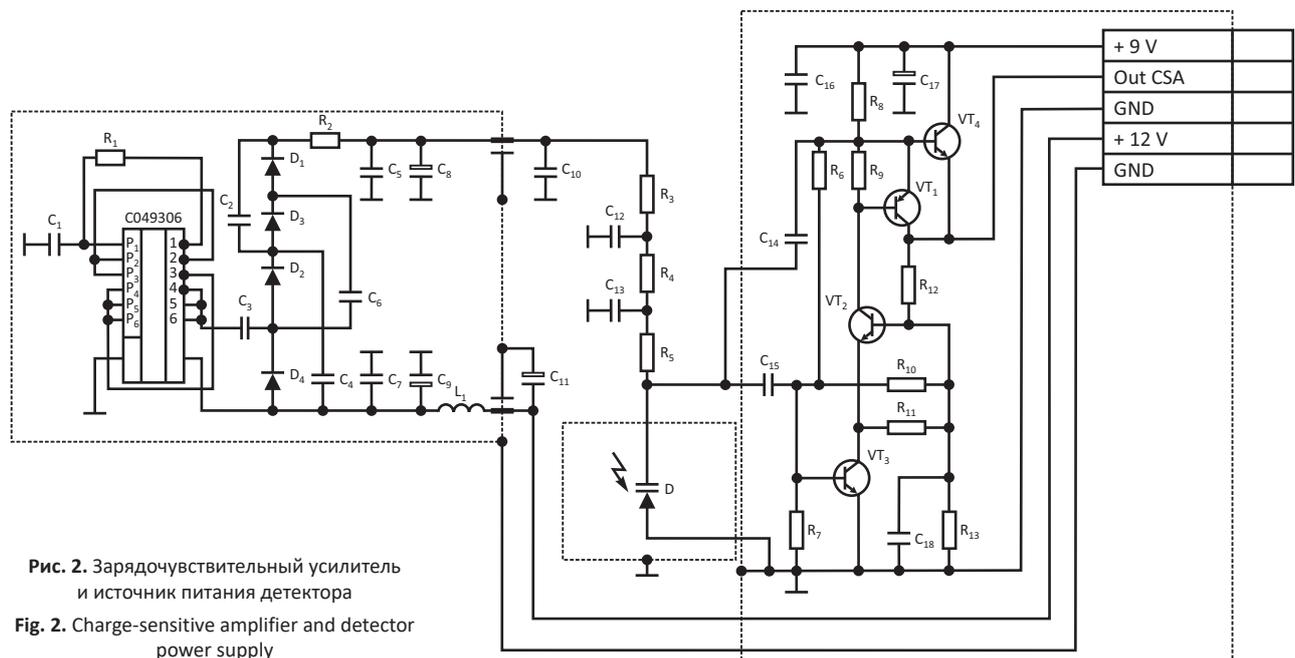


Рис. 2. Зарядочувствительный усилитель и источник питания детектора

Fig. 2. Charge-sensitive amplifier and detector power supply

УЗЕЛ УСИЛЕНИЯ И СЕЛЕКЦИИ ИНФОРМАЦИИ

Узел усиления и селекции обеспечивает преобразование заряда, возникшего в объеме детектора от взаимодействия с регистрируемой α -частицей, в импульс напряжения и затем его усиление. Далее дискриминирующим узлом обеспечивается «обрезание» информации, представляющей собой шум.

Импульсы заряда, возникшие в чувствительной области детектора от взаимодействия с регистрируемым α -излучением, подаются на вход зарядочувствительного предусилителя, собранного на транзисторах VT_1 – VT_4 (рис. 3). Предусилитель охвачен отрицательной обратной связью, реализованной на конденсаторе C_{21} . Коэффициент передачи усилителя составляет $k \approx 20\,000$. Амплитуда импульса напряжения на выходе зарядочувствительного усилителя (коллектор транзистора T_4) составляет:

$$U (mV) = E44,4 / C_{21}, \quad (4)$$

где E – энергия регистрируемых α -частиц (МэВ); C_{21} – номинальное значение конденсатора обратной связи (пФ); 44,4 – приведенный коэффициент, учитывающий физику генерации заряда.

Как известно при распаде радона 222 образуется α -частица энергией 5,4887 МэВ, а при распаде радона 220 (торон) – 6,288 МэВ. Исходя из этого, были рассчитаны параметры зарядочувствительного каскада. В реализованной схеме $C_{21} = 2,2$ пФ. То есть на выходе предусилителя при регистрации α -частицы 5,4887 МэВ образуется импульс напряжения амплитудой 110 мВ. Форма импульса представляет собой всплеск с крутым фронтом и более медленным спадом. Крутизна фронта зависит от качества используемых транзисторов. Длительность спада регламентируется значением номиналов C_{oc} и R_{oc} , т.е. постоянной RC. Далее сигнал поступает через фильтр низкой частоты C_1, R_1 на вход интегрирующего усилителя со следящей отрицательной обратной связью (рис. 3). Интегрирующая цепь на интегрирующих элементах C_2, R_5 с постоянной времени интегрирования – 2 мкс. Коэффициент передачи усилителя определяется по формуле:

$$k = \frac{Z(R_5 C_2)}{Z(R_1 C_1)}, \quad (5)$$

где $Z(R_5 C_2)$ – полное сопротивление цепи $R_5 C_2$; $Z(R_1 C_1)$ – полное сопротивление цепи $R_1 C_1$.

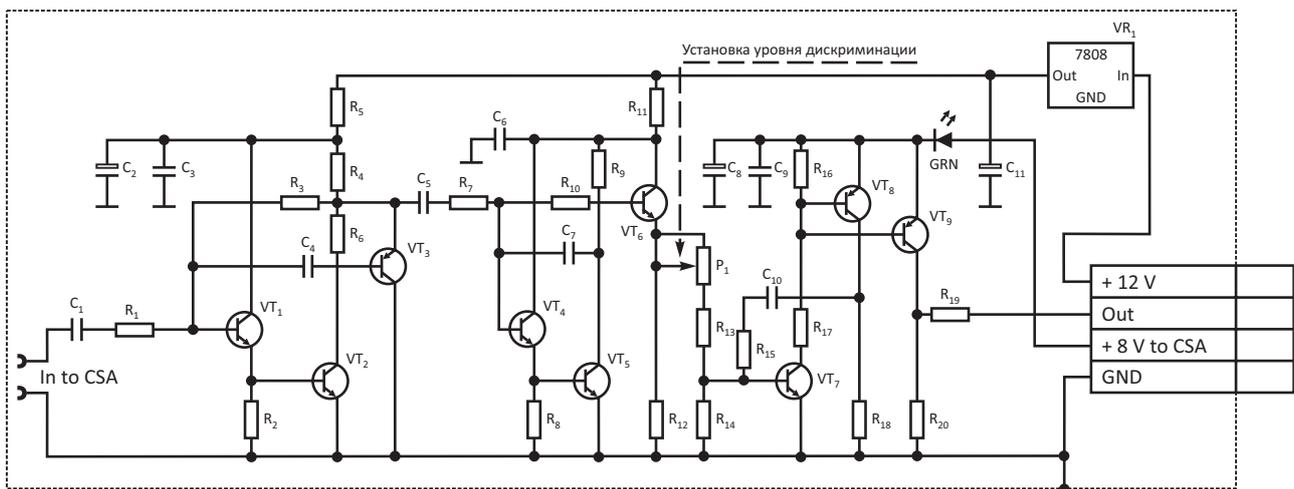


Рис. 3. Узел усилителя и устройства селекции

Fig. 3. Amplifier assembly and selection devices

Далее сигнал через дифференцирующую цепь $R_7 C_3$, подается на вход следующего интегрирующего усилителя со следящей отрицательной обратной связью, выполненного на транзисторах VT_4 – VT_6 , с постоянной времени равной 2 мкс. Выход усилителя соединен с одноканальным анализатором, служащего для выделения импульсов, соответствующим регистрируемым α -частицам с энергией более 2 МэВ. В качестве анализатора используется дискриминатор нижнего уровня, представляющий собой ждущий одновибратор на транзисторах VT_7, VT_8 со следящей обратной связью на C_8, R_{15} . Порог срабатывания одновибратора регулируется переменным многооборотным резистором R_{21} . Питание схемы обеспечивается стабилизатором на микросхеме LM7808.

При постановке задачи не ставилась задача сепарации и селективной регистрации поступающей информации по энергии. Тем более что броуновское взаимодействие альфа-частиц с чувствительной поверхностью детектора

не всегда происходит ортогонально, что приводит к неравномерной потере части энергии в «мертвом» слое и что наглядно демонстрируется на изображении спектра на экране многоканального анализатора в виде низкоэнергетического шлейфа. Поэтому было принято решение установить порог селекции на уровне – 2 МэВ.

Далее регистрируемый импульс с эмиттера VT_{12} передается на информационный порт микроконтроллера.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЙ УЗЕЛ

Микроконтроллерный узел (рис. 4) обеспечивает полную автономную работу устройства регистрации. В качестве микроконтроллера выбрана микросхема ATmega 32 с 32 кбайт программируемой памяти на кристалле.

В соответствии с поставленной задачей была разработана обвязка микроконтроллера и сформулировано техническое задание на разработку программного обеспечения «зашифтого» в управляющий микроконтроллер.

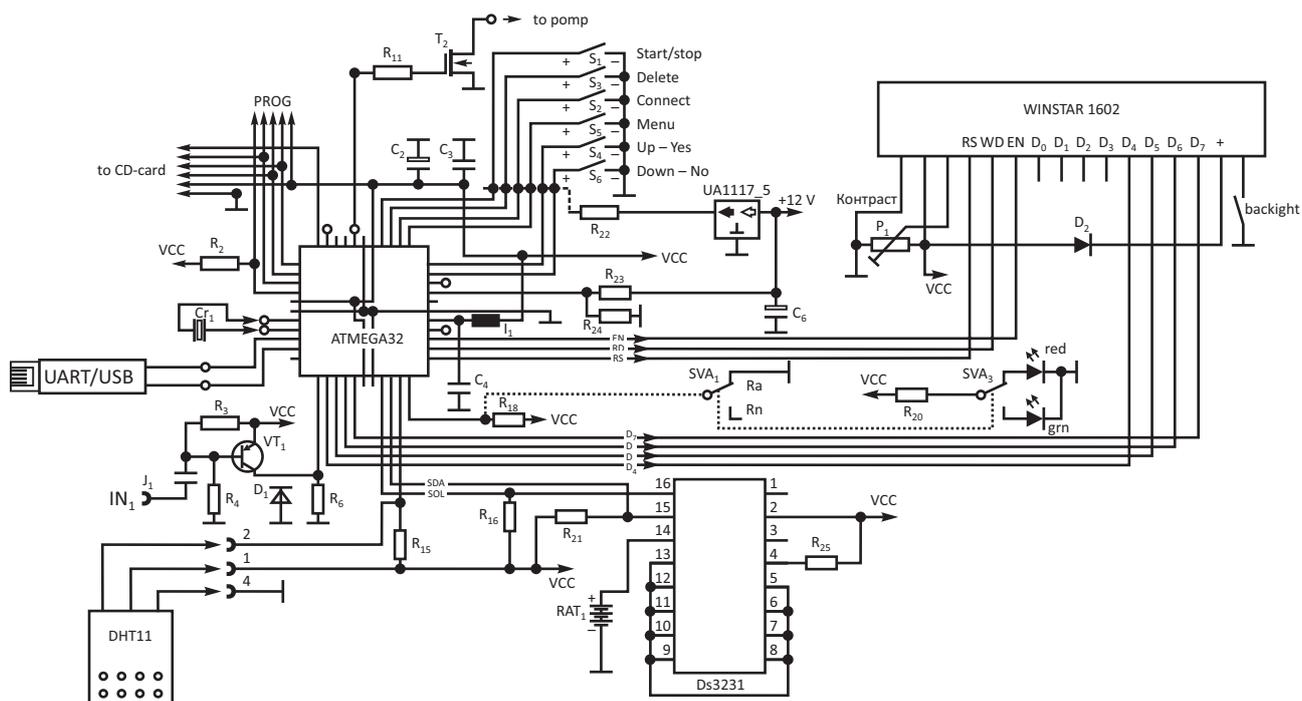


Рис. 4. Микроконтроллерный узел

Fig. 4. Microcontroller unit

Программное обеспечение обеспечивает варьлируемое управление технологическим процессом измерения:

- выбор варианта работы устройства – ручной или автоматический (периодический);
- варьлируемое управление регламентом работы воздухозаборника;
- варьлируемое управление регламентом измерения;
- измерение погодных режимов работы – температуры и влажности;
- управление встроенными электронными часами реального времени и даты;
- обеспечение логической связи с компьютером по интерфейсу USB;
- управление состоянием встроенного накопителя информации.

Обвязка микроконтроллера состоит из следующих элементов:

- прецизионные часы реального времени и даты, построенные на микросхеме DS3231. В соответствии с заложенными в нее возможностями, она в комплекте с элементом автономного питания CR3023 обеспечивает счет текущего времени в течение 10 лет. Эта информация о дате и времени вписывается в протокол локального измерения;
- датчик влажности и температуры DHT₁₁. Информация с датчика также вставляется в протокол локального измерения;
- разъем для подключения платы внешнего накопителя информации, построенного для подключения microSD-карты;
- разъем для подключения программатора;
- разъем для выхода сигнала управления воздухозаборником;
- разъем для подключения преобразователя интерфейсов UART → USB;

- клавиатура для настройки и локального управления работой устройства;
- переключатель режима работы – условно «радон–радий». Он необходим для трансформации функциональных возможностей устройства. В режиме «радий» отсутствует функция «продувка». В этом режиме измеряется α -активность вымученного образца;
- диалог оператора с микроконтроллером обеспечивается с помощью кнопок на корпусе и информационного мозаичного дисплея WS1602.

УЗЕЛ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Питание всего устройства обеспечивается от встроенной батареи аккумуляторов 18650 с суммарным напряжением 12 В и емкостью 2600 мА/ч. Узел вторичного электропитания осуществляет преобразование этого напряжения в напряжения, необходимые для нормальной работы всех функциональных узлов: +30 В для питания детектора, +5 В, для питания цифровых узлов микроконтроллерного узла, +8 В, для питания аналоговой части устройства.

В состав узла входит схема контроля и индикации состояния аккумулятора, а также элементы зарядного устройства, для возможности зарядки от внешнего сетевого источника напряжения. Предусмотрена возможность электропитания от внешнего источника напряжения при работе в стационарных условиях (рис. 5).

УЗЕЛ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА

Для осуществления операции нагнетания и последующего обновления анализируемого воздуха, в качестве воздухозаборника был выбран вариант с использованием поршневой аквариумной помпы. Первоначально в экспериментах для работы с помпой для ее питания от аккумулятора был изготовлен преобразователь 12 В / 220 В / 50 Гц.

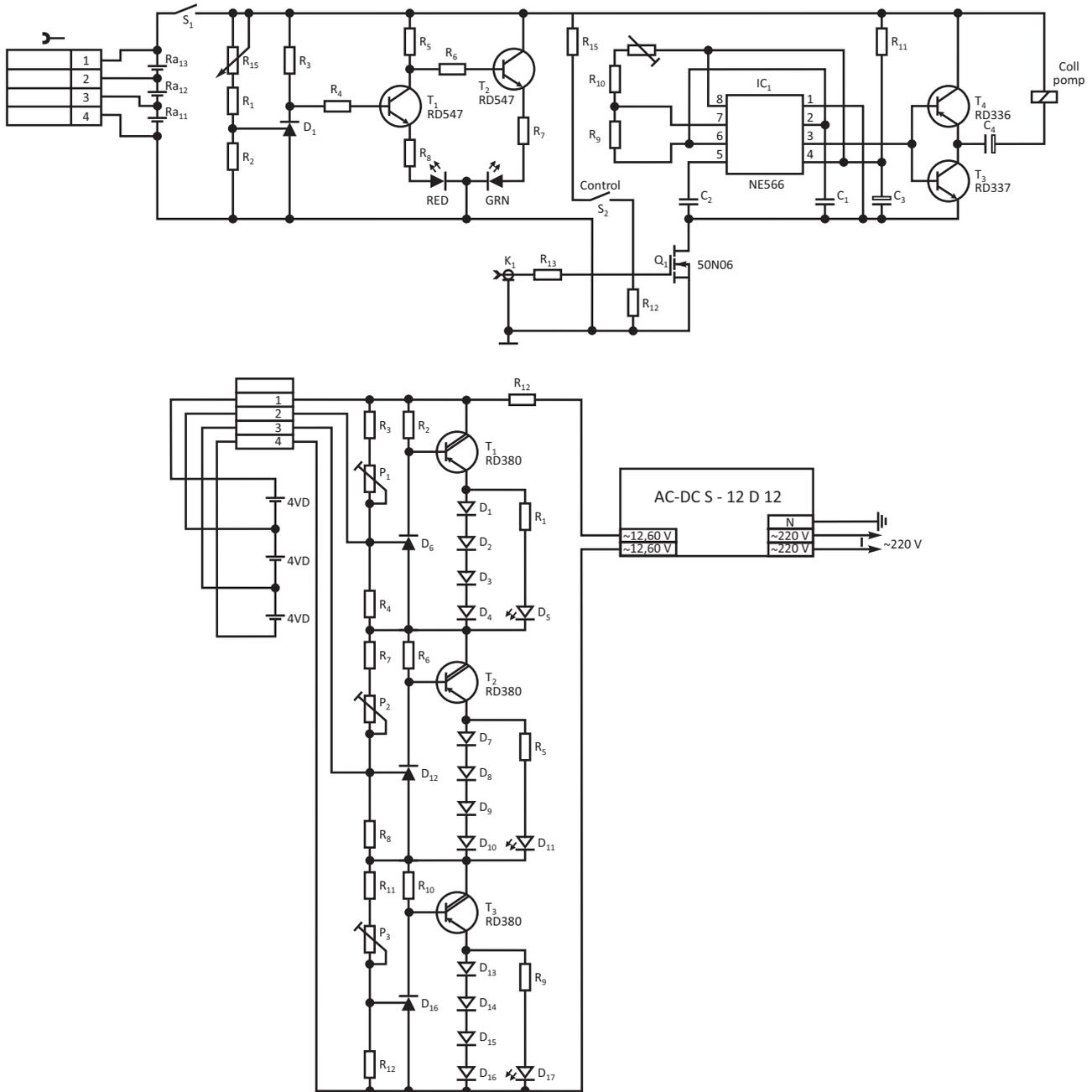


Рис. 5. Зарядное выравнивающее устройство для аккумуляторной батареи 18650

Fig. 5. 18650 Battery Charging Equalizer

Далее было принято решение переделки соленоидного узла помпы для ее прямого питания от аккумулятора. Для этого была перемотана обмотка и питание осуществляется от электронного генератора с частотой 50 Гц. Управление процессом включения осуществляется от микроконтроллера. В качестве свича используется мощный полевой МДП транзистор с низковольтным управлением. Питание воздухозаборника осуществляется от автономного комплекта аккумуляторов 18650 емкостью 2600 мА/ч.

Генератор 50 Гц собран на микросхеме NE555 в стандартном включении в режиме мультивибратора. Для работы на нагрузку на выходе микросхемы стоит умушляющий каскад на комплементарных транзисторах с большим бета (см. рис. 5).

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРА

Для обработки, накопленной в устройстве информации, оно подключается к персональному компьютеру, на котором установлено разработанное в соответствии с техническим заданием прикладное программное обеспечение – программа ADL-V1.9-3.3 [15].

ВЫВОДЫ

- Оптимизирована технология изготовления детекторов ионизирующего излучения больших размеров, приведены численные расчеты и компьютерное математическое моделирование, получаемых истинных характеристик кремниевых детекторов и радиометра альфа-излучения в целом [5–6; 8–10].

- Разработаны и изготовлены электронные узлы, а также оптимальная программа работы радиометра.
- Оптимизированы электронные узлы, программа обработки и визуализация концентрации радона в измеряемой среде.
- Разработан и изготовлен лабораторный радиометр альфа излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате исследования и проведения технологических работ, нами разработана схема изготовления радиометра. Оптимизированы технологические режимы, исследованы электрофизические и радиометрические характеристики изготовленных кремниевых детекторов больших размеров, приведены численные расчеты и компьютерное математическое моделирование, получаемых истинных характеристик кремниевых детекторов, а также изготовлен радиометр альфа-излучения. Разработанная компьютерная математическая модель позволяет обобщить и обеспечить высокое качество получаемой информации в детекторах и в целом точности информации о радиоактивностях.

Литература / References

1. Akimov Yu.K. et al. Semiconductor detectors and experimental physics. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 271 p.
2. Gryboś P. *Synchrotron Radiation News*. 2018. No. 31 (6). P. 21.
3. Muminov R.A., Radzhapov S.A., Saimbetov A.K. Developing Si (Li) nuclear radiation detectors by pulsed electric field treatment. *Technical Physics Letters*. 2009. Vol. 35. No. 8. Pp. 768–769.

4. Osmic F., Wobrauschek P., Strelci C. et al. *Spectrochim. Acta part B: Atomic spectroscopy*. 2003. No. 58. P. 2123.
5. Rajapov S.A., Rajapov B.S., Rakhimov R.Kh. Features technology manufacturing silicon surface-barrier detectors with a large sensitive working area for measuring the activity of natural isotopes. *Computational Nanotechnology*. 2018. No. 1. Pp. 151–154.
6. Rajapov S.A., Rakhimov R.Kh., Rajapov B.S. et al. Development of a radiometer based on silicon detectors with a large sensitive area. *Computational Nanotechnology*. 2019. No. 1. Pp. 65–68.
7. Muminov R.A., Radzhapov S.A., Saimbetov A.K. *Atomic Energy*. 2009. No. 106. P. 2.
8. Rajapov S.A., Rakhimov R.Kh., Rajapov B.S., Zufarov M.A. Silicon-lithium ΔE -alpha radiation detectors for a radiometer. *Computational Nanotechnology*. 2019. No. 2. Pp. 157–159.
9. Johnson H., Zaniewski A., Holmes J. et al. *Bulletin of the American Physical Society*. 2018.
10. Muminov R.A., Saymbetov A.K., Japashov N.M et al. Physical features of double sided diffusion of lithium into silicon for large size detectors. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2019. Vol. 11. No. 2. 2031 p. (4 p.).
11. Ruddy F.H., Seidel J.G., Chen Haoqian et al. *IEEE Transact. Nucl. Sci*. 2006. No. 53. P. 1713.
12. Beckhoff B., Klein R., Krumrey M. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys.* 2000. Res. A 444. P. 480.
13. Muminov R.A., Radzhapov S.A., Pindyurin Y.S., Saymbetov A.K. Method for manufacturing a Si (Li) *p-i-n*-structure. Patent RUz. 2012. No. IAP 04073.
14. Muminov R.A., Rajapov S.A., Lutpullaev S.L., Pindyurin Yu.S., Khusamidinov S.S., Yutkin S.V. Devices for measuring the volumetric activity of radon in air. RUz patent No. IAP 04882.
15. Rajapov B.S., Ergashev K. Program for the microcontroller of a radon and radium radiometer. Certificates for software products of the Republic of Uzbekistan No. DGU 20180983. December 6, 2018.

Статья поступила в редакцию 15.05.2020, принята к публикации 20.06.2020
The article was received on 15.05.2020, accepted for publication 20.06.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Раджапов Сали Аширович, доктор физ.-мат. наук; ведущий научный сотрудник Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4615-027X>. E-mail: rsafti@mail.ru

Рахимов Рустам Хакимович, доктор техн. наук; зав. лабораторией Института материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>. E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Раджапов Бежан Салиевич, старший научный сотрудник Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5446-4634>. E-mail: rsafti@mail.ru

Зуфаров Марс Ахмедович, старший научный сотрудник Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4518-5139>. E-mail: marsuz@rambler.ru

ABOUT THE AUTHORS

Sali A. Radzhapov, Dr. Sci. (Phys.–Math.); leading researcher at the Physical-Technical Institute, SPA “Physics-Sun”, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Republic Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4615-027X>. E-mail: rsafti@mail.ru

Rustam Kh. Rakhimov, Dr. Sci. (Eng.); Head of Laboratory at the Institute of Materials Science “Physics-Sun”, Uzbekistan Academy of Sciences. Tashkent, Republic Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>. E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Begjan S. Radzhapov, senior researcher at the Physical-Technical Institute SPA “Physics-Sun”, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Republic Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5446-4634>. E-mail: rsafti@mail.ru

Mars A. Zufarov, senior researcher at the Physical-Technical Institute SPA “Physics-Sun”, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Republic Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4518-5139>. E-mail: marsuz@rambler.ru

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

MULTISCALE MODELING FOR INFORMATION CONTROL AND PROCESSING

05.13.01

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ
И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT
AND INFORMATION PROCESSING

DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-29-33

Обеспечение достижимости и устойчивости при синтезе робастного дискретного управления с прогнозирующей моделью в условиях неполной информации

Нгуен Хак Тунг^{1, a} ©, А.А. Жиленков^{2, b} ©, Данг Бинь Хак^{1, c} ©

¹ Национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики (ИТМО)

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

^a E-mail: nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com

^b E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

^c E-mail: dangkhacbinh90@gmail.com

Аннотация. Целью работы является исследование методов синтеза управления разномасштабными процессами с прогнозирующими моделями для линейных систем дискретного времени. Результатом исследования стало описание схемы управления, в которой текущее управляющее действие получается путем решения в каждый момент выборки задачи оптимального управления с конечным горизонтом без обратной связи и с использованием текущего состояния объекта в качестве начального состояния. Кроме того, описана задача оптимизации, дающей оптимальную последовательность управления, когда к объекту применяется управление, полученное для первого шага последующей последовательности. Также дан анализ проблем достижимости и устойчивости синтезированных управлений с прогнозирующей моделью в условиях возмущений и неопределенностей. А также проблем обеспечения заданных показателей качества управления и сравнения показателей при управлении УПМ в разомкнутой и замкнутой системах. Обозначены актуальные вопросы, требующие исследований в рамках рассмотренной системы управления. Предложенные решения крайне актуальны задачах моделирования и управления технологическими процессами выращивания наноразмерных структур.

Ключевые слова: достижимость, устойчивость, управление, прогнозирующая модель, возмущения, неполнота информации

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Nguyen Khac Tung, Жиленков А.А., Dang Binh Khac. Обеспечение достижимости и устойчивости при синтезе робастного дискретного управления с прогнозирующей моделью в условиях неполной информации // Computational nanotechnology. 2020. Т. 7. № 2. С. 29–33. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-29-33

Ensuring reach ability and stability in the synthesis of robust discrete model predictive control in conditions of incomplete information

Nguyen Khac Tung^{1, a} ©, A.A. Zhilenkov^{2, b} ©,
Dang Binh Khac^{1, c} ©

¹ ITMO University,
St. Petersburg, Russian Federation

² St. Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russian Federation

^a E-mail: nguyengkactungvhq1994@gmail.com

^b E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

^c E-mail: dangkhacbinh90@gmail.com

Abstract. Methods of synthesis of control of multiscale processes with predictive models for linear discrete time systems are considered. A description is given of a control scheme in which the current control action is obtained by solving at each instant of the sample the optimal control problem with a finite horizon without feedback and using the current state of the object as an initial state. An optimization problem is described that gives an optimal control sequence when the control obtained for the first step of the subsequent sequence is applied to the object. The analysis of the reachability and stability problems of synthesized controls with a predictive model under conditions of disturbances and uncertainties is given. As well as the problems of providing preset indicators of the quality of management and comparing indicators in the management of MPC in open and closed systems. The urgent issues requiring research in the framework of the considered management system are identified. The proposed solutions are extremely relevant to the problems of modeling and control of technological processes of growing nanoscale structures.

Keywords: reachability, stability, control, predictive model, disturbances, incompleteness of information

FOR CITATION: Nguyen Khac Tung, Zhilenkov A.A., Dang Binh Khac. Ensuring reach ability and stability in the synthesis of robust discrete model predictive control in conditions of incomplete information. *Computational nanotechnology*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 29–33. (In Russ.) DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-29-33

ВВЕДЕНИЕ

Хотя описание проблемы в непрерывном времени кажется более естественным, поскольку модель объекта как правило непрерывна, в конечном итоге такой подход приводит к более сложной эволюции закона управления с прогнозирующей моделью (УПМ). Это связано, в первую очередь, с необходимостью решения задач функциональной оптимизации при реализации УПМ. На самом деле, если функционал качества, который должен быть минимизирован, определяется в режиме непрерывного времени, и предполагается, что общая процедура оптимизации непрерывно повторяется после любого исчезающе малого периода выборки, на практике приводит к слишком трудоемким вычислениям.

Напротив, алгоритмы УПМ, основанные на представлении системы в дискретном времени, вычислительно проще [1]. Управляемая система, которая обычно описывается или аппроксимируется обычным дифференциальным уравнением, в УПМ, как правило, моделируется разностными уравнениями, поскольку управление обычно является кусочно-аффинным. Поэтому далее рассматриваются системы дискретного времени.

ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ В УПМ

Базовая структура УПМ приведена на рис. 1, где x_1 и x_2 – соответственно данные в прошлом и прогноз; y – это сигнал управления на выходе системы УПМ; d – желаемое состояние или уставка; e – отклонение: $e = d - y$.



Рис. 1. Базовая структура УПМ

Fig. 1. Base structure of MPC

В настоящее время теория линейного УПМ стала достаточно зрелой. Она позволяет решать задачи синтеза управления с множеством параметров и с учетом ограничений и неопределенностей, что характерно для множества объектов систем автоматизации и прочих систем. Актуально

использование УПМ и в случае, когда синтез закона управления в аналитическом виде затруднен или невозможен [2].

При этом, вопросы достижимости оптимальных решений в реальном времени в литературе описаны как правило для линейных систем. Аналогичная картина наблюдается и в вопросах обеспечения устойчивости средствами УПМ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА

Преимущество подхода с использованием УПМ состоит в том, что синтез управления не детерминирован строго конкретной моделью системы, при этом реализация УПМ зависит от описания модели. При синтезе систем УПМ разработчик может использовать описание в пространстве состояний, с применением передаточной матрицы, с моделями типа свертки [3; 4] и т.д.

Анализ научных источников показывает, что при использовании УПМ практически всегда используется описание модели в пространстве состояний. Поэтому, в настоящем исследовании система также описывается в пространстве состояний, причем дискретной линейной моделью вида

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где $x(k) \in R^n$, – вектор состояния во времени k ; $u(k) \in R^r$ – вектор изменяемых переменных, определяемый контроллером. Последовательности управления и состояния должны удовлетворять $u(k) \in U, x(k) \in X$.

Обычно, U является выпуклым компактным подмножеством в R^n , а X – выпуклым замкнутым подмножеством в R^n [5]. Целью управления обычно является приведение состояния в исходное или в состояние равновесия x_r , для которого выходной сигнал $y_r = h(x_r) = r$. Подходящее изменение координат сводит вторую задачу к первой, поэтому мы рассмотрим ее в дальнейшем.

Предположим, что в текущий момент времени k доступно полное измерение состояния $x(k)$. Тогда для события (x, k) реализация удаляющегося горизонта обычно формулируется путем введения следующей задачи оптимизации без обратной связи.

$$J_{(p,m)}(x(k)), \quad (2)$$

при условии

$$u(k) \in U, \quad x(k) \in X, \quad (3)$$

при $(p \geq m)$, где p – глубина горизонта прогнозирования или горизонта выхода; m – глубина горизонта управления или горизонта входа. При $p = \infty$, говорят о проблеме бесконечного горизонта, и аналогично, когда p конечна, говорят о проблеме конечного горизонта.

Чтобы задача имела смысл, мы предполагаем, что начало координат $(x = 0, u = 0)$ находится внутри допустимой области [4].

Несколько вариантов целевой функции $J_{(p,m)}(x(k))$, в уравнении оптимизации (2) были описаны в [1–4] и сравнены в [7]. В этой главе мы рассмотрим следующую квадратичную цель

$$J_{(p,m)}(x(k)) = \min_{u(\cdot)} \left[x^T(k+p|k)P_0x(k+p|k) + \sum_{i=0}^{p-1} x^T(k+i|k)Qx(k+i|k) + \sum_{i=0}^{m-1} u^T(k+i|k)Ru(k+i|k) \right], \quad (4)$$

где $u(\cdot) = [u(k)^T, \dots, u(k+m-1|k)^T]^T$ – упорядоченный набор управляемых переменных оптимизации; $x(k+i|k)$,

$i = 1, 2, \dots, p$ – прогноз состояния, полученный на модели (1) на основе информации о состоянии в момент времени k действия последовательности управления $u(k), u(k+1|k), \dots, u(k+m-1|k)$; P_0, Q, R – являются строго положительно определенными симметричными весовыми матрицами.

Пусть $u_{(p,m)}^*(i|k), i = k, \dots, k+m-1$ – минимизирующая последовательность управления для $J_{(p,m)}(x(k))$ с учетом динамики системы (1) и ограничений (3), а $J_{(p,m)}^*$ – функция оптимизации значений. Процесс управления с удаляющимся горизонтом осуществляется путем реализации только первого управления $u_{(p,m)}^*(k|k)$ из полученной последовательности управлений, чтобы получить $x(k+1) = Ax(k) + Bu_{(p,m)}^*(k|k)$. Остальная часть управляющей последовательности $u_{(p,m)}^*(i|k), i = k+1, \dots, k+m-1$ отбрасывается и $x(k+1)$ служит для актуализации (2), выступая в роли нового начального условия.

Далее описанный механизм повторяется, при этом на каждой итерации используется только первое управляющее действие для получения обновленного начального условия, а затем вычисляя функцию качества на один шаг вперед и повторяя процесс. Именно по этой причине УПМ также называют управлением с удаляющимся горизонтом или управлением движущегося горизонта.

Целью проведения новых измерений на каждом временном шаге является компенсация неизмеренных помех и неточностей модели, которые приводят к тому, что выходная информация системы отличается от прогнозируемой моделью.

На рис. 2 приведена поясняющая УПМ иллюстрация.

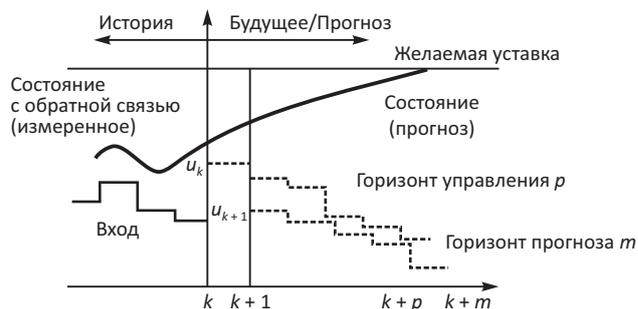


Рис. 2. Принцип управления в системе УПМ

Fig. 2. The control principle in the MPC system

Для описанной схемы управления в первую очередь актуальны следующие вопросы:

1. Достижимость сформулированной задачи, то есть при каких условиях алгоритм синтеза управляющего воздействия может быть реализован?
2. При каких условиях последовательность вычисленных управляющих воздействий приводит к устойчивому состоянию замкнутой системы?
3. Какие показатели качества управления в замкнутом контуре являются результатом повторного решения указанной задачи оптимального управления для разомкнутой системы?

Рассмотрим проблемы, поднятые данными вопросами.

ДОСТИЖИМОСТЬ

Ограничения, указанные в (3), могут сделать задачу оптимизации неосуществимой. Например, при возникновении возмущения изложенная выше задача оптимизации станет недостижимой на определенном временном шаге [3].

Может также случиться, что алгоритм, который минимизирует целевой функционал для системы с разомкнутым контуром, непреднамеренно выведет систему с замкнутым контуром за пределы области допустимых значений. Данный вопрос требует отдельного подробного исследования.

УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

В случае ограниченного или бесконечного горизонта становится неясно, при каких условиях замкнутая система устойчива. Многие исследования линейного УПМ сосредоточены именно на этой проблеме. В итоге, на сегодняшний день для обеспечения устойчивости были предложены два основных подхода [2; 4; 5]: первый основан на исходной задаче (1)–(3), а второй – на добавлении ограничения на сходимость.

Для упрощения изложения подхода предполагаем $p = m = N$, тогда $J_{(p, m)} = J_N$, как определено в уравнении (2). Ключевым моментом при этом является использование оптимальной конечной функции качества J_N^* для вычисления горизонта. В качестве функции качества используется при этом функция Ляпунова.

Необходимо отметить, что

$$J_N^*(x(k)) - J_N^*(x(k+1)) > 0, \quad x \neq 0. \quad (5)$$

Переформулирование $J_N^*(x(k)) - J_N^*(x(k+1))$ дает

$$J_N^*(x(k)) - J_N^*(x(k+1)) = [x^T(k)Qx(k) + u^{*T}(x(k))Ru^*(x(k))] + [J_{N-1}^*(x(k+1))]. \quad (6)$$

Если можно показать, что правая часть (6) положительна, то устойчивость доказана. Поскольку $Q > 0$ и $R > 0$, первое слагаемое $[x^T(k)Qx(k) + u^{*T}(x(k))Ru^*(x(k))]$ положительно. В общем, нельзя утверждать, что второй член $J_N^*(x(k)) - J_N^*(x(k+1))$ неотрицательный.

В литературе предложен ряд подходов, позволяющих убедиться, что правая часть (6) положительна. Различные ограничения, введенные для обеспечения устойчивости (терминальное ограничение для всех состояний, терминальное ограничение для неустойчивых состояний, терминальные ограничения и т.д.), потенциально могут быть причинами невыполнения достижимости. Например, может стать невозможным введение терминального ограничения, если не будет использован достаточно большой горизонт прогнозирования.

ЦЕЛЕВОЙ ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ В РАЗОМКНУТОЙ И ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМАХ

Необходимо учитывать, что при управлении с удаляющимся горизонтом применяется только первое управление из всех вычисленных до горизонта, остальные управления при этом отбрасываются. Как следствие, фактически примененные управления как правило значительно отличаются от рассчитанных на конкретном временном шаге [2; 4]. Следовательно, минимизируемый целевой функционал управления с конечным горизонтом может иметь только условную (прогнозируемую) связь со значением целевой функции, получаемой при реализации дискретных управлений.

ВЫВОДЫ

В статье продемонстрировано, что УПМ для систем с линейными ограничениями обеспечивает превосходное решение в реализации оптимального управления как теорети-

чески, так и практически. Это очень важный для понимания линейной УПМ вывод. В целом, полученные результаты согласуются с известными исследованиями по УПМ, показывая, что данный метод имеет потенциал к использованию во множестве применений. Следовательно, дальнейшие исследования должны быть проведены при более реалистичных условиях, характерных для физических, реальных систем.

Литература / References

1. Keerthi S., Gilbert E. Optimal infinite-horizon feedback laws for a general class of constrained discrete-time systems: stability and moving-horizon approximations. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 1988. No. 57 (2). Pp. 265–293.
2. Nevistić V., Primbs J.A. Finite receding horizon linear quadratic control: A unifying theory for stability and performance analysis. Paper presented at Technical Report CIT-CDS 97-001. California Institute of Technology. Pasadena, CA, 1997.
3. Bolognani S., Bolognani S., Peretti L., Zigliotto M. Design and Implementation of Model Predictive Control for Electrical Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. June 2009. Vol. 56. No. 6. Pp. 925–1936. DOI: 10.1109/TIE.2008.2007547
4. Zhilencov A., Chernyi S. Models and algorithms of the positioning and trajectory stabilisation system with elements of structural analysis for robotic applications. *International Journal of Embedded Systems*. 2019. No. 11 (6). P. 806. DOI: 10.1504/ijes.2019.104005
5. Zhilencov A., Chernyi S., Sokolov S., Nyrkov A. Intelligent autonomous navigation system for UAV in randomly changing environmental conditions. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2020. Vol. 38, No. 5, Pp. 6619–6625. Available: 10.3233/jifs-179741
6. Grimm G., Messina M.J., Tuna S.E., Teel A.R. Nominally robust model predictive control with state constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Oct. 2007. Vol. 52. No. 10. Pp. 1856–1870. DOI: 10.1109/TAC.2007.906187
7. Qi W., Liu J., Chen X., Christofides P.D. Supervisory Predictive Control of Standalone Wind / Solar Energy Generation Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Jan. 2011. Vol. 19, No. 1. Pp. 199–207. DOI: 10.1109/TCST.2010.2041930
8. Sadowska A., Schutter B.De., van Overloop P. Delivery-Oriented Hierarchical Predictive Control of an Irrigation Canal: Event-Driven Versus Time-Driven Approaches. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Sept. 2015. Vol. 23. No. 5. Pp. 1701–1716. DOI: 10.1109/TCST.2014.2381600
9. Veksler A., Johansen T.A., Borrelli F., Realfsen B. Dynamic positioning with model predictive control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. July 2016. Vol. 24. No. 4. Pp. 1340–1353. DOI: 10.1109/TCST.2015.2497280
10. Liu Jiangang, Huang Zhiwu, Peng Jun et al. An explicit predictive current-sharing control for parallel charging systems with nonlinear dynamics. *American Control Conference (ACC)*. 2016. Pp. 6821–6826.
11. Ionescu C.M., Keyser R.D., Torrico B.C. et al. Robust predictive control strategy applied for propofol dosing using BIS as a controlled variable during anesthesia. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. Sept. 2008. Vol. 55. No. 9. Pp. 2161–2170. DOI: 10.1109/TBME.2008.923142
12. Zbede Y.B., Gadoue S.M., Atkinson D.J. Model predictive MRAS estimator for sensorless induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. June 2016. Vol. 63. No. 6. Pp. 3511–3521. DOI: 10.1109/TIE.2016.2521721
13. Shadmand M.B., Balog R.S., Abu-Rub H. Model predictive control of PV sources in a smart DC distribution system: Maximum power point tracking and droop control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Dec. 2014. Vol. 29, No. 4, Pp. 913–921. DOI: 10.1109/TEC.2014.2362934
14. Kouki Rihab, Salhi Hichem, Bouani Faouzi. Application of model predictive control for a thermal process using STM32 microcontroller. *Control Automation and Diagnosis (ICCAD) International Conference*. 2017. Pp. 146–151.
15. Omar M.S., El Deib Amgad, El Shafei A.L. et al. Comparative study between PI and fuzzy-logic controllers for three-phase grid-connected photovoltaic systems. *Power Systems Conference (MEPCON) Eighteenth International Middle East*. 2016. Pp. 380–386.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Хак Тунг, аспирант Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (ИТМО). Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com

Жиленков Антон Александрович, кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой морской электроники Санкт-Петербургского Государственного Морского Технического Университета. Санкт-Петербург, Российская Федерация. AuthorID: 865291, Scopus ID 56560290200. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1555-1318>. E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

Данг Бинь Хак, аспирант Санкт-Петербургского Государственного Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (ИТМО). Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: dangkhacbinh90@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Nguyen Khac Tung, PhD student at the ITMO University. St. Petersburg, Russian Federation.

E-mail: nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com

Anton A. Zhilenkov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; St. Petersburg State Marine Technical University. St. Petersburg, Russian Federation. AuthorID: 865291, Scopus ID 56560290200. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1555-1318>. E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

Dang Binh Khac, PhD student at the ITMO University. St. Petersburg, Russian Federation. E-mail: dangkhacbinh90@gmail.com

Комбинаторные полиномиально вычислимые характеристики подстановок и их свойства

В.Г. Никонов¹ ©, А.И. Зобов² ©

¹ Российская академия естественных наук,
г. Москва, Российская Федерация

² Фонд содействия развитию безопасных информационных технологий,
г. Москва, Российская Федерация

E-mail: zobowai@gmail.com

Аннотация. Построение и выбор подходящего биективного отображения, то есть подстановки, в настоящее время становятся важной прикладной задачей, в том числе и для построения систем блочного шифрования. Во многих статьях предложено использовать различные подходы к определению качества подстановок, но большинство из них обладают высокой вычислительной сложностью. Решение данной задачи позволит существенно расширить круг методов построения и анализа схем в системах защиты информации. *Целью исследования* был поиск легковычислимых характеристик подстановок, позволяющих оценить их качество, а точнее, меры близости конкретной подстановки к случайной, или удаленности от нее. Для этой цели в работе предложены несколько характеристик – разностная и степенная, найдено их математическое ожидание, а также для разностной характеристики еще и дисперсия. Это позволяет путем сравнения результата подсчета характеристики для конкретной подстановки с вычисленным математическим ожиданием делать вывод о ее качестве. С вычислительной точки зрения положения статьи представляют исключительный интерес благодаря простоте алгоритма количественной оценки качества порождающих биективное отображение подстановок. По своей природе операция подсчета разностной характеристики осуществляет простое суммирование целочисленных слагаемых, принимающих значения в фиксированном и малом диапазоне. Такая операция и в современной, и в перспективной элементной базе заложена в логике широкого круга функциональных элементов, в особенности, при реализации вычислительных действий в оптическом диапазоне, или на иных носителях, относящихся к сфере нанотехнологий.

Ключевые слова: подстановка, S-блок, Кузнечик, BeIT, Hazad, Skipjack

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Никонов В.Г., Зобов А.И. Комбинаторные полиномиально вычислимые характеристики подстановок и их свойства // Computational nanotechnology. 2020. Т. 7. № 2. С. 34–41. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-34-41

Combinatorial polynomially computable characteristics of substitutions and their properties

V.G. Nikonov¹ ©, A.I. Zobov² ©

¹ Russian Academy of Natural Sciences,
Moscow, Russian Federation

² Secure Information Technology Assistance Foundation,
Moscow, Russian Federation

E-mail: zobowai@gmail.com

Abstract. The construction and selection of a suitable bijective function, that is, substitution, is now becoming an important applied task, particularly for building block encryption systems. Many articles have suggested using different approaches to determining the quality of substitution, but most of them are highly computationally complex. The solution of this problem will significantly expand the range of methods for constructing and analyzing scheme in information protection systems. The purpose of research is to find easily measurable characteristics of substitutions, allowing to evaluate their quality, and also measures of the proximity of a particular substitutions to a random one, or its distance from it. For this purpose, several characteristics were proposed in this work: difference and polynomial, and their mathematical expectation was found, as well as variance for the difference characteristic. This allows us to make a conclusion about its quality by comparing the result of calculating the characteristic for a particular substitution with the calculated mathematical expectation. From a computational point of view, the theses of the article are of exceptional interest due to the simplicity of the algorithm for quantifying the quality of bijective function substitutions. By its nature, the operation of calculating the difference characteristic carries out a simple summation of integer terms in a fixed and small range. Such an operation, both in the modern and in the prospective element base, is embedded in the logic of a wide range of functional elements, especially when implementing computational actions in the optical range, or on other carriers related to the field of nanotechnology.

Keywords: substitution, S-box, Kuznechik, BeIT, Hazad, Skipjack

FOR CITATION: Nikonov V.G., Zobov A.I. Combinatorial polynomially computable characteristics of substitutions and their properties. *Computational nanotechnology*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 34–41. (In Russ.) DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-34-41

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается постоянно растущий интерес к изучению биективных отображений, во многом сопряженный с построением систем блочного шифрования. Различные подходы к анализу таких систем привели исследователей к необходимости изучения целого ряда специальных характеристик подстановок, таких как разностные ([5–7] и др), дифференциальные ([11–14] и др.) и т.п.

Особенности развиваемых методов анализа привели к выделению специфических характеристик подстановок, поиск которых обладает высокой вычислительной сложностью. Задачей настоящей статьи авторы ставили введение и описание таких свойств подстановок, которые были бы легко вычислимы и позволяли прямо или косвенно судить о внутренней сложностной природе биективного преобразования. Исходя из этих соображений в статье рассмотрены разностные, квадратичные и, в общем случае, степенные характеристики, для которых удалось посчитать математическое ожидание, а для разностной характеристики еще и дисперсию. Значение математического ожидания и дисперсии разностной характеристики позволяет путем ее вычисления судить о мере близости конкретной подстановки к случайной, или о ее удаленности от нее.

Важнейшей отличительной особенностью характеристик, рассматриваемых в статье, является простота их вычисления, имеющая линейную трудоемкость.

1. ПАРАМЕТРЫ БЛИЗОСТИ ПОДСТАНОВОК

Пусть $S(0, n-1)$ – группа всех подстановок степени n . Каждая подстановка $\pi \in S(0, n-1)$ исходный символ i , $i \in 0, n-1$, переводит в образ $\pi(i)$. Рассмотрим некоторые характеристики подстановок из $S(0, n-1)$, которые позволят судить о криптографическом качестве этих подстановок, под качеством подразумевается близость подстановки к случайной.

Определение 1. Разностной характеристикой подстановки $\pi \in S(0, n-1)$ будем называть величину:

$$\xi_0(\pi) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |i - \pi(i)|. \quad (1)$$

Определение 2. Квадратичной характеристикой подстановки $\pi \in S(0, n-1)$ будем называть величину:

$$\xi_2(\pi) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (i - \pi(i))^2. \quad (2)$$

Кубической характеристикой подстановки $\pi \in S(\overline{0, n-1})$ будем называть величину:

$$\xi_3(\pi) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (i - \pi(i))^3. \quad (3)$$

Для подстановки $\pi \in S(\overline{0, n-1})$ степенной характеристикой близости будем называть величину:

$$\xi_m(\pi) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (i - \pi(i))^m. \quad (4)$$

З а м е ч а н и е. Квадратичная и кубическая характеристики являются частным случаем степенной характеристики.

Теорема 1. Выражение $n \cdot \xi_0(\pi)$ принимает четные значения в отрезке от 0 до $\lfloor n^2/2 \rfloor$, где $\lfloor x \rfloor$ – целая часть x , то есть

$$\forall a \in \left[0, \left\lfloor \frac{n^2}{2} \right\rfloor \right] \cap 2\mathbb{Z} \exists \pi \in S(\overline{0, n-1}): \xi_0(\pi) = \frac{a}{n}.$$

Доказательство

Сначала докажем, что

$$\max_{\pi \in S(\overline{0, n-1})} n \xi_0(\pi) = \left\lfloor \frac{n^2}{2} \right\rfloor.$$

Доказательство разобьем на два случая.

1. Пусть $n = 2k$ и существует $i \in \{0, \dots, k-1\}$ такой, что $\pi(i) \in \{0, \dots, k-1\}$. Тогда очевидно, что существует такой $j \in \{k, \dots, 2k-1\}$, что $\pi(j) \in \{k, \dots, 2k-1\}$.

Нетрудно проверить, что в каждом из четырех случаев:

$$\begin{aligned} i < \pi(i) < j < \pi(j); \\ \pi(i) < i < j < \pi(j); \\ i < \pi(i) < \pi(j) < j; \\ \pi(i) < i < \pi(j) < j \end{aligned}$$

выполняется неравенство

$$|\pi(i) - j| + |\pi(j) - i| > |\pi(i) - i| + |\pi(j) - j|.$$

В таком случае, разностная характеристика подстановки π' :

$$\begin{aligned} \pi'(i) &= \pi(j); \\ \pi'(j) &= \pi(i); \\ \pi'(s) &= \pi(s); \\ \forall s \in \{0, \dots, 2k-1\} \setminus \{i, j\} \end{aligned}$$

строго больше разностной характеристики π :

$$\begin{aligned} n \xi_0(\pi') &= \sum_{s \neq i, j} |s - \pi'(s)| + |i - \pi'(i)| + |j - \pi'(j)| = \\ &= \sum_{s \neq i, j} |s - \pi(s)| + |j - \pi(i)| + |i - \pi(j)| > \\ &> \sum_{s \neq i, j} |s - \pi(s)| + |j - \pi(j)| + |i - \pi(i)| = n \xi_0(\pi). \end{aligned}$$

Теперь нетрудно понять, что разностная характеристика может достигать своего максимального значения только на таких перестановках π у которых

$$\begin{aligned} \pi(\{0, \dots, k-1\}) &= \{k, \dots, 2k-1\}; \\ \pi(\{k, \dots, 2k-1\}) &= \{0, \dots, k-1\}. \end{aligned}$$

Рассмотрим произвольную подстановку вида, описанного выше и посчитаем ее разностную характеристику, умноженную на n :

$$\begin{aligned} n \xi_0(\pi) &= \sum_{i=0}^{n-1} |i - \pi(i)| = \sum_{i=0}^{k-1} |i - \pi(i)| + \sum_{i=k}^{2k-1} |i - \pi(i)| = \\ &= \sum_{i=0}^{k-1} (\pi(i) - i) + \sum_{i=k}^{2k-1} (i - \pi(i)) = \sum_{i=k}^{2k-1} s - \sum_{i=0}^{k-1} s + \sum_{i=k}^{2k-1} s - \sum_{i=0}^{k-1} s = \\ &= 2 \left(\sum_{i=k}^{2k-1} s - \sum_{i=0}^{k-1} s \right) = 2k^2 = \frac{n^2}{2} = \left\lfloor \frac{n^2}{2} \right\rfloor. \end{aligned}$$

2. Пусть $n = 2k + 1$ и, без ограничения общности, пусть $\pi(k) \in \{k+1, \dots, 2k\}$. Если $\pi^{-1}(k) = i \in \{k+1, \dots, 2k\}$, то существует $t \in \{0, \dots, k-1\}$, такой, что $\pi(t) \in \{0, \dots, k-1\}$. Тогда очевидно, что существует такой $j \in \{k, \dots, 2k-1\}$ и нетрудно проверить, что в каждом из четырех случаев:

$$\begin{aligned} t < \pi(t) < k < i < j, \\ \pi(t) < t < k < i < j, \\ t < \pi(t) < k < j < i, \\ \pi(t) < t < k < j < i \end{aligned}$$

выполняется неравенство

$$|j - t| + |\pi(t) - i| > |\pi(t) - t| + |j - k| + |k - i|.$$

В таком случае, разностная характеристика подстановки π' :

$$\begin{aligned} \pi'(t) &= j; \\ \pi'(k) &= k; \\ \pi'(i) &= \pi(t); \\ \pi'(s) &= \pi(s); \\ \forall s \in \{0, \dots, 2k\} \setminus \{i, t, k\} \end{aligned}$$

строго больше разностной характеристики π :

$$\begin{aligned} n \xi_0(\pi') &= \sum_{s \neq i, t, k} |s - \pi'(s)| + |i - \pi'(i)| + |k - \pi'(k)| + |t - \pi'(t)| = \\ &= \sum_{s \neq i, j} |s - \pi(s)| + |j - t| + |i - \pi(t)| > \\ &> \sum_{s \neq i, j} |s - \pi(s)| + |\pi(t) - t| + |j - k| + |k - i| = n \xi_0(\pi). \end{aligned}$$

Если же $\pi^{-1}(k) = i \in \{0, \dots, k-1\}$, то легко показать, что разностная характеристика подстановки π' :

$$\begin{aligned} \pi'(i) &= j; \\ \pi'(k) &= k; \\ \pi'(s) &= \pi(s); \\ \forall s \in \{0, \dots, 2k\} \setminus \{i, k\} \end{aligned}$$

совпадает с разностной характеристикой π :

$$\begin{aligned} n \xi_0(\pi') &= \sum_{s \neq i, k} |s - \pi'(s)| + |i - \pi'(i)| + |k - \pi'(k)| = \\ &= \sum_{s \neq i, k} |s - \pi'(s)| + (j - i) = \sum_{s \neq i, k} |s - \pi'(s)| + (j - k) + (k - i) = n \xi_0(\pi). \end{aligned}$$

Теперь нетрудно понять, что разностная характеристика может достигать своего максимального значения только на таких перестановках π у которых

$$\begin{aligned} \pi(\{0, \dots, k-1\}) &= \{k+1, \dots, 2k\}; \\ \pi(k) &= k, \pi\{k+1, \dots, 2k\} = \{0, \dots, k-1\}. \end{aligned}$$

Никонов В.Г., Зобов А.И.

Рассмотрим произвольную подстановку вида, описанного выше и посчитаем ее разностную характеристику, умноженную на n :

$$\begin{aligned} n\xi_0(\pi) &= \sum_{i=0}^{n-1} |i - \pi(i)| = \sum_{i=0}^{k-1} |i - \pi(i)| + \sum_{i=k+1}^{2k} |i - \pi(i)| = \\ &= \sum_{i=0}^{k-1} (\pi(i) - i) + \sum_{i=k+1}^{2k} (i - \pi(i)) = \sum_{i=k+1}^{2k} s - \sum_{i=0}^{k-1} s + \sum_{i=k+1}^{2k} s - \sum_{i=0}^{k-1} s = \\ &= 2 \left(\sum_{i=k+1}^{2k} s - \sum_{i=0}^{k-1} s \right) = 2k^2(k+1) = \frac{n^2 - 1}{2} = \left\lfloor \frac{n^2}{2} \right\rfloor. \end{aligned}$$

Осталось показать, что для любого

$$a \in \left[0, \left\lfloor \frac{n^2}{2} \right\rfloor \right] \cap 2\mathbb{Z} \exists \pi \in S(0, n-1) : \xi_0(\pi) = \frac{a}{n}.$$

Очевидно, что разностная характеристика тождественной подстановки, обозначим ее π_0 , равна 0. Построим последовательность подстановок

$$\pi_0, \dots, \pi_r,$$

где

$$\pi_r = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & n-1 \\ n-1 & n-2 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

для любого $k \in \mathbb{O}$, r ; $\pi_k(i) = \pi_{k-1}(i)$, для любого $i = 0, n-1 \setminus \{l-1, l\}$, $l = (k-1 \bmod n)$ и $\pi_k(l-1) = \pi_{k-1}(l)$, $\pi_k(l) = \pi_{k-1}(l-1)$. Количество подстановок в последовательности

$$r = (n-1) + (n-2) + \dots + 1 = \frac{n(n-1)}{2} > \frac{\left\lfloor \frac{n^2}{2} \right\rfloor}{2}.$$

Рассмотрим последовательность

$$0 = n\xi_0(\pi_0), \dots, n\xi_0(\pi_r) = \left\lfloor \frac{n^2}{2} \right\rfloor.$$

Нетрудно показать, что это неубывающая последовательность и разница между последовательными членами либо 0, либо 2. Для этого рассмотрим разность $n\xi_0(\pi_k) - n\xi_0(\pi_{k-1})$, заметим, что в этой разности не сократится только четыре члена:

$$\begin{aligned} n\xi_0(\pi_k) - n\xi_0(\pi_{k-1}) &= |\pi_k(l) - l| + |\pi_k(l-1) - (l-1)| - \\ &- |\pi_{k-1}(l) - l| - |\pi_{k-1}(l-1) - (l-1)|, \end{aligned}$$

учитывая, что, по построению последовательности $\{\pi_{k-1}(l)\}$, $\pi_{k-1}(l) > \pi_{k-1}(l-1)$, рассмотрим три случая.

$$1) \pi_{k-1}(l) > \pi_{k-1}(l-1) \geq l$$

$$\begin{aligned} n\xi_0(\pi_k) - n\xi_0(\pi_{k-1}) &= \pi_{k-1}(l-1) - l + \pi_{k-1}(l) - \\ &- (l-1) - \pi_{k-1}(l) + l - \pi_{k-1}(l-1) + (l-1) = 0, \end{aligned}$$

$$2) \pi_{k-1}(l) \geq l > l-1 \geq \pi_{k-1}(l-1)$$

$$\begin{aligned} n\xi_0(\pi_k) - n\xi_0(\pi_{k-1}) &= -\pi_{k-1}(l-1) + l + \pi_{k-1}(l) - \\ &- (l-1) - \pi_{k-1}(l) + l + \pi_{k-1}(l-1) - (l-1) = 2, \end{aligned}$$

$$3) l-1 \geq \pi_{k-1}(l) > \pi_{k-1}(l-1)$$

$$\begin{aligned} n\xi_0(\pi_k) - n\xi_0(\pi_{k-1}) &= -\pi_{k-1}(l-1) + l - \pi_{k-1}(l) + \\ &+ (l-1) + \pi_{k-1}(l) - l + \pi_{k-1}(l-1) - (l-1) = 0, \end{aligned}$$

Следовательно, последовательность $n\xi_0(\pi_0), \dots, n\xi_0(\pi_r)$ содержит все четные числа из отрезка $[0, \lfloor n^2/2 \rfloor]$.

Пример 1. Приведем пример последовательности подстановок из доказательства теоремы для $S(0, 4)$.

Таблица 1

Пример последовательности

r	Вторая строка подстановки	$n\xi_0(\pi_r)$
0	0 1 2 3 4	0
1	0 1 2 4 3	2
2	0 1 4 2 3	4
3	0 4 1 2 3	6
4	4 0 1 2 3	8
5	4 0 1 3 2	8
6	4 0 3 1 2	10
7	4 3 0 1 2	12
8	4 3 0 2 1	12
9	4 3 2 0 1	12
10	4 3 2 1 0	12

Следствие 1. Разностная характеристика $\xi_0(\pi)$ достигает своего максимума $\lfloor n^2/2 \rfloor$ на подстановках вида

$$\pi(\{0, \dots, k-1\}) = \{k+1, \dots, 2k\};$$

$$\pi(k) = k, \pi(\{k+1, \dots, 2k\}) = \{0, \dots, k-1\} \text{ при } n = 2k+1;$$

$$\pi(\{0, \dots, k-1\}) = \{k, \dots, 2k-1\};$$

$$\pi(\{k, \dots, 2k-1\}) = \{0, \dots, k-1\} \text{ при } n = 2k.$$

2. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВВЕДЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Пусть на $S(0, n-1)$ задано равномерное распределение. Тогда для дальнейшего изучения введенных характеристик найдем их математические ожидания.

Теорема 2. Справедливо следующее равенство

$$M\xi_0(\pi) = \frac{n^2 - 1}{3n}. \quad (5)$$

Доказательство

Заметим, что если зафиксировать $i \in (0, n-1)$ и некоторое j , то $|i - \pi(i)| = j$ при $\pi(i) = i - j$ и $\pi(i) = i + j$, если $j \leq i$ или только при $\pi(i) = i + j$ если $j > i$, а также, что при фиксированном i количество подстановок, принимающих некоторое конкретное значение $|i - \pi(i)|$ будет $(n-1)!$ шт. Тогда

$$\begin{aligned} M\xi_0(\pi) &= \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \frac{1}{n!} \xi_0(\pi) = \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \frac{1}{n!} \left(\sum_{i=0}^{n-1} |i - \pi(i)| \right) = \\ &= \frac{1}{n!} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{\pi \in S(0, n-1)} |i - \pi(i)| = \frac{1}{n!} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\sum_{j=0}^{n-1-i} j(n-1)! + \sum_{j=0}^i j(n-1)! \right) = \\ &= \frac{1}{n^2} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{(n-i-1)(n-i)}{2} + \frac{i(i+1)}{2} \right) = \\ &= \frac{1}{2n^2} \left(n^2(n-1) - 2(n-1) \sum_{i=0}^{n-1} i + 2 \sum_{i=0}^{n-1} i^2 \right) = \frac{n^2 - 1}{3n}. \end{aligned}$$

Теорема 3. Для любого $s \in \mathbb{N}$ справедливо следующее равенство

$$M_{\xi_m}^{\xi}(\pi) = \begin{cases} \frac{1}{n^2} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\sum_{j=i-n+1}^i j^{2s} \right) & \text{при } m = 2s, \\ 0 & \text{при } m = 2s - 1. \end{cases} \quad (6)$$

Доказательство

Заметим, что выражение $(i - \pi(i))^m$ принимает все целые значения от $i - (n - 1)$ до i , а также, что количество подстановок с фиксированными $\pi(i) - (n - 1)!$ шт. Тогда

$$\begin{aligned} M_{\xi_m}^{\xi}(\pi) &= \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \frac{1}{n!} \xi_m(\pi) = \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \frac{1}{n!} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (i - \pi(i))^m \right) = \\ &= \frac{1}{n!} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{\pi \in S(0, n-1)} (i - \pi(i))^m = \\ &= \frac{1}{n!} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\sum_{j=i-(n-1)}^i j^m (n-1)! \right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\sum_{j=i-(n-1)}^i j^m \right). \end{aligned}$$

В случае $m = 2s$ теорема доказана. Осталось рассмотреть случай $m = 2s - 1$

$$\frac{1}{n^2} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\sum_{j=i-n+1}^i j^{2s-1} \right). \quad (*)$$

Рассмотрим сумму слагаемых с номерами при $i = t$

$$\text{и } i = (n - 1 - t), \quad t \in \left(0, \left[\frac{n-1}{2} \right] \right).$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=t-n+1}^t j^{2s-1} + \sum_{j=t}^{n-1-t} j^{2s-1} &= \sum_{j=t-n+1}^t j^{2s-1} + \sum_{k=t}^{t-n+1} (-k)^{2s-1} = \\ &= \sum_{j=t-n+1}^t j^{2s-1} - \sum_{j=t-n+1}^t j^{2s-1} = 0. \end{aligned}$$

Для случая нечетного n в сумме (*) нет слагаемых, которые не взаимоуничтожаются и в этом случае $M_{\xi_{2s-1}}^{\xi}(\pi) = 0$.

Для случая четного n в сумме (*) остается одно слагаемое при $i = \frac{n-1}{2}$

$$\sum_{j=\frac{n-1}{2}-n+1}^{\frac{n-1}{2}} j^{2s-1} = \sum_{j=\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} j^{2s-1} = 0,$$

а следовательно $M_{\xi_{2s+1}}^{\xi}(\pi) = 0$ и в этом случае.

З а м е ч а н и е. Для практического подсчета $M_{\xi_m}^{\xi}(\pi)$ надо уметь вычислять $S_k = \sum_{s=0}^n s^k$, где $k \in \mathbb{N}$. Согласно [10] можно воспользоваться, например, рекуррентной формулой:

$$\binom{k+1}{1} S_k + \binom{k+1}{2} S_{k-1} + \dots + \binom{k+1}{k} S_1 + S_0 = (n+1)^{k+1} - 1,$$

$$\text{где } S_0 = n, \quad S_1 = \frac{n(n+1)}{2}.$$

С л е д с т в и е

$$M_{\xi_2}^{\xi}(\pi) = \frac{n^2 - 1}{6}; \quad M_{\xi_3}^{\xi}(\pi) = 0; \quad M_{\xi_4}^{\xi}(\pi) = \frac{(3 - 5n^2 + 2n^4)}{30}.$$

Теорема 4. Справедливо следующее равенство

$$D_{\xi_0}^{\xi}(\pi) = \frac{(n+1)(2n^2+7)}{45n^2}. \quad (7)$$

Доказательство

$$\begin{aligned} D_{\xi_0}^{\xi}(\pi) &= M(\xi_0(\pi))^2 - (M_{\xi_0}^{\xi}(\pi))^2 = \\ &= \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \frac{1}{n!} (\xi_0(\pi))^2 - \left(\frac{n^2 - 1}{3n} \right)^2 = \\ &= \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \frac{1}{n!} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |i - \pi(i)| \right)^2 - \left(\frac{n^2 - 1}{3n} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{n! n^2} \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \left(\sum_{i=0}^{n-1} |i - \pi(i)|^2 + 2 \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} |i - \pi(i)| |j - \pi(j)| \right) - \\ &\quad - \left(\frac{n^2 - 1}{3n} \right)^2 = \frac{1}{n} \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \frac{1}{n!} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (i - \pi(i))^2 \right) + \\ &\quad + \frac{2}{n! n^2} \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} |i - \pi(i)| |j - \pi(j)| - \left(\frac{n^2 - 1}{3n} \right)^2. \end{aligned}$$

В последнем равенстве первая сумма равна $(1/n) M_{\xi_2}^{\xi}(\pi)$. При подсчете второй суммы необходимо учесть, что $(i - \pi(i))$ пробегает все целые значения от $i - (n - 1)$ до i , а $(j - \pi(j))$ – все целые значения от $j - (n - 1)$ до j , причем, так как π – подстановка, то $\pi(i) \neq \pi(j)$, при $i \neq j$, а также то, что количество подстановок с фиксированными значениями $\pi(i), \pi(j) - (n - 2)!$ шт. Тогда

$$\begin{aligned} &\frac{1}{n} \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \frac{1}{n!} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (i - \pi(i))^2 \right) + \\ &+ \frac{2(n-2)!}{n! n^2} \sum_{\pi \in S(0, n-1)} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} |i - \pi(i)| |j - \pi(j)| - \left(\frac{n^2 - 1}{3n} \right)^2 = \\ &= \frac{n^2 - 1}{6n} - \left(\frac{n^2 - 1}{3n} \right)^2 + \\ &+ \frac{2}{(n-1)n^3} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} \left(\sum_{k=i-(n-1)}^i \sum_{l=j-(n-1)}^j |k||l| - \sum_{t=0}^{n-1} |i-t||j-t| \right) = \\ &= \frac{-2n^4 + 3n^3 + 4n^2 - 3n - 2}{6n} + \\ &+ \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} \left[\frac{1}{4} (2i(1+i) - (1+2i)n + n^2) (2j(1+j) - (1+2j)n + n^2) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{6} (2(-1+i-j)(i-j)(1+i-j) - (1+3j+i(3+6j))n + \right. \\ &\quad \left. + 3(1+i+j)n^2 - 2n^3) \right] = \frac{7+7n+2n^2+2n^3}{45n^2} = \frac{(n+1)(2n^2+7)}{45n^2}. \end{aligned}$$

Пример 2. Рассмотрим какие значения может принимать $\xi_0(\pi)$ если $\pi \in S(0, 7)$.

Значения

$\xi_0(\pi)$	Количество	Пример $\pi(i)$ с характеристикой $\xi_0(\pi)$	$\xi_0(\pi)$	Количество	Пример $\pi(i)$ с характеристикой $\xi_0(\pi)$
0	1	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{pmatrix}$	2	3696	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 4 & 5 & 6 & 7 & 2 & 3 \end{pmatrix}$
0,25	7	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 6 & 5 & 7 \end{pmatrix}$	2,25	4852	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 5 & 6 & 7 & 2 & 3 & 4 \end{pmatrix}$
0,5	33	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 6 & 7 & 5 \end{pmatrix}$	2,5	5708	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 2 & 5 & 6 & 7 & 1 & 3 & 4 \end{pmatrix}$
0,75	115	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 5 & 6 & 7 & 4 \end{pmatrix}$	2,75	5892	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 3 & 5 & 6 & 7 & 1 & 1 & 4 \end{pmatrix}$
1	327	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 6 & 7 & 4 & 5 \end{pmatrix}$	3	5452	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 4 & 5 & 6 & 7 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$
1,25	765	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 2 & 4 & 6 & 7 & 3 & 5 \end{pmatrix}$	3,25	4212	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1 & 4 & 5 & 6 & 7 & 0 & 2 & 3 \end{pmatrix}$
1,5	1523	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 2 & 5 & 6 & 7 & 3 & 4 \end{pmatrix}$	3,5	2844	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 2 & 4 & 5 & 6 & 7 & 0 & 1 & 3 \end{pmatrix}$
1,75	2553	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 0 & 1 & 3 & 5 & 6 & 7 & 2 & 4 \end{pmatrix}$	3,75	1764	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$
			4	576	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 4 & 5 & 6 & 7 & 0 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$

Тогда

$$M\xi_0(\pi) = \sum_{\pi \in S(0,7)} \frac{1}{8!} \xi_0(\pi) = 2,625 = \frac{8^2 - 1}{3 \cdot 8};$$

$$D\xi_0(\pi) = \sum_{\pi \in S(0,7)} \frac{1}{8!} (\xi_0(\pi) - M\xi_0(\pi))^2 = 0,421875 = \frac{(8+1)(2 \cdot 8^2 + 7)}{45 \cdot 8^2}.$$

Пример 3. Пусть $\pi \in S(0, 255)$, тогда рассмотрим несколько подстановок из действующих стандартов, подстановки взяты из [13]. Напомним, что в этом случае $M\xi_0(\pi) = 85$, $D\xi_0(\pi) \approx 11,42$.

1. BelT (см. [1; 2]) — государственный стандарт симметричного шифрования и контроля целостности Республики Беларусь (СТБ 34.101.31–2007). Подстановка представлена на рис. 1. В этом случае $\xi_0(\pi) = 88,8828185$.

2. Skipjack (см. [9]) — блочный шифр, разработанный АНБ США в рамках проекта Capstone. Подстановка представлена на рис. 2. В этом случае $\xi_0(\pi) = 89,1796875$.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	B1	94	BA	C8	OA	08	F5	3B	36	6D	00	8E	58	4A	5D	E4
1	85	04	FA	9D	1B	B6	C7	AC	25	2E	72	C2	02	FD	CE	OD
2	5B	E3	D6	12	17	B9	61	81	FE	67	86	AD	71	6B	89	OB
3	5C	BO	CO	FF	33	C3	56	B8	35	C4	05	AE	D8	EO	7F	99
4	E1	2B	DC	1A	E2	82	57	EC	70	3F	CC	FO	95	EE	8D	F1
5	C1	AB	76	38	9F	E6	78	CA	F7	C6	F8	60	D5	BB	9C	4F
6	F3	3C	65	7B	63	7C	30	6A	DD	4E	A7	79	9E	B2	3D	31
7	3E	98	B5	6E	27	D3	BC	CF	59	1E	18	1F	4C	5A	B7	93
8	E9	DE	E7	2C	8F	OC	OF	A6	2D	DB	49	F4	6F	73	96	47
9	06	07	53	16	ED	24	7A	37	39	CB	A3	83	03	A9	8B	F6
A	92	BD	9B	1C	E5	D1	41	01	54	45	FB	C9	5E	4D	OE	F2
B	68	20	80	AA	22	7D	64	2F	26	87	F9	34	90	40	55	11
C	BE	32	97	13	43	FC	9A	48	AO	2A	88	5F	19	4B	09	A1
D	7E	CD	A4	DO	15	44	AF	8C	A5	84	50	BF	66	D2	E8	8A
E	A2	D7	46	52	42	A8	DF	B3	69	74	C5	51	EB	23	29	21
F	D4	EF	D9	B4	3A	62	28	75	91	14	10	EA	77	6C	DA	1D

Рис. 1. Подстановка π стандарта BelT

	X0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	xA	xB	xC	xD	xE	xF
0x	a3	d7	09	83	f8	48	f6	f4	b3	21	15	78	99	b1	af	f9
1x	e7	2d	4d	8a	ce	4c	ca	2e	52	95	d9	1e	4e	38	44	28
2x	Oa	df	02	aO	17	f1	60	68	12	b7	7a	c3	e9	fa	3d	53
3x	96	84	6b	ba	f2	63	9a	19	7c	ae	e5	f5	f7	16	6a	a2
4x	39	b6	7b	Of	c1	93	81	1b	ee	b4	1a	ea	dO	91	2f	b8
5x	55	b9	da	85	3f	41	bf	eO	5a	58	80	5f	66	Ob	d8	90
6x	35	d5	cO	a7	33	06	65	69	45	OO	94	56	6d	98	9b	76
7x	97	fc	b2	c2	bO	fe	db	20	e1	eb	d6	e4	dd	47	4a	1d
8x	42	ed	9c	6c	49	3c	cd	43	27	d2	07	d4	de	c7	67	18
9x	89	cb	30	1f	8d	c6	8f	aa	c8	74	dc	c9	5d	5c	31	a4
Ax	70	88	61	2c	9f	Od	2b	87	50	82	54	64	26	7d	03	40
Bx	34	4b	1c	73	d1	c4	fd	3b	cc	fb	7f	ab	e6	3e	5b	a5
Cx	ad	04	23	9c	14	51	22	fO	29	79	71	7e	ff	8c	Oe	e2
Dx	Oc	ef	be	72	75	6f	37	a1	ec	d3	8e	62	8b	86	10	e8
Ex	08	77	11	be	92	4f	24	c5	32	36	9d	cf	f3	A6	bb	ac
Fx	5e	6c	a9	13	57	25	b5	e3	bd	a8	3a	01	05	59	2a	46

Рис. 2. Подстановка π шифра Skipjack

3. KHAZAD (см. [3, 4]) — симметричный блочный шифр, представленный на конкурсе NESSIE в 2000 году, где в модифицированной (tweaked) форме стал одним из алгоритмов-финалистов. Подстановка представлена на рис. 3. В этом случае $\xi_0(\pi) = 92,890625$.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	BA	54	2F	74	53	D3	D2	4D	50	AC	8D	BF	70	52	9A	4C
1	EA	D5	97	D1	33	51	5B	A6	DE	48	A8	99	DB	32	B7	FC
2	E3	9E	91	9B	E2	BB	41	6E	A5	CB	6B	95	A1	F3	B1	02
3	CC	C4	1D	14	C3	63	DA	5D	5F	DC	7D	CD	7F	5A	6C	5C
4	F7	26	FF	ED	E8	9D	6F	8E	19	AO	FO	89	OF	07	AF	FB
5	08	15	OD	04	01	64	DF	76	79	DD	3D	16	3F	37	6D	38
6	B9	73	E9	35	55	71	7B	8C	72	88	F6	2A	3E	5E	27	46
7	OC	65	68	61	03	C1	57	D6	D9	58	D8	66	D7	3A	C8	3C
8	FA	96	A7	98	EC	B8	C7	AE	69	4B	AB	A9	67	0A	47	F2
9	B5	22	E5	EE	BE	2B	81	12	83	1B	OE	23	F5	45	21	CE
A	49	2C	F9	E6	B6	28	17	82	1A	8B	FE	8A	09	C9	87	4E
B	E1	2E	E4	EO	E B	90	A4	11 E	85	60	OO	25	F4	F1	94	OB
C	E7	75	EF	34	31	D4	DO	86	7E	AD	FD	29	30	3B	9F	F8
D	C6	13	06	05	05	11	77	7C	7A	78	36	1C	39	59	18	56
E	B3	BO	24	20	B2	92	A3	CO	44	62	10	B4	84	43	93	C2
F	4A	BO	8F	20	BC	9C	6A	40	CF	A2	80	4F	1F	CA	AA	42

Рис. 3. Подстановка π шифра KHAZAD

4. «Кузнечик» (см. [7]) — симметричный алгоритм блочного шифрования, утвержденный в качестве стандарта ГОСТ Р 34.12–2015. Подстановка, используемая в «Кузнечике»:

(252, 238, 221, 17, 207, 110, 49, 22, 251, 196, 250, 218, 35, 197, 4, 77, 233, 119, 240, 219, 147, 46, 153, 186, 23, 54, 241, 187, 20, 205, 95, 193, 249, 24, 101, 90, 226, 92, 239, 33, 129, 28, 60, 66, 139, 1, 142, 79, 5, 132, 2, 174, 227, 106, 143, 160, 6, 11, 237, 152, 127, 212, 211, 31, 235, 52, 44, 81, 234, 200, 72, 171, 242, 42, 104, 162, 253, 58, 206, 204, 181, 112, 14, 86, 8, 12, 118, 18, 191, 114, 19, 71, 156, 183, 93, 135, 21, 161, 150, 41, 16, 123, 154, 199, 243, 145, 120, 111, 157, 158, 178, 177, 50, 117, 25, 61, 255, 53, 138, 126, 109, 84, 198, 128, 195, 189, 13, 87, 223, 245, 36, 169, 62, 168, 67, 201, 215, 121, 214, 246, 124, 34, 185, 3, 224, 15, 236, 222, 122, 148, 176, 188, 220, 232, 40, 80, 78, 51, 10, 74, 167, 151, 96, 115, 30, 0, 98, 68, 26, 184, 56, 130, 100, 159, 38, 65, 173, 69, 70, 146, 39, 94, 85, 47, 140, 163, 165, 125, 105, 213, 149, 59, 7, 88, 179, 64, 134, 172, 29, 247, 48, 55, 107, 228, 136, 217, 231, 137, 225, 27, 131, 73, 76, 63, 248, 254, 141, 83, 170, 144, 202, 216, 133, 97, 32, 113, 103, 164, 45, 43, 9, 91, 203, 155, 37, 208, 190, 229, 108, 82, 89, 166, 116, 210, 230, 244, 180, 192, 209, 102, 175, 194, 57, 75, 99, 182).

В этом случае $\xi_0(\pi) = 85$.

В итоге, во всех рассмотренных выше примерах, подстановки, обладающие хорошими разностными и дифферен-

циальными характеристиками, имеют разностную характеристику, отличающуюся от математического ожидания на величину меньшую, чем дисперсия.

Никонов В.Г., Зобов А.И.

Литература

1. Agievich S.V., Afonenko A.A. On the properties of exponential substitutions. *Vesti NAN Belarusi*. 2005. No. 1. Pp. 106–112. (In Russ.)
2. Agievich S.V., Galinsky B.A., Mikulich N.D., Kharin U.S. Algorithm of block encryption BelT. <http://apmi.bsu.by/assets/files/agievich/BelT.pdf> (In Russ.)
3. Barreto P., Rijmen V. The ANUBIS block cipher. *NESSIE submission*. 2000.
4. Barreto P., Rijmen V. The KHAZAD block cipher. *NESSIE submission*. 2000.
5. Chabaud F., Vaudenay S. Links between differential and linear cryptanalysis. *EUROCRYPT, Lect. Notes Comput. Sci.* 1994. No. 950. Pp. 356–365.
6. Daemen J., Rijmen V. Probability distributions of correlations and differentials in block ciphers. *J. Math. Crypt.* 2007. No. 1. Pp. 221–242.
7. GOST R 34.12–2015. Information technology. Cryptographic protection of information. Block ciphers. Moscow: Standartinform, 2015. (In Russ.)
8. Matsui M. The first experimental cryptanalysis of the data encryption standart. *Advances of Cryptology – CRYPTO’94. Lect. Notes in Comp Sci. Springer*. 1995. Vol. 839. Pp. 1–11.
9. Skipjack and KEA Algorithm Specifications, Version 2.0. 1998, <http://csrc.nist.gov/encryption/skipjack-kea/htm>
10. Кудрявцев В.А. Суммирование степеней чисел натурального ряда и числа Бернулли. Л.: Объед. науч.-техн. изд-во НКТП СССР, 1936. 37 с.
11. Логачев О.А., Сальников А.А., Смышляев С.В., Яценко В.В. Булевы функции в теории кодирования и криптологии. 2-е изд., доп. М.: МЦНМО, 2012. 584 с.
12. Логачев О.А., Федоров С.Н., Яценко В.В. Булевы функции как точки на гиперсфере в евклидовом пространстве // *Дискретная математика*. 2018. № 30:1. Pp. 39–55.
13. Менячихин А.В. Спектрально-линейный и спектрально-дифференциальный методы построения S-боксов с близкими к оптимальным значениями криптографических параметров // *Математические вопросы криптографии*. 2017. Т. 8. № 2, С. 97–116.
14. Никонов В.Г. Методы компактной реализации биективных отображений, заданных регулярными системами однотипных булевых функций / В.Г. Никонов, А.В. Саранцев // *Вестник Российского ун-та Дружбы Народов. Серия: Прикладная и промышленная математика*. 2003. Т. 2. № 1. С. 94–105.
15. Яблонский С.В. Введение в дискретную математику: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 384 с.

References

1. Agievich S.V., Afonenko A.A. On the properties of exponential substitutions. *Vesti NAN Belarusi*. 2005. No. 1. Pp. 106–112. (In Russ.)
2. Agievich S.V., Galinsky B.A., Mikulich N.D., Kharin U.S. Algorithm of block encryption BelT. <http://apmi.bsu.by/assets/files/agievich/BelT.pdf> (In Russ.)
3. Barreto P., Rijmen V. The ANUBIS block cipher. *NESSIE submission*. 2000.
4. Barreto P., Rijmen V. The KHAZAD block cipher. *NESSIE submission*. 2000.
5. Chabaud F., Vaudenay S. Links between differential and linear cryptanalysis. *EUROCRYPT, Lect. Notes Comput. Sci.* 1994. No. 950. Pp. 356–365.
6. Daemen J., Rijmen V. Probability distributions of correlations and differentials in block ciphers. *J. Math. Crypt.* 2007. No. 1. Pp. 221–242.
7. GOST R 34.12–2015. Information technology. Cryptographic protection of information. Block ciphers. Moscow: Standartinform, 2015. (In Russ.)
8. Matsui M. The first experimental cryptanalysis of the data encryption standart. *Advances of Cryptology – CRYPTO’94. Lect. Notes in Comp Sci. Springer*. 1995. Vol. 839. Pp. 1–11.
9. Skipjack and KEA Algorithm Specifications, Version 2.0. 1998, <http://csrc.nist.gov/encryption/skipjack-kea/htm>
10. Kudryavtsev V.A. Summing up the degrees of the numbers of the natural series and the Bernoulli number. Leningrad: Joint Scientific and Technical Publishing House NKTP of the USSR, 1936, 37 p.
11. Logachev O.A., Salnikov A.A., Smyshlyayev S.V., Yashchenko V.V. Bulev functions in the theory of coding and cryptology. 2nd ed., add. Moscow: MTSNMO, 2012. 584 p.
12. Logachev O.A., Fedorov S.N., Yashchenko V.V. Bulev functions as points on the hypersphere in Euclidean space. *Discrete mathematics*. 2018. No. 30:1. Pp. 39–55.
13. Menyachihin A.V. Spectral-linear and spectral-differential methods for constructing S-boxes with cryptographic parameters close to optimal values. *Mathematical Issues of Cryptography*. 2017. Vol. 8. No. 2. Pp. 97–116.
14. Nikonov V.G. Methods of compact implementation of bijective mappings specified by regular systems of the same type of Boolean functions. V.G. Nikonov, A.V. Sarantsev. *Bulletin of the Russian University of Friendship of Peoples. Series: Applied and Industrial Mathematics*. 2003. Vol. 2. No. 1. Pp. 94–105.
15. Yablonsky S.V. Introduction to discrete mathematics: Textbook for universities. 2nd ed., conv. and add. Moscow: Science. Chapter. Physical edition. a mat. Lit. 384 p.

Статья поступила в редакцию 12.05.2020, принята к публикации 20.06.2020
The article was received on 12.05.2020, accepted for publication 20.06.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Никонов Владимир Глебович, д-р техн. наук, профессор, член Президиума Российской академии естественных наук. Москва, Российская Федерация. AuthorID: 396412

Зобов Антон Игоревич, сотрудник Фонд содействия развитию безопасных информационных технологий. Москва, Российская Федерация. E-mail: zobowai@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir G. Nikonov, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Member of the Presidium RANS. Moscow, Russian Federation. AuthorID: 396412

Anton I. Zobov, research employee of Secure Information Technology Assistance Foundation. Moscow, Russian Federation. E-mail: zobowai@gmail.com

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ НА НОВЫХ ПРИНЦИПАХ, СОЗДАНИЕ НОВОГО КВАНТОВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE OF QUANTUM COMPUTERS BASED ON NEW PRINCIPLES, CREATING NEW QUANTUM PROGRAMMING

05.13.17

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ
THEORETICAL FOUNDATIONS OF COMPUTER SCIENCE

DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-42-48

УДК: 519.682

Беступиковый алгоритм расширенного синтаксического анализа и его приложение к языкам программирования для квантовых компьютеров

В.В. Кишкан¹ ©, К.В. Сафонов² ©

¹ Восточно-Сибирский техникум туризма и сервиса,
г. Красноярск, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация

E-mail: safonovkv@rambler.ru

Аннотация. При разработке перспективных языков программирования, предназначенных для обеспечения работы суперкомпьютеров, в том числе квантовых, возникает необходимость исследований, связанных с тестированием разрабатываемого языка в условиях, когда парсеры для него еще не существуют. В частности, в процессе разработки языка программирования для квантового компьютера возникает необходимость провести синтаксический анализ (разбор) некоторой программы, написанной на новом языке программирования, принадлежащем, как и все языки программирования, классу контекстно-свободных языков (кс-языков). Проблема синтаксического анализа мономов кс-языков возникла в 50–60-х гг. прошлого века, однако в ее постановке имеются некоторые различия, в связи с чем возникает необходимость уточнить формулировку этой проблемы. В связи с этим будем называть расширенной проблемой синтаксического анализа проблему разработки беступикового (безостановочного, безвозвратного) алгоритма, который позволяет установить, может ли данный моном быть выведен при помощи системы продукций, которые образуют грамматику кс-языка, а также найти сразу все выводы этого монома, если такие существуют. Описание вывода монома понимается следующим образом: необходимо определить, какие продукции из грамматики кс-языка, сколько раз и в каком порядке применяются для вывода этого монома, что равносильно построению всех деревьев вывода. В статье разработан беступиковый алгоритм решения расширенной проблемы синтаксического анализа, основанный на методе иерархии маркированных скобок. Маркировка скобок показывает, за какой продукцией они закреплены, и позволяет проследить порядок ее использования. В алгоритме используется метод последо-

вательных приближений для решения система уравнений Хомского–Шютценберже, ассоциированной с грамматикой кс-языка. Разработанный алгоритм имеет простую программную реализацию, дана также оценка сложности алгоритма.

Ключевые слова: алгоритм синтаксического анализа, квантовый компьютер

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Кишкан В.В., Сафонов К.В. Беступиковый алгоритм расширенного синтаксического анализа и его приложение к языкам программирования для квантовых компьютеров // *Computational nanotechnology*. 2020. Т. 7. № 2. С. 42–48. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-42-48

DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-42-48

Deadlock algorithm for advanced syntactical analysis and its application to programming languages for quantum computers

V.V. Kishkan¹ ©, K.V. Safonov² ©

¹ East Siberian College of Tourism and Service,
Krasnoyarsk, Russian Federation

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

E-mail: safonovkv@rambler.ru

Abstract. When developing promising programming languages designed to support the work of supercomputers, including quantum ones, there is a need for research related to testing the developed language under conditions when parsers do not yet exist for it. In particular, in the process of developing a programming language for a quantum computer, it becomes necessary to parse a certain program written in a new programming language, which, like all programming languages, belongs to the class of context-free languages (cf-languages). The problem of syntactical analysis of the monomials of cf-languages was posed in the 50–60s of the last century, however, there are some discrepancies in its formulation, and therefore there is a need to clarify the formulation of this problem. In this regard, we will call the expanded problem of parsing the problem of developing a stupid (non-stop, irrevocable) algorithm that allows establishing whether a given monomial can be deduced using a system of products that form a cf-language grammar, and also find all the conclusions of this monomial at once if the latter exists. The description of the monomial inference is understood as follows: it is necessary to determine for which products from the grammar of the cf-language, how many times and in what order they are used to derive this monomial, which is equivalent to constructing all the output trees. *The article has developed a deadlockless algorithm for solving the extended problem of parsing, based on the method of hierarchy of marked brackets.* The marked brackets order shows what products they are assigned to, and allows you to trace the order of its use. The algorithm uses the method of successive approximations to solve the Chomsky–Schützenberger system of equations associated with the cf-language grammar. The developed algorithm has a simple software implementation; an assessment of the complexity of the algorithm is also given.

Keywords: syntactical analysis algorithm, quantum computer

FOR CITATION: Kishkan V.V., Safonov K.V. Deadlock algorithm for advanced syntactical analysis and its application to programming languages for quantum computers. *Computational nanotechnology*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 42–48. (In Russ.) DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-42-48

ВВЕДЕНИЕ

При разработке перспективных языков программирования, предназначенных для обеспечения работы многопроцессорных вычислительных систем (МВС), в том числе квантовых суперкомпьютеров, возникают различные аспекты исследований, связанных с контекстно-свободными языками (кс-языками) и контекстно-свободными грамматиками (кс-грамматиками). Один из аспектов связан с проблемой синтаксического анализа (разбора) выражений, написанных на языке программирования.

Обычно для синтаксического анализа используются специальные программы – парсеры, разработанные применительно к тому или иному языку программирования и основанные на определенных алгоритмах разбора. Однако, в ситуации, когда разрабатывается и тестируется новый язык программирования, никаких парсеров, естественно, еще нет. Когда необходимо провести синтаксический анализ некоторого выражения относительно совокупности грамматических правил, находящихся в стадии разработки, могут быть полезными различные алгоритмы, в том числе имеющие высокую сложность – как правило, анализируются выражения

ограниченной длины, и в этом случае высокая сложность алгоритма не играет решающей роли. Если длина N тестируемой программы не слишком велика, сложность алгоритма синтаксического разбора может быть даже выше экспоненциальной – важно лишь, чтобы алгоритм был вполне конструктивным и допускал простую программную реализацию. Рассмотрим данную проблематику более подробно.

Отметим, что практически все известные в настоящее время языки программирования являются кс-языками, порожденными кс-грамматиками, и потому кс-язык является адекватной математической моделью любого языка программирования, в которой правильным программам отведена роль мономов кс-языка.

Проблема синтаксического анализа мономов кс-языка возникла на заре теории языков программирования в 1950–1960-х гг. [Гинзбург, 1970; Глушков, 1974; Ахо, 1978; Salomaa, 1978]. Однако в постановке проблемы имеются некоторые разночтения, в связи с чем возникает необходимость уточнить ее формулировку.

А именно, рассмотрим кс-язык, порожденный кс-грамматикой, которая представляет собой систему правил вывода (продукций):

$$z_j \rightarrow q_{j_1}(z, x), \dots, z_j \rightarrow q_{j_p_j}(z, x), \quad j = 1 \dots, n, \quad (1)$$

где $q_{j_p_j}(z, x)$ – мономы от некоммутативных символов алфавита $z_1, \dots, z_n, x_1, \dots, x_m$ с числовым коэффициентом, равным 1.

Символы x_1, \dots, x_m из второй группы называются терминальными символами и образуют словарь кс-языка. Применительно к языкам программирования терминальными символами являются цифры, буквы, вспомогательные знаки, а также состоящие из них «блоки», обозначающие, например, операторы языка программирования. Такие операторы могут обозначаться в виде некоторой последовательности букв и других символов, например, в некоторых языках программирования операторы GOTO, RETURN, но сами рассматриваются как неделимые терминальные символы алфавита.

Символы первой группы z_1, \dots, z_n называются нетерминальными, поскольку не присутствуют явно в тексте программ, а играют вспомогательную роль, участвуя в кс-грамматике как совокупности продукций, порождающих кс-язык.

По правилам грамматики формируются мономы от терминальных символов x_1, \dots, x_m , которые интерпретируются как правильные предложения языка [Глушков, 1974; Salomaa, 1978]. Такие мономы рассматриваются как корректные, в отличие от произвольных мономов, которые могут не соответствовать правилам грамматики, а значит, являются некорректными.

Вывод корректных мономов кс-языка с помощью системы продукций (1) осуществляется так. Продукции сначала следует применить к начальному символу z_1 , а затем к другим получающимся мономам неограниченное число раз и в любом порядке, что позволяет продуцировать новые мономы от терминальных символов и нетерминальных символов. Вывод заканчивается, когда получается моном чисто от терминальных символов – это и есть корректный моном языка, дальнейший вывод из него невозможен, поскольку продукции применимы только к нетерминальным символам. Все корректные мономы образуют соответствующий кс-язык.

В проблеме синтаксического анализа мономов кс-языка выделяют две составляющие: первая часть, называемая проблемой принадлежности или этапом синтаксического контроля, состоит в том, чтобы определить, принадлежит ли данный моном рассматриваемому кс-языку, т.е. может

ли быть получен из начального символа z_1 при помощи продукций, вторая часть проблемы – описание синтаксической структуры монома. Такое описание понимается в литературе по-разному.

Так, различные авторы при постановке проблемы синтаксического анализа допускают следующие варианты: требуется разработать алгоритм, для того чтобы установить: какие правила подстановки и сколько раз использовались при выводе данного монома, при этом порядок использования правил подстановки не имеет значения [Сафонов, 2005]; какие правила подстановки, сколько раз и в каком порядке использовались при выводе этого монома, т.е. построить хотя бы один из возможных выводов монома [Ахо, 1978]. Как видно, для полного решения проблемы синтаксического анализа, конечно, необходимо построить сразу все возможные выводы монома, если таких несколько.

Разночтения в формулировке проблемы синтаксического анализа сохранялись на протяжении десятилетий; различные варианты имеются в настоящее время [Хантер, 2002; Ахо, 2008; Doh, 2011; Тюгашев, 2016].

Кроме того, исследователи уделяют большое внимание тому, чтобы разработать беступиковый алгоритм синтаксического анализа мономов кс-языка [Глушков, 1974: 248].

Если алгоритм таков, что может приводить к тупикам, то он должен предусматривать возвраты с анализом определенной предыстории алгоритма, что значительно усложняет его. Однако, для произвольной кс-грамматики беступикового алгоритма синтаксического анализа на основе наиболее известных методов свертки или развертки не существует [Там же: 259].

Как итог, имеющиеся алгоритмы достаточно сложны и содержат тупики; кроме того, эти алгоритмы могут решать ограниченные задачи, например, задачу нахождения одного из возможных выводов монома [Кормен, 2006; Scott, 2009; Pingali, 2015; Verbitskaia, 2016]. Таким образом, актуализируется задача уточнения и расширения формулировки проблемы синтаксического анализа мономов кс-языка, решения этой проблемы, а также определения сложности получаемого алгоритма.

1. РАСШИРЕННАЯ ПРОБЛЕМА СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МОНОМОВ КС-ЯЗЫКА

Для уточнения формулировки проблемы синтаксического анализа, напомним следующие сведения.

Над символами алфавита определены три операции:

- 1) некоммутативная операция формального умножения – операция конкатенации;
- 2) коммутативная операция формальной суммы (вместе с этими операциями алфавит образует полукольцо);
- 3) дополнительная коммутативная операция умножения элементов алфавита, а значит и мономов, на числа (действительные или комплексные) [Глушков, 1974; Salomaa, 1978].

Говоря точнее, над полукольцом можно рассматривать символьные многочлены и формальные степенные ряды (ФСР) с числовыми коэффициентами.

В теории кс-языков имеется эффективный инструмент исследования – система уравнений с многочленами, построенными по продукциям кс-грамматики, называемая (собственной) системой уравнений Хомского–Шютценберге:

$$z_j = q_{j_1}(z, x) + \dots + q_{j_p_j}(z, x) = Q_j(z, x), \quad j = 1 \dots, n, \quad (2)$$

при этом многочлены $Q_j(z, x)$ удовлетворяют естественно объяснимым требованиям, а именно, $Q_j(0, 0) = 0$, и многочлены $Q_j(z, 0)$ не содержат линейных членов, что означает отсутствие в правилах грамматики простого переобозначения нетерминальных символов [Гинзбург, 1970; Глушков, 1974; Salomaa, 1978].

Предполагается, что система уравнений Хомского – Шютценберге решается относительно нетерминальных символов $(z_1, \dots, z_n) = z$, а решение ищется в виде ФСР от терминальных символов $(x_1, \dots, x_m) = x$:

$$z = z(x) = (z_1(x), \dots, z_n(x));$$

естественно, эти ФСР, будучи подставленными в решаемую систему уравнений, дадут верные равенства. ФСР, который представляет начальный символ z_1 (стартовый для написания программы, либо обозначающий начало предложения в естественном языке) и является соответствующим кс-языком; его членами являются все корректные мономы, которые порождены данной кс-грамматикой, записанной в виде системы уравнений Хомского–Шютценберге [Глушков, 1974; Salomaa, 1978].

Эффективность этой системы уравнений как инструмента исследования кс-языка объясняется тем, что ее можно решать конструктивно – методом последовательных приближений, получая начальные члены ФСР, которые представляют компоненты решения.

В монографии [Глушков, 1974], написанной академиком В.М. Глушковым в соавторстве с Г.Е. Цейтлиным и Е.Л. Ющенко отмечено: «Одной из важных проблем в разработке современных систем программирования является проблема синтаксического анализа программ. Процесс синтаксического анализа программы состоит в распознавании правильности данной программы, т.е. ее принадлежности к рассматриваемому алгоритмическому языку. Этот этап называется этапом синтаксического контроля программы. Одновременно с контролем осуществляется описание синтаксической структуры правильных программ, подобно тому, как производится грамматический разбор предложений в естественных языках» [Там же: 234]. Далее там же сказано: «В математической лингвистике широко распространен способ представления синтаксической структуры языковых объектов в виде деревьев грамматического разбора» [Там же: 303].

Исследователи также отмечают, что предпочтительными для исследования синтаксической структуры монома являются беступиковые (бесперебойные, безостановочные, беспереборные) алгоритмы. Так, в [Там же: 248] сказано: «С точки зрения практических приложений значительный интерес представляют формализмы для описания языков, допускающие беступиковый (беспереборный) синтаксический анализ».

Однако для произвольной кс-грамматики беступикового алгоритма синтаксического анализа на основе наиболее известных методов свертки или развертки не существует, отмечается лишь, что «важным классом однозначных кс-грамматик, допускающих беступиковый анализ разверткой, являются $LL(k)$ -грамматики» [Там же: 259].

В связи с этим будем называть *расширенной проблемой синтаксического анализа* мономов кс-языка проблему разработки беступикового алгоритма, который позволяет установить, может ли моном быть выведен при помощи системы продукций кс-языка (решить проблему принадлежности), а также найти сразу все выводы этого монома. Описание вывода монома будем понимать следующим образом: опре-

делить, какие продукции, сколько раз и в каком порядке применяются для вывода этого монома, что равносильно построению всех деревьев вывода.

Синтаксический анализ монома, проводимый в соответствии с этим алгоритмом, будем называть *расширенным синтаксическим анализом*.

Подчеркнем, что такие алгоритмы в настоящее время не разработаны, поскольку для произвольных кс-грамматик известные алгоритмы (сверткой, разверткой и др.) в общем случае приводят к тупикам.

Выше отмечалось, что имеются парсеры – специальные программы, основанные на различных алгоритмах и предназначенные для анализа выражений, написанных на определенном языке программирования. Также было отмечено, с точки зрения разработки перспективных языков программирования, в том числе для квантовых компьютеров, такие парсеры не применимы. В самом деле, когда разрабатывается и тестируется новый язык программирования и необходимо провести синтаксический разбор некоторого выражения относительно совокупности грамматических правил нового языка, находящихся в стадии разработки, парсеров не существует. И потому полезны различные алгоритмы, в том числе имеющие высокую сложность, тем более что тестируемые выражения имеют ограниченную длину – на первый план выходит конструктивность алгоритма и простота программной реализации.

2. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ РАСШИРЕННОЙ ПРОБЛЕМЫ СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

При выводе монома важен порядок, в каком порядке применяются продукции; без его знания получить желаемый моном невозможно – применение к моному продукций в различном порядке может привести к разным мономам. В самом деле, имеет место следующий пример.

Пример 1. Пусть даны продукции

$$z_1 \rightarrow z_1 z_2, z_2 \rightarrow z_2 z_1$$

и моном $z_2 z_1$.

Применяя к моному первую продукцию, а затем вторую, получим моном

$$z_1 z_2 z_1 z_2 z_1;$$

если же сначала применить вторую продукцию, а затем первую, получится другой моном:

$$z_1 z_2 z_2 z_1 z_2.$$

Для определения необходимых для вывода монома продукций и порядка их применения продукций будем опираться на вариант метода иерархии маркированных скобок, предложенный в работе [Kishkan, 2019]. Достоинством этого метода является то, что он является беступиковым, однако, к недостаткам этого метода относится сложная система маркированных скобок, затрудняющая его практическое применение.

Идея метода иерархии скобок такова. Во-первых, для каждой продукции из кс-грамматики в моном, стоящий в правой части вводится метка (символ из расширенного алфавита), которая несет информацию об использовании этой продукции, во-вторых, вводятся парные (отрывающиеся и закрывающиеся) маркированные скобки, позволяющие проследить порядок применения этой продукции относительно

других продукций, в-третьих, организуется алгоритмически простой процесс вывода всех мономов кс-языка, вплоть до нужной степени, с помощью метода последовательных приближений, который решает расширенную систему уравнений Хомского–Шютценберже [Kishkan, 2019].

Ниже предложен более простой и эффективный способ маркировки скобок, позволяющий облегчить практическое использование метода иерархии скобок. По этому способу мономиальная метка маркирует открывающуюся скобку, «привязанную» к ней справа – открывающаяся и закрывающаяся скобки введены в продукции расширенной грамматики

$$z_j \rightarrow t_{jk} [q_{jk}(z, x)], \quad j = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, p_j$$

где метка t_{jk} – символ из расширенного алфавита, «привязанная» к стоящей справа от нее открывающейся скобке [и помечает правило вывода $z_j \rightarrow q_{jk}(z, x)$; при этом соответствующую закрывающуюся скобку] в дальнейшем всегда можно однозначно найти в выражении.

Этот способ маркировки скобок с учетом структуры системы уравнений (2) приводит от расширенной кс-грамматики к расширенной системе уравнений Хомского–Шютценберже:

$$z_j = Q_j^*(z, x, t) \stackrel{\text{def}}{=} t_{j_1} [q_{j_1}(z, x)] + \dots + t_{j_p} [q_{j_p}(z, x)], \quad (3)$$

$$j = 1, \dots, n.$$

Далее, решение этой системы уравнений может быть получено методом последовательных приближений:

$$z^{k+1}(x, t) = Q_j^*(z^{(k)}(x, t), x, t); \quad k = 0, 1, \dots; \quad z^{(0)}(x, t) = 0. \quad (4)$$

Теперь синтаксический анализ монома v кс-языка, устанавливающий порядок применения продукций, проводится следующим образом. Получаем итерации метода последовательных приближений (4), которые дают стабилизирующие полиномы возрастающей степени относительно символов x, t , в том числе первую компоненту решения, которая представляет кс-язык.

Считываем мономы – начальные члены ФСР $z_1(x)$ степени $\deg_x(v)$ относительно символов x_1, \dots, x_m , пропуская символы t_{jk} , определяем, есть ли среди них моном v . При этом мономиальные метки укажут, какие продукции его генерируют, а иерархия маркированных скобок установят порядок их применения.

З а м е ч а н и е 1. Полезно иметь оценку числа итераций в методе последовательных приближений, обеспечивающего стабилизацию начальных членов решения системы уравнений Хомского–Шютценберже.

Имеет место следующая лемма.

Лемма 1. Пусть $k_2 > k_1$, тогда мономы степени не выше k_1 по переменным x многочленов

$$z_j^{(k_2)}(x, t), \quad j = 1, \dots, n,$$

не зависят от k_2 .

Таким образом, оценка состоит в том, что мономы многочленов $z_j^{(k)}(x, t), j = 1, \dots, n$, стабилизировались вплоть до степени k включительно, уже не меняясь при дальнейшем росте числа итераций.

Доказательство. Лемма 1 следует из равенства $z_1^*(x, e) = z_1(x)$, в котором параметры t заменены на пустую цепочку e , а также оценки, данной в работе [Хомский, 1966: 205].

Мономиальная метка привязана к открывающейся скобке, но не связана явным образом с парной закрывающейся скобкой. Однако, можно написать простые алгоритмы, которые позволяют для каждой закрывающейся скобки найти соответствующую открывающуюся скобку (и наоборот), при условии, конечно, что выражение, содержащее скобки, составлено корректно.

Лемма 2. Если выражение, содержащее скобки, составлено корректно, то алгоритм, основанный на вычеркивании ближайших к друг другу парных открывающихся и закрывающихся скобок, позволяет для каждой закрывающейся скобки найти единственную парную открывающуюся скобку, а в случае некорректности выражения, установить это.

Доказательство. Сначала заметим, что можно проверить корректность расстановки скобок следующим образом.

Найдем самую левую (стоящую левее других) закрывающуюся скобку, затем найдем ближайшую к ней слева открывающуюся скобку. Очевидно, что эти скобки – парные и расставлены корректно; вычеркнем их.

Теперь снова найдем самую левую закрывающуюся скобку и для нее вновь ближайшую слева открывающуюся парную скобку. Если после вычеркивания всех парных скобок в выражении больше не останется скобок, они были расставлены корректно.

При этом легко видеть, как в корректном выражении для каждой закрывающейся скобки единственным образом находится открывающая скобка.

Теперь на примере продемонстрируем идею того, как маркированные скобки позволяют установить порядок применения продукций при выводе монома.

Пример 2. Рассмотрим продукции

$$z_1 \rightarrow z_1 z_2^3, \quad z_1 \rightarrow z_1 z_2;$$

и запишем их в виде расширенной грамматики:

$$z_1 \rightarrow t_{11} [z_1 z_2^3], \quad z_1 \rightarrow t_{12} [z_1 z_2].$$

Применяя к начальному символу первую продукцию, а затем вторую, получим моном

$$t_{11} [t_{12} [z_1 z_2] z_2^3].$$

Теперь можно видеть, что определяет порядок применения продукций, а именно, внешние скобки указывают на то, что продукция с мономиальной меткой t_{11} применена первой, и внутренние скобки указывают на то, что продукция с мономиальной меткой t_{12} применяется после того.

Наконец, сформулируем основной результат в виде следующей теоремы.

Теорема 1. Расширенный метод мономиальных меток, основанный на расширенной системе уравнений Хомского–Шютценберже (3), позволяет за конечное число шагов осуществить беступиковый синтаксический анализ, с учетом порядка применения продукций, любого монома кс-языка, порожденного кс-грамматикой (1).

Фактически, переход от грамматики к расширенной грамматике позволяет включать в процесс вывода мономов информацию как о продукциях, так и порядке их применения.

З а м е ч а н и е 2. Порядок применения продукций не всегда может быть определен однозначно. Рассмотрим иерархию маркированных скобок в следующей ситуации.

Кишкан В.В., Сафонов К.В.

Пример 3. Пусть даны продукции

$$z_1 \rightarrow z_1 z_2, \quad z_1 \rightarrow x_1, \quad z_2 \rightarrow x_2$$

и моноом $x_1 x_2$.

Запишем продукции в виде расширенной грамматики, содержащей мономиальные метки и маркированные скобки:

$$z_1 \rightarrow t_{11}[z_1 z_2], \quad z_1 \rightarrow t_{12}[x_1], \quad z_2 \rightarrow t_{21}[x_2],$$

и заметим, что моноом $x_1 x_2$ получается путем последовательного применения продукции с мономиальными метками t_{11} , t_{12} , t_{21} или продукции с мономиальными метками t_{11} , t_{21} , t_{12} .

В обоих случаях имеется вывод в терминах расширенной грамматики:

$$z_1 \rightarrow t_{11}[z_1 z_2] \rightarrow t_{11}[[t_{12}x_1][t_{21}x_2]].$$

Последний моноом показывает, что продукция, которая соответствует внешним скобкам, используется первой, а продукции, которые соответствуют внутренним скобкам, используются позже, однако, между ними нет иерархии, они не подчинены друг другу и поэтому могут использоваться в любом порядке.

Как итог данного раздела, опишем алгоритм, который назовем *алгоритмом расширенного синтаксического анализа с использованием иерархии маркированных скобок*.

1. Пусть дан моноом (программа) w степени (длины) N . Проводим N итераций метода последовательных приближений (4) для решения соответствующей расширенной системы уравнений Хомского–Шютценберже.
2. Перебираем все полученные в п. 1 мономы степени N , определяя те мономы, которые, с точностью до множителей t_{jk} , совпадают с мономом w (множители t_{jk} , как отмечено выше, пропускаются). Если таких мономов нет, то моноом w вывести невозможно, если такие мономы есть, то они дают решение расширенной проблемы синтаксического анализа в соответствии со следующим п. 3.
3. Считываем все найденные в п. 2 мономы слева направо, устанавливая иерархию маркированных скобок (по признаку сравнения скобок – внутренняя или внешняя скобка) и определяя тем самым порядок применения продукции при выводе монома w , т.е. все возможные способы вывода монома.

Далее рассмотрим задачу оценки сложности (количества операций) для разбора монома с учетом порядка применения продукции.

3. ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ АЛГОРИТМА СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИИ МАРКИРОВАННЫХ СКОБОК

Оценим сложность предложенного алгоритма синтаксического анализа.

Для произвольной кс-грамматики одним из эффективных алгоритмов является алгоритм Кока–Янгера–Касами (СУК – алгоритм), позволяющий установить, можно ли в заданной кс-грамматике вывести заданную строку, и если да, то предоставить один из ее выводов.

Пусть дан моноом (программа) w степени (длины) N . Обычно сложность алгоритма синтаксического анализа выражают через число N в виде $O(f(N))$, где $f(N)$ – некоторая функция от N , что означает, что сложность не превышает числа $Cf(N)$, здесь C – некоторая константа.

Для многих алгоритмов в теоретической информатике функция $f(N)$ является мономом, и в этом случае говорят, что сложность полиномиальная (она считается небольшой), либо экспонента (тогда сложность считается значительной). Некоторые алгоритмы, естественно, имеют сложность, которая больше, чем экспоненциальная.

В процессе разработки языка программирования может понадобиться проводить синтаксический анализ тестовых программ, которые удобно рассматривать как мономы кс-языка, порождаемого системой продукции.

Алгоритм Кока–Янгера–Касами является универсальным в том смысле, что он применим к кс-грамматике в нормальной форме Хомского, к которой можно привести произвольную кс-грамматику. Сложность этого алгоритма – полиномиальная и равна $O(N^3)$.

Итак, сложность (число операций) алгоритма с использованием маркированных скобок обозначим K . Очевидно, что

$$K = K_1 + K_2 + K_3,$$

где K_1, K_2, K_3 – число операций, предусмотренных п. 1, 2, 3 этого алгоритма соответственно.

Рассмотрим число K . Одна итерация метода последовательных (4) приближений состоит в подстановке многочлена в многочлен.

Имеет место следующая лемма.

Лемма 3. Число операций при подстановке многочлена степени r в фиксированный многочлен равно $O(S_r)$, где S_r – число мономов в подставляемом многочлене степени r .

Доказательство. Достаточно оценить число операций при подстановке многочлена степени r в моноом; легко видеть, что это число равно S_r , что и доказывает лемму 2.

Далее, имеет место следующая лемма.

Лемма 4. Имеет место оценка $K_1 = O(NS_r)$.

Доказательство. Для получения оценки достаточно умножить оценку из леммы 3 на число итераций N .

Оценим теперь числа K_2 и K_3 . Понятно, что оценка для этих чисел одинаковая; она определяется необходимостью прочитать каждый полученный моноом слева направо. Такая оценка дается следующей леммой.

Лемма 5. Имеют место оценки

$$K_2 = O(NS_r), \quad K_3 = O(NS_r).$$

Доказательство. Очевидно, что каждая оценка равна произведению числа мономов степени N на длину монома N .

Таким образом, сложность алгоритма синтаксического анализа методом иерархии маркированных скобок описывается следующей леммой.

Лемма 6. Сложность алгоритма, реализующего метод синтаксического анализа из теоремы 1, равна $O(NS_r)$.

Рассмотрим теперь оценку для числа S_r применительно к многочленам, участвующим в методе последовательных приближений (4), а именно, рассмотрим многочлен

$$z_1^{(N)}(x, t) = Q_1^*(z^{(N-1)}(x, t), x, t),$$

определяющий начальные мономы порождаемого кс-языка.

Понятно, что в качестве многочленов Q_j достаточно рассмотреть многочлены вида

$$z^d + h(x),$$

а значит, достаточно оценить число мономов многочлена

$$(z^{(N-1)}(x, t))^d.$$

Очевидно, что при возведении суммы g слагаемых квадрат, получается не более g^2 слагаемых (каждое слагаемое умножается на каждое), а при возведении в степень d получается не более g^d слагаемых. Далее, при возведении полученной суммы снова в степень d получится $(g^d)^d = g^{d^2}$ слагаемых. Наконец, при выполнении N итераций число слагаемых может возрасти до g^{d^N} .

Это значит, что число S_r из лемм 4–6 фактически имеет найденный порядок:

$$S_r = O(g^{d^N}).$$

Как результат, сформулируем полученную теорему.

Теорема 2. Сложность алгоритма, основанного на расширенном методе мономиальных меток, основанном на расширенной системе уравнений Хомского–Шютценберге (3), равна $O(Ng^{d^N})$.

Литература

1. Ахо А., Ульман Дж. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. Т. 1. Синтаксический анализ. М.: Мир, 1978. 352 с.
2. Ахо А., Лам М., Сети Р., Ульман Дж. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий. М.: Вильямс, 2008.
3. Гинзбург С. Математическая теория контекстно-свободных языков. М. Мир, 1970. 325 с.
4. Глушков В.М., Цейтлин Г.Е., Ющенко Е.Л. Алгебра, языки, программирование. Киев: Наукова думка, 1974. 328 с.
5. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006.
6. Сафонов К.В. О возможности вычислительного распознавания контекстно-свободных языков // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10 (4). С. 91–98.
7. Тюгашев А.А. Основы программирования. Ч. I. СПб.: Ун-т ИТМО. 2016.
8. Хантер Р. Основные концепции компиляторов. М.: Вильямс, 2002.
9. Хомский Н., Шютценберге М.Н. Алгебраическая теория контекстно-свободных языков // Кибернетический сборник. Нов. серия. 1966. Вып. 3. С. 195–242.
10. Doh K.-G., Kim H., Schmidt D.A. Abstract LR–Parsing. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. Pp. 90–109.
11. Kishkan V.V., Safonov K.V., Tsarev R.Yu. Syntactical analysis of context-free languages taking into account the order of application of productions // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333. P. 032072.
12. Salomaa A., Soittola M. Automata-theoretic aspects of formal power series. NY: Springer-Verlag, 1978. 288 p.
13. Pingali K., Bilardi G. A graphical model for context-free grammar parsing. Heidelberg; Berlin: Springer, 2015.
14. Scott E., Johnstone A. GLL parsing // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. 2009. Vol. 253 (7).
15. Verbitskaia E., Grigorev S., Avdyukhin D. Relaxed parsing of regular approximations of string-embedded languages. Cham: Springer International Publishing. 2016. Pp. 291–302.

Статья поступила в редакцию 05.05.2020, принята к публикации 17.06.2020
The article was received on 05.05.2020, accepted for publication 17.06.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кишкан Владимир Владимирович, старший преподаватель Восточно-Сибирского техникума туризма и сервиса. Красноярск, Российская Федерация

Сафонов Константин Владимирович, д-р физ.-мат. наук, профессор; заведующий кафедрой Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва. Красноярск, Российская Федерация. ORCID ID: 0000-0003-0405-3065. E-mail: safonovkv@rambler.ru

Несмотря на то, что сложность данного алгоритма достаточно высока, она равна сложности метода мономиальных меток, предложенного в работе [Сафонов, 2005], однако, в отличие от этого метода, позволяет получить полное решение расширенной проблемы синтаксического анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм, основанный на иерархии маркированных скобок, который является конструктивным алгоритмом, который весьма прост и является беступиковым (безвозвратным, безостановочным) алгоритмом, в отличие от известных ранее алгоритмов.

Алгоритм может быть особенно эффективен в ситуациях, когда длина исследуемого монома (программы) не слишком большая, например, когда разрабатывается и тестируется язык программирования, а значит, и высокая сложность алгоритма не имеет принципиального значения.

References

1. Aho A., Ulman J. Theory of syntactic analysis, translation and compilation. Vol. 1: Syntactic analysis. Moscow: Mir, 1978. 352 p.
2. Aho A., Lam M., Seti R., Ulman J. Compilers: principles, technologies and tools. Moscow: Williams, 2008.
3. Ginzburg S. Mathematical theory of context-free languages. Moscow: Mir, 1970. 332 p.
4. Glushkov V.M., Tseitlin G.E., Yushchenko E.L. Algebra, languages, programming. Kiev: Naukova Dumka. 1974. 328 p.
5. Kormen T., Leiserson C., Rivest R., Stein K. Algorithms: construction and analysis. 2nd ed. Moscow: Williams. 2006.
6. Safonov K.V. On the possibility of computational recognition of context-free languages. *Computational Technologies*. 2005. Vol. 10 (4). Pp. 91–98.
7. Tyugashov A.A. Basics of programming. Part I. St. Petersburg: University of ITMO, 2016.
8. Hunter R. Basic concepts of compilers. Moscow: Williams, 2002.
9. Chomsky N., Schutzenberger M.N. Algebraic theory of context-free languages. *Cybernetic Collection. New Series*. 1966. Vol. 3. Pp. 195–242.
10. Doh K.-G., Kim H., Schmidt D.A. Abstract LR–Parsing. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. Pp. 90–109.
11. Kishkan V.V., Safonov K.V., Tsarev R.Yu. Syntactical analysis of context-free languages taking into account the order of application of productions // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333. P. 032072.
12. Salomaa A., Soittola M. Automata-theoretic aspects of formal power series. NY: Springer-Verlag, 1978. 288 p.
13. Pingali K., Bilardi G. A graphical model for context-free grammar parsing. Heidelberg; Berlin: Springer, 2015.
14. Scott E., Johnstone A. GLL parsing // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. 2009. Vol. 253 (7).
15. Verbitskaia E., Grigorev S., Avdyukhin D. Relaxed parsing of regular approximations of string-embedded languages. Cham: Springer International Publishing. 2016. Pp. 291–302.

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir V. Kishkan, senior lecturer at the East Siberian College of Tourism and Service, Krasnoyarsk, Russian Federation

Konstantin V. Safonov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor; Head of Chair at the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Krasnoyarsk, Russian Federation. ORCID ID: 0000-0003-0405-3065. E-mail: safonovkv@rambler.ru

05.13.11 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

MATHEMATICAL AND SOFTWARE
OF COMPUTERS AND COMPUTER NETWORKS

05.13.15 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ, КОМПЛЕКСЫ
И КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

COMPUTERS, COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS

DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-49-57

Алгоритмы выявления аномалий типа «черная дыра» в ориентированном графе при помощи топологического подхода

Д.Е. Иванов^{1, a} ©, А.С. Семенов^{1, 2, 3, b} ©

¹ Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

² Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники (АО «НИЦЭВТ»),
г. Москва, Российская Федерация

³ Высшая школа экономики,
г. Москва, Российская Федерация

^a E-mail: mr.salixnew@gmail.com

^b E-mail: semenov@nicevt.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрена задача поиска подграфа типа «черная дыра» в ориентированном графе без весов. Постановка задачи рассматривается в той формулировке, которая дана в работе коллектива авторов из университета Нью-Джерси в 2010 г. Данная работа вносит вклад в область выявления в графе подграфов определенного вида, результаты работы могут применяться для выявления аномалий в финансовой области и природных катаклизмов, анализе городских ситуаций. Цель работы – предложить новый алгоритм для поиска «черных дыр», учитывающий структуру данного паттерна и использующий ее для более эффективного перебора возможных вариантов, рассмотреть уже существующие решения на графах гораздо большего размера по сравнению с рассмотренными предыдущими исследователями. В работе рассмотрен предложенный ранее алгоритм и его модификация iBlackholeDC на основе принципа Divide and Conquer, выделены его недостатки. Предложено использовать конденсацию графа для сокращения размера задачи. В ходе работы доказаны теоремы о строении «черных дыр» на графах. Предложен подход к перебору множеств-кандидатов, основанный на доказанных теоремах. Введены правила для сокращения такого перебора. Для сокращения перебора используется топологическая сортировка графа, а также введенное нами понятие «особая вершина». Дано определение особой вершины, доказаны ее свойства. Предложен новый алгоритм TopSortBH, задействующий конденсацию, новый подход к перебору кандидатов и сокращение перебора на основе топологии. Для TopSortBH разработана модификация FastSkip, позволяющая эффективно пропускать большие группы неподходящих кандидатов. Все рассмотренные алгоритмы реализованы, проведено экспериментальное сравнение на системе Polus. Показана эффективность конденсации в качестве предобработки графа для данной задачи. Продемонстрировано преимущество алгоритма TopSortBH и его модификации FastSkip на графах RMat, SCA2, Uniform Random с числом вершин до 2^{18} по сравнению с алгоритмом iBlackholeDC.

Ключевые слова: ориентированный граф, поиска подграфов в графе, подграф «черная дыра»

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Иванов Д.Е., Семенов А.С. Алгоритмы выявления аномалий типа «черная дыра» в ориентированном графе при помощи топологического подхода // Computational nanotechnology. 2020. Т. 7. № 2. С. 49–57.
DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-49-57

Topological approach to blackholes anomaly detection in directed networks

D.E. Ivanov^{1, a} ©, A.S. Semenov^{1, 2, 3, b} ©

¹ Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation

² JSC NICEVT,
Moscow, Russian Federation

³ Higher School of Economics,
Moscow, Russian Federation

^a E-mail: mr.salixnew@gmail.com

^b E-mail: semenov@nicevt.ru

Abstract. In this paper we consider the problem of finding a blackhole pattern in directed unweighted graphs. The problem statement is the same as in an original paper by scientists from University of New-Jersey published in 2010. The paper contributes to the special graph pattern matching, the work results can be used for anomaly detection in finances, natural disasters, urban analysis. This paper aims to propose a novel algorithm for blackhole mining, which would take into account inner structure of the “blackhole” pattern and utilize this knowledge for more efficient mining. This paper reviews previously published solutions and tests them on larger graphs containing up to 1 million of nodes. In particular, an iBlackhole algorithm and its Divide and Conquer modification iBlackholeDC are considered, their weak spots are highlighted and reviewed upon. Graph condensation is introduced as an efficient preprocessing for the problem. This paper provides theorems and definitions describing inner structure of the blackhole pattern. Based on the new theorems, a new approach to enumeration of candidates is introduced as well as rules and heuristics aiming for faster filtration of candidates: they utilize topological sorting of a graph and definition of a “special” node, which is also introduced in this paper. Special nodes properties are described. We propose a novel TopSortBH algorithm. It consists of the graph condensation, candidates enumeration and heuristics for candidates filtration. The algorithm is provided with modification called FastSkip, which allows for more aggressive filtering strategy in time-sensitive cases. All mentioned algorithms are implemented and tested on the IBM Power8 based system. Experimental results show efficiency of the condensation as graph preprocessing for the problem. Strong advantage in found blackholes count is demonstrated for TopSortBH in comparison to iBlackholeDC on RMAT, SSCA2 and UR graphs containing up to 1 million nodes.

Keywords: directed networks, subgraph mining, blackhole pattern

FOR CITATION: Ivanov D.E., Semenov A.S. Topological approach to blackholes anomaly detection in directed networks. *Computational nanotechnology*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 49–57. (In Russ.) DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-49-57

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных свойств графов, которые описывают объекты реального мира, является образование в них кластеров или сообществ. Задача поиска этих сообществ имеет важное значение в социологии, биологии и компьютерных науках, поскольку объекты, изучаемые в данных прикладных областях, часто естественно моделируются при помощи графов [Fortunato, 2010].

В работе [Li et al., 2010] впервые сформулирована задача поиска подграфов (паттернов) типа «черная дыра» и «вулкан» в больших ориентированных графах. В соответствии с этой работой, черная дыра – множество вершин графа, у которого отсутствуют исходящие ребра. Вулкан – это, наоборот, множество вершин графа, у которого имеются только исходящие ребра.

Паттерны черная дыра и вулкан встречаются в прикладных задачах. Например, в торговой сети, паттерн черная дыра может представлять собой группу торговцев, которые

манипулируют рынком. Также черная дыра и вулкан могут описывать схемы отмывания денег [Semenov et al., 2017]. Поиск черных дыр и вулканов в реальном времени может своевременно обнаружить пагубные явления, такие как природные катаклизмы, катастрофы, происшествия. Разработка алгоритмов поиска таких паттернов позволяет сохранять общественную безопасность [Hong et al, 2015].

Основной вклад в исследование задачи поиска паттерна черная дыра внесла группа авторов из университета Нью-Джерси. Они сформулировали задачу и предложили алгоритм поиска черных дыр в случае ориентированного графа без весов [Li et al., 2010]. Два года спустя эти же авторы опубликовали алгоритм для приближенного поиска черных дыр в случае взвешенного графа [Li et al., 2012, 2014]. Hong [Hong et al, 2015] рассматривает задачу поиска черных дыр в реальном времени для нужд современного города. В этой работе предлагается оригинальный алгоритм, приближенно решающий задачу для динамических графов.

В данной статье рассматривается упрощенная постановка задачи поиска черных дыр для случая ориентированного графа без весов. Цель работы – разработать новый алгоритм для поиска черных дыр, устраняющий недостатки разработанных ранее алгоритмов, учитывающий структуру паттерна черных дыр и использующий ее для более эффективного перебора возможных вариантов. Задачей работы является исследование результатов работы алгоритмов на графах гораздо большего размера по сравнению с рассмотренными предыдущими исследователями.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В этом разделе приводятся основные обозначения и определения, которые будут использованы далее в тексте.

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим граф $G = G(V, E)$, где V – множество вершин, а E – множество ребер.

Определение 1. Подмножество вершин $B \subseteq V$ называется черной дырой, если одновременно выполняются следующие условия:

- 1) подграф $G' = (B, E')$ слабо связан;
- 2) нет такой пары вершин (u, v) , что $u \in B, v \in V/B; (u, v) \in E$.

Задача состоит в том, чтобы в ориентированном графе без весов найти как можно больше черных дыр за ограниченное время.

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Введем несколько дополнительных определений

Определение 2. Пусть дан ориентированный граф $G(V, E)$. Последовательность $v_0, v_1, v_2, \dots, v_k$, состоящая из вершин $v_i \in V; 0 \leq i \leq k$ образует ориентированный путь из v_0 в v_k , если существуют ребра $(v_{i-1}, v_i) \in E; 1 \leq i \leq k$ и $v_i \neq v_j$ для всех $0 \leq i, j \leq k, i \neq j$. Длина такого ориентированного пути равна k .

Определение 3. Пусть дан ориентированный граф $G = (V, E)$. Вершина $v \in V$ достижима из $u \in V$, если существует ориентированный путь, который начинается в u и заканчивается в v .

Определение 4. Пусть дан ориентированный граф $G = (V, E)$. Если вершина $v \in V$ достижима из $u \in V$, тогда u является ориентированным предком v , а v является ориентированным потомком u . Если существует ребро из u в v , то u является непосредственным предком v , а v является непосредственным потомком u .

Определение 5. Подмножество вершин $B \subseteq G$ называется компонентой сильной связности (КСС), если все вершины V попарно взаимно достижимы.

Определение 6. Пусть дан ориентированный граф $G = (V, E)$. Рассмотрим вершину $v \in V$. Замыкание вершины $\text{Closure}(v) = \{u \mid u \text{ достижима из } v\} \cup v$. Другими словами, замыкание вершины v – это множество всех вершин, достижимых из v , включая ее саму.

Следующие утверждения были ранее доказаны в статье [Li et al., 2010].

Лемма 1. Если вершина $v \in B$, причем $B \subseteq V$ – черная дыра, то все потомки v лежат в B .

Лемма 2. Если вершина $v \in B$, причем $B \subseteq V$ – черная дыра, то замыкание v полностью содержится в B .

Лемма 3. Замыкание любой вершины образует черную дыру.

2.3. ИЗВЕСТНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

В данном разделе рассматривается применимость алгоритма iBlackhole (алгоритм 1) с использованием модификации Divide and Conquer iBlackholeDC (алгоритм 2), предложенного в статье [Li et al., 2010]. Алгоритм iBlackholeDC создан для поиска черных дыр фиксированного размера. Он имеет значительный ресурс параллелизма, однако в работе [Там же] не рассматривается случай больших графов: практические исследования проводятся на графах, размер которых не превышает 1500 вершин.

Далее мы вводим дополнительное утверждение, чтобы описать проблемы существующего подхода.

Лемма 4. Пусть даны ориентированный граф $G = (V, E)$, КСС $S \subseteq V$, черная дыра $B \subseteq V$, тогда если $\exists v \in S : v \in B$, то $\forall s \in S$ будет верно, что $s \in B$. Другими словами, если любая вершина КСС принадлежит какой-то черной дыре, тогда все вершины данной КСС принадлежат той же черной дыре.

Доказательство

В КСС все вершины попарно взаимно достижимы. Это значит, что замыкание произвольной вершины КСС $v \in S$ содержит всю КСС как подмножество. Опираясь на лемму 3, получаем, что КСС принадлежит той же черной дыре, что и вершина v .

Существуют графы, которые имеют сравнительно небольшое количество черных дыр относительно общего количества вершин. Они состоят из нескольких больших КСС и относительно малого числа независимых листьев или корней. В связи с этим возникает два вопроса по поводу применимости алгоритма iBlackholeDC.

- Как узнать, что в графе содержатся черные дыры заданного размера? В общем случае необходимо проверить все возможные размеры, что займет много времени даже в параллельном режиме.
- Как можно сократить область поиска на стадии полного перебора и избежать повторных проверок комбинаций вершин?

Рассмотрим следующий пример. Граф состоит из 10^6 вершин, которые образуют единую КСС. Это значит, что в данном графе существует только одна черная дыра – это весь граф. Пока мы не знаем ничего о структуре графа и не обладаем достаточно большими вычислительными ресурсами, необходимо будет перебирать слишком большое число возможных размеров черных дыр. В худшем случае нам придется перебрать все возможные размеры графа.

Другой пример – это графы малого мира [Watts, 1999]. Большая часть вершин такого графа содержится в единственной большой КСС. Также имеется несколько вершин и корней. Мы утверждаем, что при просмотре от меньших размеров черной дыры к большим, алгоритм iBlackholeDC быстро обнаружит все небольшие черные дыры. Далее он будет очень долго пытаться найти черные дыры внутри крупных КСС, где их попросту нет, пока не доберется до размеров больше размера КСС.

3. РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Мы предлагаем рассмотреть решение задачи поиска черных дыр при помощи комбинации двух этапов. Первый этап состоит в предобработке графа, задача которого – упростить структуру графа настолько, насколько это возможно. Уменьшение размера графа значительно сокращает вычисления, которые в худшем случае являют собой полный

перебор вариантов. Второй этап – это непосредственно поиск черных дыр. Целью данного этапа является обнаружение как можно большего числа черных дыр при заданном ограничении по времени.

3.1. ПРЕДОБРАБОТКА ГРАФА

Как было сказано выше, большие КСС требуют значительных вычислительных ресурсов для обработки и при этом не образуют дополнительных черных дыр. Это может быть критично при обработке графов малого мира, потому что одна КСС может включать до 100% вершин некоторого графа. В таком случае будет удобно рассмотреть КСС как единую вершину, которая объединяет в себе все входящие и исходящие связи периферических вершин КСС. На стадии предобработки происходит сжатие каждой КСС до единственной вершины. Процесс такого сжатия известен как конденсация графа.

Определение 7. Если каждую компоненту сильной связности заменить единственной вершиной, то получится ориентированный ациклический граф, который называется конденсацией исходного графа.

В данной работе мы используем алгоритм Шарира для поиска компонент связности графа [Sharir, 1999].

3.2. ПОИСК ЧЕРНЫХ ДЫР

После предобработки графа происходит переход к этапу поиска черных дыр. Задача имеет комбинаторную природу, поэтому на данном этапе основная цель – это уменьшить число потенциальных кандидатов. Опишем сначала подход, основанный на полном переборе вершин.

Определение 8. Корень черной дыры $B \subseteq V$ – это такая вершина $v \in B$, что не найдется ребра $(u, v) \in E$, где $u \in B, u \neq v$.

Определение 9. Множество всех корней черной дыры называется базисом черной дыры.

Отметим, что базис черной дыры может состоять из произвольного числа вершин, отличного от нуля.

Во время полного перебора мы просматриваем все возможные неупорядоченные подмножества вершин графа. Далее для каждой вершины мы получаем ее замыкание. Объединение всех таких замыканий является кандидатом, потенциальной черной дырой. Если кандидат является слабо связным подграфом, тогда это черная дыра.

Такой подход не застрахован от повторного обнаружения уже известной черной дыры. Для уменьшения количества повторного обнаружения уже известных дыр мы вводим эвристику.

Согласно определениям, данным выше, если какая-то вершина не является корнем черной дыры, то она может быть опущена, так как набор корней описывает черную дыру единственным образом. Каждая не корневая вершина в черной дыре достижима из какого-то корня этой дыры. Значит, если мы располагаем матрицей достижимости для данного графа, то мы можем эффективно определять лишние, не являющиеся базисами, комбинации вершин. Конечно же, мы могли бы прямо вычислить такую матрицу достижимости, но это вычислительно сложная задача $O(V^3)$, что не позволяет применить такое правило для больших графов. Мы можем столкнуться с нехваткой как памяти, так и времени на предобработку. Надо отметить, что неплохо бы получить первые черные дыры как можно скорее после старта, что ограничивает нас в использовании особенно дорогих вычислений. Поэтому мы воспользуемся эвристикой,

которая является частным случаем описанного правила, чтобы частично сократить поле перебора, не жертвуя временем первого ответа. Те дубликаты, которые не могут быть отфильтрованы эвристикой, будут проверены «в лоб».

Далее мы используем идею топологической сортировки графа.

Определение 10. Топологическая сортировка или топологическое упорядочивание ациклического орграфа – такой массив вершин, что для любого ребра $(u, v) \in E$ вершина v будет иметь индекс меньше, чем u .

Определение 11. Пусть дан ориентированный граф $G(V, E)$, корень $r \in Roots(G)$, $topSortOrder_r$ – топологическая сортировка замыкания $Closure(r)$ и $|Closure(v)|$ – размеры замыканий для всех вершин $v \in Closure(r)$, то есть доступных из r . Вершина v называется особой вершиной под корнем r , если размер ее замыкания $|Closure(v)|$ равен ее индексу в массиве $topSortOrder_r$ плюс один. Заметим, что множество $Special_r$ особых вершин под корнем r полностью содержится в замыкании данного корня, то есть

$$Special_r \subseteq Closure(r).$$

З а м е ч а н и е 1. Решение о том, является ли вершина особой, принимается независимо в поддереве каждого корня. Одна и та же вершина может быть особой в поддереве одного корня и не являться таковой в поддереве другого корня. Пример такой ситуации отображен на рис. 1.

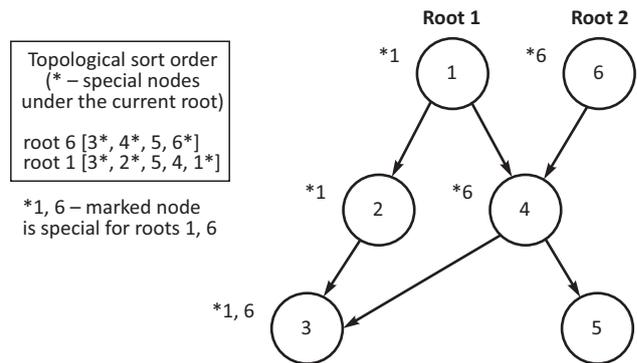


Рис. 1. Special nodes in a graph with 2 roots.
 *x, y – marked node is special for roots x, y

Определение 12. Пусть дан ориентированный граф $G(V, E)$, один из его корней $r \in Roots(G)$, $topSortOrder_r$ – топологическая сортировка замыкания $Closure(r)$, $v \in Special_r$ и $u \in Closure(r)$. Вершина v доминирует над вершиной u под корнем r , если v имеет больший индекс, чем u в массиве $topSortOrder_r$.

З а м е ч а н и е 2. Если дано две особых вершины под одним корнем, то одна из них всегда будет доминировать над другой.

Теорема 1. Пусть дан ориентированный граф $G(V, E)$, один из его корней $r \in Roots(G)$, $v, u \in Closure(r)$. Если v доминирует над u под корнем r , значит u достижима из v .

Доказательство. По определению особой вершины размер замыкания v равен ее индексу плюс один в $topSortOrder_r$. Рассмотрим все вершины, отличные от v в замыкании $Closure(v)$. Эти вершины в массиве $topSortOrder_r$ имеют индексы меньше, чем вершина v . Отсюда $\forall u \in Closure(v)$ вершина u будет достижима из v .

Теорема 2. Пусть дан ориентированный граф $G(V, E)$, один из его корней $r \in \text{Roots}(G)$, $v \in \text{Special}$, $u \in \text{Closure}(r)$. Если v доминирует над u под корнем r , значит

$$\text{Closure}(v) \cup \text{Closure}(u) = \text{Closure}(v).$$

Доказательство. Согласно предыдущей теореме, если v доминирует над u под корнем r , то вершина u будет достижима из v . Тогда $u \in \text{Closure}(v)$, откуда следует

$$\text{Closure}(u) \cup \text{Closure}(v).$$

Определение 13. Те вершины графа $G(V, E)$, которые не имеют входящих ребер, называются глобальными корнями.

Рассмотрим две вершины в замыкании глобального корня. Одна из них особая, а другая обычная. Чтобы эти две вершины образовали базис, особая вершина не должна доминировать над обычной. В противном случае обычная вершина могла бы быть опущена как не значимая. В общем случае, если дан набор вершин, мы можем опустить все доминируемые вершины и получить корректный базис.

Алгоритм IsBasis (алгоритм 3) проверяет, является ли набор вершин базисом. Этот алгоритм принимает набор вершин и возвращает True, если данный набор образует базис и False в противном случае. Этот алгоритм используется как составная часть алгоритма TopSortBH (алгоритм 4), который перебирает наборы-кандидаты и отфильтровывает некорректные наборы. Если IsBasis возвращает False для кандидата, то этот набор может быть пропущен.

IsBasis действует следующим образом.

В первую очередь нам нужно знать, какие вершины являются особыми. Этот шаг может быть посчитан заранее. Чтобы определить особые вершины, мы строим топологическую сортировку замыкания для каждого глобального корня. Далее по определению отмечаем особые вершины.

Вторым шагом, если мы находим, что какие-то вершины доминируемы, то мы опускаем данный набор вершин.

На третьем шаге закончились дешевые методы принятия решения. Проверяем попарную достижимость вершин в наборе. Если найдется хоть одна такая пара, опускаем данный набор вершин.

Если ни одна из предыдущих проверок не ответила False (опустить), то IsBasis возвращает True. Это значение возвращается в алгоритм TopSortBH и означает, что мы имеем дело с корректным базисом черной дыры. Для получения черной дыры мы должны, согласно определению, объединить все замыкания базисных вершин. Последним шагом убедимся, что полученное множество является слабо связным, это будет означать, что мы получили черную дыру.

Очевидно, что процесс не оптимален, но исследования демонстрируют его эффективность. Мы успешно избегаем дорогой проверки на слабую связность в большом количестве случаев.

Также мы вводим модификацию SkipFast для нашего алгоритма. Она позволяет быстрее находить черные дыры в ситуациях, когда время ограничено, но допускает ложно отрицательные результаты.

Пусть дан массив pos , описывающий набор кандидатов в порядке топологической сортировки и содержащий в себе особую вершину на некоторой позиции $skip \neq 0$. Сформируем массив pos' такой, что единственная особая вершина, если такая найдется, будет находиться по индексу равному 0. Мы знаем, что первая особая вершина находится в позиции

$skip$ и имеет номер $skipVal = pos[skip]$. Перейдем от массива $[..., skipVal, ...]$ к массиву

$$[skipVal, skipVal + 1, ..., skipVal + pos.size() - skip].$$

Такой набор по построению будет иметь особую вершину на первой позиции, но не обязательно будет являться корректным базисом. При таком переходе мы пропустим большое число вариантов с одинаковым некорректным префиксом.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Чтобы показать эффективность нашего подхода, мы провели серию экспериментов, состоящую из сравнения производительности алгоритмов iBlackholeDC и TopSortBH. Для данных экспериментов мы выбрали равномерно случайные (Uniform Random, UR) [Erdos et al. 1959], RMAT [Chakrabarti et al. 2004] SCA2 [Bader et al. 2005] типы графов. Они были сгенерированы для масштабов от 4 до 18. Масштаб i означает, что граф имеет 2^i вершин и приблизительно $32 * |V|$ ребер.

Эксперименты были проведены на одном узле вычислительной системы Polus, установленной на факультет ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова, в котором установлено 2 десятиядерных процессора IBM POWER 8, оперативная память узла – 256 Гб. Запуски проводились в однопоточном режиме. Ограничение по времени работы для всех запусков составило 30 минут.

На рис. 2, 3 показано сравнение производительности на графах RMAT. По рис. 2 видим, что на графах масштаба до 11 включительно TopSortBH и iBlackholeDC с использованием конденсации успевают найти все черные дыры и завершиться. В то же время iBlackholeDC без конденсации работает значительно дольше на всех размерах графов и не успевает завершиться в случае $scale = 11$.

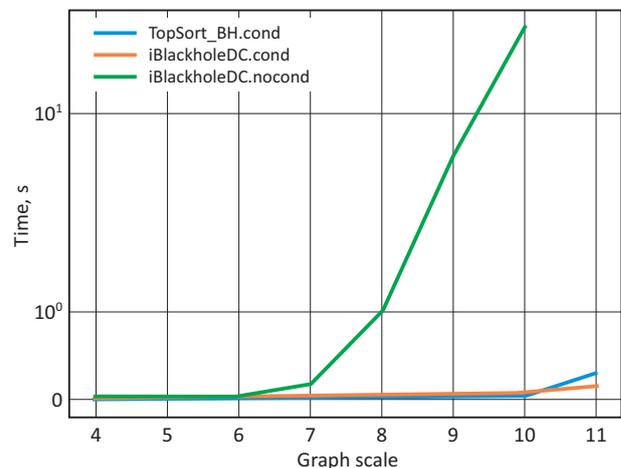


Рис. 2. Execution time on RMAT graphs for scales up to 11. Timeout: 30 minutes

Для графов больших размеров (см. рис. 3), ни один из алгоритмов не успевает обработать полностью, поэтому производится сравнение количества черных дыр, найденных за полчаса работы. TopSortBH без модификации SkipFast показывает превосходящий результат, тем не менее, с увеличением размера графа его преимущество постепенно уменьшается. С использованием модификации SkipFast наблюдаем увеличение числа найденных черных дыр на несколько порядков по сравнению с другими алгоритмами.

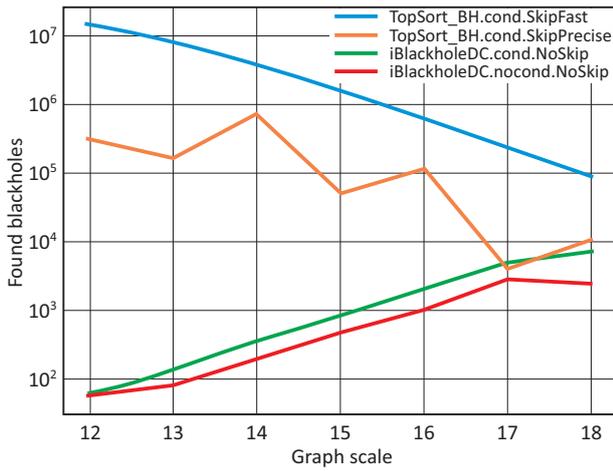


Рис. 3. Found blackholes count on RMAT graphs for scales from 12 to 18. Timeout: 30 minutes

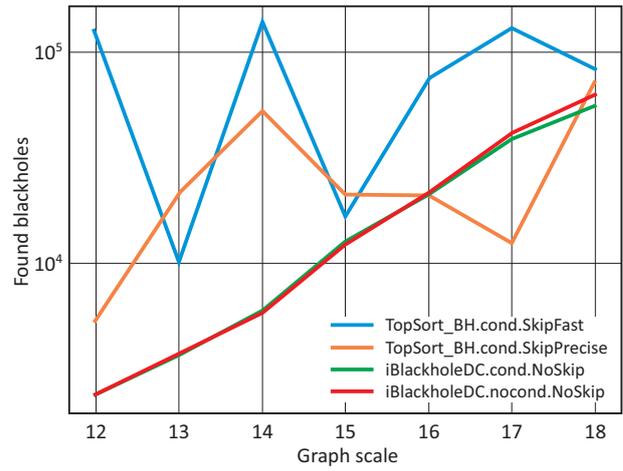


Рис. 5. Found blackholes count on SSCA2 graphs for scales from 12 to 18. Timeout: 30 minutes

Для графов SSCA2 все алгоритмы успевают завершиться для масштабов графа не превышающих 6. Поэтому на рис. 4–5 показано только количество черных дыр, которые были обнаружены за 30 минут работы. Видимо, что алгоритм TopSortBH демонстрирует преимущество в большинстве случаев, которое как и для RMAT графов, может быть увеличено при использовании модификации SkipFast. В то же время, на SSCA2 графах это преимущество не настолько значительное, а иногда и вовсе отсутствует. Скачки в количестве найденных черных дыр возникают из-за различных размеров черных дыр и неравномерного их распределения в области перебора.

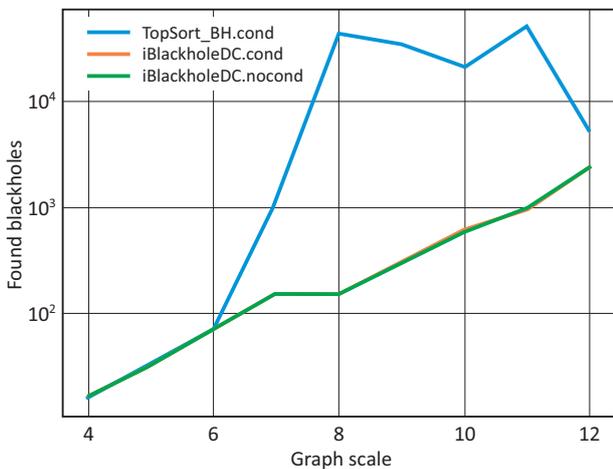


Рис. 4. Found blackholes count on SSCA2 graphs for scales up to 11. Timeout: 30 minutes

Uniform Random графы всех размеров в нашем случае состояли из единственной большой КСС, поэтому для всех алгоритмов, использующих конденсацию графа, время работы отличается незначительно, а алгоритм iBlackholeDC без использования конденсации заметно проигрывает по времени работы даже на графах небольших размеров. Для графов данного типа все алгоритмы успевали завершиться для всех размеров графов. Время выполнения приводится на рис. 6–7.

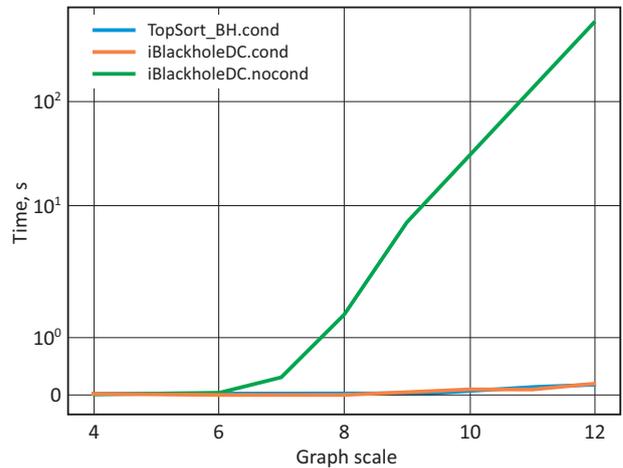


Рис. 6. Execution time on UR graphs for scales up to 11. Timeout: 30 minutes

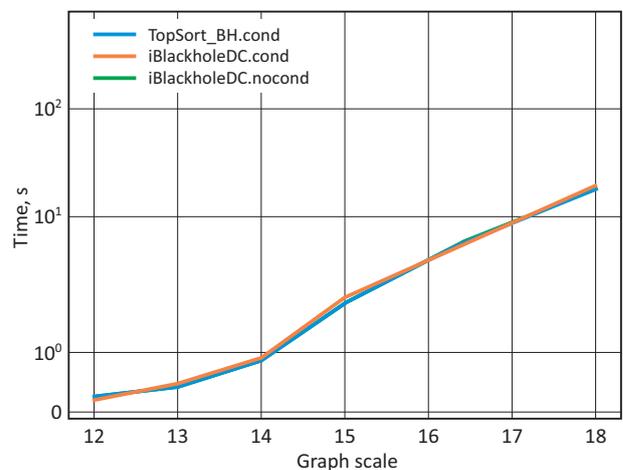


Рис. 7. Execution time on UR graphs for scales from 12 to 18. Timeout: 30 minutes

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы рассмотрели проблемы, связанные с использованием уже известного алгоритма iBlackholeDC для решения задачи поиска черных дыр в графе. Мы предложили и протестировали новый алгоритм TopSortBH. В рамках работы над ним мы предложили предобработку графа, которая раньше не применялась для решения рассматриваемой задачи, оригинальный подход к перебору черных дыр, а также способы сокращения этого перебора. Мы проверили наш подход на трех различных видах графов в различных масштабах. Мы впервые описываем поиск черных дыр для графов, состоящих из более миллиона вершин.

Для графов, содержащих большие компоненты сильной связности, мы демонстрируем уверенное преимущество в скорости работы перед алгоритмом iBlackholeDC. Кроме того, мы умеем относительно быстро определять ситуацию полного отсутствия черных дыр. Однако в ряде случаев, довольно дорогая предобработка нивелирует выигрыш по времени поиска, ухудшая производительность нашего алгоритма.

Литература / References

1. Bader D.A., Madduri K. Design and implementation of the hpcs graph analysis benchmark on symmetric multiprocessors. *International Conference on High Performance Computing*. Springer, 2005. Pp. 465–476.
2. Chakrabarti D., Zhan Y., Faloutsos C. R-mat: A recursive model for graph mining. *Proceedings of the 2004 SIAM International Conference on Data Mining*. SIAM, 2004. Pp. 442–446.
3. Erdos P., Reyni A. On random graphs. *Publicationes Mathematicae*. 1959. No. 6. Pp. 290–297.
4. Fortunato S. Community detection in graphs. *Physics Reports*. 2010. No. 486 (3-5). Pp. 75–174.
5. Hong L., Zheng Y., Yung D. et al. Detecting urban black holes based on human mobility data. *Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM, 2015. P. 35.
6. Li Z., Xiong H. Mining blackhole and volcano patterns for fraud detection. In: *Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining*. 2014. Pp. 904–915.
7. Li Z., Xiong H., Liu Y. Mining blackhole and volcano patterns in directed graphs: A general approach. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2012. No. 25 (3). Pp. 577–602.
8. Li Z., Xiong H., Liu Y., Zhou A. Detecting blackhole and volcano patterns in directed networks. *2010 IEEE International Conference on Data Mining*. 2010. Pp. 294–303.
9. Semenov A., Mazeev A., Doropheev D. et al. Survey of common design approaches in aml software development. *GraphHPC 2017 Conference (GraphHPC)*. *CEUR Workshop Proceedings*. 2017. Vol. 1981. Pp. 1–9.
10. Sharir M. A strong-connectivity algorithm and its applications in data flow analysis. *Computers & Mathematics with Applications*. 1981. No. 7 (1). Pp. 67–72.
11. Watts D.J. Networks, dynamics, and the small-world phenomenon. *American Journal of sociology*. 1999. No. 105 (2). Pp. 493–527.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Algorithm 1: iBlackhole

Input: $G(V, E)$ – ориентированный граф, V – множество вершин, E – множество ребер, n – максимальное число вершин, которое может содержать черная дыра

Output: *Blackholes* – множество всех черных дыр графа размером от 1 до n
 $Blackholes = \emptyset, C_0 = \emptyset$.

```

for i in 1 to n do
     $P_i = \{v \mid d_{out}(v) < i\} // d_{out}(v)$  – количество исходящих из  $v$  ребер
    foreach  $v \in P_i$  do
        if  $v \in C_{i-1}$  then  $v$ 
            if как минимум один из непосредственных потомков  $v$  не принадлежит  $P_i$  then
                удалить  $v$  из  $P_i$ 
                удалить всех предков  $v$  из  $P_i$ 
            end
        end
    end
     $C_i = P_i // C_i$  – список кандидатов
    foreach  $v \in C_i$  do
        if  $|Closure(v)| = i$  then
             $Blackholes = Blackholes \cup Closure(v)$ 
        end
        if  $|Closure(v)| > i$  then
            удалить  $v$  из  $C_i$ 
            удалить всех предков  $v$  из  $C_i$ 
        end
    end
    end
    /* Применить алгоритм полного перебора к  $C_i(i)$  – множеству всех подмножеств, содержащих  $i$  вершин */
    foreach  $B \subset C_i(i)$  do
        if  $G(B)$  слабо связан then
            if  $d_{out}(B) = 0$  then
                 $Blackholes = Blackholes \cup B$ 
            end
        end
    end
end
end
return Blackholes

```

Algorithm 2: iBlackholeDC

Input: $G(V, E)$ – ориентированный граф, V – множество вершин, E – множество ребер
 n – максимальное число вершин, которое может содержать черная дыра
Output: *Blackholes* – множество всех черных дыр размером от 1 до n
 $Blackholes = \emptyset, C_0 = \emptyset$
for i **in** 1 to n **do**
 $P_i = \{v \mid d_{out}(v) < i\}$ // $d_{out}(v)$ – количество исходящих из v ребер
 убрать лишние вершины из P_i и сформировать список кандидатов C_i
 убрать лишние вершины из C_i и сформировать список кандидатов F_i
 foreach $WCC \in G(F_i)$ **do**
 /* Применить алгоритм полного перебора к $WCC_i(i)$ – множеству всех подмножеств, содержащих i вершин */
 foreach $B \subset WCC_i(i)$ **do**
 if $G(B)$ слабо связан **then**
 if $d_{out}(B) = 0$ **then**
 $Blackholes = Blackholes \cup B$
 end
 end
 end
 end
end
return *Blackholes*

Алгоритм 3: IsBasis

Input: $G(V, E)$ – орграф без весов, не содержащий циклов
 $Cand \subset V$ – набор вершин, потенциальный базис черной дыры
Output: *True*, если $Cand$ – корректный базис, иначе – *False*.
/* (1) найти особые вершины для каждого корня */
foreach $r \in Roots(G)$ **do**
 $Special_r = \emptyset$
 построить $topSortOrder_r$
 for $i = 0; i < |topSortOrder_r|; i = i + 1$ **do**
 $v = topSortOrder_r[i]$
 $C_v = Closure(v)$
 if $|C_v| = i$ **then**
 $Special_r = Special_r \cup v$
 $maxSpecialIndex_r = \max(SpecialIndex_r, i)$
 end
 end
end
/* (2) проверить наличие доминируемых вершин */
foreach $r \in Roots(G)$ **do**
 $maxSpecialIndex_r = -1$
end
foreach $v \in Cand$ **do**
 foreach $r \in Roots(G)$ **do**
 if $v \in Special_r$ **then**
 $vTopSortIndex_r = \arg_v(topSortOrder_r)$
 $maxSpecialIndex_r = \max(maxSpecialIndex_r, vTopSortIndex_r)$
 end
 end
end
foreach $v \in Cand$ **do**
 foreach $r \in Roots(G)$ **do**
 if $v \in Closure(r)$ **then**
 $vTopSortIndex_r = \arg_v(TopSortIndex_r)$
 if $vTopSortIndex_r < maxSpecialIndex_r$ **then**
 return *False*
 end
 end
end
end

Иванов Д.Е., Семенов А.С.

```
/* (3) Проверка попарной достижимости */  
foreach  $(v, u) \in \text{Cand}(G) \times \text{Cand}(G)$  do  
    if  $v$  достижима из  $u$  then  
        return False  
    end  
end  
return True
```

Алгоритм 4: TopSortBH

Input: $G(V, E)$ – орграф без весов
Output: *Blackholes* – множество всех черных дыр размером от 1 до n
 $\text{Blackholes} = \emptyset$
Построить конденсацию графа $\text{Cond}(V', E')$
for $i = 1$ to $|V'|$ do
 foreach $B_i \in V'(i)$ do
 if $\text{IsBasis}(\text{Cond}(V', E'), B_i)$ then
 if B_i – слабо связанный подграф then
 $\text{Blackholes} = \text{Blackholes} \cup B_i$
 end
 end
 end
end
return *Blackholes*

Статья поступила в редакцию 07.05.2020, принята к публикации 18.06.2020
The article was received on 07.05.2020, accepted for publication 18.06.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Денис Евгеньевич, магистр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Москва, Российская Федерация. E-mail: mr.salixnew@gmail.com

Семенов Александр Сергеевич, кандидат технических наук; начальник отдела АО «Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники» (АО «НИЦЭВТ»); доцент Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова; ведущий научный сотрудник, Высшая школа экономики. Москва, Российская Федерация. ORCID: 0000-0003-4878-6287. ResearcherID: V-4265-2018. Scopus, AuthorID: 57061601800. E-mail: semenov@nicevt.ru

ABOUT THE AUTHORS

Denis E. Ivanov, graduate student at the Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russian Federation. E-mail: mr.salixnew@gmail.com

Alexander S. Semenov, Cand. Sci. (Eng.); Head of a Department at the JSC NICEVT; associate professor at the Moscow State University; leading researcher at the Higher School of Economics. Moscow, Russian Federation. ORCID:0000-0003-4878-6287. ResearcherID:V-4265-2018. Scopus, AuthorID: 57061601800. E-mail: semenov@nicevt.ru

РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

DEVELOPMENT OF NEW ENERGY UNITS BASED ON RENEWABLE KINDS OF ENERGY

DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-58-63

Mathematical modeling of optimal parameters of atmospheric influence on the properties of the solar module

E.Z. Imamov^{1, a} ©, R.A. Muminov^{2, b} ©, R.Kh. Rakhimov^{3, c} ©

¹ Tashkent University of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi,
Tashkent, Republic of Uzbekistan

² Physical-technical Institute, SPA “Physics-Sun”, Academy of Sciences of Uzbekistan,
Tashkent, Republic of Uzbekistan

³ Institute of materials science, SPA “Physics-sun”, Academy of Sciences of Uzbekistan,
Tashkent, Republic of Uzbekistan

^a E-mail: erkinimamov@mail.ru

^b E-mail: detector@uzsci.net

^c E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Abstract. Technological factors of environmental impact on the protective structures of solar modules are considered. It is shown that the problem of extending the service life of solar converters is successfully solved by improving the technology of their operation – indirect activities. It is shown that after each regular cleaning of the surface of the protective structures of the solar module can almost completely restore the working efficiency of its power output, even at high (up to 35%) level of reduction due to dust on the territory of our country within one to two days. The atmospheric impact on the protective structures of solar modules was calculated. The influence of the partial pressure of air particles and the large difference between night and day temperatures on the degree of dust contamination of the protective coatings of the solar module is analyzed. They are the main natural factors that reduce the output power and efficiency of solar energy to electricity converters.

Keywords: dust and air pollution, climate parameters, destruction, adsorption, desorption

Acknowledgments. The authors are grateful to academician R.A. Zahidov and Professor M.N. Tursunov for stimulating discussion of the results obtained.

The work is done in the framework of the project, the PFI FA-F3-004 “A Study of fundamental physical models, mechanisms, methods for forming high-efficient, cheap solar cells, as durable photovoltaic installations on their basis”.

FOR CITATION: Imamov E.Z., Muminov R.A., Rakhimov R.Kh. Mathematical modeling of optimal parameters of atmospheric influence on the properties of the solar module. *Computational nanotechnology*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 58–63. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-58-63

Математическое моделирование оптимальных параметров атмосферного воздействия на свойства солнечного модуля

Э.З. Имамов^{1, a} ©, Р.А. Муминов^{2, b} ©, Р.Х. Рахимов^{3, c} ©

¹ Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразмий,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

² Физико-технический институт научно-производственного объединения «Физика-Солнце»
Академии наук Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

³ Институт материаловедения научно-производственного объединения «Физика-Солнце»
Академии наук Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

^a E-mail: erkinimamov@mail.ru

^b E-mail: detector@uzsci.net

^c E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Аннотация. Рассмотрены технологические факторы воздействия внешней среды на защитные конструкции солнечных модулей. Показано, что проблема удлинения срока службы солнечных преобразователей успешно решается совершенствованием технологии их эксплуатации – деятельностью косвенного характера. Показано, что после каждой регулярной очистки поверхности защитных конструкций солнечного модуля можно почти полностью восстановить рабочую эффективность его выходной мощности, несмотря даже на высокий (до 35%) уровень снижения ее за счет запыленности воздуха на территории нашей страны в течение одного-двух дней. Проведен расчет атмосферного воздействия на защитные конструкции солнечных модулей. Проанализированы влияние величины парциальных давлений частиц воздуха и большой разницы ночной и дневной температур на степень загрязнения частицами пыли защитных покрытий солнечного модуля. Именно они – основные природные факторы снижения выходной мощности и эффективности преобразователей солнечной энергии в электричество.

Ключевые слова: запыленность и загрязнение воздуха, климатические параметры, деструкция, адсорбция, десорбция

Благодарности. Авторы благодарны академику Р.А. Захидову и профессору М.Н. Турсунову за стимулирующее обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена в рамках проекта ПФИ ФА-ФЗ-004 «Изучение фундаментальных новых физических моделей, механизмов, способов для формирования высокоэффективных, дешевых фотопреобразователей, а также долговечных фотоэнергетических установок на их основе».

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Имамов Э.З., Муминов Р.А., Рахимов Р.Х. Математическое моделирование оптимальных параметров атмосферного воздействия на свойства солнечного модуля // Computational nanotechnology. 2020. Т. 7. № 2. С. 58–63. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-58-63

INTRODUCTION

In this paper, we consider the technological conditions of environmental impact on the protective structures of solar modules, as well as the mechanism for controlling the level of this impact. It is shown that the problem of extending the service life of solar converters can be successfully solved by indirect activities – improving the technology of their operation.

Studies have shown that the accumulation of pollutants on the surface of protective structures affects the final output of solar energy. In a dry, hot climate, the efficiency of photovoltaic installations (PV) is greatly influenced by the dustiness of the air [1–7].

High air temperature during the day, a high difference between night and day temperatures, and contamination of the surface of solar modules with dust particles are the main natural factors for reducing the output power of photovoltaic installations (reducing output power due to dustiness of the air is from 17 to 35 percent [8–9]). This is especially evident in countries such as China, India, the States of the Arabian Peninsula and Central Asia, which are the most “dusty” in the world. Therefore, when operating photovoltaic installations, it is advisable to periodically conduct cleaning operations to remove contamination from the surface of the protective structures of the solar module. Experience shows that after each regular cleaning, almost complete restoration of the working efficiency of the solar module is achieved.

Fixing dirt in the form of a dust particle depends on:

- structures of the solar module surface protection system,
- mechanisms for optimizing the conditions for protecting the surface of solar modules from contamination,
- a number of climatic parameters of the area: pressure (P), temperature (T) and humidity, differences in night and day temperatures and other atmospheric factors that affect the state of the glass surface.

STRUCTURE OF THE SOLAR MODULE PROTECTION SYSTEM

Structurally, the solar module is a multi-layer system enclosed in a frame¹. The system contains a glass plate² covering the surface of the aluminum profile, followed by a number of sealing films (sealant), which is used as a material EVA-ethylene-vinyl-acetate transparent film that protects the solar cells and their electrical contacts from air or moisture³.

The structure of the solar module includes its main element – a semiconductor solar cell tightly packed with several layers of sealing films. In addition, the protective system includes a glass plate with an antireflection coating, a protective film and a housing.

The absence of such a protective structure can lead to direct contact of the solar cell with air or moisture, which may result in accelerated oxidation and destruction of contacts, as well as failure of the solar cell.

If the surface of an unprotected solar module is covered in a large amount of foreign air molecules, this may lead to partial changes in both surface and some volume properties. Especially undesirable are changes in the electro physical and optical properties of the solar cell, which can occur when the atoms of the solar cell surface naturally come into contact and interact with air molecules.

The surface of the glass plate is also quite affected by the environment, especially by precipitation. In this interaction, glass corrosion occurs (a chemical reaction of leaching metal ions and hydroxyl groups from the glass). Corrosion or destruction⁴ causes serious violations and destruction of the normal structure of the glass surface, which becomes opaque and extends, depending on the composition of the glass and the physical properties of the surface, to a depth of several micrometers (roughness, mechanical stress, damage, cracks, scratches, etc.). During destruction, many optical properties of glass change: the refractive index and coefficient of thermal expansion are lower.

From the above it becomes clear that the life of solar inverters and their efficiency is determined not only by the properties of the substrate material of the solar cell (e.g. silicon), but also to a large extent, technological parameters of the structures that comprise the solar module.

The structure of the solar module includes its main element – a solid-state solar cell tightly packed with several layers of sealing films. In addition, the protective system includes a glass plate with an anti-reflective coating, a protective film and a housing.

The absence of such a protective structure can lead to direct contact of the solar cell with air or moisture, which may result in accelerated oxidation and destruction of contacts, as well as failure of the solar cell.

If the surface of an unprotected solar module is covered in a large amount of foreign air molecules, this may lead to partial changes in both surface and some volume properties. Especially undesirable are changes in the electrophysical and optical properties of the solar cell, which can occur when the atoms of the solar cell surface naturally come into contact and interact with air molecules.

The surface of the glass plate is also quite affected by the environment, especially by precipitation. In this interaction, glass corrosion occurs (a chemical reaction of leaching metal ions and hydroxyl groups from the glass). Corrosion or destruction causes serious disruption and destruction of the normal structure of the glass surface, which becomes opaque and extends, depending on the composition of the glass and the physical properties of the surface, to a depth of several micrometers (roughness, mechanical stress, damage, cracks, scratches, etc.). During destruction, many optical properties of glass change: the refractive index and the coefficient of thermal expansion are lower.

From the above it becomes clear that the life of solar inverters and their efficiency is determined not only by the properties of the substrate material of the solar cell (e.g. silicon), but also to a large extent, technological parameters of the structures that comprise the solar module.

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF OPERATION OF SOLAR MODULES

Direct contact of the atmosphere with the solar module occurs precisely on the surface of protective structures: a glass coating and several layers of sealing films. Atmospheric influence is very strong and can quickly reduce the transparency of the surface to radiation, change its reflectivity, and weaken the mechanical strength of the entire structure of the solar module [11–19]. Ultimately, these factors lead to a significant decrease in the efficiency of the entire radiation conversion process, a negative impact on the electro physical properties of solar cells and structural structures of the solar module, as well as on the duration of its operation in the open air.

Experience shows [7] that in a few days the decrease in the output power of the solar module due to the dustiness of the air reaches 35%, and after each regular cleaning, almost complete restoration of the working efficiency of the solar module is achieved.

Operation of large-scale solar installations requires periodic cleaning of their protective structures. In modern conditions, this function can most effectively be performed by appropriately programmed flying drones with special automatic cleaning mechanisms (flying “vacuum cleaners-drones”).

Responsibility for the condition of a low-power solar installation that also needs regular prevention (for example, a power plant on the roofs of private homes) can be assigned to its owner under a specially designed contract (as is practiced in the US under the “Million roofs” program or in Germany under the “400,000 roofs” program).

It follows from the above that the problem of extending the service life of solar converters can be solved successfully by indirect activities – by improving the technology of their operation.

¹ In many cases, made of aluminum profile.

² Toughened glass with polished or textured surface with thickness of 4–6 mm.

³ Currently, we are searching for other materials for the production of sealing films that will have a more stable transparency and a significantly longer service life as a protective means of solar cells [10].

⁴ Destruction – destructio in Latin.

**THE SIMPLEST MODEL OF THE KINETICS
OF ADSORPTION AND DESORPTION
OF MOLECULES**

Interaction with the environment is usually accompanied by either the process of fixing the air molecule on the surface (adsorption – from the Latin *ad* – on, at and *sorbeo* – absorb) of the solar module, or the alienation of the molecule from the surface (desorption – *de* – from, with and *sorbeo* – absorb)⁵. The interaction continues until a quantitative equilibrium of States is established between the surface and the gas medium, when due to acts of interaction, the number of molecules coming to the surface per unit of time is balanced by the number of molecules leaving the surface for the same time and under the same initial atmospheric conditions (pressure and temperature).

In the simplest Langmuir model [20], we calculate the kinetics of the process in question (the effect of air molecules on the atoms of the surface of a hermetic glass plate) and analyze the effect of specific atmospheric parameters on the electro physical properties of the surface of the solar module.

The calculation of kinetics is based on the assumption that there are separate centers⁶ on the protective surface of the solar system that can hold only one air molecule, one particular type. This ability is characterized by a certain amount of ϵ – the binding energy of the molecule with the center. It is assumed that the strong connection of the molecule with the center excludes any interaction between neighboring molecules, as well as the fact that for a given surface, the number of such centers is constant N_0 and does not depend on the state of the environment. Based on these assumptions, we determine $N(t)$ – the time dependence of the number of air molecules held by the solar module’s protective structures at time t on a single surface at temperature T and the partial pressure p of molecules (or particles) of a certain type⁷ that settle on the surface of the protective structures from the environment.

The corresponding differential equation for the kinetics of $N(t)$ has the form:

$$dN(t)/dt = \alpha P(N_0 - N(t)) - \beta N(t). \quad (1)$$

Here $\alpha = \eta s (2\pi M k_B T)^{-1/2}$, $\beta = \zeta e^{-\epsilon/kT}$, τ and s – the average lifetime of the molecules at the center of the grip and the effective area of the center, N_0 – the surface concentration of centers capture foreign molecules considered varieties, ζ is the probability of the inverse care center (the probability of desorption of molecules from the center), η is the probability that the captured molecule to fixate on the center (the probability of adsorption of molecules from the center).

The positive term of the right-hand side of equation (1) determines the number of adsorption acts (the number of molecules held on a single surface and per unit time on the protective structures of the solar module). The second term is responsible for the acts of desorption of molecules (the number of molecules leaving it).

At the initial time $t = 0$ and under the condition $N(0) = 0$, the solution (1) has the form:

$$N(t) = N_0 (1 - e^{-at}) / (1 + b), \quad (2)$$

where $a = \alpha P + \beta$, $b = \beta / (\alpha \cdot P)$.

⁵ Not to be confused with absorption – this is the property of the surface to absorb the molecules of the medium; light absorption is the same as light absorption.

⁶ With a surface concentration of N_0 .

⁷ This can be silane SiH_4 , or silicon carbide SiC , or silicon nitride Si_3N_4 , or any other molecules that in one configuration or another are part of the settling dust particles.

It follows from (2) that the number of molecules N held by the center on a single surface at a given T – temperature (in Kelvins) and P – pressure (in Pascals), the greater the number of centers the surface contains and the stronger the bond of the molecule with the center (that is, the greater the ϵ).

The kinetics of the reverse process of removing captured molecules can be described by the same equation (1), whose integration under initial conditions: $P = 0$, $t = 0$, and $N = N^*$ (N^* – equilibrium filling) leads to the ratio:

$$N(t) = N^* e^{-\beta t}.$$

It can be seen that the higher the temperature, the more intense the process of removing molecules.

Let’s consider the solution (2) in two cases: at the very initial moments of contact of the solar module with the atmosphere ($t \rightarrow 0$) and at the moment of transition to the stationary mode of operation (at $t \rightarrow \infty$).

At $t \rightarrow 0$ and a small filling of $N \ll N_0$ and $t \ll 1/a$, the change in time of the surface concentration of the retained air molecules occurs according to the linear law:

$$N(t) = \alpha P N_0 t. \quad (2^*)$$

In the stationary mode of operation ($t \rightarrow \infty$), a saturation state occurs, so that the equilibrium value of the surface concentration of retained air molecules is determined by the ratio:

$$N = P \alpha N_0 / (\beta + P \alpha) = N_0 / (1 + b). \quad (2^{**})$$

**ANALYSIS OF ATMOSPHERIC EFFECTS
(PRESSURE)**

The stationary solution of the kinetic equation (2^{**}) is completely determined by the product of $P \alpha^3$, as well as the adsorption capacity of the protective surface β to this type of air molecules.

If $\beta / (\alpha P) = b \gg 1$, this means that the partial pressure ($P = nkT$), and with it the n – concentration of molecules of this class in the atmosphere is small (weak dustiness), that is, the adsorption ability of the protective surface to this type of air molecules is weak. At $P^* \alpha \ll \beta$ ($b \gg 1$ – weak dustiness), the value of the surface concentration of N – retained air molecules (from (2^{**})) is significantly inferior to the N_0 – surface concentration of the capture centers ($N \ll N_0$) and is equal to:

$$N \approx N_0 / b = N_0 \alpha P / \beta.$$

If $b \ll 1$ and $\beta / \alpha \ll P$, then the opposite is true: low partial pressure and high concentration of dust particles in the atmosphere, that is, dust is strong and there is increased adsorption. At the same time, the efficiency of solar energy conversion is greatly deteriorated, and the concentration of adsorbed air molecules N is almost equal to the surface concentration of the capture centers of N_0 , that is, $N \approx N_0$.

The noted conclusions follow directly from the General stationary solution (2^{**}) of the differential equation of kinetics (1).

All parameters included in (2^{**}) have certain temperature dependencies: $P \sim$ increases proportionally to T , $\alpha \sim$ decreases as $T^{-1/2}$, $\beta \sim$ increases as $e^{-\epsilon/kT}$ ($\epsilon = \epsilon/k_B$, $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ eV/K). Therefore, according to (2^{**}), the temperature dependence

⁸ The product of the partial pressure $P = nkT$ (deposited or adsorbed molecules in accordance with Dalton’s law) by the proportionality coefficient $\alpha = \alpha = \eta s (2\pi M k_B T)^{-1/2}$.

of the N – surface concentration of the retained air molecules can be expressed as:

$$N = N_0/[1 + b_0 e^{-\gamma/T^{1/2}}] = N_0/[1 + b_0 f_T], \quad (3)$$

where $f_T = e^{-\gamma/T^{1/2}}$,

where $b_0 = [2\pi M / (k_B \eta^2 s^2 n^2)]^{1/2}$, e is the base of the natural logarithm (or the Neper number), n is the concentration of environmental molecules (such as dust) settling on the surface of protective structures, whose partial pressure is P .

At temperature $T = 2\gamma$, the temperature dependence N takes the minimum value equal to:

$$N_{\min} = N_0/[1 + b_0/(2\gamma e)^{1/2}],$$

taking into account which (3) can be rewritten as:

$$N = N_0/[1 + (2\gamma e)^{1/2} f_T (N_0/N_{\min} - 1)]. \quad (4)$$

Denoting by $N(T)$ the surface concentration of retained air molecules at temperature T , and by $N(T_2)$ – at temperature $T_2 = T + \Delta T$, we determine the dependence of the relative value of the adsorption capacity of glass $\Delta N/N(T)$ on the difference between day and night temperatures ΔT (more precisely, on the relative value $X = \Delta T/T$). It is equal to:

$$\begin{aligned} \Delta N/N(T) &= [N(T_2) - N(T)]/N(T) = -[1 - N(T_2)/N(T)] = \\ &= -b_0 f_T (2\gamma - T) \Delta T / (2T^2) = -Xb(2\gamma - T)/2T. \end{aligned} \quad (5)$$

If T is the nighttime temperature, and $T_2 = T + \Delta T$ is the daytime temperature, then (5) shows that during the day, at high temperature, the capture of air molecules by the glass surface is almost small ($N(T_2) < N(T)$).

It is interesting to consider the relation (5) when performing the inequalities $b \ll 1$ and $b \gg 1$. In the first case, when there is a strong dustiness of the air: (γ – large, the center is deep, the adsorption capture is weakly expressed):

$$\Delta N/N(T) \approx -Xb\gamma/T.$$

It can be seen that even with heavy dust ($b \ll 1$) due to the positive temperature difference ($\Delta T > 0$) at night at a low temperature, the adsorption increases, and the solar module loses its converting properties much more.

To restore the efficiency of the Converter, it is necessary to clean its protective surface in the morning.

In another extreme case, when the air is slightly dusty ($b \gg 1$), two options are possible:

- or a shallow capture center and $\gamma < T/2$, while $\Delta N/N(T) \approx Xb/2$, adsorption is mainly intense during the day at a high temperature $T_2 = T + \Delta T$;
- either the center is deep and $T > 2\gamma$, with $\Delta N/N(T) \approx -Xb\gamma/T$, and the adsorption at night is slightly increased (as in $b \ll 1$).

These results fully confirm the experimental facts of the work [7; 9], that at the same difference in day and night temperatures of the ΔT , a decrease in partial pressure due to a decrease in temperature ($P = nkT$) weakens the adsorption properties of the surface – the dust does not sit down, but is in the air.

OTHER MODELS OF ADSORPTION AND DESORPTION PROCESSES

The above relations are valid when a given center captures a molecule of a particular variety. In fact, the air contains a mixture of different molecules and therefore each of them is characterized by its own partial pressure P_i and its specific

concentration of capture centers N_{0i} . Instead of (2) for each center, we have another generalized equation:

$$N_i(t) = P_i \alpha N_{0i} / (\alpha P_i + \beta_i). \quad (7)$$

When different P_i/b_i molecules are captured at the same N_0 center, the center's ability to capture a molecule of this variety is reduced by the combined influence of ($\sum \alpha P_i$) molecules of other varieties and instead of (2) we have:

$$N_i(t) = P_i \alpha N_{0i} / (\sum \alpha P_i + \beta_i). \quad (4)$$

Note that in real cases, the total effect of molecules of other varieties can not only reduce, but also increase the ability of the surface to capture molecules.

The calculation of the kinetics is based on the Langmuir model (I. Langmuir). Naturally, it reflects the interaction of individual air molecules with some hypothetical surface [20] and is not able to describe the behavior of all possible other types of molecules.

Other theoretical descriptions of adsorption and desorption kinetics are also known for specific interacting objects [20]. For example, the Roginsky–Zeldovich equation $dN/dt = C e^{-\gamma N}$ describes the kinetics of CO adsorption on MnO_2 as $N(t) = \gamma^{-1} \ln(1 + t/t_0)$.

And to describe the kinetics of adsorption of O_2 on ZnO and O_2 on TiO_2 , the J.M. Thuillier equation is more suitable, according to which $N(t) = C e^{-\gamma N}$.

For small filling levels, it is possible to obtain satisfactory results in some materials using $N(t) = C t^n$, where $n < 1$ is Benham's law (D.N. Bangham).

In real cases, processes are also possible when the ϵ -binding energy of the molecule with the center (or the differential heat of capture) is itself a function of N and decreases with the growth of N . This can be explained either by the representation of the interaction between molecules captured by the center, or by the representation of the inhomogeneity of the surface with centers of different nature (different values of the ϵ – heat function).

The numerical value of N also depends on volume impurities, lighting, electric field, and other influences.

SUMMARY

A model of the kinetics of adsorption and desorption of molecules on the surface of the protective structures of the solar module is constructed, which correctly describe the observed facts of operation [7; 9]. Some other possible theoretical models of adsorption and desorption of air molecules are analyzed [20].

Recommendations are given for extending the service life of small and large power solar converters by improving their operation technology.

The possibility of significantly extending the service life of solar converters by activities of a very indirect nature – improving the technology of their operation.

References

1. Sandnes B., Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate: experimental study and analytic model. *Solar Energy*. 2002. No. 72 (1). Pp. 63–73.
2. Tursunov M.N., Sabirov H., Yuldoshev I.A. et al. Photothermal batteries of different designs: comparative analysis. *Helioelektronika*. 2017. No. 1. Pp. 26–29.
3. Tursunov M.N., Muminov R.A., Dyskin V.G., Yuldoshev I.A. A mobile photothermal convertor and its operating characteristics. *Appl. Solar Energy*. 2013. No. 1. Pp. 23–27.

Imamov E.Z., Muminov R.A., Rakhimov R.Kh.

4. Tursunov M.N., Dyskin V.G., Yuldashev I.A. criterion of contamination of the glass surface of a photoelectric battery. *Solar Technology*. 2015. No. 2. Pp. 82–84.
5. Akhatov J.S., Yuldashev I.A., Halimov A.S. Experimental Investigations on PV-T collector under natural condition of Tashkent. *Energy Procedia*. Mexico. ISES Solar World Congress. 2013. No. 39. Pp. 2327–2336.
6. Muminov R.A., Tursunov M.N., Sabirov H. et al. Research of photo parameters of thermal batteries of increased efficiency in natural conditions. *Problems of energy and resource saving*. 2019. No. 2. Pp. 56–59.
7. Muminov R.A., Tursunov M.N., Sabirov H. et al. Modernization photodope battery to improve the efficiency of use in hot climates. *Physics*. 2019. No. 1. Pp. 44–49.
8. Mani M., Pillai R. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. Pp. 3124–3131.
9. Muminov R.A., Tursunov M.N., Sabirov H. et al. Research on methods for protecting the surface of photovoltaic batteries from contamination. *Applied Solar Energy*. 2015. Vol. 51. No. 2. Pp. 163–164.
10. Zahidov A. Carbon nanotubes and transparent gels. *J. Phys. Chem. B*. 2012. No. 116. Pp. 10823–10829.
11. Yuldoshev I.A., Saymbetov A.K. Combined photo thermo converters solar energy with reflecting concentrators. *Proceedings of XIII international Scientific Conference "Solid State Physics"*. June 25–27, 2014. Pp. 217–219.
12. Muminov R.A., Tursunov M.N., Sabirov H. et al. Research of photo parameters of thermal batteries of increased efficiency in natural conditions. *Problems of energy and resource saving*. 2019. No. 3–4.
13. Tursunov M.N., Dyskin V.G., Sobirov H., Turdiev B.M. Improving the efficiency of the phototeplopreobrazovatelnoy installation. *Heliotechnika*. 2014. No. 4. Pp. 84–86.
14. Gremenyuk V.F., Tivanov M.S., Zalessky V.B. Solar cells based on semiconductor materials. *Alternative Energy and Ecology*. 2009. No. 1 (69). Pp. 59–123.
15. Tursunov M.N., Muminov R.A., Tukfatullin O.F. et al. Photothermo-electric batteries based on silicon solar cells. *Heliotechnika*, 2011. No. 1. Pp. 72–75.
16. Chow T.T. A review of photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*. 2010. No. 87 (2). Pp. 365–379.
17. Hallmark B., Hornung C.H., Broady D. et al. The application of plastic microcapillary films for fast transient micro-heat exchange. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. Pp. 5344–5358.
18. Lutpullaev S.L., Tursunov M.N., Dadamuhamedov S., Yuldoshev I.A. Phototherapeutic. Utility model Patent no. FAP 00793 dated 18.07.2011. Rasmi Ahborotnoma. 28.02.2013. № 2.
19. Mazumder M., Horenstein M.N., Stark J.W. et al. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013. Vol. 49. No. 4. Pp. 1793–1800.
20. Felts A. Amorphous and glassy inorganic solids. Moscow: Mir, 1986. 556 p.
21. Wolkensteyn F.F. Physics-chemistry of the surface of semiconductors. "Science" Physical Ed. Math. Lit-ry. 1973. 399 p.

Статья поступила в редакцию 18.05.2020, принята к публикации 25.06.2020
The article was received on 18.05.2020, accepted for publication 25.06.2020

ABOUT THE AUTHORS

Erkin Z. Imamov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor; Tashkent University Of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8580-222>. E-mail: erkinimamov@mail.ru

Ramizulla A. Muminov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academician of the Academy Sciences of the Republic Uzbekistan; Physical-Technical Institute, SPA "Physics-Sun", Academy of Sciences of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7243-595X>. E-mail: detector@uzsci.net

Rustam Kh. Rakhimov, Dr. Sci. (Eng.); Head of laboratory No. 1 of the Institute of Materials Science, SPA "Physics-Sun", Academy of Sciences of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>. E-mail: rustam-shsul@yandex.com

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Имамов Эркин Зуннунович, доктор физико-математических наук, профессор; Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразмий. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8580-222>. E-mail: erkinimamov@mail.ru

Муминов Рамизулла Абдуллаевич, доктор физико-математических наук, академик Академии наук Республики Узбекистан, Физико-технический институт, Научно-производственное объединение «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7243-595X>. E-mail: detector@uzsci.net

Рахимов Рустам Хакимович, доктор технических наук; зав. лабораторией № 1 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>. E-mail: rustam-shsul@yandex.com

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL NANOMATERIALS BASED ON NANOPARTICLES AND POLYMER NANOSTRUCTURES

DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-64-70

УДК: 621.791:338.45

Эффективность сушки и прокатки сварочных электродов в печах с использованием излучения наноструктурированной функциональной керамики (НФК)

Р.М. Саидов^{1, a} ©, Р.Х. Рахимов^{1, b} ©, Б.Д.угли Юсупов^{2, c} ©,
М.К.Б.уғли Холдорев^{3, d} ©

¹ Институт материаловедения научно-производственного объединения «Физика-Солнце»
Академии наук Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

² Андижанский машиностроительный институт,
г. Андижан, Республика Узбекистан

³ Ферганский университет,
г. Фергана, Республика Узбекистан

^a E-mail: saidov_r@yahoo.com

^b E-mail: rustam-shsul@yandex.com

^c E-mail: yusupov.b.d@mail.ru

^d E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Аннотация. В настоящей статье приведены результаты исследований по изучению влияния различных методов сушки и прокатки сварочных электродов с покрытием кисло-рутилового типа стандартной технологией в электрических печах и в печах с использованием излучения наноструктурированной функциональной керамики (НФК) на сварочно-технологические свойства сварочных электродов. По результатам исследований выявлено улучшение сварочно-технологических свойств при сушке и прокатке сварочных электродов в печи с использованием излучения НФК. Прокатка сварочных электродов с использованием излучения НФК, позволяет получить качественные сварочно-технологические свойства покрытий и без применения естественной сушки после нанесения обмазки на сварочную проволоку. Это позволяет проводить термическую обработку сварочных электродов с большой экономией потребления электроэнергии и снижения времени прокатки по сравнению со стандартной технологией.

Ключевые слова: ручная дуговая сварка, сварочные электроды, сушка и прокатка электродов, импульсное излучение, наноструктурированная функциональная керамика (НФК), сварочно-технологические свойства электродов

Благодарность. Настоящая работа выполнена в рамках прикладного проекта Государственной научно-технической программы Республики Узбекистан за № ФА-Атех-2018-32 на тему «Разработка импортозамещающих сварочных электродов на базе местного сырья для сварки конструкционных сталей» и фундаментального проекта Государственной научно-технической программы Республики Узбекистан за № ФА-Ф-4-005 «Новые принципы генерации инфракрасного импульсного излучения функциональной керамикой и его взаимодействие с веществом».

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Саидов Р.М., Рахимов Р.Х., Юсупов Б.Д.угли, Холдоров М.К.Б.уғли. Эффективность сушки и про-
калки сварочных электродов в печах с использованием излучения наноструктурированной функциональной керамики
(НФК) // Computational nanotechnology. 2020. Т. 7. № 2. С. 64–70. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-64-70

DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-64-70

Efficiency of drying and calcining of welding electrodes in furnaces using radiation from nanostructured functional ceramics (NFC)

R.M. Saidov^{1, a} ©, R.Kh. Rakhimov^{1, b} ©, B.D.ugli Yusupov^{2, c} ©,
M.K.B.ugli Kholdorov^{3, d} ©

¹ Institute of Materials Science, SPA “Physics-sun”, Academy of Sciences of Uzbekistan,
Tashkent, Republic of Uzbekistan

² Andijan Machine-Building Institute,
Andijan, Republic of Uzbekistan

³ Fergana University,
Fergana, Republic of Uzbekistan

^a E-mail: saidov_r@yahoo.com

^b E-mail: rustam-shsul@yandex.com

^c E-mail: yusupov.b.d@mail.ru

^d E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Abstract. This article presents the results of research on the influence of various methods of drying and calcining welding electrodes coated with acid-rutile type standard technology in electric furnaces and in furnaces using nanostructured functional ceramics (NFC) radiation on the welding and technological properties of welding electrodes. According to the results of research, the improvement of welding and technological properties during the drying and calcining of welding electrodes in a furnace using radiation with NFC was revealed. Calcination of welding electrodes using NFC radiation allows to obtain high-quality welding and technological properties of coatings without the use of natural drying after coating the welding wire. This makes it possible to perform heat treatment of welding electrodes with great savings in power consumption and reduced calcination time compared to standard technology.

Keywords: manual arc welding, welding electrodes, drying and calcining of electrodes, radiation from nanostructured functional ceramics (NFC), welding and technological properties of electrodes

Acknowledgements. This work was carried out within the framework of the research project of the State scientific and technical program of the Republic of Uzbekistan No. FA-Ateh-2018-32 on the theme “Development of import-substituting welding electrodes based on local raw materials for welding of a structural steels” and fundamental project of the State scientific and technical program of the Republic of Uzbekistan No. FA-F-4-005 “New principles for the generation of infrared pulsed radiation by functional ceramics and its interaction with matter”.

FOR CITATION: Saidov R.M., Rakhimov R.Kh., Yusupov B.D.ugli, Kholdorov M.K.B.ugli. Efficiency of drying and calcining of weld-
ing electrodes in furnaces using radiation from nanostructured functional ceramics (NFC). *Computational nanotechnology*.
2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 64–70. (In Russ.) DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-64-70

ВВЕДЕНИЕ

Качество процесса дуговой сварки покрытыми электродами, зависит от нескольких факторов, одним из которых является наличие влаги в электродных покрытиях. Наличие влаги в покрытиях сварочных электродов и образующиеся при ее разложении водород и кислород вызывают неста-

бильное горение дуги, повышенное разбрызгивание расплавленного металла, неудовлетворительное формирование шва, образование в сварных соединениях пор, шлаковых включений и трещин [1–4].

Поэтому большое значение, при изготовлении сварочных электродов и их подготовке к сварке, уделяют сушке и про-
калке обмазки покрытий в целях полного удаления влаги.

Влажность покрытия обычно определяют путем доведения навески покрытия, снятого с электрода, до постоянного веса выдержкой в термостате при 105–110 °С.

По стандартной технологии электроды после нанесения покрытия опрессовкой подвергаются воздушной сушке в течение не менее 2 ч, а затем подвергаются прокалке в печах при высоких температурах. Температура прокалки сварочных электродов зависит от их типа покрытия. Электроды с рутиловым и кислым покрытиями содержат в рецептуре органику (целлюлоза, крахмал и др.), создающую газовую защиту сварочной ванны. В связи с этим температура прокалки таких электродов не должна превышать 185–190 °С. Влажность покрытия указанных электродов, определяемая при 180 ± 10 °С, должна составлять не более 0,3–0,4%. [5–8]

Однако сушка и прокалка по стандартной технологии требует большого количества времени и затрат электроэнергии, что повышает себестоимость производства сварочных электродов, и соответственно, их стоимость.

Известны работы [9–15], в которых представлены примеры применения ИК-техники в народном хозяйстве, и в частности, при сушке и прокалке различных материалов с помощью генерации импульсного излучения наноструктурированной функциональной керамикой (НФК) [14; 15], позволяющие существенно снизить расход энергии и повысить качество конечного продукта. Так, в работе [16] установлено, что метод прокалки сварочных электродов с использованием излучения НФК позволяет получить качественные сварочно-технологические свойства покрытий,

при экономии потребления электроэнергии и снижении времени прокалки по сравнению со стандартной технологией прокалки.

Целью настоящей работы являлось проведение сравнительных испытаний процессов сушки и прокалки сварочных электродов рутилово-смешанного вида различными способами и выявление влияния этих методов на качество сушки и прокалки сварочных электродов и их сварочно-технологические свойства.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе реализации настоящих исследований проводилось изучение влияния методов сушки и прокалки сварочных электродов с кислорутитовым типом покрытия марки ИМАН-3/К-Р, разработанного Институтом материаловедения НПО «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан, на сварочно-технологические свойства сварочных электродов.

Покрытия на сварочных электродах получали методом окунания в обмазочную массу, полученную в результате смешивания исследуемых соединений (порошок с гранулометрическим составом менее 100 мкм) с жидким стеклом (плотностью 1,4 г/см³) в соотношении, способствующим образованию на поверхности металлического стержня слоя обмазки, толщиной 0,8–1,2 мм. После нанесения обмазки, электроды сушили и прокалывались различными методами, представленными в табл. 1.

Table 1

Welding electrodes heat treatment methods and parameters

№	Heat treatment methods	Furnace type	Temperature, °C	Heat treatment duration, min	Weight loss, %	Appearance of the electrode surface after heat treatment
1	К	Natural drying at room temperature	25	1440	0,87	
2	КР	Natural drying at room temperature + calcining in electric furnace (Fig. 1a)	25 + 180	1440 + 120	0,87 + 1,15	
3	ИК-1	Furnace with the use of radiation NFC (Fig. 1b)	150	40	1,36	
4	ИК-2	Natural drying at room temperature + calcination using NFC (Fig. 1b)	25 + 150	1440 + 40	0,87 + 0,96	



a



b

Fig. 1. Furnace for welding electrodes heat treatment:
a – electric furnace; b – furnace with the use of radiation NFC

В результате сушки и прокаливания электродов по методам и режимам, указанным в табл. 1, выявлено отличие внешнего вида поверхности электродного покрытия и потери его веса в зависимости от метода и режимов прокаливания электродов. Так, при естественной сушке (проявление) (К) и прокаливании в электрической печи с использованием излучения НФК без естественной сушки (ИК-1), поверхность покрытия имеет равномерный светло-серый матовый цвет с тонкими прожилками светло-фиолетового цвета, а потеря веса покрытия, полученного по методу ИК-1 почти в два раза больше, чем при естественной сушке (К). Внешний вид покрытий электродов, полученных при термообработке методами КП и ИК-2 (см. табл. 1) имеет блестящую поверхность с равномерным светло-серым цветом с еле заметными тонкими прожилками светло-фиолетового цвета.

На рис. 2 представлен график потери веса покрытия сварочного электрода в зависимости от методов термообработки и времени экспозиции. В соответствии с полученными результатами, самым эффективным методом по удалению влаги из покрытия является метод ИК-1, при котором электродное покрытие приобретает постоянный вес при выдержке под воздействием излучения НФК до 25 мин (1,36%). При термообработке электродов по методу ИК-2 постоянный вес покрытия достигается при времени экспозиции до 40 мин (0,96%), по методу КП до 120 мин (1,15%) и до 300 мин (0,87%) при естественной сушке (К).

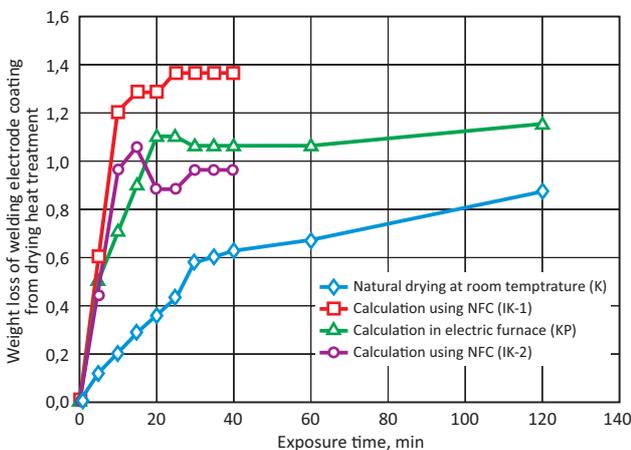


Fig. 2. Dependence of weight loss of welding electrode coating from drying methods and exposure time

В качестве сварочно-технологических свойств сварочных электродов изучались такие свойства, как стабильность горения дуги сварочного электрода $L_{р\text{дд}}$, формирование наплавленной точки $\phi_{\text{св.т}}$, величина козырька или чехла на торце электрода h_k и коэффициенты расплавления α_p , наплавки α_n и потерь на угар и разбрызгивание ψ .

Наплавка осуществлялась на пластину из стали СтЗсп, толщиной 5 мм, при помощи выпрямителя инверторного типа марки Jasic TIG-200P. Питание сварочной дуги осуществлялось на переменном токе при величине силы сварочного тока 140А и диаметре стержня электрода 4 мм.

Показателем стабильного горения дуги сварочных электродов является разрывная длина дуги $L_{р\text{дд}}$, которую определяли по методике, описанной в работе [16; 17]. Результаты исследований влияния методов термообработки на величину $L_{р\text{дд}}$ приведены в табл. 2.

Исследование влияния методов термической обработки прокаливания на склонность сварочных электродов к образованию козырька оценивали по высоте козырька или толщине чехла на торце электрода h_k (см. табл. 2).

Формирование наплавленной точки $\phi_{\text{св.т}}$ оценивали по форме и диаметру наплавленной точки (см. табл. 2). Правильное формирование наплавленной точки без таких наружных дефектов как подрезы, прожоги, наплывы трещины и поры свидетельствует о качественном формировании наплавленного металла.

Основными величинами, характеризующими процесс сварки и наплавки, являются [18]:

- коэффициент расплавления металла α_p ;
- коэффициент наплавки α_n ;
- коэффициент потерь ψ .

Для оценки величины этих потерь вследствие разбрызгивания, окисления, испарения (угар) за время горения дуги используется, так называемый коэффициент потерь ψ и определяется по формуле:

$$\psi = \frac{\alpha_p - \alpha_n}{\alpha_p} 100\% \quad (1)$$

Коэффициент расплавления металла α_p показывает, какое количество электродного металла расплавляется в единицу времени на один ампер сварочного тока, и определяется формулой:

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I t} \text{ г/(А} \cdot \text{ч)}, \quad (2)$$

где G_p – масса расплавленного за время t электродного металла, г; I – величина сварочного тока, А; t – время горения дуги, ч.

Table 2

Results of research of welding and technological properties of welding electrodes depending on the heat treatment method

№	Heat treatment methods	Breaking length of the arc L_{bl} , mm	Visor at the end of the electrode h_v , mm	View of the electrode visor	Formation of the deposited metal ϕ_{dp} , mm	View of the deposited metal
1	K	6,0	0,4		7,6	
2	KP	14,0	1,4		12,1	
3	IK-1	12,5	1,4		12,8	
4	IK-2	13,0	0,4		12,6	

Note: Each value shown in the table corresponds to the arithmetic mean of the results of three measurements.

Table 3

Results of research of welding and technological properties of welding electrodes depending on the heat treatment method

Heat treatment methods	Welding current value, A	Arcing time, sec	Weight of the molten metal G_{mm} , gr	Weight of deposited metal G_{dm} , gr	Coefficient of melting α_m , gr/A · h	Coefficient of surfacing α_s , gr/A · h	Coefficient of loss ψ , %
K	140	3	0,6	0,41	5,14	3,51	31,7
KP		7	1,42	1,08	5,21	3,97	23,8
IK-1		5	1,38	1,13	7,08	5,81	17,9
IK-2		6,5	1,19	0,98	4,71	3,88	17,6

Note: Each value shown in the table corresponds to the arithmetic mean of the results of three measurements.

Коэффициент расплавления зависит от материала электрода, состава его покрытия, рода, полярности и плотности тока. Кроме того, в процессе сварки электрод нагревается, что также сказывается на интенсивности расплавления электродного металла. До начала сварки электрод имеет комнатную температуру, к концу сварки он может нагреться до 500 °С.

Для оценки процесса наплавки применяется коэффициент наплавки α_n , определяемый по формуле:

$$\alpha_n = \frac{G_n}{It} \text{ г/(А · ч)}, \quad (3)$$

где G_n – масса наплавленного электродного металла за время t , г; I – величина сварочного тока, А; t – время горения дуги, ч.

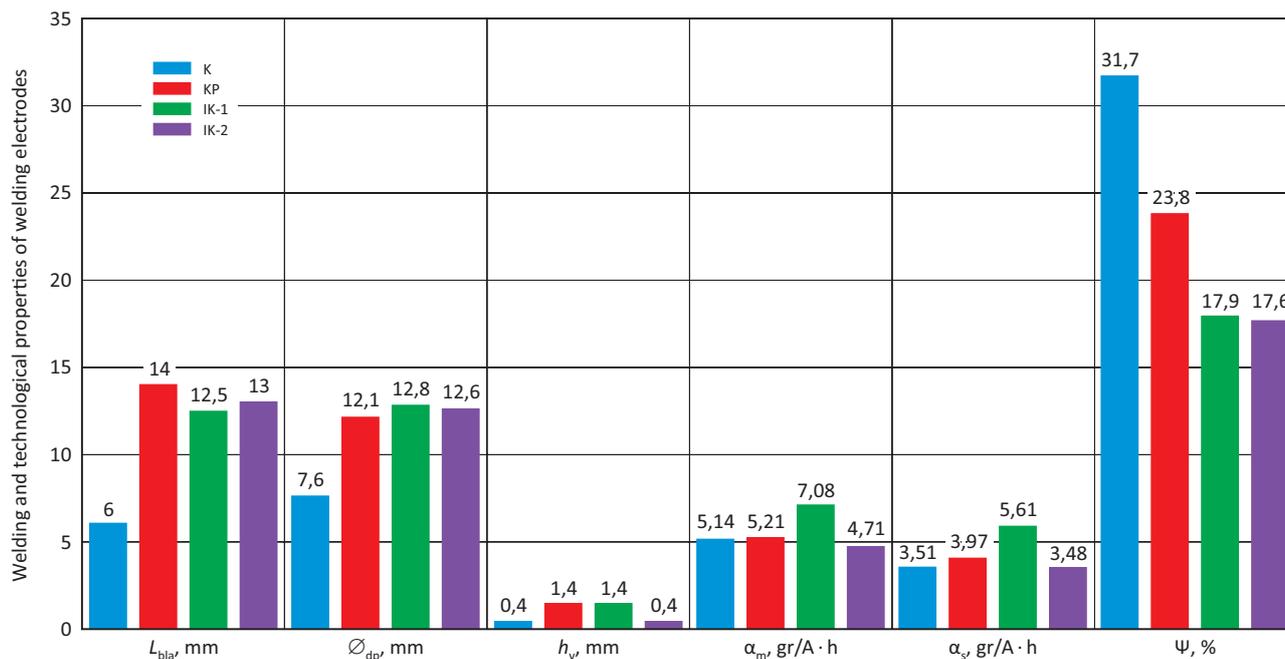


Fig. 3. Welding and technological properties of welding electrodes depending on the methods of drying and calcining

Коэффициент потерь Ψ зависит от состава электрода и его покрытия, от режима сварки и вида сварного соединения. Так, например, коэффициент потерь возрастает при увеличении плотности тока и длины дуги.

Результаты исследований сварочно-технологических свойств сварочных электродов «ИМАН-3/К-Р» в зависимости от метода и режимов прокалики представлены в табл. 2, 3 и на рис. 3.

В соответствии с этими результатами, наблюдается благоприятное влияние термической обработки сварочных электродов «ИМАН-3/К-Р» импульсным излучением наноструктурированной функциональной керамикой ИК-1 и ИК-2 (рис. 3).

Сравнительные результаты прокалики электродов «ИМАН-3/К-Р» в печи с использованием излучения НФК (ИК-1 и ИК-2) и в электрической печи по стандартному режиму (КП) показали на улучшение сварочно-технологических свойств, кроме разрывной длины дуги, в печи с использованием излучения (см. рис. 4). Например, в наплавленных точках, полученных электродами, прокаленными по режимам ИК-1 и ИК-2, наблюдаются самые низкие значения толщины чехла на торце электрода и коэффициента потерь на угар и разбрызгивание. Электроды, прокаленные по стандартной технологии (КП) имеют значения коэффициента потерь на разбрызгивание Ψ более 20%. В соответствии с требованиями к сварочным электродам по этому показателю, их использование нецелесообразно. Только величина разрывной длины дуги незначительно выше у электродов, прокаленных по стандартному режиму (КП).

Таким образом, полученные результаты позволяют констатировать, что новый метод прокалики сварочных электродов с использованием излучения НФК позволяет получить качественные сварочно-технологические свойства покрытий, при экономии потребления электроэнергии и снижении времени прокалики по сравнению со стандартной технологией прокалики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с полученными данными, термическая обработка сварочных электродов с покрытием кислород-рутилового типа в печах с использованием излучения наноструктурированной функциональной керамикой (НФК) позволяет получать качественные электродные покрытия с хорошими сварочно-технологическими свойствами. При этом, эффективное действие прокалики с использованием излучения наблюдается и без применения естественной сушки после нанесения обмазки на сварочную проволоку.

Установлено, что новый метод прокалики сварочных электродов с использованием излучения НФК позволяет получить качественные сварочно-технологические свойства покрытий, при экономии потребления электроэнергии и снижении времени прокалики по сравнению со стандартной технологией прокалики.

Литература / References

1. Khrenov K.K. Welding, cutting, soldering. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973. 408 c.
2. Potapov N.N. Welding materials for arc welding. Moscow: Mechanical Engineering, 1993. 225 p.
3. Welding and materials to be welded. Vol. 2: Technology and equipment. 3-ht ref. ed. V.M. Yampolsky (ed.). Moscow: Publishing House of MSTU named after N.E. Bauman, 1998.
4. Urbanovich N.I. Welding consumables. Minsk: BNTU. 2019, 294 p.
5. Makarov S.V., Sapozhkov S.B. Production of electrodes for manual arc welding using nanodisperse materials. *World Applied Sciences Journal*. 2014. No. 29 (6). Pp. 720–723.
6. Makarov S.V. Heat treatment of welding electrodes. In the Proceedings of the XII International Scientific and Practical Teleconference "Technical Sciences – from Theory to Practice". Novosibirsk: Siberian Association of Consultants, 2012. Pp. 44–50.
7. Makarov S.V. Heat treatment of welding electrodes. *Collection "Science and Technology". Section 3: Mechanical Engineering and Mechanical Engineering*. 2012. Pp. 44–49.
8. RD 34.10.124-94. Instructions for the preparation and storage of welding materials. 1995. 12 p.

9. *Levitin I.B.* The use of infrared technology in the national economy. Leningrad: Energoizdat, 1981. P. 264.
10. *Gossorg J.* Infrared thermography. Moscow: Mir, 1988. 402 p.
11. *Salikhov T.P., Kan V.V., Urazaeva E.M.* et al. Chemical-thermal method for processing industrial waste on solar furnaces. *Solar Engineering*. 2005. No. 2. Pp. 52–56.
12. *Pippard A.* Oscillation physics. Transl. from English. Moscow: Higher School, 1989. 264 p.
13. *Fomenko V.S.* Emission properties of materials. Directory. Kiev: Naukova Dumka, 1970, 145 p.
14. *Rakhimov R.Kh.* Generation and properties of infrared radiation. *Comp. nanotechnol.* 2019. No. 2. Pp. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-2-101-137>
15. *Rakhimov R.K., Kim E.V.* USA Patent “Treatment of materials with infrared radiation”, # 5472720 from 12/05/1995.
16. *Saidov R.M., Rakhimov R.Kh., Yusupov B.D., Kholdorov M.K.* A new method of drying and calcining welding electrodes using emitters made of functional ceramics. *Computational Nanotechnology*. 2020. No. 1. Pp. 44–52. (In Russ.)
17. *Litvinova T.R., Elsukov S.K., Antipov I.S.* et al. Study of the welding and technological properties of coated electrodes for welding low-alloy high-strength steels. *International Research Journal*. 2017. No. 05. Part 3. Pp. 71–75.
18. *Gevorgyan V.G.* Fundamentals of welding. Moscow: Higher School, 1975. 168 p.

Статья поступила в редакцию 11.05.2020, принята к публикации 20.06.2020
The article was received on 11.05.2020, accepted for publication 20.06.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Саидов Рустам Маннапович, кандидат технических наук; старший научный сотрудник Института материаловедения НПО «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0126-5273>. Scopus Author ID: 6602574798. E-mail: saidov_r@yahoo.com

Рахимов Рустам Хакимович, доктор технических наук; зав. лабораторией № 1 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>. E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Юсупов Бекзод Дилмурод угли, ассистент кафедры технологических машин и оборудования Андижанского машиностроительного института. Андижан, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2066-1872>. E-mail: yusupov.b.d@mail.ru

Холдороров Мухаммад Карим Ботирали угли, преподаватель Ферганского университета. Фергана, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-0481>. E-mail: rustam-shsul@yandex.com

ABOUT THE AUTHORS

Rustam M. Saidov, Cand. Sci. (Eng.); leader research at the Institute of Material Sciences, SPA “Physics-Sun” Academy of Science of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0126-5273>. Scopus Author ID: 6602574798. E-mail: saidov_r@yahoo.com

Rustam Kh. Rakhimov, Dr. Sci. (Eng.); Head of laboratory No. 1 at the Institute of Materials Science, SPA “Physics-sun”, Academy of Sciences of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>. E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Bekzod D. ugli Yusupov, assistant teacher at the Department of Technological Machines and Equipment, Andijan Machine-Building Institute. Andijan, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2066-1872>. E-mail: yusupov.b.d@mail.ru

Muhammad K.B. ugli Xoldorov, teacher at the Fergana University. Fergana, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-0481>. E-mail: rustam-shsul@yandex.com

05.02.02

*МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ
И ДЕТАЛИ МАШИН*

*MACHINE SCIENCE, DRIVE SYSTEMS
AND MACHINE PARTS*

DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-71-78

УДК: 629.1-482

Расчетно-экспериментальный метод определения конструктивного облика трансмиссионных валов, изготовленных с применением композиционных материалов

В.П. Еремин^а ©, А.А. Больших^б ©, М.В. Шкурин^с ©

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация

^а E-mail: ereminvp@mai.ru

^б E-mail: bolshikhaa@mai.ru

^с E-mail: maksmai33@gmail.com, m.shkurin@mai.ru

Аннотация. Данная расчетно-экспериментальная работа посвящена разработке перспективных конструкций трансмиссионных валов автомобилей из полимерных композиционных материалов (ПКМ). В статье анализируются существующие конструкции приводных валов гоночных болидов и обосновывается использование карбонового приводного вала с титановыми наконечниками. Также рассматривается технология производства для такого продукта. Оценка характеристик конструкции под действием предельных нагрузок проводилась методом конечных элементов с учетом анизотропных свойств армированных материалов. Опытные образцы составных приводных валов были изготовлены для дальнейших лабораторных испытаний. По результатам испытаний приводные валы выдерживают больший крутящий момент, чем расчетный. В результате было решено установить их на гоночный болид для проведения натурных испытаний. Во время натурных испытаний композитного приводного вала конструкция соединения титанового наконечника с композитной трубкой была разрушена. В ходе натурных испытаний не было нагрузок, превышающих 60% расчетных, поэтому основной причиной разрушения конструкции является усталостное разрушение. Следующим этапом исследований стала разработка конструкции, устойчивой к длительным циклическим нагрузкам и обладающей достаточной надежностью. Эта конструкция была разработана, изготовлена и испытана в рамках натурных испытаний. В результате работы были сделаны выводы о характеристиках разработанных конструкций и их применимости к гоночным автомобилям.

Ключевые слова: композиционные материалы, трансмиссионные валы, полуоси, анализ методом конечных элементов, гоночный автомобиль

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Больших А.А., Еремин В.П., Шкурин М.В. Расчетно-экспериментальный метод определения конструктивного облика трансмиссионных валов, изготовленных с применением композиционных материалов // Computational nanotechnology. 2020. Т. 7. № 2. С. 71–78. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-71-78

Computational and experimental method for determining the structural appearance of transmission shafts made using composite materials

V.P. Eremin^a ©, A.A. Bolshikh^b ©, M.V. Shkurin^c ©

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation

^a E-mail: ereminvp@mai.ru

^b E-mail: bolshikhaa@mai.ru

^c E-mail: maksmai33@gmail.com, m.shkurin@mai.ru

Abstract. This computational and experimental work is dedicated to the development of promising designs of vehicle drive shafts made of polymer composite materials. The paper analyzes the existing models of drive shafts vehicles and substantiates the use of a carbon-fiber drive shaft with titanium tips. A manufacturing technology for such a product is also presented. Evaluation of structure performance under the action of ultimate loads was carried out by the finite element method considering anisotropic properties of reinforced materials. Prototypes of composite drive shafts were produced for further laboratory tests. According to the tests results, the drive shafts withstands a greater torsional moment than the calculated one. As a result, it was decided to install them on a racing vehicle for carrying out field tests. During the field tests of the composite drive shaft, the mounting structure between titanium tip and composite tube was destroyed. During the full-scale tests there were no loads exceeding 60% of the calculated ones, therefore, the main cause of structural failure is fatigue failure. The next stage of the research was the development of a design that is resistant to long-term cyclic loads and has sufficient reliability. This design was designed, manufactured and tested in the framework of field tests.

Keywords: composite materials, drive shafts, finite element analysis, racing car

FOR CITATION: Eremin V.P., Bolshikh A.A., Shkurin M.V. Computational and experimental method for determining the structural appearance of transmission shafts made using composite materials. *Computational nanotechnology*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 71–78. (In Russ.) DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-71-78

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время композитные материалы получили широкое распространение в качестве конструкционных материалов в узлах и агрегатах гоночных болидов.

Применение современных композитных материалов в элементах трансмиссии автомобиля, таких как полуоси или приводные валы, позволяет существенно улучшить характеристики колесной машины: снизить полную и неподдресоренную массу, уменьшить момент инерции трансмиссии. Из современных композитных материалов можно выделить полимерные композитные материалы, имеющие в качестве армирующего элемента углеродные волокна, обладающие малой плотностью, и наилучшим образом сочетающие высокий уровень прочностных свойств с технологичностью изготовления изделия. В статье приведены результаты исследований, целью которых является уменьшение неподдресоренной массы, момента инерции трансмиссии и сохранение необходимой прочности приводных валов гоночного автомобиля за счет применения углепластиковых элементов в их конструкции.

Наибольшее распространение при изготовлении приводных валов в автомобилях класса получили четыре конструкционных материала: сталь, титан, стекловолокно и углепла-

стик [1]. Приводные валы, изготовленные из стали, имеют наибольшее распространение. Стальные валы более надежны чем композитные, имеют минимальную цену и просты в производстве, но обладают наибольшей массой.

К приводному валу предъявляются следующие требования:

- передавать крутящий момент от трансмиссии на ведущее колесо;
- он должен быть способен вращаться с требуемой угловой скоростью;
- он должен работать при приложении крутящего момента в обоих направлениях [2].

Поскольку масса является важным фактором, влияющим на динамику автомобиля, необходимо уменьшить массу автомобиля и максимально уменьшить момент инерции трансмиссии. Снижение массы наиболее востребовано на спортивных автомобилях. Валы из титана являются самыми дорогими и сложными в производстве из-за необходимости применения сложных технологий, таких как сварка трением, при изготовлении изделия. Изделия из стеклопластика имеют низкую удельную прочность по сравнению с изделиями из углепластика. Использование углеродного волокна в конструкции приводного вала позволяет снизить вес изделия на 30% по сравнению со стальным аналогом [3; 4]. Таким образом, чтобы максимально снизить вес приводного вала

при сохранении его рабочих характеристик, было решено создать конструкцию из углеродного волокна с титановыми шлицевыми наконечниками.

На сегодняшний день организация надежной передачи крутящего момента с помощью шлицевого соединения является сложной задачей, если один компонент изготовлен из углепластика, а другой - из металла. Ввиду этого проблемой изготовления составного приводного вала вместо металлического является соединение корпуса составного вала и металлического наконечника. Одним из самых простых способов организации такого соединения является клеевое соединение [5; 6]. Однако этот метод имеет ряд недостатков, таких как высокая зависимость клеевого соединения от технологии его производства, низкая усталостная прочность и высокая чувствительность к вибрационным нагрузкам. В этом случае механическое соединение обладает большей надежностью [7; 8].

В статье предлагается конструкция приводного вала, состоящего из двух наконечников из титанового сплава, механически соединенных при помощи углепластикового трубчатого элемента. На наконечниках имеются шлицы, на которые устанавливаются триподы. Фиксация триподов на шлицах обеспечивается при помощи двух стопорных шайб, общий вид композитного вала представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид композитного трансмиссионного вала
Fig. 1. General view of the composite drive shaft

Наконечники позиционируются друг относительно друга при помощи тонкостенной технологической композитной трубки необходимой длины, которая клеится на специальные буртики на наконечниках. Далее производится намотка углеволокна на заготовку. Волокно ложится на участок наконечника, имеющий иглы, которые материал огибает и тем самым обеспечивает механическое соединение металла и композита.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Определение напряженно-деформированного состояния приводного вала, изготовленного из композитного материала, является нетривиальной задачей, связанной с учетом анизотропии свойств армированного пластика. Основные сложности возникают в следствии учета особенностей структуры материала, таких как направление армирования и количество слоев армирующего материала.

Предельные моменты, действующие на приводные валы, возникают при трогании с места и торможении двигателем. Случай, трогания с места при максимальном моменте, реализуемым по сцеплению, является наиболее опасным. В гоночных автомобилях, при использовании спортивной резины, коэффициент сцепления может достигать 1,7–1,8, в расчетах момента максимально реализованного по сцеплению принимается 1,7 [9].

$$M_{\text{сц}} = r_{\text{к}} \cdot k_{\text{бл}} \cdot \varphi \cdot M \cdot g \cdot 0,7 = 914 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (1)$$

где $M = 240 \text{ кг}$ – полная масса автомобиля; $r_{\text{к}} = 0,261 \text{ м}$ – радиус качения; $k_{\text{бл}} = 1,25$ – коэффициент блокировки дифференциала; $\varphi = 1,7$ – коэффициент сцепления; $M_{\text{сц}}$ – максимальный момент, реализуемый по сцеплению [10].

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

Для оценки характеристик конструкции под действием экстремальных нагрузок обычно используется конечно-элементный программный комплекс со встроенными модулями для подготовки модели конечных элементов с учетом анизотропных свойств армированных материалов [11; 12].

В рамках исследования создана трехмерная имитационная математическая модель приводного вала с конечными элементами (рис. 2), состоящая из 12 325 оболочечных конечных элементов. Титановые элементы наконечника вала и игл моделируются с помощью трехмерных конечных элементов.

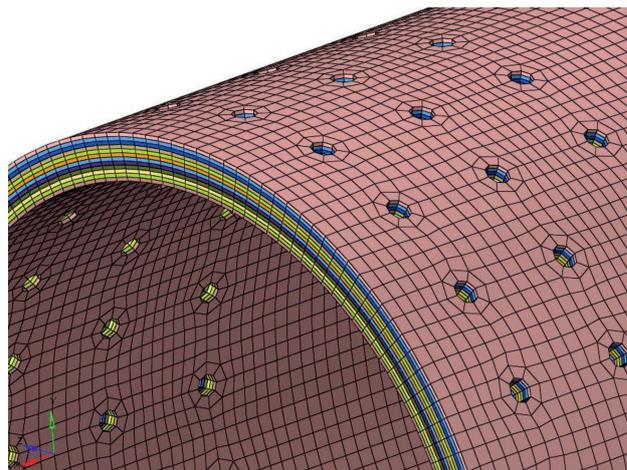


Рис. 2. Конечно-элементная модель приводного вала
Fig. 2. Finite element model of drive shaft

В диалоговом окне, показанном на рис. 3, задаются такие параметры материала, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига в трех ортогональных направлениях. Далее задается количество слоев и направление армирования композитного материала. Слои чередуются с углом намотки $+54^\circ$ и -54° [13; 14].

Для правильной оценки прочности приводного вала необходимо использовать критерии разрушения, учитывающие анизотропные свойства и типы разрушения композитного материала. Конечно-элементный программный комплекс позволяет оценить прочность детали с учетом одновременного анализа нескольких критериев отказов. Можно использовать максимальную деформацию, максимальное напряжение, Цая-Хилл, Пук и другие критерии [15; 16]. В каждом слое композита оценка прочности проводится в соответствии с перечисленными критериями. На основе этой оценки определяются критические слои, в которых значения одного или нескольких критериев достигают максимума.

На рис. 4 дается наиболее нагруженный слой композитного материала. Максимальные напряжения сконцентрированы в максимально отдаленном от края композитной трубы ряду игл. В том же регионе сосредоточены максимальные значения критериев отказа. В локальных зонах отдельных слоев материал может подвергаться разрушению при экстремальных нагрузках, но такие зоны незначительны. Эти зоны находятся только в некоторых слоях и не влияют на надежность, поэтому можно сделать вывод, что составная часть является достаточно прочной.

Card Image	MAT8	Name	Id	Color	Material	Thickness	Orientation	IP	Result
User Comments	Hide In Menu/Export	ply1	1		CFRP	0.25000	54.0	3	yes
E1	140000.0	ply2	2		CFRP	0.25000	-54.0	3	yes
E2	7500.0	ply3	3		CFRP	0.25000	54.0	3	yes
NU12	0.3	ply4	4		CFRP	0.25000	-54.0	3	yes
G12	4000.0	ply5	5		CFRP	0.25000	54.0	3	yes
G1Z		ply6	6		CFRP	0.25000	-54.0	3	yes
GZZ		ply7	7		CFRP	0.25000	54.0	3	yes
RHO	1.5e-009	ply8	8		CFRP	0.25000	54.0	3	yes
A1		ply9	9		CFRP	0.25000	-54.0	3	yes
A2		ply10	10		CFRP	0.25000	54.0	3	yes
TREF		ply11	11		CFRP	0.25000	-54.0	3	yes
Xt	1500.0	ply12	12		CFRP	0.25000	54.0	3	yes
Xc	900.0								
Yt	58.0								
Yc	170.0								
S	80.0								

Рис. 3. Параметры материала и углы укладки приводного вала

Fig. 3. Material parameters and laminate of the CF drive shaft

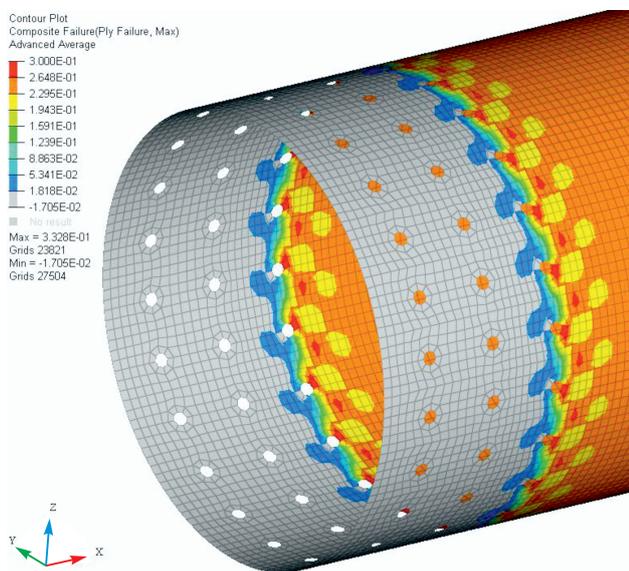


Рис. 4. Критерий разрушение композиционного материала

Fig. 4. Torque loading result

Конечно-элементная модель (КЭМ) и схема конструкции наконечника с иглами показаны на рис. 5. Для ускорения расчета была воспроизведена лишь небольшая часть титанового элемента с иглами. Крутящий момент распределяется по всем отверстиям и иглам.

Результат расчета кончиков валов и игл показан на рис. 6 и 7.

Расчет показывает высокие контактные напряжения у основания игл. Это может быть объяснено тем фактом, что при расчете не учитывается адгезия углеродного волокна и наконечника вала, возникающая при намотке нити накала на заготовку, и, как следствие, перераспределение нагрузки на иглы.

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

На основании результатов расчетов под действием предельных нагрузок можно сделать выводы об эффективности конструкции составных приводных валов.

Следующая часть работы посвящена стендовым испытаниям экспериментального образца приводного вала. На первом этапе была создана твердотельная модель станда.

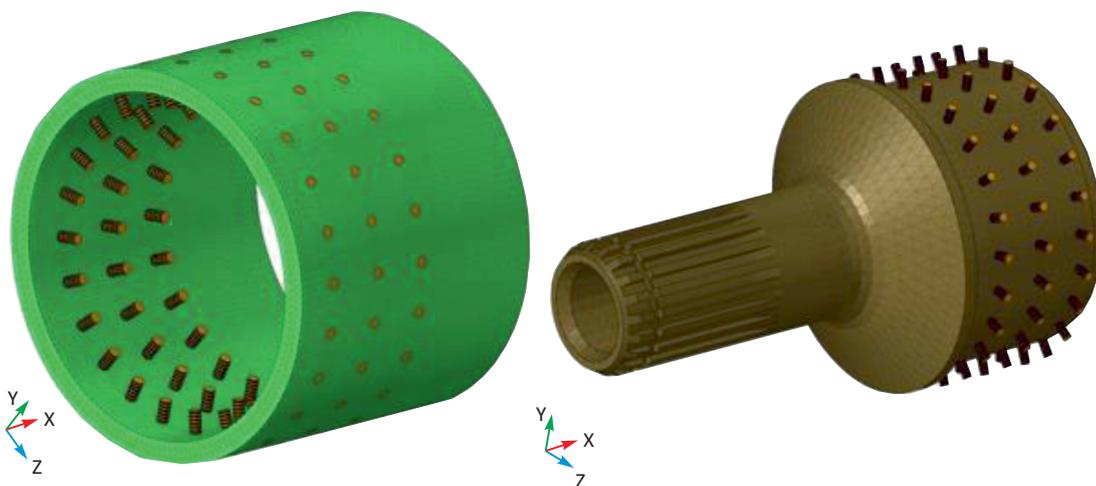


Рис. 5. КЭМ наконечников приводного вала с иглами

Fig. 5. FEM of the drive shaft tips with needles

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО ОБЛИКА
ТРАНСМИССИОННЫХ ВАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**
Еремин В.П., Больших А.А., Шкурин М.В.

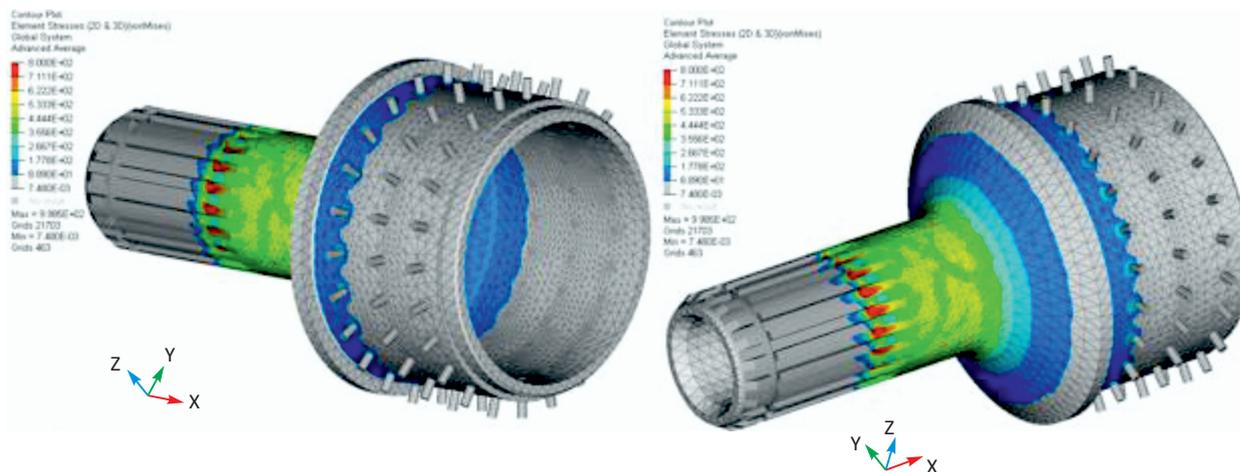


Рис. 6. Результат расчета наконечников вала
Fig. 6. Result of calculation of shaft tips

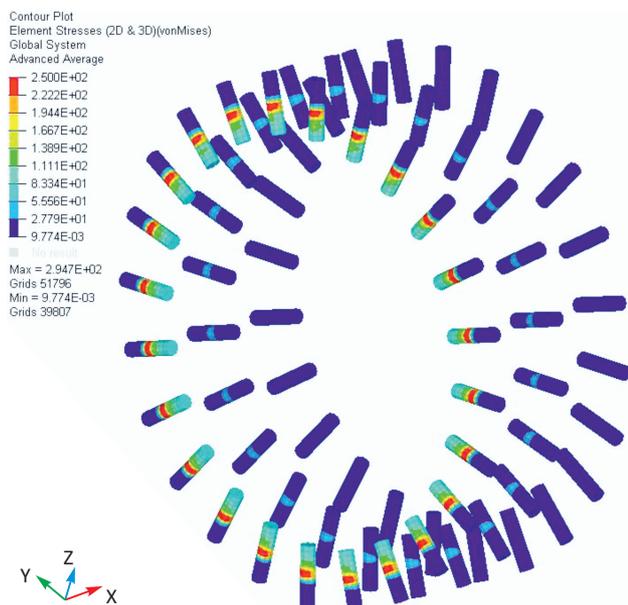


Рис. 7. Результат расчета игл
Fig. 7. Result of calculation of needles

Приводной композитный вал испытывается на кручение при воздействии на плечо усилия, приложенного с помощью стяжного устройства (3). Величина нагрузки фиксируется тензодатчиком (1). Величина крутящего момента рассчитывается, как произведение усилия, фиксируемого тензодатчиком на длину плеча. Величина углового перемещения измеряется при помощи индикаторной головки часового типа (2) и рычага, поджимающего головку датчика (рис. 8).

Разрушение изделия происходит в области шлицов на титановом наконечнике композитного вала при достижении крутящим моментом значения 1179 Н · м (рис. 9).

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Предложенная конструкция составных приводных валов, согласно результатам стендовых испытаний, выдерживает большой крутящий момент, чем рассчитанный, поэтому было принято решение изготовить валы и установить их на гоночный автомобиль для проведения натурных испытаний.



Рис. 8. Стенд для испытаний:
1 – тензодатчик; 2 – индикаторная головка часового типа (для измерения деформации); 3 – стягивающее устройство

Fig. 8. Test fixture:
1 – strain gauge; 2 – dial indicator head; 3 – tightening device

В результате анализа данных телеметрии было установлено, что в ходе натурных испытаний автомобиль эксплуатировался в различных условиях, таких как старт с места, торможение двигателем, прохождение поворотов, внезапное ускорение и торможение. Во время работы не было обнаружено никаких внешних дефектов ни на шлицах, ни в области титанового наконечника и крепления композитной трубы, ни на самой композитной трубе. При пробеге около 30 км все иглы, фиксирующие титановый наконечник, были разрушены (рис. 10).

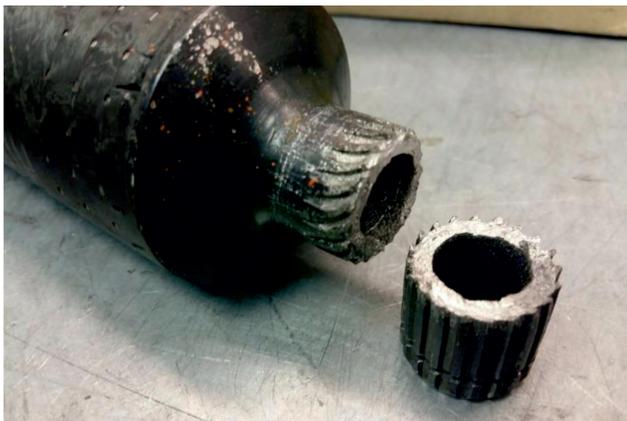


Рис. 9. Разрушение изделия в области шлицов
Fig. 9. Tip failure

Во время эксплуатации машины не было нагрузок, превышающих 60% от расчетных, поэтому основной причиной поломки является усталостное разрушение игл. Усталостное разрушение может произойти из-за динамических нагрузок, вызванных несбалансированными характеристиками двигателя [17].

Испытательный автомобиль оснащен одноцилиндровым мотоциклетным двигателем Yamaha WR450f. Двигатели этого типа имеют высокие амплитудные крутильные колебания системы двигатель-трансмиссия-колесо. Причиной дисбаланса двигателя являются силы инерции возвратно-поступательного движения масс и их моментов, периодически меняющиеся по величине и направлению. Поэтому возникает неравномерность передаваемого крутящего момента, вызывающая высокие циклические динамические нагрузки и приводящая к быстрому росту усталостных трещин в соединительных элементах вала, что значительно сокращает срок службы детали. Для увеличения срока службы приводных валов, изготовленных по описанной методике, необходимо уменьшить концентрацию напряжений в металлических и композитных соединительных элементах и использовать материалы с более высоким пределом усталостной выносливости.

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИИ НОВЫХ ПРИВОДНЫХ ВАЛОВ

В связи с тем, что разработанный приводной вал не обладал достаточной надежностью, было решено разработать новую конструкцию, лишенную этого недостатка. Поскольку слабым местом оригинальной конструкции оказался концентратор напряжений на стыке между иглами и наконечником приводного вала, было решено разработать и изготовить монолитные наконечники. Кроме того, было решено увеличить прочность соединительных элементов путем увеличения их площади поперечного сечения, чтобы увеличить прочность на сдвиг.

Таблица 1

Масса приводных валов [Mass of drive shafts]

Тип приводного вала	Масса, г
Стальной приводной вал	1729
Композитный приводной вал с иглами	1138
Композитный приводной вал с монолитными наконечниками	985



Рис. 10. Разрушенный композитный приводной вал
Fig. 10. Composite drive shaft failure

Однако изготовление вкладышей, соединенных с валом, является сложной технологической задачей. Кроме того, увеличение диаметра элементов приводит к появлению зазоров между композитным материалом и иглой при намотке волокна. Чтобы устранить эти зазоры и одновременно увеличить площадь поперечного сечения, а также улучшить технологичность изделия, было решено изготавливать наконечники вала с ромбовидными соединительными элементами (рис. 11). Поверхности ромбовидных элементов наклонены под углом намотки, чтобы исключить зазоры между ними и жгутом нити при намотке. Производство такой детали не является технологически сложным при использовании 4-х-осевого станка с ЧПУ. В связи с тем, что предыдущая конструкция вала уже показала достаточную прочность при испытании на статическую нагрузку, новая конструкция, которая, очевидно, является более долговечной, не требует испытаний на статическую нагрузку.



Рис. 11. Наконечники валов с ромбовидными соединительными элементами
Fig. 11. Drive shaft tips with lozenge-shaped joint elements

Было решено изготовить предложенную конструкцию и провести ее натурные испытания в реальных условиях эксплуатации. Испытания проводились на гоночном автомобиле и заключались в проведении пробных заездов по типичным трассам (рис. 12).



Рис. 12. Гоночный автомобиль с установленными композитными приводными валами последней конфигурации

Fig. 12. Race car with new design composite drive shafts installed

В ходе испытаний были реализованы режимы максимального ускорения и торможения двигателем. Во время испытания поломка не произошла, и визуальный осмотр валов не выявил конструктивных дефектов.

Литература

1. Chandrakant P., Nayan G. Design & analysis of composite material shaft in automobile: A review // *International Journal for Scientific and Research and Development*. 2014. No. 2 (10). Pp. 149–151.
2. Афанасьев Б.А., Даштиев И.З. Проектирование элементов автомобиля из полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / под ред. Б.А. Афанасьева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 92 с.: ил.
3. Jebakani D., Paul Robert T. Particle swarm optimization for RBDO of composite drive shaft // *European Journal of Scientific Research*. 2011. Vol. 62. Is. 2. P. 294.
4. Hatwar P.K., Dr. Dalu R.S. Design and analysis of composite drive shaft: A review // *International Journal for Scientific and Research and Development*. 2015. No. 3 (1). Pp. 1294–1297.
5. Kassapoglou Ch. Design and analysis of composite structures with applications to aerospace structures. The Netherlands: Delft University of Technology, 2010.
6. Parshuram D., Mangsetty S. Design and analysis of composite. Hybrid drive shaft for automobiles // *The International Journal of Engineering and Science*. 2013. No. 2 (1). Pp. 160–171.
7. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
8. Viroliya C.C., Viroliya V.C. (C.V. Patel). A review on "Design and development of composite drive shaft" // *International Journal of Advancements in Research & Technology*. December, 2018. Vol. 7, Is. 1,
9. Moorthy S., Mitiku Y., Sridhar K. Design of Automobile Driveshaft using Carbon/Epoxy and Kevlar/Epoxy Composites // *American Journal of Engineering Research*. 2013. No. 2 (10). Pp. 173–179.
10. Проектирование полноприводных колесных машин: учеб. для вузов. В 3 т. / Б.А. Афанасьев [и др.]; Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А.А. Полуняна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
11. Bhanjatri V.S., Bhanjatri S.C., Shindolkar A.M., Amarpure S.S. Design and analysis of composite drive shaft. 2014.
12. Manjunath K., Mohan S.K., Channakeshava K.R. Optimization and simulation of composite driveshaft for automobile applications // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2010. No. 1 (1). Pp. 76–94.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате вычислительной и экспериментальной работы были разработаны различные конструкции композитных приводных валов, а также технология их изготовления.
2. Эффективность конструкции приводных валов с игольчатым соединением под воздействием статической нагрузки подтверждается расчетным методом.
3. Для проверки характеристик обеих конструкций приводных валов были изготовлены натурные образцы для проведения стендовых статических испытаний и динамических натурных испытаний.
4. В результате полевых испытаний приводной вал, изготовленный из наконечников с игольчатым соединением, был разрушен. Анализ результатов стендовых и натурных испытаний позволяет сделать вывод об усталостном характере разрушения соединительных игл.
5. Конструкция композитного приводного вала с монолитным титановым наконечником была разработана, изготовлена и успешно испытана.
6. Разработанная конструкция композитного приводного вала с монолитным титановым наконечником на 43% легче металлического аналога и обладает такой же надежностью.
7. Разработанный приводной вал можно использовать на спортивных автомобилях вместо стальных.

References

1. Chandrakant P., Nayan G. Design & analysis of composite material shaft in automobile: A review. *International Journal for Scientific and Research and Development*. 2014. No. 2 (10). Pp. 149–151.
2. Afanasyev B.A., Dashtiev I.Z. Design of car elements from polymer composite materials: Textbook. B.A. Afanasyev (ed.). Moscow: Publishing House MSTU named after N.E. Bauman, 2006. 92 p.: il.
3. Jebakani D., Paul Robert T. Particle swarm optimization for RBDO of composite drive shaft. *European Journal of Scientific Research*. 2011. Vol. 62. Is. 2. P. 294.
4. Hatwar P.K., Dr. Dalu R.S. Design and analysis of composite drive shaft: A review. *International Journal for Scientific and Research and Development*. 2015. No. 3 (1). Pp. 1294–1297.
5. Kassapoglou Ch. Design and analysis of composite structures with applications to aerospace structures. The Netherlands: Delft University of Technology, 2010.
6. Parshuram D., Mangsetty S. Design and analysis of composite. Hybrid drive shaft for automobiles. *The International Journal of Engineering and Science*. 2013. No. 2 (1). Pp. 160–171.
7. Vasiliev V.V. Mechanics of structures from composite materials. Moscow: Mechanical Engineering, 1988. 272 p.
8. Viroliya C.C., Viroliya V.C. (C.V. Patel). A review on "Design and development of composite drive shaft". *International Journal of Advancements in Research & Technology*. December, 2018. Vol. 7, Is. 1,
9. Moorthy S., Mitiku Y., Sridhar K. Design of Automobile Driveshaft using Carbon/Epoxy and Kevlar/Epoxy Composites. *American Journal of Engineering Research*. 2013. No. 2 (10). Pp. 173–179.
10. Design of all-wheel drive wheelers: For universities. In 3 vols. B.A. Afanasyev [at al.]; A.A. Polungana (general ed.). Moscow: Publishing House MSTU named after N.E. Bauman, 2008.
11. Bhanjatri V.S., Bhanjatri S.C., Shindolkar A.M., Amarpure S.S. Design and analysis of composite drive shaft. 2014.
12. Manjunath K., Mohan S.K., Channakeshava K.R. Optimization and simulation of composite driveshaft for automobile applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2010. No. 1 (1). Pp. 76–94.

13. Композиционные материалы: справочник / В.В. Васильев [и др.]; под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
14. *Gebresilassie A.* Design and analysis of composite drive shaft for rear-wheel drive engine. May, 2012. Vol. 3. Is. 5.
15. *Kaw A.K.* Mechanics of composite materials. Boca Raton (Florida): Taylor & Francis Group, 2006. 457 p.
16. *Pedro P. Camanho* Failure criteria for fibre-reinforced polymer composites. URL: <http://paginas.fe.up.pt/~stpinho/teaching/feup/y0506/fcriteria.pdf> (дата обращения: 07.12.16).
17. *Kollar L.P., Springer G.S.* Mechanics of composite structures. Cambridge University Press, 2003.
13. Composites: Handbook. V.V. Vasiliev [et al.]; V.V. Vasiliev, Yu.M. Tarnopolsky (eds.). Moscow: Engineering, 1990. 512 p.
14. *Gebresilassie A.* Design and analysis of composite drive shaft for rear-wheel drive engine. May, 2012. Vol. 3. Is. 5.
15. *Kaw A.K.* Mechanics of composite materials. Boca Raton (Florida): Taylor & Francis Group, 2006. 457 p.
16. *Pedro P. Camanho* Failure criteria for fibre-reinforced polymer composites. URL: <http://paginas.fe.up.pt/~stpinho/teaching/feup/y0506/fcriteria.pdf> (data accesses: 07.12.16).
17. *Kollar L.P., Springer G.S.* Mechanics of composite structures. Cambridge University Press, 2003.

Статья поступила в редакцию 15.05.2020, принята к публикации 23.06.2020
The article was received on 15.05.2020, accepted for publication 23.06.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Еремин Валентин Петрович, инженер лаборатории № 2 «Композиционные материалы и конструкции» НИО-101 Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет). Москва, Российская Федерация. E-mail: ereminvp@mai.ru

Больших Александр Андреевич, инженер лаборатории № 2 «Композиционные материалы и конструкции» НИО-101 Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет). Москва, Российская Федерация. E-mail: bolshikhaa@mai.ru

Шкурин Максим Викторович, старший преподаватель кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московского авиационного института (национальный исследовательский университет). Москва, Российская Федерация. E-mail: maksmai33@gmail.com; m.shkurin@mai.ru

ABOUT THE AUTHORS

Valentin P. Eremín, engineer at the Laboratory “Composite materials” of the Department of Aircraft Design and Certification of the Moscow Aviation Institute (National Research University). Moscow, Russian Federation. E-mail: ereminvp@mai.ru

Alexander A. Bolshikh, engineer at the Laboratory “Composite materials” of the Department of Aircraft Design and Certification of the Moscow Aviation Institute (National Research University). Moscow, Russian Federation. E-mail: bolshikhaa@mai.ru

Maksim V. Shkurin, senior lecturer at the Department of Aircraft Design and Certification of the Moscow Aviation Institute (National Research University). Moscow, Russian Federation. E-mail: maksmai33@gmail.com; m.shkurin@mai.ru

Математическое моделирование результатов заимствования иностранных слов русского языка как отражение процесса исторического взаимодействия русских с иностранцами

М.А. Черепнёв^а ©, А.Н. Швец^б ©

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

^а E-mail: cherepniov@gmail.com

^б E-mail: tz.coneforest@gmail.com

Аннотация. Как было отмечено известным социологом Кеннетом Боулдингом, человеческое сообщество, разделенное на различные социальные организации, это наиболее сложный класс биологических систем. Данная статья посвящена математическому моделированию результатов исторического взаимодействия русского народа с иностранцами, нашедших отражение в формировании живого русского языка. Трудность данного исследования заключается, в частности, в той сложности, которую испытывает исследователь, находящийся внутри исследуемой системы. Естественное желание абстрагироваться в этом исследовании от самой системы может быть реализовано при помощи строго научного подхода и привлечения вычислительной техники. А именно, при помощи использования формальных объектов и таких же формальных методик их сравнения как это принято в математике, физике и других науках, исследующих законы природы в тех областях, которые не связаны напрямую с человеком и обществом. Для работы с заимствованными словами и выражениями необходимо в первую очередь отбросить те совпадения, которые можно отнести к случайным. Только в этом случае характер нашего исследования может быть объективным. Целью данного исследования является определение языковых групп иностранцев, оказавших наибольшее влияние на русское население до начала масштабного обмена печатными изданиями. Для достижения этой цели применяются методы статистического анализа для выявления факта случайного совпадения фонетического и смыслового образа слов из разных языков. Базовым инструментом мы выбрали теорему о парадоксе дней рождения. Как следствие получен метод выявления заимствованных слов, появившихся в языке в результате взаимодействия народов – носителей разных языков, исключая случайный характер их совпадения. Обосновано применение программного определения совпадающих слов по оцифрованным словарям. Метод применен к русскому языку. Сделаны выводы об истории развития русского народа и его языка. Эти выводы состоят в том, что основное влияние на русское население и его язык оказали европейцы, прежде всего французы. В тоже время не выявлено никаких существенных следов влияния монгольского или других восточных языков. Влияние тюркской языковой группы и греческого языка занимают среднее положение. При этом если смысловая нагрузка тюркских и греческих заимствований носит общенаучный или хозяйственный характер, то европейские заимствования в первую очередь связаны с торговлей, администрированием, войной, украшениями. Сделан вывод о семейном характере взаимодействия носителей английского языка и языковых групп, близких к англичанам географически, с русским населением, поскольку названия основных членов семьи являются заимствованными в основном из английского языка при наличии в старославянском языке устаревших на сегодня соответствующих названий.

Ключевые слова: парадокс дней рождения, заимствованные слова, историческое взаимодействие народов

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Черепнёв М.А., Швец А.Н. Математическое моделирование результатов заимствования иностранных слов русского языка как отражение процесса исторического взаимодействия русских с иностранцами // Computational nanotechnology. 2020. Т. 7. № 2. С. 79–89. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-79-89

Mathematical modeling of results of borrowing foreign words of the Russian language a reflection of the process of historical interaction between Russians and foreigners

M.A. Cherepniov^a ©, A.N. Shvetz^b ©

Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation

^a E-mail: cherepniov@gmail.com

^b E-mail: tz.coneforest@gmail.com

Abstract. As was mentioned by known sociologist Kenneth Ewart Boulding, the human community, divided into various social organizations, is the most complex class of biological systems. This article is dedicated for mathematical modeling of the process of historical interaction between Russians and foreigners, which are reflected in the formation of a living Russian language. The difficulty lies not only in the large number of relationships, but also in the complexity experienced by the researcher who is inside the system under study. The natural desire to abstract in this study from the system itself can be realized using a strictly scientific approach and computational programming. Namely, by using formal objects and the same formal methods of comparing them, as is customary in mathematics, physics, and other sciences that study the laws of nature in areas that are not directly related to human being and society. To form an objective knowledge base about the interaction of social groups of people, you can use the analysis of traces of this interaction, one of which is their language. It is in the language of a people that the main factors of influence of other peoples – native speakers of another language-remain. These traces, in particular, are borrowed words and expressions. To work with such words and expressions, you must first discard those matches that can be attributed to random. Only in this case can the nature of our research be objective. This article uses statistical analysis methods to identify the fact of accidental coincidence of phonetic and semantic images of words from different languages. The basic tool we have chosen is the birthday paradox theorem. As a result, a method for identifying borrowed words that appeared in the language as a result of the interaction of native speakers of different languages, excluding the random nature of their coincidence, is obtained. The application of software definition of matching words in digitized dictionaries is justified. The method is applied to the Russian language. Conclusions are made about the history of the development of the Russian people and its language. These conclusions are that the main significant influence on the Russian population and its language was exerted by Europeans, primarily the French. At the same time, no traces of the influence of Mongolian or other Eastern languages were found. The influence of the Turkic language group and the Greek language occupy a middle position. At the same time, if the semantic load of Turkic and Greek borrowings is of a general scientific or economic nature, then European borrowings are primarily associated with trade, administration, war, and luxuries. The authors concludes that the family character of interaction between native English speakers and language groups close to the English geographically with the Russian population, since the names of the main family members are borrowed mainly from the English language, while the corresponding names was already exist in the old Slavonic language.

Keywords: the paradox of birthdays, borrowed words, historical interaction of peoples

FOR CITATION: Cherepniov M.A., Shvetz A.N. Mathematical modeling of results of borrowing foreign words of the Russian languages a reflection of the process of historical interaction between Russians and foreigners. *Computational nanotechnology*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 79–89. (In Russ.) DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-2-79-89

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, проведенные в этой работе, следует отнести к биоинформатике, как совокупности методов и подходов, включающих в себя, в частности, исследование стратегий, соответствующих вычислительных методологий, а также общее управление информационной сложности биологических систем [2]. При этом биологические системы – это объ-

екты различной сложности, имеющие несколько уровней структурно-функциональной организации и представляющие собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов. Одна из наиболее полных и интересных классификаций биологических систем по уровням сложности предложена известным социологом Кеннетом Боулдингом. Среди наиболее сложных он указал людей и их социальные организации.

Заимствование иностранных слов в устной речи, по мнению авторов, имеет первостепенное значение для раскрытия характера исторического взаимодействия народов. Во введении к [7] сказано: «Русский язык постоянно обогащается за счет иноязычных заимствований. В разные исторические периоды влияние определенных иностранных языков на русский усиливалось. Это не случайно и объясняется тем, что больше всего новых слов приходит из языка того народа, с которым происходят самые активные контакты – экономические, культурные, политические. Таким образом, заимствованная лексика русского языка вполне объективно отражает историю России в целом.» Однако в современном языкознании принято больше внимания уделять письменным источникам, в изобилии появившимся в Москве начиная с XVII века и позже в Санкт-Петербурге. Так, например, в.н.с. отдела лингвистического источника Института русского языка имени В.В. Виноградова РАН В.Г. Демьянов в [1: 4], пишет: «Преимущество оригиналов перед историческими словарями представляется самоочевидным». Такая постановка приводит ее автора к изучению лишь некоторых конкретных слов. Кроме того, среди лингвистов принято не доверять словарю В. Даля. Однако ни в каком другом словаре не зафиксированы слова, находящиеся в обиходе русской глубинки в XVIII в. Исключая словарь В. Даля из научного оборота, мы фактически лишаемся возможности изучать устную речь, сформировавшуюся к первой половине XIX века в густонаселенных в этот период Новгородской, Тверской, Смоленской, Владимирской, Тамбовской и других областях центральной России.

Согласно известной работе Реформатского [8: 329], относительно родственного характера языков, «...полное звуковое совпадение форм слов разных языков ничего показать и доказать не может». В подтверждение этого тезиса он приводит слово «bad» в английском и персидском, называя это совпадение «чистой игрой природы». Наш статистический анализ покажет, что слова, состоящие из трех и менее звуковых единиц (фонем) могут совпадать в разных языках случайно. Однако случайное совпадение одновременно фонетически и по смыслу уже очень маловероятно, а для слов из большего, чем пять фонем одно только фонетическое случайное совпадение становится очень маловероятным. «Совпадение слов в разных языках при том же или подобном звучании и значении ничего доказать не может (относительно родства языков, то есть их происхождения от одного праязыка (прим. автора)), так как, во-первых, это может быть следствием заимствования или результатом случайного совпадения...» [Там же: 327]. Мы понимаем эту мысль так: носители одного языка, попав в разные места проживания, довольно быстро трансформируют фонетические образы своих слов. Этот эффект хорошо изучен на примере романских языков (см., например, «линия Специя-Ремини»). Поэтому фонетические совпадения слов говорят скорее об относительно недавнем заимствовании, а не о древнем родстве. В нашей работе мы докажем, что фонетически совпадающие и совпадающие по смыслу слова из четырех и более фонем случайно совпадать не могут (для слов из двух и трех фонем это также маловероятно), а значит являются результатом заимствования, а именно совместного использования носителями разных языков при ведении совместной деятельности. Наиболее естественный

механизм заимствования, как нам кажется, это когда одно и то же слово или фраза произносятся в одной и той же ситуации и тем самым возникает связь этой ситуации с этим словом или фразой, которые становятся в дальнейшем обозначением этой ситуации для иноязычных свидетелей. В качестве контраргумента к такому механизму заимствования часто приводят фонетически совпадающие, но совершенно разные по смыслу слова из разных языков. Однако известные нам такие примеры имеют не более трех фонем и, как будет показано в данной статье, их фонетическое совпадение это достаточно распространенный случай, а вот вероятность случайного совпадения слов одновременно по звучанию и по смыслу чрезвычайно мала. Поэтому такие слова описывают реальное взаимодействие людей, носителей разных языков. Дополнительные возможности в этом исследовании могли бы дать законы преобразования звуковых форм (например, [Там же: 331]).

С другой стороны, заимствованными, по нашему мнению, могут быть не только слова, но и фразы и даже небольшие тексты. Мы увидим в дальнейшем, что для них вероятность случайно быть последовательностью слов другого алфавита очень мала и экспоненциально убывает относительно длины своего фонетического выражения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Итак, возьмем за основу два языка: русский и английский, а также русско-английский словарь под редакцией Апресяна [3], содержащий более 250 тыс. слов, словарь иностранных слов современного русского языка Т.В. Егоровой и толковый словарь В. Даля.

В своих оценках мы будем использовать теорему о парадоксе дней рождения, которая гласит, что в группе из 23 и более человек с вероятностью, примерно равной 0,5, найдутся два человека с общим днем рождения. Более общая формулировка выглядит так: При случайном выборе с возвращением из массива большой мощности N подмножества размера $n = \sqrt{N}$ вероятность $P(n)$ появления двух одинаковых элементов в этом подмножестве примерно равна 0,4 вне зависимости от N .

Доказательство этого факта в несколько упрощенном виде выглядит так. При n , значительно меньших N , посчитаем вероятность того, что второй выбранный элемент не совпадает с первым выбранным элементом, третий выбранный элемент не совпадает с первыми двумя и так далее, а потом вычтем получившуюся вероятность из единицы. Получим

$$P(n) = 1 - \left(1 - \frac{1}{N}\right) \left(1 - \frac{2}{N}\right) \dots \left(1 - \frac{n-1}{N}\right).$$

Раскрывая скобки и сокращая единицу, получим сумму вычитаемых каждой скобки минус сумму их попарных произведений, плюс сумму произведений по 3 и т.д. При этом каждая следующая сумма получается из предыдущей умножением ее слагаемых, которые, в свою очередь, являются произведениями, на сумму некоторых вычитаемых, не вошедших в эти произведения. Такие суммы при $n \leq \sqrt{2N}$ будут меньше единицы. Поэтому получающийся знакопеременный ряд по степеням N будет иметь монотонно

убывающие члены. Продолжая равенство при достаточно больших N , получим оценку снизу, отбрасывая все члены кроме первых двух:

$$P(n) = \frac{1+2+\dots+(n-1)}{N} - \dots \geq \frac{1+2+\dots+(n-1)}{N} - \frac{1\left(\frac{n(n-1)}{2}-1\right)+2\left(\frac{n(n-1)}{2}-(2+1)\right)+\dots+(n-1)\left(\frac{n(n-1)}{2}-((n-1)+\dots+1)\right)}{N^2} =$$

$$= \frac{n(n-1)}{2N} - \frac{\frac{n(n-1)}{2} \frac{n(n-1)}{2}}{N^2} + \frac{1+2(2+1)+3(3+2+1)+\dots+(n-1)((n-1)+\dots+1)}{N^2} \geq \frac{n(n-1)}{2N} - \left(\frac{n(n-1)}{2N}\right)^2 + \frac{\sum_1^{n-1} i^2 \frac{i+1}{2}}{N^2} \geq$$

$$\geq \frac{n(n-1)}{2N} - \left(\frac{n(n-1)}{2N}\right)^2 + \frac{\int_0^{n-1} (t^3+t^2) dt}{2N^2} = \frac{n(n-1)}{2N} - \left(\frac{n(n-1)}{2N}\right)^2 + \frac{(n-1)^4}{8N^2} + \frac{(n-1)^3}{6N^2} \geq \frac{3}{8} \quad (n(n-1) \approx N).$$

Более точный анализ показывает, что эта оценка приближается к 0,4. Для простоты дальнейших рассуждений так и будем считать.

Для анализа нам нужен будет несколько иной результат. Пусть $Q(n)$ – вероятность того, что при случайном выборе из массива большой мощности N двух подмножеств, состоящих из n различных элементов (одного за другим с возвращением), между ними будет нетривиальное пересечение. Тогда, очевидно, получим, что

$$Q(n) = 1 - \left(1 - \frac{n}{N}\right)^n > P(n).$$

Поэтому, если $Q(n) = P(m)$, то $n < m$, так как эти функции возрастают. Таким образом, вероятность, близкую к 0,4, мы получим на меньших, чем \sqrt{N} , значениях n . Этим мы будем в дальнейшем пользоваться. Конечно, с помощью не сложной математики легко показать, что функция $Q(n)$ при $n \approx \sqrt{N}$ и достаточно больших N , будет близка к

$$1 - \frac{1}{e},$$

где

$$e = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{m}\right)^m = 2,718\dots$$

Но здесь мы намеренно все упрощаем, чтобы расширить круг потенциальных читателей. В дальнейшем мы оценим среднюю мощность пересечения двух множеств мощности $n > \sqrt{N}$, взяв за основу оценку $Q(\sqrt{N}) \approx 0,4$. Для этого мы разделим множества мощности n на подмножества мощности \sqrt{N} и воспользуемся тем, что среднее значение суммы случайных величин равно сумме средних значений.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Перейдем теперь к анализу вероятности случайного совпадения слов в различных языках. Возьмем за основу англо-русский словарь под редакцией акад. Апресяна [3]. В нем около 250 000 слов. Сначала проанализируем, какую долю всех слов составляют слова из одной, двух, трех, и т.д. фонем. Слов из одной фонемы столько же, сколько самих фонем, т.е. 26. (В данной статье мы огрубляем лингвистическое понятие фонемы, объединяя твердые и мягкие. Это в первую очередь связано с тем, что мягкие фонемы практически отсутствуют в греческом и романских языках, о которых пойдет речь в этой статье.) Слов из двух фонем также всего около 700, то есть примерно 1/350 всех слов из [3]. Из трех фонем попадают уже существенно не все сочетания. Взяв наугад 200–300 слов подряд, получаем соответствующие частоты,

умножая их на 250 000, получаем, достаточно грубо, следующие цифры: из 3-х фонем около 250 000 / 27 ≈ 10 000 слов, из 4-х, и т.д. 8-и фонем около 250 000 / 7 ≈ 35 000 слов по каждой категории, из 9-и фонем около 250 000 / 8 ≈ 30 000 слов, из 10 фонем около 250 000 / 15 ≈ 17 000 слов, затем, примерно, по 250 000 / 63 ≈ 4000 слов соответственно из 11, 12, 13 фонем. Ну и совсем мало слов (статистически не значимо) из большего числа фонем. Для русского языка, примерно, то же самое.

Оценивая число слов из [3], совпадающих по смыслу (грубо говоря, определяющих одно и то же), получим в среднем грубо не более 25 слов (здесь нам важен только порядок этой величины). То есть вероятность совпадения по смыслу случайных английских слов из словаря Апресяна (250 000 слов) примерно равна 1/10 000 (то же и для русских слов).

Пусть это выглядит несколько грубо, но для простоты рассуждений мы будем считать, что в русском языке имеются те же фонемы, что и в английском или французском, или соответствующие им, в том же количестве 26. Для наших целей можно было бы взять и другое близкое число. Общий характер полученных оценок это бы не изменило. Рассмотрим сначала случай слов из четырех фонем. Общее число формальных сочетаний из четырех фонем равно 26⁴, а случайные множества из английского и русского языков, пересекающиеся с вероятностью 0,4, должны состоять из $\sqrt{26^4} \approx 700$ различных слов. Для оценки среднего числа совпадений четырехфонемных слов разделим их в каждом языке на 35 000 / 700 ≈ 50 подсовокупностей в каждом языке. Среднее число пересечений двух совокупностей из разных языков примерно равно 0,4. Поэтому одна подсовокупность пересекается с 50-ю подсовокупностями другого языка в среднем по 50 · 0,4 = 20 словам, а всего пересечений по всем четырехфонемным словам 20 · 50 = 1000. Для каждого из этих слов вероятность случайного совпадения его по смыслу в английском и в русском языках мы оценили как 1/10 000. То есть в среднем на 10 000 слов одно совпадет по смыслу случайно. Таким образом, среди четырехфонемных слов одно такое слово найдется с вероятностью 1/10.

Для слов, состоящих из трех фонем, последовательно получим

$$\sqrt{26^3} \approx 130; \quad \frac{10\,000}{130} \approx 77; \quad 77 \cdot 0,4 \approx 31; \quad 77 \cdot 31 \approx 2400.$$

То есть 2400 совпадающих из общего числа в 10 000 слов. Поэтому каждое трехфонемное русское слово может встречаться в английском языке с вероятностью 2400/10 000 ≈ 1/4. Аналогично предыдущему, вероятность наличия случайного трехфонемного слова в английском и в русском языках, совпадающего еще и по смыслу, также равна 1/4. Таким образом, трехфонемные слова могут довольно часто встречаться

одновременно в двух языках без совпадения по смыслу, а вот вероятность того, что найдется трехфонемное слово, совпадающее по смыслу в обоих языках, равна 1/4.

Для двухфонемных слов аналогично

$$\sqrt{26^2} = 26; \quad \frac{26^2}{26} = 26; \quad 26 \cdot 0,4 \approx 10; \quad 26 \cdot 10 \approx 260.$$

То есть примерно 260 совпадающих из примерно 700 общих слов. Поэтому каждое двухфонемное русское слово может встречаться в английском языке с вероятностью $260/700 \approx 1/3$. То есть снова двухфонемные слова могут довольно часто встречаться одновременно в двух языках без совпадения по смыслу, а вот вероятность наличия случайного двухфонемного слова в английском и в русском языках, совпадающего еще и по смыслу, меньше, ввиду малого количества двухфонемных слов, и примерно равна $260/10\,000 \approx 1/40$.

Аналогично для слов, состоящих из пяти фонем, последовательно получим $\sqrt{26^5} \approx 3400$, $35\,000/3400 \approx 10$, а всего пересечений по всем пятифонемным словам $4 \cdot 10 = 40$. Умножая на $1/10\,000$, получим $1/250$. То есть практически нереализуемая вероятность. Аналогично для шестифонемных в среднем возможно примерно 1,5 общих слова, а для слов с большим числом фонем такое совпадение вообще маловероятно. То есть слова, содержащие 6 и более фонем можно считать заимствованными, даже если они не совпадают по смыслу.

В качестве примера рассмотрим слово «мать» (божья). Здесь 5 фонем также как в латинском слове «mater». Отсюда же происходит и древнее русское слово «матерний», означающее «относящийся к матери» [4]. Поскольку случайность мы отвергли, то, согласно приведенному выше постулату Реформатского, это слово является заимствованием. Причем в русском языке существовало и существует сейчас слово «родительница» с корнем «род», как у многих других древнеславянских слов, обозначающих родственников [6] (родительник, родим, родина, родин, сродник, родияк и т.д.). При этом мать, впрочем также как сестра и брат(р) [6], могут быть не родными, чего не может быть с родительницей, родиной, родимом соответственно. То есть новое название привнесло с собой и новые характеристики обозначаемого, в большей степени соответствующие новым историческим реалиям. Отметим, что слова брат(р), сестра, это заимствования не из латыни, а именно из английского языка. (В этимологическом словаре Макса Фасмера [9] для такой фонетики имеются еще варианты: фризский (Нидерланды) *bratr*, др. прусский *swestro*. Территориально это земли, примыкающие к полуострову Шлезингер, где до VI в. проживали англ и саксы.)

А является ли для нас создание семьи носителями русского и английского языка чем-то «из ряда вон выходящим»? Нет, не является.

Теперь рассмотрим фразу, состоящую из n фонем. Это может быть устойчивое выражение или стихотворная форма (считалочка, песенка и т.п.). Оценим вероятность того, что эта фраза, существующая в одном языке, случайно раскладывается в некоторую фразу в другом языке (без связи по смыслу между фразами в разных языках). Это произведение вероятностей того, что на каждом шаге разложения мы сможем взять столько начальных фонем, чтобы соответствующее слово принадлежало другому языку. Вероятность появления очередного слова по формуле полной вероятности есть сумма по i произведений частоты появления i -фонемных слов

в языке перевода на вероятность того, что случайное i -фонемное слово лежит в этом языке:

$$\frac{1}{350} \frac{26^2}{26^2} + \frac{1}{27} \frac{10000}{26^3} + \frac{1}{7} \cdot 35\,000 \cdot \left(\frac{1}{26^4} + \frac{1}{26^5} + \frac{1}{26^6} + \frac{1}{26^7} + \frac{1}{26^8} \right) +$$

$$+ \frac{1}{7} \cdot 30\,000 \cdot \frac{1}{26^9} + \frac{1}{15} \cdot 17\,000 \cdot \frac{1}{26^{10}} +$$

$$+ \frac{1}{63} \cdot 4000 \cdot \left(\frac{1}{26^{11}} + \frac{1}{26^{12}} + \frac{1}{26^{13}} \right) \approx \frac{1}{45} + \frac{5000}{26^4} \approx \frac{1}{30}.$$

Получается $1/30^k$, где k – количество слов. Если, более грубо, считать, что в основном все осмысленные слова имеют от четырех до восьми фонем, то получим примерно $35\,000/26^4 \approx 0,07$ или $0,07^k$ для текста из k слов. Для очень коротких фраз, например, из двух слов, указанная вероятность будет равна вероятности того, что случайное слово окажется среди тех, которые в данном языке могут завершить осмысленную фразу. Например, для слова «шерамы(жник)», считая случайным совпадение первого слова «шер» (здесь другого начала во французском языке нет), получение осмысленной фразы «cher ami» случайно возможно только с вероятностью, примерно равной отношению числа трехфонемных слов, которые могут закончить осмысленную фразу, начинающуюся со слова «cher», к числу всех трехфонемных слов. Сказать точно не беремся, но думаем, что это небольшая величина.

Поскольку средняя длина слова равна

$$2 \frac{1}{350} + 3 \frac{1}{27} + (4+5+6+7+8) \frac{1}{7} +$$

$$+ 9 \frac{1}{8} + 10 \frac{1}{15} + (11+12+13) \frac{1}{63} \approx 7,$$

мы получаем окончательную оценку вероятности случайного разложения длинной фразы, состоящей из n фонем в одном языке, в осмысленную фразу из другого языка в виде

$$\frac{1}{30^{n/7}} \approx \left(\frac{3}{5} \right)^n.$$

Теперь применим полученные результаты на практике. Во избежание тенденциозности подбора слов будем их брать подряд по алфавиту. Возьмем «Словарь иностранных слов современного русского языка» Т.В. Егоровой [7], сравним с переведенным на современный язык толковым словарем В. Даля [4] и выпишем их общие слова, случайное совпадение которых практически невероятно. Выделив слова, заимствованные из фиксированного языка, мы увидим картину взаимодействия народов-носителей этого языка с русским народом в период до написания В. Далем его словаря (1819–1868). Отсортируем слова в соответствии с древнейшим языком заимствования по [7]. В словаре Т.В. Егоровой указана некоторая траектория заимствования, то есть утверждается, что общее слово заимствовано скажем не из Латыни, а через немецкий язык. Не всегда понятно, почему автором было принято такое решение. Поскольку целью данной статьи является изучение заимствованных слов, то нам достаточно того, что это слово не наследуется из общего праязыка. И указание на общее направление заимствования. Для более детального уточнения народа, от которого произошло заимствование, надо иметь фонетический образ слова в русском языке и языке заимствования на момент этого заимствования, то есть с периодом по времени не более 500 лет, чего на данный момент нет. Ниже приведены все слова, полученные указанным сравнением словарей.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился с общедоступными электронными версиями словарей [4] и [7].

Текст словарей был размечен в полуавтоматическом режиме при помощи текстового редактора в формат XML. Были размечены словарные статьи, внутри статей основные термины и упоминания языков заимствования.

С помощью программы на языке Perl находились паросочетания терминов, присутствующих одновременно в обоих словарях (при сравнении терминов удалялись знаки ударения). В файл протокола записывались найденные паросочетания, выдержки из текста словарных статей для каждого из словарей и списки языков заимствования упомянутых в статьях.

Вычисления производились на персональном компьютере с процессором Intel® Core™ i9-9900K @3,60 ГГц, ОЗУ 32 ГиБ под управлением операционной системы Linux openSUSE Leap 15.1. Время работы программы составило около 55 минут.

К сожалению, разметка терминов в словаре [4] получилась неполной. Структура словарных статей в данном словаре предполагает присутствие в статье, помимо основного термина, других родственных терминов, поиск которых потребовал бы ручного вмешательства. Поэтому мы ограничились лишь разметкой основных терминов, являющихся заголовками статей.

На следующем этапе полученный отчет обрабатывался вручную. Были удалены паросочетания терминов, имеющих одинаковую запись, но отличающихся по значению. Для оставшихся паросочетаний определялся язык заимствования. Определение языка производилось исключительно на основании данных из словаря [7], при этом выбирался самый древний язык из цепочки заимствования.

При интерпретации результатов следует принять во внимание, что в словаре [7] явно недостаточно представлены заимствования из тюркских и других восточных языков.

Сгруппировав слова в соответствии с языками заимствования, получим следующий список:

Латинский язык (711): АБЕРРА́ЦИЯ, АБОРИГЭ́Н, АБРАКАДА́БРА, АБРИКО́С, АБСТРА́КТНЫЙ, А́ВГУСТ, А́ВТОР, АГЭ́НТ, АГИТА́ЦИЯ, АГРЕГА́Т, АДВОКА́Т, АДЕ́ПТ, АДМИНИСТРА́ЦИЯ, АКВАМАРИ́Н, АКТ, АКЦЭ́НТ, АКЦИ́З, АЛТА́РЬ, АЛЬБИНО́С, АЛЬТ, АЛЮМИ́НИЙ, АМАЛЬГА́МА, АМБИ́ЦИЯ, АМПЛИФИКА́ЦИЯ, АМПУТА́ЦИЯ, АМУНИ́ЦИЯ, АМУ́РЫ, АНГИ́НА, АПЕЛЛИ́РОВАТЬ, АПЕЛЛЯ́ЦИЯ, АПОФЕО́З, АППАРА́Т, АПРИО́РИ, АРБИ́ТР, АРГУМЕН́Т, АРЭ́НА, АРЭ́НДА, А́РКА, А́РМИЯ, АРТИ́СТ, АСПЭ́КТ, АССИСТЭ́НТ, АССОЦИА́ЦИЯ, АТРИБУ́Т, АТТЕСТА́Т, АУДИ́ТОР, АУКЦИО́Н, АУСКУЛЬТА́ЦИЯ, АФФЕКТА́ЦИЯ, БАЗА́ЛЬТ, БАКАЛА́ВР, БАЛДАХИ́Н, БАЛЭ́Т, БАЛЛА́ДА, БА́РЖА, БА́РКАС, БЕНЗИ́Н, БЕРДЫ́Ш, БИНО́КЛЬ, БИНО́М, БО́А, БО́Р, БРЮ́КИ, БУ́ЛЛА, БУ́РСА, БЮЛЛЕТЭ́НЬ, ВАКА́НСИЯ, ВАКА́ЦИЯ, ВАЛЕ́РИА́НА, ВАНИ́ЛЬ, ВАССА́Л, ВЕНТИЛЯ́ТОР, ВЕРДИ́КТ, ВЕРСИФИКА́ЦИЯ, ВЕРТИКА́ЛЬ, ВЕТЕРА́Н, ВЕТЕРИНА́РИЯ, ВИБРА́ЦИЯ, ВИКА́РИЙ, ВИРТУО́З, ВУА́ЛЬ, ВУЛКА́Н, ВУЛЬГА́РНЫЙ, ГАЛЛЮЦИНА́ЦИЯ, ГЕНЕРА́Л, ГЕНЕРА́ЦИЯ, ГЭ́НИЙ, ГЕРА́ЛЬДИКА, ГЕРБА́РИЙ, ГЕРКУЛЭ́С, ГЕРО́ЛЬД, ГЛО́БУС, ГО́СПИТАЛЬ, ГРАВИТА́ЦИЯ, ГРАДА́ЦИЯ, ГРА́ДУС, ГРА́Н, ГРА́НАТА, ГРАНИ́Т, ГРА́ЦИЯ, ГРО́Т, ГУА́ШЬ, ДАНТИ́СТ, ДЭ́БЕТ, ДЕИ́ЗМ, ДЕКА́Н, ДЕКЛАРА́ЦИЯ, ДЕКОРА́ЦИЯ, ДЕКРЕ́Т, ДЕКСТРИ́Н, ДЕЛЕГА́ЦИЯ, ДЕМО́НСТРА́ЦИЯ, ДЕПО́, ДЕПУТА́Т, ДЕФЕКА́ЦИЯ, ДЖИ́Н, ДИВЭ́РСИЯ, ДИВИДЭ́НД, ДИЛИЖА́НС, ДИРЕ́КТОР, ДИ́СКА́НТ, ДИСЛОКА́ЦИЯ, ДИСПО́ЗИЦИЯ, ДИ́СПУТ, ДИССЕРТА́ЦИЯ, ДИССИДЭ́НТ,

ДИССОНА́НС, ДИСТА́НЦИЯ, ДИСЦИПЛИ́НА, ДИФФЕ́РЕНТ, ДО́КТОР, ДОКУМЕН́Т, ДОМИНА́НТА, ДОМИНО́, ДО́РТУА́Р, ДРАГУ́Н, ДУЭ́ЛЬ, ДУЭ́Т, ЗАЛП, ИГНОРИ́РОВАТЬ, ИЛЛЮ́ЗИЯ, ИМПЭ́РИЯ, ИМПОНИ́РОВАТЬ, ИМПРОВИ́ЗИРОВАТЬ, ИНВАЛИ́Д, ИНВЕНТА́РЬ, ИНВЕСТИ́ТУРА, ИНДИВИ́Д, ИНДИ́ГО, ИНДИ́КТ, ИНДУЛЬГЭ́НЦИЯ, ИНДУСТРИ́Я, ИНЭ́РЦИЯ, ИНЖЕНЭ́Р, ИНИЦИАТИ́ВА, ИНКО́ГНИТО, ИНКОРПОРИ́РОВАТЬ, ИНКРУСТА́ЦИЯ, ИНСИНУА́ЦИЯ, ИНСПЭ́КТОР, ИНСТА́НЦИЯ, ИНСТИ́НКТ, ИНСТИТУ́Т, ИНСТРУ́КЦИЯ, ИНСТРУМЕН́Т, ИНТЕГРА́Л, ИНТЕЛЛЕКТУА́ЛЬНЫЙ, ИНТЕНДА́НТ, ИНТЕНСИ́ВНЫЙ, ИНТЕРВА́Л, ИНТЕРЭ́С, ИНТЕРМЕ́ДИЯ, ИНТЕРПОЛИ́РОВАТЬ, ИНТОНА́ЦИЯ, ИНТРИ́ГА, ИНТРОДУ́КЦИЯ, ИНФУЗО́РИЯ, ИРРАЦИОНА́ЛЬНЫЙ, ИРРЕГУЛЯ́РНЫЙ, ИЮ́ЛЬ, ИЮ́НЬ, КА́БЕЛЬ, КАДРИ́ЛЬ, КА́ЗУС, КА́КТУС, КАЛЕНДА́РЬ, КА́ЛЬЦИЙ, КАМЕ́ЛИЯ, КА́МЕРА, КА́МФОРА, КАНАПЭ́, КАНДЕЛЯ́БР, КАНДИДА́Т, КАНИФА́С, КА́НЦЛЕР, КАПЭ́ЛЛА, КАПИТА́Л, КАПИТА́Н, КАПИТЕ́ЛЬ, КАПИ́ТУЛ, КАПЮШО́Н, КАРАМЕ́ЛЬ, КАРБОНА́Т, КАРБУ́НКУЛ, КАРДИНА́Л, КА́РЦЕР, КА́ССА, КА́СТА, КАСТЕЛЯ́Н, КВАДРА́Т, КВА́РТА, КВА́РТИРА, КВИ́НТА, КЭ́САРЬ, КЛАСС, КЛЕВРЕ́Т, КЛИЭ́НТ, КОАЛИ́ЦИЯ, КОКЛЮ́Ш, КО́ЛЕР, КОЛЭ́Т, КОЛЛЕ́ГИЯ, КОЛЛЕ́КЦИЯ, КОЛО́НИЯ, КОЛОРИ́Т, КОМБИНА́ЦИЯ, КОМЕНДА́НТ, КОМИССА́Р, КОМИТЕ́Т, КОМУНИКА́ЦИЯ, КОМПА́КТНЫЙ, КОМПА́НИЯ, КО́МПАС, КОМПЕНСА́ТОР, КОМПЛЕ́КТ, КОМФОР́Т, КОНВЭ́НЦИЯ, КОНВО́Й, КОНВУ́ЛЬСИЯ, КОНГЛОМЕРА́Т, КОНГРЕ́СС, КОНДИ́ЦИЯ, КОНДУ́КТОР, КОНКЛА́В, КОНКОРДА́Т, КОНКУ́РС, КОНСИСТО́РИЯ, КОНСПЭ́КТ, КОНСТИТУ́ЦИЯ, КОНСТРУ́КЦИЯ, КОНТИНЭ́НТ, КОНТИНЭ́НТ, КОНТРА́КТ, КОНТРА́СТ, КОНТРИБУ́ЦИЯ, КОНТУ́ЗИЯ, КОНФЕДЕРА́ЦИЯ, КОНФЕ́РЕНЦИЯ, КОНФИГУРА́ЦИЯ, КОНФУ́З, КОНЦЭ́ПЦИЯ, КОНЦЭ́РТ, КОНЦЭ́ССИЯ, КООРДИНА́ТА, КО́ПИЯ, КОРО́НА, КОРПИ́Я, КОРПУ́С, КОРРЕСПОНДЕ́НТ, КОРРЕСПОНДЕ́НЦИЯ, КОСЕ́КАНС, КОТА́НГЕНС, КОЭФФИЦИЭ́НТ, КРЕА́ТУРА, КРЕ́ДИТ, КРЕДИ́Т, КРЕП, КРИНОЛИ́Н, КУЛЬМИНА́ЦИЯ, КУЛЬТУ́РА, КУ́ПОЛ, КУРА́ТОР, КУРС, КУРЬЭ́Р, ЛАБОРАТО́РИЯ, ЛАВА́НДА, ЛАВИ́НА, ЛАВР, ЛАГУ́НА, ЛАКТО́МЕТР, ЛАНЦЭ́Т, ЛА́СТИК, ЛАТУ́К, ЛАФЭ́Т, ЛА́ЦКАН, ЛЕГА́ЛЬНЫЙ, ЛЕГА́Т, ЛЕГЭ́НДА, ЛЕЙТЕНА́НТ, ЛЭ́КТОР, ЛЕОПАР́Д, ЛИБЕРА́Л, ЛИБРА́ЦИЯ, ЛИВРЕ́Я, ЛИ́ГА, ЛИКВИДА́ЦИЯ, ЛИКЭ́Р, ЛИНГВИ́СТИКА, ЛИ́НИЯ, ЛОКОМОБИ́ЛЬ, ЛОКОМОТИ́В, ЛЯ́ПИС, МАГИ́СТР, МАГНА́Т, МАГНЕ́ЗИЯ, МА́ГНИЙ, МАЖО́Р, МАЙО́Р, МАКА́КА, МА́КСИМУМ, МАКУЛА́ТУРА, МА́ЛЬВА, МА́НДОЛИ́НА, МА́НЭВР, МАНИПУЛЯ́ЦИЯ, МАНИФЭ́СТ, МА́НТИЯ, МА́НУФАКТУ́РА, МАРС, МА́ССА, МАТ, МАТЕ́РИЯ, МА́ТРИЦА, МАШИ́НА, МЕДА́ЛЬ, МЕ́ДИУМ, МЕДИЦИ́НА, МЕНСТРУА́ЦИЯ, МЭ́РГЕЛЬ, МЕРИДИА́Н, МЕРКУ́РИЙ, МЕССИ́Я, МЕТИ́С, МИКСТУ́РА, МИЛИ́ЦИЯ, МИЛЛИО́Н, МИ́ЛЯ, МИНЕРА́Л, МИ́НИМУМ, МИНИ́СТР, МИНО́Р, МИ́НУС, МИ́НУТА, МИ́ССИЯ, МО́ДА, МОЗА́ИКА, МОЛ, МОЛЛЮ́СК, МО́ЛЬ, МОМЕН́Т, МОНИТО́Р, МО́НУМЕН́Т, МОРА́ЛЬ, МОСКИ́Т, МОТИ́В, МОЦИО́Н, МУЛЬТИПЛИКА́ТОР, МУ́НДИР, МУРЕ́НА, МУСКА́Т, МУ́СКУЛ, МУШКЭ́Т, НАВИГА́ЦИЯ, НАТУ́РА, НА́ЦИЯ, НЕГАТИ́ВНЫЙ, НЕГОЦИА́НТ, НЕГР, НЕЙТРА́ЛЬНЫЙ, НЕПТУ́Н, НЕ́РВ, НИГИЛИ́ЗМ, НИО́БИЙ, НИ́ША, НО́ЛЬ, НОМЕНКЛАТУ́РА, НО́МЕР, НОМИНА́ЛЬНЫЙ, НО́НА, НОРМА, НО́ТА, НОЯ́БРЬ, НУ́ГА, НУ́ЛЬ, НУМЕРА́ЦИЯ, НУМИЗМА́ТИКА, НУТА́ЦИЯ, ОБЛИГА́ЦИЯ, ОБСЕРВА́ЦИЯ, ОБСИДИА́Н, ОБСКУРА́НТ, ОБСТРУ́КЦИЯ, ОБЪЭ́КТ, ОВА́Л, ОВА́ЦИЯ, ОКА́ЗИЯ, ОКТА́ВА, ОЛИ́ВА, ОПА́Л, ОПЕРА, ОПЕРА́ЦИЯ, ОРА́КУЛ, ОРБИ́ТА, ОРДА́ЛИЯ, О́РДЕН, ОРИГИНА́Л, ОРНА́МЕНТ, ПАВИЛЬО́Н, ПАВЛИ́Н, ПАЛАДИ́Н, ПАЛА́ТА, ПАЛИСА́Д, ПА́ЛЬМА, ПАЛЬТО́, ПАМФЛЭ́Т, ПАНЕ́ЛЬ, ПАНСИО́Н, ПАРАФИ́Н, ПАР́ТИЯ, ПА́ССИЯ, ПАСТИ́ЛА, ПА́СТОР, ПАТЭ́НТ, ПА́ТЕР, ПАТРО́Н, ПАЦИЭ́НТ, ПАШТЭ́Т, ПЕДА́ЛЬ, ПЭ́МЗА, ПЭ́НЯ, ПЕРЛ, ПЕРЛЮСТРА́ЦИЯ, ПЕРПЕНДИКУЛЯ́Р, ПЕРСПЕКТИ́ВА, ПЕРТУРБА́ЦИЯ, ПЕТИ́ЦИЯ, ПИЛИГРИ́М, ПИЛЮ́ЛЯ, ПИЛЯ́СТРА, ПИНГВИ́Н, ПЛАН, ПЛАНИМЕ́ТРИЯ, ПЛАНТА́ЦИЯ,

ПЛИС, ПЛОМБА, ПЛЮС, ПОЗИЦИЯ, ПОЛИТУРА, ПОМАДА, ПОМОЛОГИЯ, ПОНТОН, ПОРТ, ПОРТУЛАК, ПОРЦИЯ, ПОСТ, ПОТЕРНА, ПРЕЗИДЕНТ, ПРЕЛЮДИЯ, ПРЕМИЯ, ПРЕПАРАТ, ПРЕРОГАТИВА, ПРЕТЕНДЕНТ, ПРИВАТНЫЙ, ПРИВИЛЕГИЯ, ПРИЗ, ПРИМА, ПРИНЦ, ПРИНЦИП, ПРОВИАНТ, ПРОВИЗОР, ПРОГРЕСС, ПРОГРЕССИЯ, ПРОДУКТ, ПРОЕКТ, ПРОЗА, ПРОКЛАМАЦИЯ, ПРОКУРОР, ПРОЛЕТАРИЙ, ПРОПАГАНДА, ПРОПОРЦИЯ, ПРОСПЕКТ, ПРОТЕСТ, ПРОФАН, ПРОФИЛЬ, ПРОЦЕДУРА, ПРОЦЕНТ, ПРОЦЕСС, ПУБЛИКА, ПУЛЬС, ПУНКТ, ПУРИЗМ, РАДИУС, РАКА, РАСА, РЕАГЕНТ, РЕАЛЬНЫЙ, РЕБУС, РЕВЕРАНС, РЕВЕРС, РЕВОЛЮЦИЯ, РЕГАЛИЯ, РЕГЕНТ, РЕГЛАМЕНТ, РЕГУЛЯРНЫЙ, РЕДАКТОР, РЕДУТ, РЕЕСТР, РЕЗЕДА, РЕЗЕРВ, РЕЗИДЕНТ, РЕЗОЛЮЦИЯ, РЕЗОНАНС, РЕЗУЛЬТАТ, РЕКВИЗИЦИЯ, РЕКЛАМА, РЕКРЕАЦИЯ, РЕКТОР, РЕЛИГИЯ, РЕЛЯЦИЯ, РЕМИЗ, РЕНТА, РЕПЕРТУАР, РЕПУТАЦИЯ, РЕСКРИПТ, РЕСПУБЛИКА, РЕТОРТА, РЕФОРМАЦИЯ, РЕФРАКТОР, РЕЦЕПТ, РЕЦИДИВ, РЕЧИТАТИВ, РИДИКУЛЬ, РОЗА, РОЗМАРИН, РОЛЬ, РОТОНДА, РУБИН, РУБРИКА, РЯСА, САЛИВАЦИЯ, САТИРА, САТИСФАКЦИЯ, САТУРН, СЕАНС, СЕГМЕНТ, СЕЗОН, СЕКАНС, СЕКРЕТ, СЕКСТА, СЕКТА, СЕКУЛЯРИЗАЦИЯ, СЕКУНДА, СЕЛИТРА, СЕМЕСТР, СЕМИНАРИЯ, СЕНАТ, СЕНТЕНЦИЯ, СЕПТИМА, СЕРВИЗ, СЕРЕНАДА, СЕРЖАНТ, СЕРИЯ, СЕРПЕНТИН, СЕССИЯ, СИ, СИГНАЛ, СИТУАЦИЯ, СОЛИСТ, СОЛО, СОМНАБУЛИЗМ, СОНАТА, СОРТ, СОУС, СПЕКТАКЛЬ, СПЕКУЛЯЦИЯ, СПИРАЛЬ, СТАТУТ, СТАТУА, СТИЛЕТ, СТИПЕНДИЯ, СТРОП, СТРУКТУРА, СТУДЕНТ, СУБОРДИНАЦИЯ, СУБСИДИЯ, СУБСТАНЦИЯ, СУБЪЕКТ, СУЛЕМА, СУММА, СУРДИНА, ТАБЕЛЬ, ТАКСА, ТАКТ, ТАНГЕНС, ТЕКСТ, ТЕЛЕГРАФ, ТЕМП, ТЕМПЕРАМЕНТ, ТЕНДЕНЦИЯ, ТЕНОР, ТЕРМИН, ТЕРРИТОРИЯ, ТЕРРОРИЗМ, ТЕРЦИЯ, ТИГР, ТИНКТУРА, ТИТУЛ, ТОРТ, ТОСТ, ТРАКТАТ, ТРАНЗИТ, ТРАНСФЕРТ, ТРИАНГУЛЯЦИЯ, ТРИБУНА, ТРИО, ТУР, ТУРБИНА, УЗУРПАТОР, УЛЬТИМАТУМ, УЛЬТРАМАРИН, УМБРА, УНИВЕРСИТЕТ, УНИСОН, УНИЯ, УНЦИЯ, УРАН, УРНА, УТРИРОВАТЬ, ФАБРИКА, ФАВОРИТ, ФАКСИМИЛЕ, ФАКТОР, ФАЛЬШЬ, ФАМИЛИЯ, ФАНАТИЗМ, ФАТАЛИЗМ, ФАУНА, ФАШИНА, ФЕДЕРАЦИЯ, ФИАЛКА, ФИБРА, ФИГУРА, ФИЛЬТР, ФИНАЛ, ФИНАНСЫ, ФИСКАЛ, ФИСТУЛА, ФЛЕКСИЯ, ФЛОРА, ФОКУС, ФОЛИАНТ, ФОНД, ФОНТАН, ФОРТУНА, ФУНДАМЕНТ, ФУНКЦИЯ, ФУНТ, ФУРИЯ, ХАНДРА, ЦЕЗУРА, ЦЕЛЕСТИН, ЦЕМЕНТ, ЦЕНЗУРА, ЦЕРЕМОНИЯ, ЦЕСАРЬ, ЦИВИЛИЗАЦИЯ, ЦИКЛОРИЙ, ЦИНГА, ЦИРКУЛЬ, ЦИСТЕРНА, ЦИТИРОВАТЬ, ЦИТРА, ШАЛФЕЙ, ШЕВРОН, ШПАЦИЯ, ШТАТ, ШТАТИВ, ЭВОЛЮЦИЯ, ЭГОИЗМ, ЭКВАТОР, ЭКЗАЛЬТАЦИЯ, ЭКЗАМЕН, ЭКЗЕМПЛЯР, ЭКСКУРСИЯ, ЭКСПЕДИЦИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ЭКСПОНЕНТ, ЭКСПРОПРИАЦИЯ, ЭКСТЕРН, ЭКСТРАКТ, ЭКСЦЕНТРИЧНЫЙ, ЭЛЕКТОРАЛЬНЫЙ, ЭЛЕМЕНТ, ЭМИГРАНТ, ЭРА, ЭСКИЗ, ЭСКУЛАП, ЭТАЖ, ЮМОР, ЮРИСТ.

Греческий язык (544): АБАКА, АВТОГРАФ, АГАВА, АГАТ, АГИАСМА, АГОНИЯ, АГРОНОМИЯ, АД, АЗОТ, АКАДЕМИЯ, АКАЦИЯ, АКРОБАТ, АКРОСТИХ, АКЦИОМА, АКУСТИКА, АЛЛЕГОРИЯ, АЛЬФА, АМАЗОНКА, АМЕТИСТ, АММИАК, АМНИСТИЯ, АМФИБИЯ, АМФОНА, АНАГРАММА, АНАЛИЗ, АНАРХИЯ, АНАТОМИЯ, АНАФЕМА, АНАХОРЕТ, АНГЕЛ, АНГИОЛОГИЯ, АНДРОГИН, АНЕКДОТ, АНЕМИЯ, АНЕСТЕЗИЯ, АНИС, АНОМАЛИЯ, АНОНИМ, АНТАГОНИЗМ, АНТИДОТ, АНТИТЕЗА, АНТОЛОГИЯ, АНТРАЦИТ, АНТРОПОЛОГИЯ, АПАТИЯ, АПОГЕЙ, АПОКАЛИПСИС, АПТЕКА, АРИСТОКРАТИЯ, АРИФМЕТИКА, АРОМАТ, АРТЕРИЯ, АРХАИЗМ, АРХИПЕЛАГ, АРХИТЕКТУРА, АСБЕСТ, АСПИД, АСФАЛЬТ, АСФИКСИЯ, АТЕИЗМ, АТЛАС, АТЛЕТ, АТМОСФЕРА, АТОМ, АТОНИЯ, АТРОФИЯ, АФЕЛИЙ, АФОНИЯ, АХРОМАТИЧЕСКИЙ, БАЗА, БАЛЛИСТИКА, БАЛЬЗАМ, БАРИТОН, БАРОМЕТР, БАТОМЕТР, БЕРИЛЛ, БИБЛИЯ, БИГАМИЯ, БОМБА, БОРА, БОТАНИКА, БРОМ, БУБОН, ВАЙЯ, ВАКХАНАЛИЯ, ВАРВАР, ГАГАТ, ГАЗ, ГАЛУРГИЯ, ГАНГРЕНА, ГАРМОНИЯ,

ГАРПИЯ, ГАСТРОНОМ, ГЕКЗАМЕТР, ГЕЛИОМЕТР, ГЕМАТИТ, ГЕМИПЛЕГИЯ, ГЕНЕАЛОГИЯ, ГЕРМЕНЕВТИКА, ГЕРОЙ, ГИАЛИТ, ГИАЦИНТ, ГИГАНТ, ГИГИЕНА, ГИГРОМЕТР, ГИДРА, ГИЕНА, ГИМН, ГИМНАЗИЯ, ГИПЕРБОЛА, ГИПОТЕЗА, ГИПОПОТАМ, ГИПС, ГИТАРА, ГЛИЦЕРИН, ГОМЕОПАТИЯ, ГОНИОМЕТР, ГОНОРЕЯ, ГОРИЗОНТ, ГРАФА, ГРАФИТ, ГРИФ, ГУММИ, ДАКТИЛЬ, ДЕЛЬТА, ДЕМАГОГ, ДЕМОКРАТИЯ, ДЕМОН, ДЕНДРИТ, ДИАБАЗ, ДИАГНОСТИКА, ДИАГОНАЛЬ, ДИАГРАММА, ДИАЛЕКТИКА, ДИАМЕТР, ДИАПАЗОН, ДИАРЕЯ, ДИАТРИБА, ДИДАКТИКА, ДИЕЗ, ДИЕТА, ДИЗЕНТЕРИЯ, ДИНАМИКА, ДИНАСТИЯ, ДИОПТР, ДИОРАМА, ДИОРИТ, ДИПЛОМ, ДИСГАРМОНИЯ, ДОГМА, ДОДЕКАЭДР, ДРАКОН, ДРАМА, ЕВАНГЕЛИЕ, ЕВНУХ, ЕВХАРИСТИЯ, ЕПАРХИЯ, ЕПИСКОП, ЕПИТРАХИЛЬ, ЕРЕСЬ, ЗЕФИР, ЗОДИАК, ЗОНА, ИБИС, ИГУМЕН, ИДЕЯ, ИДИЛЛИЯ, ИДИОМА, ИДОЛ, ИЗУМРУД, ИПОКРИТ, ИПОСТАСЬ, ИПОТЕКА, ИПОХОНДРИЯ, ИРИДИЙ, ИРИС, ИРОНИЯ, ИССОП, ИСТЕРИКА, ИСТОРИЯ, ИХНЕВМОН, ИХТИОЛОГИЯ, ЙОД, КАДАСТР, КАДМИЙ, КАЛЕЙДОСКОП, КАЛЛИГРАФИЯ, КАЛОМЕЛЬ, КАЛОРИМЕТР, КАМИЛАВКА, КАМИН, КАНАТ, КАНИФОЛЬ, КАНОН, КАРАТ, КАРИАТИДА, КАРТЕЧЬ, КАТАЛЕПСИЯ, КАТАЛОГ, КАТАР, КАТАСТРОФА, КАТАФАЛК, КАТЕГОРИЯ, КАТЕТ, КАТЕТЕР, КАТЕХИЗИС, КАФЕДРА, КАШТАН, КЕФАЛЬ, КИМВАЛ, КЛИМАКС, КЛИМАТ, КЛИНИКА, КЛИР, КОМЕДИЯ, КОМЕТА, КОНХИОЛОГИЯ, КОРДА, КОРИФЕЙ, КОСМОС, КРАНИОЛОГИЯ, КРАТЕР, КРЕМ, КРИЗИС, КРИСТАЛЛ, КРИТИКА, КУБ, ЛАБИРИНТ, ЛАВРА, ЛАДАН, ЛАКОНИЗМ, ЛАКРИЦА, ЛАМПА, ЛЕВ, ЛЕВКОЙ, ЛЕМА, ЛЕПТА, ЛЕТАРГИЯ, ЛИМАН, ЛИМФА, ЛИТАВРА, ЛИТОГРАФИЯ, ЛИТУРГИЯ, ЛИЦЕЙ, ЛОГАРИФМ, ЛОГИКА, МАВЗОЛЕЙ, МАГИЯ, МАГНИТ, МАЛАХИТ, МАНИЯ, МАРАЗМ, МАТЕМАТИКА, МЕГЕРА, МЕДУЗА, МЕЛАНХОЛИЯ, МЕЛИССА, МЕЛОДИЯ, МЕНЬСК, МЕНТОР, МЕТАЛЛ, МЕТАМОРФОЗА, МЕТАФИЗИКА, МЕТАФОРА, МЕТЕОР, МЕТОД, МЕТОНИМИЯ, МЕТР, МЕХАНИКА, МИЗАНТРОП, МИКРОМЕТР, МИМИКА, МИНДАЛЬ, МИОЛОГИЯ, МИОПИЯ, МИРО, МИРРА, МИСТИКА, МИТРА, МИФ, МНЕМОНИКА, МОНАРХИЯ, МОНОГАМИЯ, МРАМОР, МУЗА, МУЗЫКА, НАРЦИСС, НАТРИЙ, НЕВРАЛГИЯ, НЕОФИТ, НЕФРИТ, НОМОКАНОН, ОАЗИС, ОБЕЛИСК, ОДА, ОДОНОЛОГИЯ, ОКЕАН, ОЛИГАРХИЯ, ОЛИФА, ОМЕГА, ОНИКС, ОНТОЛОГИЯ, ООЛИТ, ОПИЙ, ОПТИКА, ОРГАН, ОРГИЯ, ОРИОН, ОРКЕСТР, ОРНИТОЛОГИЯ, ОРОГРАФИЯ, ОРФОГРАФИЯ, ОСМИЙ, ОСТЕОЛОГИЯ, ОХРА, ПАЛИМПСЕСТ, ПАНАЦЕЯ, ПАНЕГИРИК, ПАНИКАДИЛО, ПАНИХИДА, ПАНОРАМА, ПАНТЕИЗМ, ПАНТЕРА, ПАНТОМИМА, ПАРАГРАФ, ПАРАДОКС, ПАРАЗИТ, ПАРАЛИЧ, ПАРАЛЛЕЛЬ, ПАРАФ, ПАРАФРАЗ, ПАРОДИЯ, ПАРОКСИЗМ, ПАТЕТИЧЕСКИЙ, ПАТОЛОГИЯ, ПАТРИАРХ, ПАТРИОТ, ПАУЗА, ПЕДАГОГИКА, ПЕРИМЕТР, ПЕРИОД, ПЕРИСТИЛЬ, ПЕРИФЕРИЯ, ПЕРИФРАЗА, ПИОН, ПИРАМИДА, ПИРАТ, ПИРОКСЕН, ПИРУЭТ, ПЛАНЕТА, ПЛАСТИКА, ПЛАТАН, ПЛАЦ, ПЛЕОНАЗМ, ПЛЕЯДЫ, ПЛИНТУС, ПОДАГРА, ПОЛЕМИКА, ПОЛИГАМИЯ, ПОЛИГОН, ПОЛИГРАФИЯ, ПОЛИНОМ, ПОЛИП, ПОЛИТЕИЗМ, ПОЛИТИКА, ПОЛИЦИЯ, ПОЛЮС, ПОРА, ПОРФИРА, ПОЭЗИЯ, ПРАКТИКА, ПРЕСВИТЕР, ПРИЗМА, ПРОБЛЕМА, ПРОГРАММА, ПРОЗЕЛИТ, ПРОЛОГ, ПРОЛОГ, ПРОПЕДЕВТИКА, ПРОСОДИЯ, ПРОТЕИН, ПРОТОКОЛ, ПРОТОТИП, ПСАЛОМ, ПСИХОЛОГИЯ, ПУРПУР, РАПСОДИЯ, РЕВМАТИЗМ, РЕЗИНА, РИЗА, РИТМ, РИТОРИКА, РИФМА, РОДИЙ, РОМБ, РУМБ, САЛАМАНДРА, САРКОФАГ, СЕЛЕН, СЕЛЬДЕРЕЙ, СЕМИОТИКА, СЕПИЯ, СЕРДОЛИК, СИБАРИТ, СИКОМОР, СИЛЛОГИЗМ, СИМВОЛ, СИММЕТРИЯ, СИМОНИЯ, СИМПАТИЯ, СИМПТОМ, СИМФОНИЯ, СИНАГОГА, СИНОНИМ, СИНТАКСИС, СИРЕНА, СИСТЕМА, СИФОН, СКЕЛЕТ, СКЕПТИЦИЗМ, СКИПЕТР, СОФИЗМ, СПАРЖА, СПОРА, СПОРАДИЧНЫЙ, СТАЛАГМИТ, СТАТИКА, СТЕАРИН, СТЕКА, СТЕНОГРАФИЯ, СТЕРЕОМЕТРИЯ, СТЕТОСКОП, СТИЛЬ, СТИРАКС,

СТИХ, СТИХАРЬ, СТИХИЯ, СТРАТЕГИЯ, СТРИХНИН, СТРОФА, СФЕРА, СФИНКС, СХИЗМА, СХИМА, СХОЛАСТИКА, СЦЕНА, ТАКТИКА, ТАНТАЛ, ТАРТАР, ТЕЗИС, ТЕЛЕСКОП, ТЕМА, ТЕОКРАТИЯ, ТЕОЛОГИЯ, ТЕОРИЯ, ТЕРАТОЛОГИЯ, ТЕРЕМ, ТЕРМОМЕТР, ТЕРПЕНТИН, ТЕТРАДЬ, ТЕХНИКА, ТИАРА, ТИП, ТИРАН, ТОПАЗ, ТОПОГРАФИЯ, ТРАГЕДИЯ, ТРАДИЦИЯ, ТРЕМОЛИТ, ТРИГОНОМЕТРИЯ, ТРИУМФ, ТРОП, ТУМБА, УКСУС, УРИНА, УТОПИЯ, ФАЗАН, ФАЛАНГА, ФАНТАЗИЯ, ФАРМАКОЛОГИЯ, ФАСОЛЬ, ФЕНИКС, ФЕНОМЕН, ФИЗИКА, ФИЛАНТРОПИЯ, ФИЛОЛОГИЯ, ФИЛОСОФИЯ, ФИНИК, ФОТОГРАФИЯ, ФРАЗА, ФТОР, ХАЛЦЕДОН, ХАМЕЛЕОН, ХАОС, ХАРАКТЕР, ХАРТИЯ, ХЕРУВИМ, ХИМЕРА, ХИМИЯ, ХИРОМАНТИЯ, ХЛОР, ХОЛЕРА, ХОР, ХОРАЛ, ХОРДА, ХОРЕЙ, ХОРЫ, ХРЕСТОМАТИЯ, ХРИЗОЛИТ, ХРОМ, ХРОНИКА, ХРУСТАЛЬ, ЦЕНТР, ЦИКЛ, ЦИЛИНДР, ЦИРЮЛЬНИК, ШАЛАНДА, ЭВДИОМЕТР, ЭКЛИПТИКА, ЭЛЕГИЯ, ЭЛИКСИР, ЭМБЛЕМА, ЭМПИРИЗМ, ЭНЕРГИЯ, ЭНТОМОЛОГИЯ, ЭНТУЗИАЗМ, ЭНЦИКЛОПЕДИЯ, ЭПИГРАММА, ЭПИДЕМИЯ, ЭПИЗОД, ЭПИСТОЛА, ЭПИЧЕСКИЙ, ЭПОС, ЭПОХА, ЭРМИТАЖ, ЭСТЕТИКА, ЭТИКЕТ, ЭТИМОЛОГИЯ, ЭТНОГРАФИЯ, ЭФИР, ЭХО, ЯМБ.

Французский язык (315): АБАЖУР, АБОРДАЖ, АВАНГАРД, АКССУАР, АКУШЕР, АЛАРМИСТ, АЛЛЕЯ, АЛЛЮР, АЛЬБАТРОС, АМБРАЗУРА, АМОТИЗАЦИЯ, АМПЛУА, АНГАЖИРОВАТЬ, АНСАМБЛЬ, АНТРАКТ, АНТРЕСОЛЬ, АНФИЛАДА, АПАРТАМЕНТЫ, АРБЕРГАРД, АССОРТИМЕНТ, АФЕРА, АФИША, АФРОНТ, БАГАЖ, БАДЬЯН, БАЗИЛИК, БАЙКА, БАК, БАЛАНС, БАЛЛ, БАНКЕТ, БАРЕЛЬЕФ, БАРЬЕР, БАСОН, БАССЕЙН, БАТАРЕЯ, БАТИСТ, БЕЗЕ, БЕЛЛЕТРИСТИКА, БЕНЕФИС, БЕНУАР, БИЛЛИОН, БИЛЛОН, БИРЖА, БИСКВИТ, БИСТР, БОКАЛ, БОНБОНЬЕРКА, БОНТОН, БОРДЮР, БОРТ, БРАВИЙ, БРАСЛЕТ, БРЕЛОК, БРЕТЕР, БРЕШЬ, БРОШЮРА, БУДУАР, БУКИНИСТ, БУРЖУАЗИЯ, БУТОН, БЮДЖЕТ, ВИНЕГРЕТ, ВИНЬЕТКА, ВИТРИНА, ВОДЕВИЛЬ, ВОЛАН, ВОЛОНТЕР, ГАВОТ, ГАЗЕЛЬ, ГАЗОН, ГАЛОП, ГАЛУН, ГАМАК, ГАММА, ГАРАНТИЯ, ГАРДЕМАРИН, ГАРНИЗОН, ГАРНИТУРА, ГИЛЬОТИНА, ГЛАЗЕТ, ГНУ, ГОБОЙ, ГОРЕЛЬЕФ, ГОРЖА, ГРАВИЙ, ГРАВИРОВАТЬ, ГРИПП, ГРИФ, ГУВЕРНЕР, ДЕБАРКАДЕР, ДЕБЮТ, ДЕЗЕРТИР, ДЕКОЛЬТЕ, ДЕМАРКАЦИЯ, ДЕПАРТАМЕНТ, ДЕПЕША, ДЕСАНТ, ДЕСЕРТ, ДЕТАЛЬ, ДИАМАНТ, ДОЛОМИТ, ДОРМЕЗ, ДУБЛЕТ, ЖАБО, ЖАНДАРМ, ЖАРГОН, ЖАСМИН, ЖЕЛАТИНА, ЖЕЛЕ, ЖЕСТ, ЖЕТОН, ЖИЛЕТ, ЖУИРОВАТЬ, ЖУРНАЛ, ЗАЛ, ЗЕБРА, ЗОНД, ИЗОЛИРОВАТЬ, ИНТИМНЫЙ, КАБИНЕТ, КАБОТАЖ, КАБРИОЛЕТ, КАВАЛЕР, КАДЕТ, КАЛАМБУР, КАМЛОТ, КАМПАНИЯ, КАМУФЛЕТ, КАНВА, КАНИТЕЛЬ, КАНОНАДА, КАПОТ, КАПРИЗ, КАПТЕНАРМУС, КАРАМБОЛЬ, КАРАНТИН, КАРЕ, КАРЬЕР, КАШНЕ, КАЮТА, КЕПИ, КЛАРНЕТ, КОКАРДА, КОКЕТКА, КОМПРЕСС, КОНСОЛЬ, КОНТРОЛЬ, КОНЬЯК, КОРНЕТ, КОРСЕТ, КОТЕРИЯ, КРОКИ, КУАФЮРА, КУЛИСА, КУПОН, КЮВЕТ, ЛАБРАДОР, ЛАМПАС, ЛЕВРЕТКА, ЛИАНА, ЛИЛОВЫЙ, ЛОЖЕМЕНТ, ЛОМБАРД, ЛОРНЕТ, ЛЮСТРА, ЛЮЦЕРНА, МАДАМ, МАНЕЖ, МАНЖЕТА, МАРКИЗ, МАРКИРОВАТЬ, МЕБЕЛЬ, МЕЛЬХИОР, МЕНУЭТ, МЕТРДОТЕЛЬ, МИНА, МИРАЖ, МОРЕНА, НАИВНЫЙ, НАРВАЛ, НЕГЛИЖИРОВАТЬ, НИВЕЛИРОВАТЬ, ОДЕКОЛОН, ОЛЕАНДР, ОРАНЖЕВЫЙ, ОТЕЛЬ, ПА, ПАКЕТ, ПАЛИТРА, ПАПИЛЬОТКА, ПАПЬЕ-МАШЕ, ПАРАД, ПАРАШЮТ, ПАРДОН, ПАРИ, ПАРЛАМЕНТ, ПАРОЛЬ, ПАС, ПАСОВАТЬ, ПАССАЖ, ПАСЬЯНС, ПАТРУЛЬ, ПЕЙЗАЖ, ПЕНЬЮАР, ПЕТАРДА, ПИКА, ПИОНЕР, ПЛАКАТ, ПЛАТФОРМА, ПЛАФОН, ПЛЮМАЖ, ПОЗА, ПОЗУМЕНТ, ПОЛИС, ПОМПА, ПОМПОН, ПОНИ, ПОПУРРИ, ПОРТМОНЕ, ПОРТРЕТ, ПОРТУПЕЯ, ПОРТФЕЛЬ, ПОРТШЕЗ, ПОРТЬЕРА, ПРЕЙСКУРАНТ, ПРЕФЕРАНС, ПРИЗ, ПЬЕДЕСТАЛ, РАБАТКА, РАВЕЛИН, РАКУРС, РАМПА, РАНГ, РАНДЕВУ, РАНЕТ, РАНЖИР, РАПИРА, РАФИНАД, РЕВАНШ, РЕДАН, РЕЗОН, РЕКРУТ, РЕМОНТ, РЕНОНС, РЕПЕТИЦИЯ, РЕПС, РЕССОРА, РИКОШЕТ, РОМАН, РОНДО, РОНДО,

РУЛАДА, РУЛЕТКА, РУТИНА, РЮШ, СВИТА, СИЛУЭТ, СУБРЕТКА, СУФЛЕР, СЮЖЕТ, СЮРПРИЗ, ТАБУРЕТ, ТАЛИЯ, ТАРТИНКА, ТИК, ТИРАДА, ТИРЕ, ТОЛЬ, ТРАНСПАРАНТ, ТРАНШЕЯ, ТРИКО, ТРОАКАР, ТУАЛЕТ, ТУР, ТУРНИКЕТ, ТУШЬ, ТЮЛЬ, УВЕРТЮРА, ФАНЕРА, ФАНФАРОН, ФАРС, ФАС, ФАСАД, ФАСОН, ФАЯНС, ФЕЛЬЕТОН, ФЕРМА, ФЕРМУАР, ФЕТОН, ФИКТИВНЫЙ, ФИЛЕ, ФЛАКОН, ФЛАНГ, ФЛАНЕЛЬ, ФЛЕШЬ, ФЛОТ, ФРАК, ФРИЗ, ФРОНТ, ФУГАС, ФУЗЕЯ, ФУРЬЕР, ШАМПИНОН, ШАНС, ШАРАБАН, ШАРАДА, ШИК, ШПИНГАЛЕТ, ЭКИПАЖ, ЭКРАН, ЭМАЛЬ, ЭСКОРТ, ЭШАФОТ, ЭШЕЛОН.

Немецкий язык (153): АБРИС, АЛЕБАРДА, БАЛЛАСТ, БАРОН, БАСТР, БЕГЕМОТ, БЛИК, БОДМЕРЕЯ, БРАК, БРАКОНЬЕР, БУКС, БУРГОМИСТР, БУРМИСТР, БУХТА, ВАЛТОРНА, ВАЛЬС, ВАМПИР, ВАХТА, ВЕКсель, ВЕРБОВАТЬ, ГАЛСТУК, ГАРДИНА, ГАУБИЦА, ГАУПТВАХТА, ГЕРБ, ГЕРЦОГ, ГЕТМАН, ГИЛЬДИЯ, ГИЛЬЗА, ГЛАЗУРЬ, ГЛЕТ, ГЛЯНЕЦ, ГНЕЙС, ГОРН, ГРАФ, ГРИФ, ГРОСФАТЕР, ГРУНТ, ДЕКЕЛЬ, ДОМКРАТ, ДРАБАНТ, ДРЕЛЬ, ДУНСТ, ЕГЕРЬ, ЗАМША, ИМБИРЬ, КАРТОФЕЛЬ, КАЮК, КВАРЦ, КЕГЛЯ, КЛАПАН, КНОП, КОБАЛЬТ, КОЛБА, КРОНА, КУНСТКАМЕРА, ЛАГЕРЬ, ЛАСТ, ЛОЗУНГ, ЛЯДУНКА, МАКЛЕР, МАРКА, МАРКГРАФ, МАРШАЛ, МАСШТАБ, МАТ, МИНОГА, МОЛЬБЕРТ, МОПС, НАГЕЛЬ, НИКЕЛЬ, ОБШЛАГ, ОСТ, ПАВИАН, ПАПКА, ПУДЕЛЬ, РАНЕЦ, РАНТ, РАПС, РАТУША, РАУХТОПАЗ, РАШПИЛЬ, РЕЙС, РЕЙСФЕДЕР, РЕЙТАР, РОСТВЕРК, РОТМИСТР, РЫНОК, РЫЦАРЬ, СУБАЛТЕРН-ОФИЦЕР, ТАБУН, ТАКСА, ТАРАН, ТОРФ, ТРАУР, ФАНТ, ФЕЛЬДМАРШАЛ, ФЛЕР, ФЛИГЕЛЬ, ФЛЮГЕР, ФЛЯГА, ФОКУС, ФОРДЕК, ФОРЕЙТОР, ФОРЕЛЬ, ФОРЗАЦ, ФРАХТ, ФУРА, ФУРМА, ФУТЛЯР, ФУХТЕЛЬ, ЦЕХ, ЦИКЛЯ, ЦИНК, ЦУГ, ШАБЛОН, ШАРМАНКА, ШАФЕР, ШВЕЙЦАР, ШИРМА, ШИХТА, ШЛАГБАУМ, ШЛАМ, ШЛАФРОК, ШЛЕЙФ, ШЛЯПА, ШЛЯХТА, ШНУР, ШПАТЕЛЬ, ШПИК, ШПИОН, ШПОН, ШПРИЦ, ШПУНТ, ШПУР, ШРИФТ, ШТАЛМЕЙСТЕР, ШТАМБ, ШТАНГА, ШТЕЙГЕР, ШТЕЙН, ШТЕМПЕЛЬ, ШТОК, ШТОРА, ШТРАФ, ШТРИХ, ШТУКА, ШТУФ, ШТУЦЕР, ЭТАП, ЮНГА, ЮНКЕР, ЯРМАРКА, ЯХОНТ.

Итальянский язык (110): АВИЗО, АДАЖИО, АККОРД, АЛЛЕГРО, АЛЬПАРИ, АРИЯ, БАЛКОН, БАЛЮСТРАДА, БАНДА, БАНДЕРОЛЬ, БАНК, БАНКА, БАНКЕТ, БАРОККО, БАРИКАДА, БАС, БАСТИОН, БАТАЛИЯ, БЕЛЛАДОННА, БЕЛВЕДЕР, БЕМОЛЬ, БОЛОНКА, БОСКЕТ, БРИГ, БРИГАДА, ГАБИОН, ГАЛЕРА, ГИРЛЯНДА, ГОНДОЛА, ГРАВЕ, ГРАНДИОЗНЫЙ, ГРОТЕСК, ДИСКОНТ, ЖИРАНДОЛЬ, КАВАЛЕР, КАВАТИНА, КАЗАРМА, КАЗЕМАТ, КАМЗОЛ, КАНТОН, КАПРАЛ, КАПУЦИН, КАРИКАТУРА, КАРКАС, КАРНАВАЛ, КАРТЕЛЬ, КАРУСЕЛЬ, КАРЬЕР, КАСКАД, КОДА, КОЛЬРАБИ, КОРСАР, ЛАВА, ЛАЖ, ЛАЗАРЕТ, ЛАРГО, ЛАТУНЬ, ЛИБРЕТТО, МАДРИГАЛ, МАЙОРАН, МАКАРОНЫ, МАРГАНЕЦ, МАРИОНЕТКА, МЕЗОНИН, МЕРКАНТИЛЬНЫЙ, МОДЕРАТО, МУФЛОН, ОРАТОРИЯ, ПАЖ, ПАНЦИРЬ, ПАРИК, ПАСКВИЛЬ, ПАСПОРТ, ПАСТЕЛЬ, ПАЯЦ, ПОМЕРАНЕЦ, ПОПЛИН, РАКЕТА, РЕГАТА, РЕКАМБИО, РЕЛЬЕФ, РЕНЕГАТ, САЛОН, СКАРЛАТИНА, СМАЛЬТА, СОЛДАТ, СОЛЬ, СТАККАТО, СТАНС, СТОПИН, ТАМБУР, ТАРАНТУЛ, ТОРС, ТРАФАРЕТ, ТРЕЛЬ, ФА, ФАГОТ, ФЕЛЮГА, ФИРМА, ФЛЕЙТА, ФОРА, ФРЕГАТ, ФУГА, ХИНА, ЦИТАДЕЛЬ, ЦОКОЛЬ, ШАРЛАТАН, ШТАМП, ЭСКАДРА.

Нидерландский язык (77): БАК, БАНКА, БЕЙДЕВИНД, БИТЕНГ, БОТ, БОЦМАН, БРАШПИЛЬ, БУЙ, БУХТА, ВАНТА, ВАТЕРЛИНИЯ, ГАКАБОРТ, ГАЛС, ГАЛФВИНД, ГАЛЬЮН, ГАРПУН, ГАФЕЛЬ, ГРОТ, ГЮЙС, ДАМБА, ДРЕЙФ, ДЮЙМ, КАМБУЗ, КАПЕР, КИЛЬ, КОК, КОРВЕТ, КРЕН, КУБРИК, ЛАВИРОВАТЬ, ЛАКМУС, ЛОПАРЬ, МАКРЕЛЬ, МАНЕКЕН, МАРС, МАТРОС, МАЧТА, МУФТА, НАКТОУЗ, НОК, НОРД, ОВЕРСТАГ, ОГОН, РАВЕНДУК, РЕЙ, РЕЙД, РЕЯ, РИФ, РУЛЬ, РУПОР, РЮМКА, СТАКСЕЛЬ, СТАПЕЛЬ, ТАКЕЛАЖ, ТРЮМ, ФАЛ, ФАЛРЕП, ФАРВАТЕР,

ФЕРТОНГ, ФЛАГ, ФОРДЕВИНД, ШВАРТОВ, ШКИПЕР, ШКОТ, ШЛЮЗ, ШЛЮП, ШПАНГОУТ, ШПИГАТ, ШПИЛЬ, ШТАГ, ШТИЛЬ, ШТОПОР, ШТОРМ, ШТУРМАН, ЮВЕЛИР, ЯЛ, ЯХТА.

Арабский язык (56): АВА́РИЯ, АДМИРА́Л, А́ЗИМУТ, А́ЛГЕБРА, АЛКОГО́ЛЬ, АЛХИ́МИЯ, А́ЛМАНА́Х, АМУЛÉТ, АРСЕНА́Л, АТЛАС, БИЗА́нь, БУРНУ́С, БЯ́зь, ГАРЕ́М, ГРАФИ́Н, ЖИРА́Ф, ЗЕНИ́Т, ИМА́М, ИСЛА́М, КАБАЛА́, КА́ЛИЙ, КА́НДАЛЫ́, КАРМАЗИ́Н, КАРМИ́Н, КОРА́Н, ЛАК, ЛАКЕ́Й, ЛАФА́, МАРАБУ́, МА́СКА, МАТ, МЕЧЕ́ТЬ, МИШУРА́, МУЛА́Т, МУССО́Н, НАБА́Т, НАДИ́Р, НАИ́Б, РАМАЗА́Н, РЕАЛБГА́Р, СОФА́, СУЛТА́Н, СУМА́Х, ТАЛИСМА́Н, ТАЛЪК, ТА́РА, ТАРИ́Ф, ФАКИ́Р, ХАЛА́Т, ХАЛВА́, ХНА, ЦИ́ФРА, ШАЙТА́Н, ШИФР, ЭСТРАГО́Н, Я́ШМА.

Английский язык (51): АВРА́Л, БИМС, БЛОК, БРЕКВА́ТЕР, БРИДЕ́ЛЬ, БУЛЬДО́Г, ВЕЛЬБО́Т, ВИ́НДЗЭ́ЙЛЬ, ГВА́РДИЯ, ГЕЛМПО́РТ, ГИТ, ГРОГ, ГРУМ, ДЭ́нди, ДОК, ДРЕНА́Ж, ЖОКЕ́Й, КА́ТЕР, КАУЧУ́К, КАШЕМИ́Р, КЕНГУ́РУ, КЛИ́ПЕР, КОКС, ЛАГ, ЛАГЛИ́нь, МИ́ЧМАН, ПИДЖА́К, ПО́РТЕР, ПОТА́Ш, ПУНШ, РА́ЙГРАС, РА́УТ, РЕВОЛЬВЕ́Р, РЕЛЬС, РОМ, РО́СТБИФ, СКВЕР, СПИЧ, СПРУТ, СТО́ПОР, СТРО́НЦИЙ, ТВИ́СТ, ТЭ́НДЕР, ТЕНТ, ТЕСТ, ТИК, ФУТ, ЧЕК, ШАЛЬ, ШКВАЛ.

Персидский язык (28): ДИВА́Н, АБА́З, АРБУ́З, БАЗА́Р, БРО́НЗА, ДЭ́РВИШ, ДУВА́Н, КАЛЬЯ́Н, КАРАВА́Н, КИШМИ́Ш, МАГ, МИТКА́ЛЬ, МУ́МИЯ, МУ́СКУС, НАМА́З, САФЬЯ́Н, СЕРА́ЛЬ, ТАФТА́, ТУМА́Н, ФАРФО́Р, ФЕРЗЬ, ХУРМА́, ЦИРКО́Н, ЧАДРА́, ШАРОВА́РЫ, ШАХ, ША́ХМАТЫ, ШЕПТА́ЛА.

Тюркские языки (21): АРБА́, АРКА́Н, БАКШИ́Ш, БАУ́Л, БЕ́РКУТ, ЕСАУ́Л, ИНЖИ́Р, КАЗНА́, КАРАГА́Ч, КИЗИ́Л, КУРGÁН, КУРДЮ́К, ЛАЧУ́ГА, ПА́РЧА, СУРЬМА́, ТАБУ́Н, ТАМGÁ, ТЕМЛЯ́К, ТУМА́Н, ФУ́НДУ́К, ЧАЛМА́.

Испанский язык (14): АНАКО́НДА, БАСТОНА́ДА, ИГУА́НА, КАКА́О, КАПО́НИР, КА́СКА, КАСТАНЬЕ́ТА, КОКО́С, МАЙС, ПЛА́ТИНА, СИГА́РА, ТАБА́К, УРАGÁН, ЭСТРА́ДА.

Польский язык (13): БА́НКА, ВЭ́НЗЕЛЬ, ДОСКО́НАЛЬНИЙ, КАРЕ́ТА, КИ́ВЕР, КИ́Й, КРАКОВЯ́К, МУШТА́БЕЛЬ, СЕЙ́М, ФА́РТУК, ФРАМУ́ГА, ФРАНТ, ЦИМБА́ЛЫ.

Турецкий язык (9): БАЙРА́М, БЕРГАМО́Т, ЕРМО́ЛКА, КИО́СК, ПАЙ, ПАЛА́Ш, ТЮЛЬПА́Н, УЛА́Н, ЯРЛЫ́К.

Малайский язык (8): АНАНА́С, БАМБУ́К, БЕ́ТЕЛЬ, ГУТТАПЭ́РЧА, ОРАНГУТА́НГ, ТАМТА́М, ТИК, ТОМПА́К.

Еврейский язык (7): КАБАЛИ́СТИКА, КАГА́Л, РАВВИ́Н, СУББО́ТА, ТАЛМУ́Д, ЭДЕ́М, ЮБИЛЕ́Й.

Финский язык (5): КА́МБАЛА, ЛА́ЙБА, МО́ЙВА, НЕ́РПА, ХА́РИУС.

Монгольский язык (4): ЛА́МА, ТАВРО́, ХО́РУГВЬ, ХО́РУНЖИ́Й.

Португальский язык (4): АУТОДАФЭ́, КАШАЛО́Т, МА́РМЕЛА́Д, ФЕТИ́Ш.

Татарский язык (4): БАСМА́, БЕШМЕ́Т, МУРЗА́, ЧУЛА́Н.

Венгерский язык (3): ГАЙДУ́К, ГУСА́Р, ШЕ́РЕНГА.

Китайский язык (2): СО́Я, ЧАЙ.

Амхарский язык (1): БАОБА́Б.

Алтайские языки (1): КАБА́РГА.

Банту языки (1): БАНА́Н.

Идиш (1): ФАНАБЭ́РИЯ.

Калмыцкий язык (1): ДЗЕ́РЕ́Н.

Коми язык (1): ЧА́ГА.

Литовский язык (1): ЯНТА́РЬ.

Тунгусские языки (1): КЕТА́.

Румынский язык (1): БРЫ́НЗА.

Санскрит (1): ШАМА́Н.

Сирийский язык (1): АББА́Т.

Түпи языки (1): ТАПИ́Р.

Эвенкский язык (1): МА́МОНТ.

Этрусский язык (1): ПЕРСО́НА.

ВЫВОДЫ

Мы не утверждаем, что таким образом получены все заимствованные слова. Например, вместе со словами календарь, июнь, июль, август, ноябрь латинскими заимствованиями являются и все остальные названия месяцев, в несколько трансформированном виде. Однако в нашем подходе нет предвзятого отношения ни к одному из языков. Из данного примера видно, что гораздо больше половины заимствованных слов пришло к нам из латинского языка и его производных: французского, немецкого, итальянского, испанского языков. Причем слова, заимствованные из греческого языка, в целом носят общенаучный характер, в то время как слова, заимствованные из латинского языка, это городской уклад жизни, а до начала XX в. 95% населения России проживало в сельской местности (городское население на Руси сложилось к XII–XIII вв.). Немецкие заимствования часто связаны с администрированием, французские и итальянские – с предметами роскоши, торговлей со спекулятивным уклоном, войной. Заимствования из нидерландского – сплошь морские термины (это и не удивительно, поскольку средневековая Голландия – страна пиратов). Арабским заимствованиям характерен научно-религиозный уклон. Английские заимствования так или иначе часто связаны с кораблями. Персидские – с базаром. Остальные заимствования, как правило, обозначают конкретный предмет, вошедший в повседневную жизнь русских. Таким образом, можно сделать вывод, что среди иностранцев основное влияние на население русской равнины оказали носители романо-германской группы языков, и в первую очередь французы (значительная часть латинских слов была заимствована из старофранцузского). Причем характер заимствованных слов говорит о том, что это влияние осуществлялось в ходе совместной деятельности. Когда подобная массовая совместная деятельность могла иметь место? Вряд ли полторы тысячи беглецов от французской революции, принявших присягу Екатерине II в 1793 г., могли оказать существенное влияние на разговорный русский язык. Около 150 тыс. пленных войны на 1812 г., оставшихся в России это уже нужно учитывать. Однако эти люди занимали подневольное положение в среде русского дворянства, поэтому трудно объяснить, почему именно термины из предметов роскоши, торговли и военного обихода были заимствованы от них. К тому же в 1819 г. В. Даль уже начал работу над своим словарем, сконцентрировавшись на «языке народа», а не дворянства. То есть речь о заимствовании из французского в начале XIX в. могла идти только в процессе самой военной компании 1812 г., которая действительно имела характер массового, хотя кратковременного и специфического, взаимодействия народов. Плоть до X века Русь входила в государство Хазар, которое охватывало практически ту же территорию, что и Европейская часть СССР. Поэтому, до XI в. можно говорить скорее о преобладании влияния тюркоязычных народов, чего мы как раз и не наблюдаем. Видимо дело в том, что язык уже изменился. Это можно наблюдать по резкому сокращению тюркоязычных слов в древнерусских текстах с XII до XIV в. (см. сравнение «Слова о полку Игореве» и «Задонщины» в [12]). Из нашей истории [10; 11] мы знаем лишь один период действительно продолжительного контакта носителей русского и латинского, французского языков, это период пребывания генуэзцев в Крыму, на черноморском побережье и низовьях Днепра, Дона, Волги, Кубани (XIII–XV вв.). В этот период Генуя была независимым государством, а до и после была частью Франции,

позже – Италии. Это тот самый период нашей истории, который принято называть татаро-монгольским игом. Это период существования государства «Золотая Орда» с центром на территории современной Ростовской, Волгоградской и Саратовской областей. Этот же период в Европе связан с повсеместным распространением французского языка. На нем говорили в придворных кругах Германии, Фландрии, Нидерландов. Французский язык также был общим языком различных крестоносцев, был языком государств крестоносцев на ближнем востоке. Возник французский язык из так называемой народной разговорной латыни. Поэтому, те заимствования, которые описаны в [7] как взятые из латинского языка, вполне могли быть заимствованы русскими от носителей старофранцузского языка, который был подвергнут сильному влиянию классической латыни, что, по всей видимости, связано с возвышением папства в этот период. Таким образом, заимствования из французского, латинского и немецкого языков в этот период могут быть связаны с взаимодействием русского населения и населения центральной Европы. Никакого существенного влияния языков азиатских народов мы не обнаружили, поскольку, как мы видим, заимствования минимальны.

В заключение приведем пример известной русской считалочки «Гуси, Гуси, га-га ...», имеющей разложение в осмысленный английский текст по словарю Апресяна.

Разложение	Подстрочный перевод по [3]
Goosy, goosy, gaga	Глупый, глупый, обалдевший
Yeast hot eater	Страстный поедатель дрожжевой закваски
Da-da	Десять раз папа
Null yet eater	Ничего еще не съевший
Serry	Двигаясь сомкнутыми рядами
Volcae	Кельтское племя вол(ь)ков
Pot gore row	Пронзает брюхо шеренгой
Ne poorshouse	Урожденную в сиротской богадельне
Nasty mow	Нечисть косит
Null yet eater	Ничего еще не съевший
Cac hot eater	Отвратительный обжора
Toco lap kibe	Язвы от порки на коленях
Bearer gittern	Носитель лиры

Литература

1. Демьянов В.Г. Иноязычная лексика в истории русского языка XI–XVII веков. М.: Наука, 2001. 409 с.
2. Torshin I.Y. Bioinformatics in the Post-Genomic Era: The role of biophysics // Nova Science Publishers. 2006.
3. Новый большой англо-русский словарь / под общ. рук. д-ра физ. наук, проф. Э.М. Медниковой и акад. Ю.Д. Апресяна. М.: Русский язык, 1993.
4. Даль В. Толковый словарь живого великорусского языка. СПб.; М.: Тип. М.О. Вольфа, 1880. 812 с.
5. Мазур Д. Задача о дне рождения // Игра случая. Математика и мифология совпадения. М.: Альпина нон-фикшн, 2017. С. 116–123.
6. Старчевский А.В. Словарь древнего славянского языка, составленный по Остромирову евангелию. СПб.: Тип. А.С. Суворина, 1899. 946 с.
7. Егорова Т.В. Словарь иностранных слов современного русского языка. М.: Аделант, 2014. 801 с.
8. Реформатский А.А. Введение в языкознание. М.: Учпедгиз, 1960. 431 с.
9. Фасмер М. Этимологический словарь русского языка. В 4-х т. / пер. с нем. = Russisches etymologisches Wörterbuch; пер. и доп. О.Н. Трубачёва. 4-е изд., стереотип. М.: Астрель – АСТ, 2004. Т. 4. 860 с.
10. Карпов С.П. Работоторговля в Танае в XIV–XV вв. (преимущественно по данным венецианских нотариальных источников) // Византийский временник. 2017. Т. 101. С. 128–142.

Здесь 30 английских слов, поэтому вероятность случайного совпадения в соответствии с приведенными выше оценками не больше

$$\left(\frac{7}{100}\right)^{30} \leq \frac{1}{10^{30}}.$$

Заметим, что в русском варианте текст носит довольно бессмысленный характер, а в английском отнюдь нет. Данная считалочка передавалась из поколения в поколение не в ходе производственной, торговой или иной общественной деятельности, а от родителей к детям. При этом общее количество слов, заимствованных из английского языка (см. выборку выше), уступает количеству заимствований из французского или немецкого языков. Это, а также знаковые английские слова, относящиеся к семье: сестр(а), папа [жидкий хлеб [4]], брат(р), слово «отец» с точки зрения Шахматова (см. статью в этимологическом словаре М. Фасмера [9]) заимствовано из ирландского aithech, aithech «мужчина из самостоятельного слоя общества», могут говорить о неполноценном, но устойчивом взаимодействии в средние века носителей английского и русского языков.

В английской филологии вопрос о времени и языке заимствования каждого частопотребительного слова давно решен. Хочется подчеркнуть, что англичанами проанализированы не просто общие тенденции, а каждое слово в отдельности. Если бы подобные исследования были проведены для русского языка, то эта статья, наверное, не появилась бы. Однако нам не известно о подобных исследованиях, да и вообще, самый объемный на данный момент этимологический словарь русского языка был составлен в 1938–1950 гг. российским и немецким ученым Максом Фасмером на немецком языке. Переведен на русский язык и дополнен в 1959–1961 гг. О.Н. Трубачёвым. В этом словаре порой просто перечислены все версии заимствования, что само по себе строго научным подходом не является.

References

1. Demianov V.G. Foreign language vocabulary in the history of the Russian language of the XI–XVII centuries. Moscow: Nauka, 2001. 409 p.
2. Torshin I.Y. Bioinformatics in the Post-Genomic Era: The role of biophysics. Nova Science Publishers. 2006.
3. A new large English-Russian dictionary. E.M. Mednikova, Yu.D. Apreasian (gen. guidance). Moscow: Russian language, 1993.
4. Dal V. Explanatory dictionary of the living great Russian language. St. Petersburg: Typ. of M.O. Wolf, 1880. 812 p.
5. Mazur D. The Problem of birthday. In: Game of chance. Mathematics and mythology of coincidence. Moscow: Alpina non-fiction, 2017. Pp. 116–123.
6. Starchevsky A.V. Dictionary of ancient Slavic language, compiled according to the Ostromirov gospel. St. Petersburg: Typ. of A.S. Suvorin, 1899. 946 p.
7. Egorova T.V. Dictionary of foreign words of modern Russian language. Moscow: Adellant, 2014. 801 p.
8. Reformatsky A.A. Introduction to linguistics. Moscow: Uchpedgiz, 1960. 431 p.
9. Fasmer M. Russisches etymologisches Wörterbuch. O.N. Trubachev (transl. and add.). 4th ed., stereotype. Moscow: Astrel, 2004. Vol. 4. 860 p.
10. Karpov S.P. The slave Trade in Tana in the XIV–XV centuries (mostly according to Venetian notarial sources). The Byzantine chronic. 2017. Vol. 101. Pp. 128–142.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗАИМСТВОВАНИЯ ИНОСТРАННЫХ СЛОВ РУССКОГО ЯЗЫКА КАК ОТРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССА ИСТОРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУССКИХ С ИНОСТРАНЦАМИ
Черепнёв М.А., Швец А.Н.

11. Карпов С.П. Modus vivendi жителей венецианской фактории в Танае (Азове) в XIV–XV вв. Российская история (Старое название: Отечественная история; История СССР). М.: Наука, 2016, № 3. С. 27–32.
12. Сулейменов О.О. Аз и Я. Алма-Ата, 1975. 112 с.
11. Karpov S.P. Modus vivendi of the inhabitants of the Venetian trading post in Tana (Azov) in the XIV–XV centuries. Russian history (Old name: Russian history; History of the USSR). Moscow: Nauka, 2016. No. 3. Pp. 27–32.
12. Suleimenov O.O. Az i Ya. Alma-Ata, 1975. 112 p.

Статья поступила в редакцию 06.05.2020, принята к публикации 15.06.2020
The article was received on 06.05.2020, accepted for publication 15.06.2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Черепнев Михаил Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент; доцент кафедры информационной безопасности Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (специальность 01.01.06, 01.01.09). Москва, Российская Федерация. РИНЦ Autor ID: 154134. E-mail: cherepniov@gmail.com

Швец Антон Николаевич, старший преподаватель кафедры теоретической механики и мехатроники Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (специальность 01.02.01). Москва, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5952-8350>. E-mail: tz.coneforest@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Mikhail A. Cherepniov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor; associate professor at the Department of Information Security of the Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russian Federation. Autor ID: 154134. E-mail: cherepniov@gmail.com

Anton N. Shvetz, senior lecturer at the Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics, of the Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5952-8350>. E-mail: tz.coneforest@gmail.com

**О ЖУРНАЛЕ.
ПРАВИЛА РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ АВТОРСКИХ ЭКЗЕМПЛЯРОВ СТАТЕЙ,
ПОСТУПАЮЩИХ В ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ЮР-ВАК»
(В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «COMPUTATIONAL NANOTECHNOLOGY»)
ПРАВА И ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ. ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИЯМ.
ПОРЯДОК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ПУБЛИКАЦИЮ**

О ЖУРНАЛЕ

Журнал входит в «Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ», в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по праву. Решение Президиума ВАК Минобрнауки России от 29.05.2017 г. по следующим специальностям:

- 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение,**
- 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление,**
- 05.14.00 – Энергетика.**

Журнал востребован как в Российской Федерации, так и за рубежом, о чем свидетельствует география подписки на журнал. Журнал зарегистрирован в следующих базах данных: научная электронная библиотека E-LIBRARY.RU, ULRICHS WEB/GLOBAL SERIALS DIRECTORY, EAST VIEW, ИВИС, ЭБС (издательство «ЛАНЬ»). Также статьи журнала представлены в открытом доступе для обеспечения максимального цитирования в Google Scholar, OCLC The world's libraries Connected, EBSCO Research Databases, RePEc, OpenAire, BASE Bielefeld Academic Search Engine.

Каждый выпуск журнала содержит не менее 250 стр. и включает не менее 50 научных статей от аспирантов до маститых докторов наук. Подписаться на журнал можно:

1. По каталогу агентства «Пресса России» (Том 1. Газеты и журналы) – индекс **70854**. Телефон в Москве: (495) 680-90-88, 8-800-200-20-90.
2. Альтернативная подписка и курьерская доставка – Агентство «Урал-Пресс». Телефон в Москве: 8 (495) 789-86-36.

ПРАВИЛА ПОДАЧИ МАТЕРИАЛОВ

Публикация статей в журнале осуществляется при условии заключения Автором лицензионного договора, условия и порядок заключения которого изложены в публичной оферте. Статьи и подписанный договор оферты следует направлять в электронном виде в Редакцию по E-mail: urvak@urvak.ru Телефон редакции: +7 (495) 932-47-09, +7(916)577-94-06.

Редакционная политика Издательского дома «Юр-ВАК» основывается на принципах, сформулированных Комитетом по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics), и соблюдает Кодекс этики научных публикаций Некоммерческого партнерства «Комитет по этике научных публикаций».

Рукописи принимаются лишь при условии, что в настоящее время они не рассматриваются для публикации в другом издании, не размещались в Интернете и не были опубликованы ранее, ответственность за достоверность этой информации несет автор.

Авторы гарантируют, что их рукописи являются оригинальной работой, не содержащей элементов плагиата и недобросовестного заимствования.

Авторы должны уведомить Редакцию о наличии любых конфликтов интересов.

Авторы должны четко указать все источники, используемые в их тексте.

Авторы несут ответственность за подбор и достоверность сведений, изложенных в статьях, цитат, юридических документов, а также не должны наносить урон чести, достоинству и деловой репутации третьих лиц.

Авторы должны сообщать о любых ошибках, которые они обнаружат в своей рукописи после публикации.

Статьи по техническим и физико-математическим наукам направляются авторам для сверки до выхода номера. После сверки, авторы должны прислать подтверждение в редакцию о результатах.

КОМПЛЕКТНОСТЬ РУКОПИСИ

1. В начале статьи указываются: фамилия, имя, отчество (полностью) автора, должность, ученое звание, ученая степень, место работы (все данные об авторах приводятся на русском и английском языках), электронный адрес, телефон.
2. Номер специальности (обязательно).
3. Название статьи на русском и английском языках.
4. Аннотация на русском языке и английском языках. Аннотация должна быть **четко структурированной** и отражать следующие аспекты содержания статьи (не более 100 слов в каждом разделе).
 - **Задача** – причины/цели написания исследовательской работы. Обязательны ссылки на иностранных авторов, работающих над исследуемой задачей.
 - **Модель** – методология / как это было выполнено / область исследования.
 - **Выводы** – обсуждение/результаты.
 - **Рамки исследования/возможность последующего использования результатов научной работы** (если применимо) – исключения/следующие шаги.
 - **Практическое значение** (если применимо) – применение на практике / Что дальше?
 - **Оригинальность/ценность** – Кто сможет извлечь пользу из этой работы и что в ней нового? Для кого предназначена работа.
5. 4–6 ключевых слов на русском и английском языках (до 100 знаков с пробелами). Используйте релевантные и известные ключевые слова. Ключевые слова должны отражать суть работы, научную новизну.
6. Текст статьи в редакторе Word с минимальным форматированием. Для статей технических и физико-математических специальностей просим направлять также текст в формате PDF для проверки формул при верстке.

7. Список используемых литературных источников в едином формате, установленном ГОСТ Р 7.0.5–2008 и ГОСТ 7.82–2001; фамилии авторов в алфавитном порядке. Количество цитируемых публикаций не должно превышать 15 источников.
8. Заполненная публичная оферта Издательства, размещенная на сайте:
<http://www.urvak.ru/upload/oferta-rus.pdf>
9. Отчет системы **Антиплагиат** www.antiplagiat.ru в расширенной версии в формате pdf и текстом проверяемой статьи.
 - Рекомендуемая версия программы – система Антиплагиат.Вуз (модули поиска: Интернет (Антиплагиат), **Коллекция eLIBRARY.ru**, Диссертации и авторефераты РГБ, Университетская библиотека онлайн, Модуль поиска переводных заимствований, Модуль поиска ЭБС «Лань», Модуль поиска ЭБС «Айбукс», Кольцо вузов, Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика, Цитирования).
 - Если воспользоваться бесплатной версией программы Антиплагиат, установленной в ВУЗе, невозможно, то принимается отчет программы www.antiplagiat.ru в платной версии с модулями проверки: Интернет (Антиплагиат), **Коллекция eLIBRARY.ru**, Диссертации и авторефераты РГБ.
 - Статьи рассматриваются с показателем оригинальности от 80%.
10. Объем публикуемых материалов **неограничен**, шрифт 14, интервал 1,5.
11. Предоставляемые материалы должны быть актуальными, новыми, иметь научную или практическую значимость.
12. Все материалы следует представлять в редакцию в электронном варианте по электронной почте на адрес редакции urvak@urvak.ru или непосредственно на электронном носителе, так и в печатном виде.

Библиографические ссылки к статьям авторы оформляют по ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». В библиографических ссылках используют сокращения отдельных слов и словосочетаний по ГОСТ 7.11–2004 «Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на иностранных европейских языках» и ГОСТ 7.12–93 «Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила».

Рекомендуем авторам использовать Гарвардский стиль (*Harvard Style – именная – временная система (name-date system): после цитируемой фразы или ссылки на мнение автора в скобках указываются фамилия автора цитируемой работы и год ее публикации, а в списке литературы источники даются в алфавитном порядке*) с тем, чтобы информация корректнее отображалась в международных базах данных.

Все журналы Издательского дома «Юр-ВАК» предоставляются в полнотекстовом виде в базе ведущего мирового агрегатора научной периодики EBSCO Publishing на платформе EBSCOhost.

Ссылки в тексте оформляются в квадратных скобках – указываются **фамилия автора** (без инициалов), **год**. Если ссылку приводят на конкретный фрагмент текста документа, указывают номер страницы: [Иванов, 2010: 60]

Если ссылка содержит сведения о нескольких работах, они разделяются знаком точка с запятой:

[Иванов, Сидоров, Латышев, Год; Петров, Год]

Списки литературы формируются на русском + на английском языке. В списке литературы:

- ссылка на статью в журнале
 1. *Иванов И.И.* Название статьи // Название журнала. Год. Т. (номер тома). № (номер). С. (страницы).
 1. *Ivanov I.I.* [транслитерация (не перевод) фамилии и инициалов] Перевод названия статьи на англ. язык // Название журнала (если журнал имеет официальный перевод своего названия на англ. язык, то необходимо указывать его (обычно у современных изданий он есть), если издание относится к советскому или досоветскому периоду, то нужно давать его транслитерацию). Год. Vol. (номер тома). № (номер). Р. (страницы).
 - ссылка на книгу
 1. *Иванов И.И.* Название книги: указание вида издания (монография, учеб. пособие и т.п.) / ред. (инициалы фамилия) В.В. Петров. Город: название издательства, год. С. (страницы).
 1. *Ivanov I.I.* [транслитерация (не перевод) фамилии и инициалов] Перевод названия книги на англ. язык: указание вида издания (монография, учеб. пособие и т.п.) на англ. языке / ред. (на англ. языке) V.V. Petrov (транслитерация). Город (на англ. языке): название издательства (если издательство имеет официальный перевод своего названия на англ. язык, то необходимо указывать его (обычно у современных издательств он есть), если издание относится к советскому или досоветскому периоду, то нужно давать транслитерацию назв. издательства), год. Р. (страницы).

РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ

Издательский дом «Юр-ВАК» осуществляет обязательное двойное рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих тематике журналов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов, имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемых статей.

Срок рецензирования – **20 рабочих дней**.

Все статьи проходят первичный отбор на соответствие:

- общим содержательным требованиям и требованиям к оформлению библиографических ссылок
- заявленным научным направлениям журналов;
- проверяются системой Антиплагиат в полной платной версии на сайте www.antiplagiat.ru, данные об оригинальности статей печатаются в журналах после текста работы;
- к публикации принимаются тексты, оригинальность которых составляет не менее 80%.

Если в ходе обязательной независимой редакционной проверки будут обнаружены факты некорректного обхода системы проверки Антиплагиат, в публикации будет отказано.

После успешного прохождения первичного отбора статьи направляются на **обязательное внешнее рецензирование**. Рецензенту направляется для рассмотрения статья автора и отчет программы Антиплагиат www.antiplagiat.ru.

Решение о публикации или отклонении поступающих в журнал материалов принимается редакционной коллегией в соответствии с положением о рецензировании. Подробные правила рецензирования изложены на сайте Издательского дома «Юр-ВАК» <http://www.urvak.ru/review/>

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ В ЖУРНАЛ «COMPUTATIONAL NANOTECHNOLOGY», ПОРЯДОК И УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ, ПРАВА И ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

В своем отзыве на статью рецензент:

1. Оценивает соответствие статьи тематике журнала.
2. Проводит оценку уровня научной работы представленной рукописи:
 - оригинальные результаты/выводы, полученные в работе;
 - наличие ошибочных утверждений;
 - отсутствие заимствований;
 - актуальность и значимость представленной статьи;
 - наличие ссылок на работы других авторов, в том числе и зарубежных исследователей, работающих по данной тематике.
3. Определяет качество оформления работы:
 - соответствие заглавия и аннотации основному содержанию работы;
 - наличие сформулированной во введении цели работы;
 - адекватность и обоснованность основных выводов работы;
 - требуются ли орфографические правки в тексте.
4. Дает одно из следующих заключений по работе в целом:
 - статью можно публиковать в соответствующем по тематике журнале «Издательского дома Юр-ВАК»;
 - статью можно публиковать в соответствующем по тематике журнале «Издательского дома Юр-ВАК» после доработки текста автором;
 - статью необходимо качественно переработать и рассмотреть вопрос о ее публикации после нового рецензирования.

Отрицательная рецензия оформляется на отдельной странице для отправки авторам с подписью рецензента и главного редактора.

Редакция издания направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакция не выплачивает авторам денежные вознаграждения за предоставленные для публикации материалы.