

Учредитель: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный журнал "Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика" публикует оригинальные научные статьи, краткие сообщения и обзорные статьи по направлениям журнала на русском и английском языках, ранее не публиковавшиеся и не представленные для публикации в других изданиях. Все статьи проходят рецензирование членами редакционной коллегии журнала и внешними рецензентами.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

БУЗМАКОВА М. М., к. ф.-м. н., доцент; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
МАЛАНИН В. В., д. т. н., профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
БАРУЛИНА М. А., д. ф.-м. н.; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
НУРБАКОВА Д. М., PhD in Computer Science; Национальный институт прикладных наук Лиона (National Institute of Applied Sciences of Lyon), Лион, Франция.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

БУЗМАКОВА М. М., к.ф.-м.н., доцент, **главный редактор**; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
РУСАКОВА О. Л., к.ф.-м.н., доцент, **ответственный секретарь**; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
АЛЕКСЕЕВ А. О., к.э.н., доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия;
АПТУКОВ В. Н., д.т.н., профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
АПУШКИНСКАЯ Д. Е., д.ф.-м.н.; Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия;
БАРУЛИНА М. А., д.ф.-м.н.; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
БИРЮКОВ А. Н., д.э.н., доцент; Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, Стерлитамак, Россия;
БОРИСОВ В. В., д.т.н., профессор; Смоленский филиал национального исследовательского университета «МЭИ», Смоленск, Россия;
ВЕЧТОМОВ Е. М., д.ф.-м.н., профессор; Вятский государственный университет, Киров, Россия;
ГУСЕВ А. Л., д.т.н.; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
ДЕМИДОВ С. С., д.ф.-м.н.; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия;
ИВАНОВ Д. В., д.ф.-м.н., доцент; Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия;
ИСАЕВ К. П., д.ф.-м.н.; Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия;
ИШКИН Х. К., д.ф.-м.н.; доцент; Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия;
КРИВОШЕЕВА О. А., д. ф.-м. н., доцент; Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия;
КОССОВИЧ Л. Ю., д.ф.-м.н., профессор; Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия;
КУЗНЕЦОВ А. Г., к.т.н.; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
МАЛАНИН В. В., д.т.н., профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
МАТВЕЕНКО В. П., д.т.н., профессор, академик РАН; Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия;

МАХНЕВ А. А., д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН; Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия;
ПАПКОВА И. В., д.ф.-м.н., доцент; Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия;
ПЕСТРЕНИН В. М., к.ф.-м.н., доцент; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
ПОЛОСКОВ И. Е., д.ф.-м.н., доцент; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
РУСАКОВ С. В., д.ф.-м.н., профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
САВЧИН В. М., д.ф.-м.н., профессор; Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия;
СЕЛЕТКОВ И. П., к.т.н.; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
ТРУСОВ П. В., д.ф.-м.н., профессор; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия;
ТЮРИН С. Ф., д.т.н., профессор; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия;
ХАЧАЙ М. Ю., д.ф.-м.н., профессор РАН, чл.-корр. РАН; Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия;
ХЕННЕР Е. К., д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАО; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
ФАЗУЛЛИН З.Ю., д.ф.-м.н., доцент; Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия;
ЧЕРМНЫХ В. В., д.ф.-м.н., доцент; Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорочкина, Сыктывкар, Россия;
ЧЕРНИКОВ А. В., к.т.н.; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
ЧИНЕНОВА В. Н., к.ф.-м.н.; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия;
ШАХМАМЕТОВА Г. Р., д.т.н., доцент; Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия;
ШВАРЦ К. Г., д.ф.-м.н., профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
ЮМАГУЛОВ М. Г., д.ф.-м.н., профессор; Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия;
ЯКОВЛЕВ В. И., д.ф.-м.н., профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;
ЯСНИЦКИЙ Л. Н., д.т.н., профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77 - 66787 от 08.08.2016.

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (приказ от 08.07.2024). Научные специальности: Вещественный, комплексный и функциональный анализ; Дифференциальные уравнения и математическая физика; Геометрия и топология; Математическая логика, алгебра, теория чисел и дискретная математика; Вычислительная математика; Теоретическая механика, динамика машин; Механика деформируемого твердого тела; Механика жидкости, газа и плазмы; Искусственный интеллект и машинное обучение; Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; Теоретическая информатика, кибернетика; Системный анализ управление и обработка информации, статистика; Вычислительные системы и их элементы; Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования. Издание включено в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ, eLIBRARY ID 28484).

Founder: Perm State University

The journal "Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science" publishes Full Articles, Short Communications Article and Review paper/perspectives on the journal's directions, which have not been previously published. The papers have been written in Russian and English. The papers are reviewed by the journal editorial board members and external reviewers.

EDITORIAL COUNCIL

BUZMAKOVA M. M., Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; Perm State University, Perm, Russia;
MALANIN V. V., Doctor of Science in Engineering, Professor; Perm State University, Perm, Russia;
BARULINA M. A., Doctor of Science in Physics and Mathematics; Perm State University, Perm, Russia;
NURBAKOVA D. M., PhD in Computer Science; National Institute of Applied Sciences of Lyon, France.

EDITORIAL BOARD

BUZMAKOVA M. M., Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; **Editor-in-Chief**; Perm State University, Perm, Russia;
RUSAKOVA O. L., Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; **Executive Secretary**; Perm State University, Perm, Russia;
ALEKSEEV A. O., Candidate of Science in Economics, Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;
APTUKOV V. N., Doctor of Science in Engineering, Professor; Perm State University, Perm, Russia;
APUSHKINSKAYA D. E., Doctor of Science in Physics and Mathematics; Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia;
BARULINA M. A., Doctor of Science in Physics and Mathematics; Perm State University, Perm, Russia;
BIRUKOV A. N., Doctor of Science in Economics, Associate Professor; Sterlitamak Branch of Bashkir State University, Sterlitamak, Russia;
BORISOV V. V., Doctor of Science in Engineering, Professor; Smolensk Branch of National Research University "MEI", Smolensk, Russia;
VECHTOMOV E. M., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor; Vyatka State University, Kirov, Russia;
GUSEV A. L., Doctor of Science in Engineering; Perm State University, Perm, Russia;
DEMIDOV S. S., Doctor of Science in Physics and Mathematics; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;
IVANOV D. V., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; N.G. Chernyshevsky Saratov National Research State University, Saratov, Russia;
ISAEV K. P., Doctor of Science in Physics and Mathematics; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia;
ISHKIN H. K., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia;
KRIVOSHEEVA O. A., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia;
KOSSOVICH L. Yu., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor; N.G. Chernyshevsky Saratov National Research State University, Saratov, Russia;
KUZNECOV A. G., Candidate of Science in Engineering; Perm State University, Perm, Russia;
MALANIN V. V., Doctor of Science in Engineering, Professor; Perm State University, Perm, Russia;
MATVEENKO V. P., Doctor of Science in Engineering, Professor, Academician of RAS; Institute of Continuous Media Mechanics, UrD RAS, Perm, Russia;

MAHNEV A. A., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, member-corr. RAS; N.N. Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics, UrD RAS;
PAPKOVA I. V., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; N.G. Chernyshevsky Saratov National Research State University, Saratov, Russia;
PESTRENIN V. M., Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; Perm State University, Perm, Russia;
POLOSKOV I. E., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; Perm State University, Perm, Russia;
RUSAKOV S. V., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor; Perm State University, Perm, Russia;
SAVCHIN V. M., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor; Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia;
SELETKOV I. P., Candidate of Science in Engineering; Perm State University, Perm, Russia;
TRUSOV P. V., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor; Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;
TURIN S. F., Doctor of Science in Engineering, Professor; Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;
HACHAI M. Yu., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor of RAS, member-corr. RAS; N.N. Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics, UrD RAS, Yekaterinburg, Russia;
HENNER E. K., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, member-corr. RAO; Perm State University, Perm, Russia;
FAZULLIN Z. Yu., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia;
CHERMNYH V. V., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor; Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia;
CHERNIKOV A. V., Candidate of Science in Engineering; Perm State University, Perm, Russia;
CHINENOVA V. N., Candidate of Science in Physics and Mathematics; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;
SHAHMAMETOVA G. R., Doctor of Science in Engineering, Associate Professor; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia;
SHVARTS K. G., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor; Perm State University, Perm, Russia;
UMAGULOV M. G., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia;
YAKOVLEV V. I., Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor; Perm State University, Perm, Russia;
YASNICKIY L. N., Doctor of Science in Engineering, Professor; Perm State University, Perm, Russia.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor). Certificate of registration of the mass media PI No. FS 77 - 66787 dated 08.08.2016.

The journal is included in the peer-reviewed scientific publications list for the main research results should be published (Candidate of Sciences and Doctor of Sciences, order dated 07/08/2024). Scientific specialties: Real, complex and functional analysis; Differential equations and mathematical physics; Geometry and topology; Mathematical logic, algebra, number theory and discrete mathematics; Computational Mathematics; Theoretical mechanics, dynamics of machines; Mechanics of deformable solids; Mechanics of liquid, gas and plasma; Artificial intelligence and machine learning; Mathematical modeling, numerical methods and software packages; Theoretical Computer science, cybernetics; System analysis, information management and processing, statistics; Computer systems and their elements; Computer modeling and design automation. The journal is included in the national information and analytical system "Russian Science Citation Index" (eLIBRARY ID 28484).

Содержание

Аналитический отчет о проведении I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Механика управления движением и робототехнические комплексы"	5
МАТЕМАТИКА	
Абдуллаев А.А. Аналог уравнения Эйлера и необходимые условия оптимальности второго порядка в задаче оптимального управления нелинейным интегральным уравнением Вольтерра.....	6
МЕХАНИКА	
Аваряский Д.П., Вака Веласкес Д.П. Формирование инспекционного движения космических аппаратов на лунных орбитах.....	18
Барина Е.В., Тимбай И.А., Миронов Е. Исследование плоского углового движения наноспутника стандарта CubeSat с помощью фазовых портретов.....	28
Барулина М.А., Голиков А.В., Панкратова Е.В., Маркелова О.В. Исследование влияния структуры подвеса инерционной массы стеклянного микромеханического акселерометра на его характеристики.....	41
Макеев Н.Н. Движение гироската в световом потоке полувеклидова пространства.....	52
Мохирева К.А., Кузнецов К.Ю., Осоргина И.В. Специфика изготовления образцов из смолы горячего отверждения для возможного использования в условиях открытого космоса.....	67
Хабин М.Р., Марышев Б.С. Применение метода многих масштабов к задаче о возникновении концентрационной конвекции в прямоугольной области пористой среды.....	79
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА	
Исаева Е.В., Сафарбеков Б.З. Базовый алгоритм автоматической корректировки орфографии текстов на русском языке: разработка, оценка и перспективы.....	91
Лазарев В.А., Иванов П.А. Разработка системы управления сервопривода с параметрической адаптацией для поворотных испытательных стендов.....	109
Соколов А.В., Шуткин А.С., Елифанова Е.М., Попкова А.А., Бекларян А.Л., Барулина М.А. Применение искусственного интеллекта для привлечения клиентов в социальных сетях: обзор российского и зарубежного опыта.....	118
Чуприна С.И., Гимашева К.В. Методы и средства виртуальной семантической интеграции данных из распределенных разнородных источников.....	145
Информация для авторов.....	160

Contents

Analytical Report on the First All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation "Motion Control Mechanics and Robotic Systems"	5
---	---

MATHEMATICS

Abdullayev A.A. An Analogue of the Euler Equation and Necessary Conditions for Second-order Optimality in an Optimal Control Problem Described by Nonlinear Volterra Integral Equation.....	6
--	---

MECHANICS

Avariaskin D.P., Vaca Velasquez D.P. Formation of Inspection Motion for Spacecraft in Lunar Orbits.....	18
--	----

Barinova E.V., Timbai I.A., Mironov E. Study of Plane Angular Motion of a CubeSat Nanosatellite Using Phase Portraits.....	28
---	----

Barulina M.A., Golikov A.V., Pankratova E.V., Markelova O.V. Investigation of the Influence of Inertial Mass Suspension Structure of Glass Micromechanical Accelerometer on its Properties.....	41
--	----

Makeev N.N. Gyrostat Motion in the Light Flow of Semi-Euclidean Space....	52
--	----

Mokhireva K.A., Kuznetsov K.Yu., Osorgina I.V. Production Peculiarities of Hot-Curing Resin Samples for Potential Use in Open Space Conditions.....	67
--	----

Khabin M.R., Maryshev B.S. Application of the Method of Multiple Scales to the Problem of Occurrence of Solute Convection in Rectangular Region of Porous Medium.....	79
--	----

COMPUTER SCIENCE

Isaeva E.V., Safarbekov B.Z. Basic Algorithm for Automatic Spelling Correction of Russian Texts: Development, Evaluation and Prospects.....	91
--	----

Lazarev V.A., Ivanov P.A. Development of a Servo Control System With Parametric Adaptation for Rotary Test Stands.....	109
---	-----

Sokolov A.V., Shutkin A.S., Epifanova E.M., Popkova A.A., Beklaryan A.L., Barulina M.A. Artificial Intelligence Implementation for Customer Engagement in Social Networks: an Overview of Russian and Foreign Experience.....	118
--	-----

Chuprina S.I., Gimasheva K.V. Methods and Tools for Virtual Semantic Integration of Data from Distributed Heterogeneous Sources.....	145
---	-----

Information for authors	160
-------------------------------	-----

**Аналитический отчет о проведении
I Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием
"Механика управления движением и робототехнические комплексы"**

Конференция состоялась 2–6 декабря 2024 г. в г. Перми на базе Физико-математического института Пермского государственного национального исследовательского университета. Она была проведена под руководством директора Физико-математического института доктора физико-математических наук М.А. Барулиной. Организация конференции поддержана Министерством образования и науки Пермского края в соответствии с Перечнем мероприятий в области науки и высшего образования, приуроченных к Десятилетию науки и технологий (приказ № 26-01-06-970 от 18.10.2023).



Основные направления конференции следующие.

1. Новые материалы для авиа- и космического применения.
2. Приборы и системы навигации для беспилотных объектов.
3. Робототехнические устройства и системы.
4. Фотонные приборы и устройства.
5. Биомеханические комплексы и прикладная биомеханика.
6. Искусственный интеллект в задачах управления и навигации.
7. Иные стратегически важные задачи механики управления движением.



В конференции приняли участие 321 человек, в том числе: пленарных докладчиков – 8, секционных докладчиков – 26, слушателей – 287. В рамках конференции работала школа молодых ученых, в которой были проведены мастер-классы, семинары, круглый стол по направлениям конференции.

По материалам конференции готовится к выпуску сборник докладов (РИНЦ), часть из которых отобраны для публикаций в научном журнале "Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика".

Конференция состоялась впервые, но уже вызвала интерес участников из многих городов России, что подтверждает широкая география участников. Она стала платформой для обмена опытом и обсуждений широкого круга вопросов в различных областях науки и техники, таких как космические и авиационные технологии, разработка новых транспортных технологий, достижения в области создания робототехнических комплексов и систем в том числе в сфере сельскохозяйственного производства и нефтеперерабатывающей промышленности, разработка новых композиционных материалов и конструкций.

По итогам работы конференции принято решение сделать ее ежегодной.

МАТЕМАТИКА

Научная статья

УДК 517.977.56

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-6-17

<https://elibrary.ru/bubykz>

Аналог уравнения Эйлера и необходимые условия оптимальности второго порядка в задаче оптимального управления нелинейным интегральным уравнением Вольтерра

Агшин Абиль оглы Абдуллаев

Бакинский государственный университет, Институт Систем управления НАН Азербайджана
г. Баку, Азербайджан
agshin-abdullayev@mail.ru
aqshinabiloqlu@gmail.com

Аннотация. Рассматривается задача оптимального управления о минимуме многозначного функционала, определенного на решениях нелинейного интегрального уравнения, получены неявные необходимые условия оптимальности первого и второго порядков. Также, используя их, установлен аналог уравнения Эйлера и получены конструктивно проверяемые необходимые условия оптимальности второго порядка. Изучены особые, в классическом смысле, управления на оптимальность.

Ключевые слова: задача оптимального управления; многозначный функционал качества; функция Гамильтона–Понтрягина; необходимое условие оптимальности; допустимое управление, аналог уравнения Эйлера, аналог уравнения Лежандра–Клебша, особое управление в классическом смысле

Для цитирования: Абдуллаев А.А. Аналог уравнения Эйлера и необходимые условия оптимальности второго порядка в задаче управления нелинейным интегральным уравнением Вольтерра // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 6–17. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-6-17. <https://elibrary.ru/bubykz>.

Благодарности: автор выражает благодарность профессору К.Б. Мансимову за полезные замечания.

Статья поступила в редакцию 07.08.2024; одобрена после рецензирования 12.02.2025; принята к публикации 15.03.2025.

MATHEMATICS

Research article

An Analogue of the Euler Equation and Necessary Conditions for Second-order Optimality in an Optimal Control Problem Described by Nonlinear Volterra Integral Equation

Agshin Abil Abdullayev

Baku State University, Institute of control system of the National academy of sciences of Azerbaijan,
Baku, Azerbaijan
agshin-abdullayev@mail.ru
aqshinabiloqlu@gmail.com



Эта работа © 2025 Абдуллаев А.А. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Abstract. The optimal control problem of the minimum of a multipoint functional defined on solutions of a nonlinear integral equation is considered, and implicit necessary conditions for optimality of the first and second orders are obtained. Also using them, an analogue of the Euler equation was established and constructively verifiable necessary conditions for second-order optimality were obtained. Singular optimality controls in the classical sense have been studied.

Keywords: *optimal control problem; quality functionality; Hamilton–Pontryagin function; necessary condition for optimality; admissible control, analogue of Euler's equation, analogue of the Legendre–Clebsch equation, singular control in the classical sense*

For citation: Abdullayev, A. A. (2025), "An Analogue of the Euler Equation and Necessary Conditions for Second-order Optimality in an Optimal Control Problem Described by Nonlinear Volterra Integral Equation", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 6-17. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-6-17. <https://elibrary.ru/bubykz>.

Acknowledgments: the author expresses his gratitude to Professor K.B. Mansimov for his helpful comments.

The article was submitted 07.08.2024; approved after reviewing 12.02.2025; accepted for publication 15.03.2025.

Введение

Многие сложные процессы описываются различными интегральными уравнениями типа Вольтерра (см. напр. [1–6]). Поэтому изучаются различные задачи оптимального управления, описываемые интегральными уравнениями. В работах [1, 7–9] и др. исследованы ряд задач оптимального управления, описываемые интегральными уравнениями типа Вольтерра с критериями качества типа Лагранжа или же терминального типа, и установлены некоторые необходимые условия оптимальности первого порядка при различных предположениях на данные задачи.

Но нередко условия оптимальности первого порядка, вырождаясь, становятся неэффективными (см. напр. [10]). Поэтому возникает необходимость в получении необходимых условий оптимальности высокого, в частности второго, порядка. Они позволяют также сузить множество допустимых управлений, подозрительных на оптимальность.

В предлагаемой работе рассматривается задача о минимуме многоточечного функционала, определенного на решениях нелинейного интегрального уравнения, порожденных всевозможными кусочно-непрерывными управляющими функциями (с конечным числом точек разрыва первого рода) при предположении об открытости области управления.

Для начала были получены неявные необходимые условия оптимальности первого и второго порядков. Используя их, был установлен аналог уравнения Эйлера (необходимое условие оптимальности первого порядка), и получен ряд конструктивно проверяемых необходимых условий оптимальности второго порядка.

В конце работы изучены особые в классическом смысле [10] управления на оптимальность.

Постановка задачи

Предположим, что управляемый объект описывается на заданном отрезке времени $[t_0, t_1]$ системой нелинейных одномерных интегральных уравнений типа Вольтерра.

$$z(t) = \int_{t_0}^t f(t_1, \tau, z(\tau), u(\tau)) d\tau, \quad \tau, t \in [t_0, t_1]. \quad (1)$$

Здесь $f(t, \tau, z, u)$ – заданная n -мерная вектор-функция непрерывная по совокупности переменных вместе с частными производными по (z, u) до второго порядка включительно, $u(t)$ – r -мерный кусочно-непрерывный (с конечным числом точек разрыва первого рода) вектор управляющих воздействий со значениями из заданного непустого, ограниченного и открытого множества U – r -мерного линейного пространства R^r т.е.

$$u(t) \in U \subset R^r, t \in [t_0, t_1]. \quad (2)$$

Каждую управляющую функцию с вышеприведенными свойствами назовем *допустимым управлением*.

Предполагается, что при заданном допустимом управлении $u(t)$ интегральное уравнение (1) имеет единственное непрерывное решение $z(t)$ интегрального уравнения (1).

На решениях интегрального уравнения (1), порожденных допустимыми управлениями, определим многоточечный функционал:

$$J(u) = \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k)). \quad (3)$$

Здесь $\varphi(z_1, z_2, \dots, z_k)$ – заданная непрерывно-дифференцируемая скалярная функция, а $T_i \in (t_0, t_1]$, $i = \overline{1, k}$ – заданные точки, причем

$$t_0 < T_1 < T_2 < \dots < T_k \leq t_1.$$

Рассмотрим задачу о минимуме функционала (3) при ограничениях (1), (2).

Допустимое управление, доставляющее минимальное значение функционалу (3) при ограничениях (1), (2), назовем оптимальным управлением.

Целью работы является вывод необходимых условий оптимальности первого и второго порядков, носящие конструктивный характер. Как видно, многоточечный функционал (3) является более общим, чем терминальный функционал.

Вычисление первых и вторых вариаций функционала качества

Предположим, что $(u(t), z(t))$ и $(\bar{u}(t) = u(t) + \Delta u(t), \bar{z}(t) = z(t) + \Delta z(t))$ некоторые допустимые процессы.

Тогда ясно, что приращение $\Delta z(t)$ будет решением интегрального уравнения

$$\Delta z(t) = \int_{t_0}^t \left(f(t, \tau, \bar{z}(\tau), \bar{u}(\tau)) - f(t, \tau, z(\tau), u(\tau)) \right) d\tau. \quad (4)$$

Запишем приращение многоточечного функционала (3):

$$\Delta J(u) = J(\bar{u}) - J(u) = \varphi(\bar{z}(T_1), \bar{z}(T_2) \dots \bar{z}(T_k)) - \varphi(z(T_1), z(T_2) \dots z(T_k)). \quad (5)$$

Пусть $\psi(t)$ пока произвольная n – мерная вектор-функция.

Тогда из тождества (4) получим, что

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_1} \psi'(t) \Delta z(t) dt = \\ & = \int_{t_0}^{t_1} \left[\int_{t_0}^t \psi'(t) \left(f(t, \tau, \bar{z}(\tau), \bar{u}(\tau)) - f(t, \tau, z(\tau), u(\tau)) \right) d\tau \right] dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Из формулы (6), применяя формулу Дирихле (см. напр. [11], с. 136), будем иметь

$$\int_t^t \psi'(t) \Delta x(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} \left[\int_t^{t_1} \psi'(\tau) \left(f(\tau, t, \bar{z}(t), \bar{u}(t)) - f(\tau, t, z(t), u(t)) \right) d\tau \right] dt. \quad (7)$$

Далее из соотношения (4) следует, что

$$\Delta z(T_i) = \int_{t_0}^{T_i} \left(f(T_i, t, \bar{z}(t), \bar{u}(t)) - f(T_i, t, z(t), u(t)) \right) dt.$$

Пусть $\alpha_i(t), i = \overline{1, k}$ характеристические функции на отрезках $[t_0, T_i], i = \overline{1, k}$. Тогда последнее соотношение может быть записано в виде

$$\Delta x(T_i) = \int_{t_0}^{t_1} \alpha_i(t) \left(f(T_i, t, \bar{z}(t), \bar{u}(t)) - f(T_i, t, z(t), u(t)) \right) dt. \quad (8)$$

Используя формулу Тейлора из (5), получим, что

$$\begin{aligned} \Delta J(u) = & \sum_{i=1}^k \frac{\partial \varphi'(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i} \Delta z(T_i) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \Delta z'(T_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i \partial z_j} \Delta z(T_j) + o_1 \left(\left[\sum_{i=1}^k \|\Delta z(T_i)\| \right]^2 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Заметим, что здесь выражение $\|a\|$ является нормой вектора $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)'$ в R^n , которая вычисляется по формуле $\|a\| = \sum_{i=1}^k |a_i|$, а $(\cdot)'$ штрих – операция транспонирования.

Учитывая формулы (7) и (8) в формуле приращения (9) получим

$$\begin{aligned} \Delta J(u) = & \int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial \varphi'(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i} \alpha_i(t) \left(f(T_i, t, \bar{z}(t), \bar{u}(t)) + f(T_i, t, z(t), u(t)) \right) dt + \\ & + \int_{t_0}^{t_1} \psi'(t) \Delta z(t) dt - \int_{t_0}^{t_1} \left[\int_t^{t_1} \psi'(\tau) \left(f(\tau, t, \bar{z}(t), \bar{u}(t)) - f(\tau, t, z(t), u(t)) \right) d\tau \right] dt + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \Delta z(T_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i \partial z_j} \Delta z(T_j) + o_1 \left(\left[\sum_{i=1}^k (\Delta z(T_i, X_i)) \right]^2 \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Теперь для рассматриваемой задачи оптимального управления введем аналог функции Гамильтона–Понтрягина в виде:

$$\begin{aligned} H(t, z(t), u(t), \psi(t)) = \\ = - \sum_{i=1}^k \alpha_i(t) \frac{\partial \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i} f(T_i, t, z(t), u(t)) + \\ + \int_t^{t_1} \psi'(\tau) f(\tau, t, z(t), u(t)) d\tau. \end{aligned}$$

Учитывая вид функции Гамильтона–Понтрягина в формуле (10), получим

$$\begin{aligned} \Delta J(u) = & - \int_{t_0}^{t_1} \psi'(t) \Delta z(t) dt - \\ & - \int_{t_0}^{t_1} \left(H(t, \bar{z}(t), \bar{u}(t), \bar{\psi}(t)) - H(t, z(t), u(t), \psi(t)) \right) dt + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \Delta z'(T_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i \partial z_j} \Delta z(T_j) + o_1 \left(\left[\sum_{i=1}^k (\Delta z'(T_i)) \right]^2 \right). \end{aligned} \quad (11)$$

А из формулы (11), на основании формулы Тейлора, будем иметь

$$\Delta J(u) = - \int_{t_0}^{t_1} \left[\frac{\partial H'(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z} \Delta z(t) + \frac{\partial H'(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u} \Delta u(t) \right] dt -$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \left[\Delta z'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z^2} \Delta z(t) + 2\Delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u \partial z} \Delta z(t) + \right. \\
 & \left. + \Delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u^2} \Delta u(t) \right] dt - \int_{t_0}^{t_1} o_2([\|\Delta z(t)\| + \|\Delta u(t)\|]^2) dt + \\
 & + o_1 \left(\left[\sum_{i=1}^k \|\Delta z(T_i)\| \right]^2 \right) + \int_{t_0}^{t_1} \psi'(t) \Delta z(t) dt.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Предположим, что $\psi(t)$ удовлетворяет соотношению

$$\psi(t) = \frac{\partial H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z}. \tag{13}$$

Соотношение (13) является линейным неоднородным интегральным уравнением относительно $\psi(t)$ (сопряженная система) [10–12].

При этом формула приращения (12) примет вид:

$$\begin{aligned}
 \Delta J(u) = & - \int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial H'(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u} \Delta u(t) dt - \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \left[\Delta z'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z^2} \Delta z(t) \right. \\
 & + 2\Delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u \partial z} \Delta z(t) + \Delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u^2} \Delta u(t) \left. \right] dt + \\
 & + o_1 \left(\left[\sum_{i=1}^k \|\Delta z(T_i)\| \right]^2 \right) - \int_{t_0}^{t_1} o_2([\|\Delta z(t)\| + \|\Delta u(t)\|]^2) dt.
 \end{aligned} \tag{14}$$

В дальнейшем нам понадобится оценка нормы приращения траектории $x(t)$.

Из формулы (4), переходя к норме, и используя условие Липшица получаем, что

$$\|\Delta z(t)\| \leq L_1 \int_{t_0}^t [\|\Delta z(\tau)\| + \|\Delta u(\tau)\|] d\tau,$$

где $L_1 = \text{const} > 0$ некоторое постоянное.

Применяя к последнему неравенству лемму Гронуолла–Беллмана (см. напр. [11]), получим, что

$$\|\Delta z(t)\| \leq L_2 \int_{t_0}^t \|\Delta u(\tau)\| d\tau, \tag{15}$$

($L_2 = \text{const} > 0$).

Из уравнения (4) получаем, что $\Delta z(t)$ является решением линеаризованной системы уравнений

$$\begin{aligned}
 \Delta z(t) = & - \int_{t_0}^t \left[\frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial z} \Delta z(\tau) + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial u} \Delta u(\tau) + o_3([\|\Delta z(\tau)\| + \|\Delta u(\tau)\|]) \right] d\tau.
 \end{aligned} \tag{16}$$

По предположению множество U (область управления) является открытой.

Поэтому специальное приращение допустимого управления $u(t)$ можно определить по формуле

$$\Delta u_\varepsilon(t) = \varepsilon \delta u(t), t \in [t_0, t_1]. \quad (17)$$

Здесь ε достаточно малое по абсолютной величине число, а $\delta u(t) \in R^r, t \in [t_0, t_1]$ произвольная кусочно-непрерывная и ограниченная вектор-функция.

Через $\Delta z_\varepsilon(t)$ обозначим специальное приращение траектории $z(t)$, отвечающее специальному приращению (17) управления $u(t)$.

Из оценки (15) следует, что

$$\|\Delta z_\varepsilon(t)\| \leq L_3 \varepsilon, t \in [t_0, t_1], \quad (L_3 = \text{const} > 0) \quad (18)$$

Учитывая формулу (17) и оценку (18) в формуле (16), получим, что

$$\Delta z_\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t \frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial z} \Delta z_\varepsilon(\tau) d\tau + \varepsilon \int_{t_0}^t \frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial u} \delta u(\tau) d\tau + o_4(\varepsilon; t).$$

При помощи этого разложения доказывается

Лемма. Для специального приращения $\Delta z_\varepsilon(t)$ траектории $z(t)$ имеет место разложение

$$\Delta z_\varepsilon(t) = \varepsilon \delta z(t) + o_5(\varepsilon; t), \quad (19)$$

здесь $\delta z(t)$ является решением линейного неоднородного интегрального уравнения Вольтерра

$$\delta z(t) = \int_{t_0}^t \left[\frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial z} \delta z(\tau) + \frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial u} \delta u(\tau) \right] d\tau. \quad (20)$$

Лемма доказывается по схеме, аналогичной схеме из [10], используемой в случае задачи оптимального управления обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Учитывая разложение (19) и формулу (17) в приращении (14) функционала, получим, что

$$\begin{aligned} S(u + \Delta u_\varepsilon) - S(u) = & -\varepsilon \int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial H'(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u} \delta u(t) dt + \\ & + \frac{\varepsilon^2}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \delta z'(T_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i \partial z_j} \delta z(T_j) - \\ & - \frac{\varepsilon^2}{2} \int_{t_0}^{t_1} \left[\delta z'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z^2} \delta z(t) + 2 \delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u \partial z} \delta z(t) + \right. \\ & \left. + \delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u^2} \delta u(t) \right] dt + o(\varepsilon^2). \end{aligned}$$

На основании этого разложения заключаем, что первая и вторая вариации (в классическом смысле) функционала (3) имеют, соответственно, вид:

$$\begin{aligned} \delta^1 J(u; \delta u) = & - \int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial H'(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u} \delta u(t) dt, \\ \delta^2 J(u; \delta u) = & \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \delta z'(T_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i \partial z_j} \delta z(T_j) - \end{aligned} \quad (21)$$

$$- \int_{t_0}^{t_1} \left[\delta z'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z^2} \delta z(t) + 2\delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u \partial z} \delta z(t) + \right. \\ \left. + \delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u^2} \delta u(t) \right] dt. \quad (22)$$

Необходимые условия оптимальности

Поскольку по предположению множество U открытое, то для оптимальности управления необходимо, чтобы первая вариация функционала вдоль оптимального управления $u(t)$ была равной нулю и вторая должна быть неотрицательной (см. напр. [10–13]).

Поэтому из соотношений (21) и (22) следует, что вдоль оптимального управления $u(t)$, для всех $\delta u(t)$, $t \in T$ (вариация управления)

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial H'(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u} \delta u(t) dt = 0, \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \delta z'(T_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(T_1), \dots, z(T_k))}{\partial z_i \partial z_j} \delta z(T_j) - \int_{t_0}^{t_1} \left[\delta z'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z^2} \delta z(t) + \right. \\ \left. + 2\delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u \partial z} \delta z(t) + \delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u^2} \delta u(t) \right] dt \geq 0. \quad (24)$$

Соотношения (23) и (24) являются неявными необходимыми условиями первого и второго порядка, соответственно. Из них надо получить необходимые условия оптимальности, явно выраженные через параметры рассматриваемой задачи.

Из тождества (23) следует

Теорема 1. Для оптимальности допустимого управления $u(t)$ необходимо, чтобы соотношение

$$\frac{\partial H(\theta, z(\theta), u(\theta), \psi(\theta))}{\partial u} = 0 \quad (25)$$

выполнялось для всех $\theta \in [t_0, t_1]$.

Здесь $\theta \in [t_0, t_1]$ произвольная точка непрерывности управления $u(t)$.

Соотношение (25) является аналогом уравнения Эйлера из вариационного исчисления (см. напр. [10, 11]).

Каждое допустимое управление, являющееся решением уравнения Эйлера (25), назовем *классической экстремалью*.

В принципе, число классических экстремалей может быть достаточно большим.

Поэтому необходимо иметь необходимые условия оптимальности второго порядка носящие явный характер.

Пусть $R(t, \tau)$ ($n \times n$) – матричная функция, являющаяся решением матричного линейного интегрального уравнения

$$R(t, \tau) = \int_{\tau}^t R(t, s) \frac{\partial f(s, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial z} ds + \frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial z}.$$

Тогда решение $z(t)$ уравнения (20) допускает представление (см. напр. [6])

$$\delta z(t) = \int_{t_0}^t R(t, \tau) \left(\int_{t_0}^{\tau} \frac{\partial f(\tau, s, z(s), u(s))}{\partial u} \delta u(s) ds \right) d\tau + \int_{t_0}^t \frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial u} \delta u(\tau) d\tau.$$

Отсюда применяя формулу Дирихле получаем, что

$$\delta z(t) = \int_{t_0}^t \left[\int_{\tau}^t R(t, s) \frac{\partial f(s, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial z} \delta u(\tau) ds \right] d\tau + \int_{t_0}^t \frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial u} \delta u(\tau) d\tau.$$

Полагая

$$Q(t, \tau) = \int_{\tau}^t R(t, s) \frac{\partial f(s, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial u} ds + \frac{\partial f(t, \tau, z(\tau), u(\tau))}{\partial u},$$

получим

$$\delta z(t) = \int_{t_0}^t Q(t, \tau) \delta u(\tau) d\tau. \quad (26)$$

Из представления (26) следует, что

$$\delta z(T_i) = \int_{t_0}^{t_1} \alpha_i(t) Q(T_i, t) \delta u(t) dt. \quad (27)$$

Теперь, используя представления (26) и (27), займемся преобразованием отдельных слагаемых в неравенстве (22).

На основе формулы (27) получаем, что

$$\begin{aligned} & \delta z'(T_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i \partial z_j} \delta z(T_j) = \\ &= \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_1} \alpha_i(\tau) \alpha_j(s) \delta u'(\tau) Q'(T_i, \tau) \\ & \quad \times \frac{\partial^2 \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i \partial z_j} Q(T_j, s) \delta u(s) ds d\tau. \end{aligned} \quad (28)$$

Используя формулу (26), будем иметь:

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_1} \delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u \partial z} \delta z(t) dt = \\ &= \int_{t_0}^{t_1} \left[\int_{t_0}^t \delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u^2} Q(t, \tau) \delta u(\tau) d\tau \right] dt, \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^t \delta z'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z^2} \delta z(t) dt = \\ &= \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_1} \delta u'(\tau) \left[\int_{\max(\tau, s)}^{t_1} Q'(t, \tau) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z^2} Q(t, s) dt \right] \delta u(s) ds. \end{aligned} \quad (30)$$

По аналогии ([12]) введем обозначение

$$K(\tau, s) = - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \alpha_i(\tau) \alpha_j(s) Q'(T_i, \tau) \frac{\partial^2 \varphi(z(T_1), z(T_2), \dots, z(T_k))}{\partial z_i \partial z_j} Q(T_j, s) + \\ + \int_{\max(\tau, s)}^{t_1} Q'(t, \tau) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial z^2} Q(t, s) dt. \quad (31)$$

Учитывая введенные обозначение $K(\tau, s)$ и тождества (28)–(31) из неравенства (22) получим.

Теорема 2. Для оптимальности классической экстремали $u(t)$ необходимо, чтобы неравенство

$$\int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_1} \delta u'(\tau) K(\tau, s) \delta u(s) ds d\tau + \\ + \int_{t_0}^{t_1} \left[\int_{t_0}^t \delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u \partial z} Q(t, \tau) \delta u(\tau) d\tau \right] dt + \\ + \int_{t_0}^{t_1} \delta u'(t) \frac{\partial^2 H(t, z(t), u(t), \psi(t))}{\partial u^2} \delta u(t) dt \leq 0 \quad (32)$$

выполнялось для всех $\delta(u) \in R^r$, $t \in T$.

Как видно, неравенство (32), являясь общим интегральным необходимым условием оптимальности второго порядка, носит конструктивный характер.

Более того, из него можно, за счет произвольности допустимых вариаций $\delta u(t)$ управляющей функции $u(t)$ получить ряд еще более легко проверяемых необходимых условий оптимальности.

Приведем одну из них.

Теорема 3. Для оптимальности классической экстремали $u(t)$ необходимо, чтобы неравенство

$$v' \frac{\partial^2 H(\theta, z(\theta), u(\theta), \psi(\theta))}{\partial u^2} v \leq 0 \quad (33)$$

выполнялось для всех $\theta \in [t_0, t_1)$ и $v \in R^r$.

Здесь $\theta \in [t_0, t_1)$ – произвольная точка непрерывности управления $u(t)$.

Неравенство (33) есть аналог условия Лежандра–Клебша из вариационного исчисления [10–12] для рассматриваемой задачи.

Докажем условие оптимальности (33).

Пусть $\theta \in [t_0, t_1)$ – произвольная точка непрерывности управления $u(t)$, $\varepsilon > 0$ достаточно малое произвольное число, такое что, $\theta < \varepsilon < t_1$, и $v \in R^r$ произвольный вектор.

В силу произвольности допустимой вариации $\delta u(t)$ управления $u(t)$, его определим по формуле

$$\delta u_\varepsilon(t) = \begin{cases} v, & t \in [\theta, \theta + \varepsilon), \\ 0, & t \in [t_0, t_1] \setminus [\theta, \theta + \varepsilon). \end{cases} \quad (34)$$

Учитывая выражение $\delta u_\varepsilon(t)$, в формуле (34) из неравенства (32), после некоторых преобразований получим, что

$$\varepsilon v' \frac{\partial^2 H(\theta, z(\theta), u(\theta), \psi(\theta))}{\partial u^2} v + o(\varepsilon) \leq 0. \quad (35)$$

Разделив обе части последнего неравенства на ε и переходя к пределу при $\varepsilon \rightarrow 0$ получим утверждение теоремы 3.

Теорема 2 позволяет получить необходимые условия оптимальности также при вырождении аналога условия Лежандра–Клебша.

По аналогии с работами [10, 12] введем понятие особого в классическом смысле управления.

Определение. Если для всех $\theta \in [t_0, t_1]$ и $v \in R^r$

$$v' \frac{\partial^2 H(\theta, z(\theta), u(\theta), \psi(\theta))}{\partial u^2} v = 0,$$

то классический экстремаль будем называть *особым* (в классическом смысле) управлением в задаче (1)–(3).

Из введенного определения ясно, что для особых в классическом смысле управлений аналог условия Лежандра–Клебша, вырождаясь, становится неэффективным.

Пусть $u(t)$ особое (в классическом смысле) оптимальное управление.

Учитывая формулу (36) в неравенстве (32), получим, что в особом случае

$$\begin{aligned} & \varepsilon^2 v' K(\theta, \theta) v + \\ & + \varepsilon^2 v' \frac{\partial^2 H(\theta, z(\theta), u(\theta), \psi(\theta))}{\partial u \partial z} Q(\theta, \theta) v + \\ & + o(\varepsilon^2) \leq 0. \end{aligned}$$

Отсюда, в силу произвольности $\varepsilon > 0$ получаем, что

$$v' \left[K(\theta, \theta) + \frac{\partial^2 H(\theta, z(\theta), u(\theta), \psi(\theta))}{\partial u \partial z} Q(\theta, \theta) \right] v \leq 0. \quad (36)$$

Таким образом, доказана

Теорема 4. Для оптимальности особого в классическом смысле управления $u(t)$ необходимо, чтобы неравенство (36) выполнялось для всех $\theta \in [t_0, t_1]$ и $v \in R^r$.

Замечание. Как известно, (см. напр. [13]) применение серии игольчатых вариаций при доказательстве необходимых условий оптимальности первого порядка не усиливает ни принципа максимума Понтрягина, ни его следствия. В особом случае же использование серии игольчатых вариаций позволяет усилить необходимые условия оптимальности, особых управлений, полученных с помощью простых игольчатых вариаций (см. напр. [13, 14, 16, 17]). Исходя из этого, результат Теоремы 4 можно усилить.

Заметим, что ряд необходимых условий оптимальности первого и второго порядков, в частности аналог условия Лежандра–Клебша для задачи оптимального управления, описываемого системой обыкновенных дифференциальных уравнений с нетиповым критерием качества, получены в работе [15].

Заключение

В работе рассматривается задача минимизации многоточечного функционала, определенного на решениях нелинейного интегрального уравнения в классе кусочно-непрерывных управляющих функций при предположении, что область управления является ограниченным и открытым множеством. Методом приращения выведены первая и вторая вариации критерия качества.

Из условия равенства первой вариации функционала вдоль оптимального управления получен аналог уравнения Эйлера.

А из условия неотрицательности второй вариации функционала получены общие необходимые условия оптимальности, позволяющие установить аналог условия Лежандра–Клебша и исследовать особые (в классическом смысле) управления на оптимальность.

Список источников

1. Винокуров В.Р. Оптимальное управление процессами, описываемыми интегральными уравнениями // Изв. Вузов, сер. Математика. 1967, № 7. С. 21–33.
2. Владимиров В.С. Уравнение математической физики. М.: Наука, 1976, 528 с.
3. Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1982. 304 с.
4. Абуладзе А.А. Задачи оптимального управления для систем, описываемых интегральными уравнениями. Тбилиси: Изд-во ТГУ, 1988. 117 с.
5. Васильева А.Б., Тихонов Н.А. Интегральные уравнения. М.: Изд-во МГУ, 1989. 156 с.
6. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. IV, ч. I. М.: Наука, 1974. 336 с.
7. Мансимов К.Б., Мустафаев М.Г. Некоторые необходимые условия оптимальности в задачах управления, описываемые интегральными уравнениями типа Вольтерра // Известия АН Азерб. ССР. Сер. физ-техн. и матем. Наук. 1985, № 5. С. 35–41.
8. Carlson D.A. An elementary Proof of the maximum principle for optimal control problems governed by Volterra integral equations // Journ. of Optim. theory and Apple. 1987. Vol. 54, № L. P. 32–45. DOI: 10.1007/bf00940404 EDN: YLWVEX.
9. De la Vega Constanta. Necessary conditions for optimal terminal time control problems governed by a Volterra integral equation // Journal Optimization theory and Apple. 2006. Vol. 130, no. 1. P. 79–93. DOI: 10.1007/s10957-006-9087-7.
10. Габасов Р., Кириллова Ф.М. Особые оптимальные управления. М.: Либроком, 2011. 259 с.
11. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. М.: Физматлит, 2018. 384 с.
12. Мансимов К.Б. Особые управления в системах с запаздыванием. Баку: "Элм", 1999. 176 с.
13. Габасов Р., Кириллова Ф.М. Принцип максимума в теории оптимального управления. Минск: изд-во "Наука и техника", 1974. 272 с.
14. Мансимов К.Б., Марданов М.Дж. Качественная теория оптимального управления в системах Гурса–Дарбу. Баку: "Элм", 2010. 360 с.
15. Мансимов К.Б., Нагиева И.Ф. Необходимые условия оптимальности первого и второго порядков в одной задаче оптимального управления с нетиповым критерием качества // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2023, № 64. С. 11–20. DOI: 10.17223/19988605/64/2 EDN: GHXADE.
16. Гороховик С.Я. Необходимые условия оптимальности в задаче с подвижным правым концом траектории // Дифференциальные уравнения. 1975, № 10. С. 1765–1773.
17. Срочко В.А. Многоточечные условия оптимальности для особых управлений // В сб. "Численные методы анализа (прикладная математика)". Иркутск, СО АН СССР, 1976. С. 43–50.

References

1. Vinokurov, V. R. (1967), "Optimal control of processes described by integral equations", *Izvestiya Vuzov, ser. Matematika*, no. 7, pp. 21-33.

2. Vladimirov, V. S. (1982), "Equation of mathematical physics", Nauka, Moscow, Russia, 1976, 528 p.
3. Volterra, V. (1982), "Theory of functionals, integral and integro-differential equations", Nauka, Moscow, Russia, 304 p.
4. Abuladze, A. A. (1988), "Optimal control problems for systems described by integral equations", Tbilisi, Izvestiya TSU, 117 p.
5. Vasilyeva, A. B. and Tikhonov, N. A. (1989), "Integral equations", Moscow State University Press, Moscow, Russia, 156 p.
6. Smirnov, V. I. (1974), "Course in Higher Mathematics", vol. IV, part I, Nauka, Moscow, Russia, 336 p.
7. Mansimov, K. B., and Mustafaev, M. G. (1985), "Some necessary optimality conditions in control problems described by Volterra-type integral equations", *Bulletin of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. Series of Phys.-Tech. and Mathematical Sciences*, no. 5, pp. 35-41.
8. Carlson, D. A. (1987), "An elementary proof of the maximum principle for optimal control problems governed by Volterra integral equations", *Journ. of Optim. Theory and Appl.* vol. 54, NL, pp. 32-45.
9. De la Vega Constanta (2006), "Necessary conditions for optimal terminal time control problems governed by a Volterra integral equation", *Journal Optimization theory and Appl.*, vol. 130, no. 1, pp. 79-93.
10. Gabasov, R. and Kirillova, F.M. (2011), "Singular optimal controls", Librokom, Moscow, 259 p.
11. Alekseev, V. M., Tikhomirov, V. M. and Fomin, S. V. (2018), "Optimal control", Fizmatlit, Moscow, 384 p.
12. Mansimov, K.B. (1999), "Singular controls in systems with delay", Elm, Baku, 176 p.
13. Gabasov, R. and Kirillova, F. M. (1974), "Maximum principle in the theory of optimal control", Science and Technology Publishing House, Minsk, 272 p.
14. Mansimov, K. B. and Mardanov, M. J. (2010), "Qualitative theory of optimal control in Goursat-Darboux systems", Elm, Baku, 360 p.
15. Mansimov, K. B. and Nagieva, I. F. (2023), "Necessary optimality conditions of the first and second orders in one optimal control problem with a non-standard quality criterion", *Bulletin of Tomsk State University*, [Controls, computing engineering and informatics], no. 64, pp. 11-20.
16. Gorokhovik, S. Ya. (1975), "Necessary conditions for optimality in a problem with a moving right end of the trajectory", *Differential equations*, no. 10, pp. 1765-1773.
17. Srochko, V. A. (1976), "Multipoint optimality conditions for singular controls", *In the collection "Numerical methods of analysis (applied mathematics)"*, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Irkutsk, pp. 43-50.

Информация об авторе:

A. A. Абдуллаев – кандидат физико-математических наук, доцент, Бакинский государственный университет (Az, 1148, Азербайджан, г. Баку, ул. З. Халилова, 23), Институт Систем управления НАН Азербайджана (Az, 1141, Азербайджан, г. Баку, ул. Бахтияра Вагабзаде, 68).

Information about the author:

A. A. Abdullaev – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor Baku State University (23, Z. Khalilova St., Baku, Azerbaijan, Az, 1148), Institute of Control Systems of the National Academy of Sciences of Azerbaijan (68, Bakhtiyar Vahabzade St., Baku, Azerbaijan, Az, 1141).

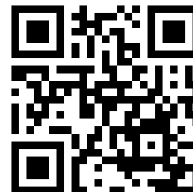
МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 629.783

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-18-27

<https://elibrary.ru/hkpwgx>



**Формирование инспекционного движения
космических аппаратов на лунных орбитах**

Денис Петрович Аваряски¹, Доменика Паулина Вака Веласкес²

^{1,2}Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

¹avaryaskin.dp@ssau.ru

²domerpa026@gmail.com

Аннотация. В данной работе решается задача выбора начальных параметров относительного движения космических аппаратов (КА) для обеспечения и сохранения инспекционной траектории. Исследование включает моделирование относительного движения двух КА (опорный и инспектор) на низких лунных круговых орбитах. В качестве орбит для опорного КА рассматриваются известные стабильные и "замороженные" орбиты, что позволило проанализировать их применимость в реализации задач инспекции. Результаты исследования показали наличие трех основных видов движения относительной траектории в орбитальной системе координат: перемещение вдоль оси Ох, вращение вокруг осей Оу и Ох. Обосновано использование 15 гармоник гравитационного потенциала Луны для анализа относительного движения КА вокруг Луны. Каждая относительная траектория была проанализирована с учетом отклонений по осям. Показано, что не все стабильные орбиты подходят для выполнения задач инспекции. Полярные орбиты продемонстрировали свои преимущества за счет большей адаптивности и меньшей неустойчивости относительной траектории. Показано, что на неполярных орбитах эффект увеличения эксцентриситета относительной траектории со временем имеет значительное влияние на инспекционное движение.

Ключевые слова: инспекционная траектория; космические аппараты; гравитационное поле Луны; низкие лунные орбиты; относительное движение; инспектор

Для цитирования: Аваряскин Д. П., Вака Веласкес Д. П. Формирование инспекционного движения космических аппаратов на лунных орбитах // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып.1(68). С. 18–27. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-18-27. <https://elibrary.ru/hkpwgx>.

Статья поступила в редакцию 28.01.2025; одобрена после рецензирования 17.02.2025; принята к публикации 15.03.2025.

MECHANICS

Research article

Formation of Inspection Motion for Spacecraft in Lunar Orbits
Denis P. Avaryaskin¹, Domenica P. Vaca Velasquez²



Эта работа © 2025 Аваряскин Д.П., Вака Веласкес Д.П. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

^{1,2}Samara National Research University, Samara, Russia

¹avaryaskin.dp@ssau.ru

²domepao026@gmail.com

Abstract. In this work, the problem of selecting the initial parameters for the relative motion of spacecraft (SC) to ensure and maintain the inspection trajectory is addressed. The study includes modeling the relative motion of two SCs (reference and inspector) in low lunar circular orbits. The orbits for the reference SC considered are known stable and "frozen" orbits, which allowed for the analysis of their applicability in the implementation of inspection tasks. The results of the study demonstrated the presence of three main types of motion of the relative trajectory in the orbital coordinate system: movement along the Ox axis, rotation around the Oy and Ox axes. The use of 15 harmonics of the lunar gravitational potential for the analysis of relative motion of SCs around the Moon was justified. Each relative trajectory was analyzed taking into account deviations along the axes. It was shown that not all stable orbits are suitable for performing inspection tasks. Polar orbits demonstrated their advantages due to greater adaptability and reduced instability of the relative trajectory. It was shown that in non-polar orbits, the effect of increasing the eccentricity of the relative trajectory over time has a significant impact on the inspection movement.

Keywords: *inspection trajectory; spacecraft; lunar gravitational field; low lunar orbits; relative motion; inspector*

For citation: Avaryaskin, D. P. and Vaca Velasquez, D. P. (2025), "Formation of Inspection Motion for Spacecraft in Lunar Orbits", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 18-27. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-18-27. <https://elibrary.ru/hkpwgwx>.

The article was submitted 28.01.2025; approved after reviewing 17.02.2025; accepted for publication 15.03.2025.

Введение

В последнее время наблюдается возрождение интереса к Луне, что проявляется в значительном увеличении числа лунных миссий, как уже осуществленных, так и запланированных на этот и ближайшие годы. За каждой из этих миссий стоят не только государственные учреждения, но и активное участие частного сектора, что способствует развитию космической отрасли и ее коммерциализации. Научные и технические усилия прилагают такие страны, как США, Россия, Китай, Индия, Япония и государства Европейского Союза, которые разрабатывают спутники, луноходы и беспилотные аппараты с целью создания устойчивой лунной базы для постоянного присутствия космонавтов.

Ключевую роль успехе лунных миссий играет глубокое понимание строения Луны, ее физических характеристик и разнообразных явлений, происходящих в ее окрестностях. Эти факторы значительно влияют на механику полета космических аппаратов и требуют тщательного анализа.

Перспективным направлением развития лунных миссий является разворачивание группировок КА на орбитах Луны, выполняющих различные задачи. В связи с этим, решение задачи формирования инспекционного движения КА на лунных орбитах является важным шагом к реализации подобных миссий. В случае группового полета требуется анализировать относительное движение КА, обеспечивая соблюдение необходимого расстояния между ними. Одним из видов такого относительного движения является инспекционное движение, при котором один КА (инспектор) следует за другим КА (опорным) таким образом, что в орбитальной системе координат (ОСК) инспектор вращается вокруг опорного космического аппарата.

1. Постановка задачи

Относительное движение инспектора и опорного КА рассматривается в ОСК, начало которой находится в центре масс опорного КА, ось Oy направлена по его радиус-вектору, ось Ox в плоскости орбиты – по направлению движения, а ось Oz дополняет до правой. Для обеспечения инспекционного движения необходимо обеспечить замкнутую траекторию движения инспектора относительно опорного КА в ОСК. Для этого необходимо выполнение условия равенства периодов обращения каждого КА по своей орбите:

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{и}}. \quad (1)$$

Если движение космических аппаратов рассматривается в центральном гравитационном поле, тогда формирование замкнутой относительной траектории легко обеспечить путем равенства больших полуосей орбит каждого КА. Тогда выполняется и условие (1). Однако, если гравитационное поле оказывается неоднородным или учитываются другие виды возмущений, или одновременно оба этих фактора, выполнение условия (1) с течением времени нарушается. В таких условиях замкнутые траектории не существуют, и их форма изменяется со временем. В данной работе в качестве возмущающего воздействия учитывается нецентрального гравитационное поле Луны. Рассматриваются низкие круговые лунные орбиты, на которых влиянием гравитации других тел можно пренебречь.

Целью данной работы является выбор начальных параметров движения, которые позволяют сохранить инспекционную траекторию на лунных орбитах с учетом сложного гравитационного поля Луны.

2. Математическая описание

На высоких и даже средних лунных орбитах гравитационные поля Земли и Солнца могут существенно повлиять на траекторию движения КА. Лунная атмосфера крайне разрежена, а ее магнитное поле в тысячу раз слабее, чем у Земли, что позволяет исключить их из математической модели движения. [1]

Математическая модель относительного движения КА включает в себя систему уравнений, описывающих возмущенное движение центров масс каждого КА в инерциальной абсолютной селеноцентрической системе координат (АССК), а также в модели используются известные матрицы перехода из ОСК в инерциальную (в данном случае в АССК) и обратно.

$$\begin{aligned} \frac{dX_{\text{оп}}}{dt} &= V_{x\text{оп}}, & \frac{dX_{\text{и}}}{dt} &= V_{x\text{и}}, \\ \frac{dY_{\text{оп}}}{dt} &= V_{y\text{оп}}, & \frac{dY_{\text{и}}}{dt} &= V_{y\text{и}}, \\ \frac{dZ_{\text{оп}}}{dt} &= V_{z\text{оп}}, & \frac{dZ_{\text{и}}}{dt} &= V_{z\text{и}}, \\ \frac{dV_{x\text{оп}}}{dt} &= -\frac{\mu}{r_{\text{оп}}^3} X_{\text{оп}} + f_x^{\text{оп}}, & \frac{dV_{x\text{и}}}{dt} &= -\frac{\mu}{r_{\text{и}}^3} X_{\text{и}} + f_x^{\text{и}}, \\ \frac{dV_{y\text{оп}}}{dt} &= -\frac{\mu}{r_{\text{оп}}^3} Y_{\text{оп}} + f_y^{\text{оп}}, & \frac{dV_{y\text{и}}}{dt} &= -\frac{\mu}{r_{\text{и}}^3} Y_{\text{и}} + f_y^{\text{и}}, \\ \frac{dV_{z\text{оп}}}{dt} &= -\frac{\mu}{r_{\text{оп}}^3} Z_{\text{оп}} + f_z^{\text{оп}}, & \frac{dV_{z\text{и}}}{dt} &= -\frac{\mu}{r_{\text{и}}^3} Z_{\text{и}} + f_z^{\text{и}}, \end{aligned}$$

где μ – гравитационный параметр Луны; $X_{оп}, Y_{оп}, Z_{оп}, X_{и}, Y_{и}, Z_{и}$ – координаты КА (оп – опорный, и – инспектор); $V_{хоп}, V_{уоп}, V_{зоп}, V_{хв}, V_{ув}, V_{zv}$ – проекции скорости КА; $r_{оп}, r_{и}$ – модули радиусов-векторов КА, $f_x^{оп}, f_x^{оп}, f_x^{оп}, f_x^{и}, f_x^{и}, f_x^{и}$ – проекции возмущающего ускорения, вызванного нецентральностью гравитационного поля Луны.

Гравитационное поле Луны описывается с помощью сферического гармонического разложения, в котором можно выделить различные элементы, такие как связанные полиномы Лежандра и коэффициенты. Эти коэффициенты классифицируются по порядку и делятся на зональные, секторальные и тессеральные гармоники. Гравитационный потенциал Луны сложный, поскольку он зависит от распределения массы, рельефа и геометрической формы [2]. В данной работе в качестве модели гравитационного поля Луны используется модель LP165P, которая была создана на основе анализа высокоточных измерений, полученных в ходе лунных миссий. Она описывает гравитационное поле с порядком 165x165.

Для исследования изменения относительной траектории инспектора с течением времени, был проведен анализ ее эволюции как плоской замкнутой фигуры в форме эллипса. Такая форма относительной траектории получается через один виток в центральном гравитационном поле, когда опорный КА движется по круговой орбите, при выполнении двух условий. Первым условием является то, что начальная скорость инспектора в АССК определяется из интеграла энергии:

$$V_{0и} = \sqrt{\frac{2\mu}{r_{и}} - \frac{\mu}{r_{оп}}}.$$

Вторым условием является то, что начальные условия движения инспектора в ОСК (v_{x0} и v_{y0}) определяются из выражения связи АСК и ОСК:

$$\begin{cases} V_{0и}^2 = (v_{x0} + \omega_{0орб}y_0 + V_{n0оп})^2 + (v_{y0} - \omega_{0орб}x_0 + V_{r0оп})^2, \\ v_{y0} = \omega_{0орб}x_0/2 \end{cases}, \quad (2)$$

где $\omega_{0орб}$ – начальная орбитальная угловая скорость опорного КА; $V_{n0оп}, V_{r0оп}$ – нормальная и радиальная проекции начальной скорости опорного КА в АССК [3].

3. Результаты моделирования

На первом этапе моделирования был установлен характер изменения относительной траектории инспектора. В результате исследования выявлено, что траектория осуществляет сложное движение, которое представляет собой сумму трех движений в ОСК: перемещения вдоль оси Ox , а также вращения вокруг осей Oy и Ox (рис. 1). Эти движения делают инспекционную траекторию нестабильной и могут привести к потере связи с опорным КА или даже к их столкновению. Скорость этих движений меняет срок активного существования, сокращая его. Если начальные параметры движения выбраны неудачно, тогда возникает необходимость корректировки траектории с помощью приложения импульсов скорости, что предполагает наличие двигателей на борту инспектора.

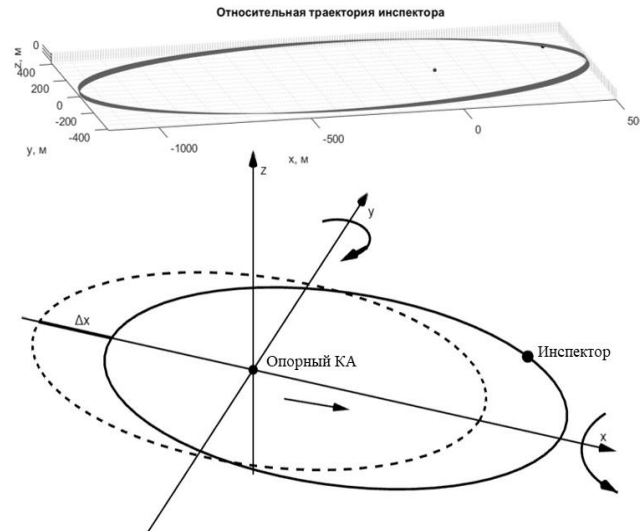


Рис. 1. Моделирование относительной траектории за 20 витков (сверху), диаграмма характера изменения относительной траектории (внизу)

В связи с тем, что учет различного количества гармоник, входящих в разложение потенциала гравитационного поля Луны, вносит значительное влияние на скорость изменения относительной траектории, возникает задача выбора достаточного порядка его разложения. Увеличение количества гармоник значительно повышает время вычислений, в то время как их недостаточное количество может привести к снижению точности полученных результатов. На сегодняшний день нет универсального согласования оптимального числа гармоник, которое обеспечивало бы достаточно точное описание орбитального движения. В ходе исследования было проанализировано влияние порядка разложения на смещение относительной траектории по оси Ox в ОСК, так как именно этот сдвиг является наиболее значимым параметром для стабильности траектории.

На рис. 2 показана зависимость максимального смещения относительной траектории инспектора по оси Ox в ОСК в зависимости от количества учитываемых гармоник гравитационного поля Луны. Исследование проведено для круговых орбит опорного КА с высотой 200 км на различных наклонениях с шагом в 10 градусов.

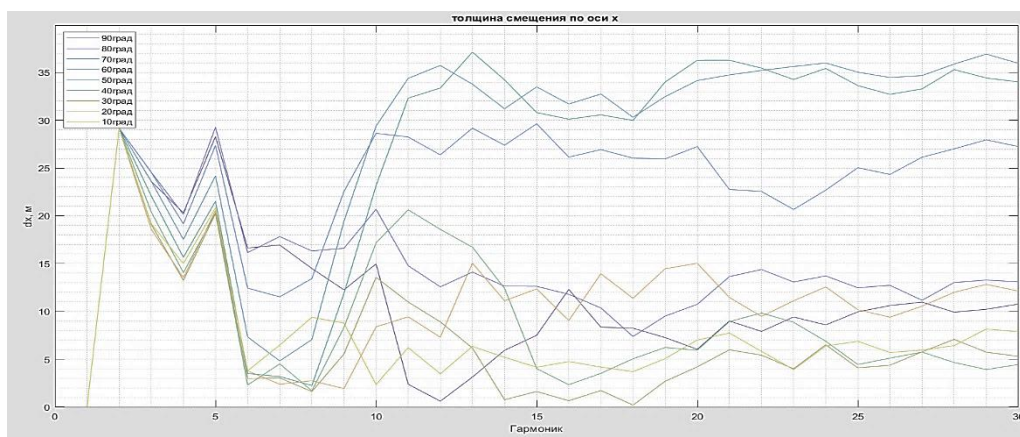


Рис. 2. Максимальное смещение относительной траектории в зависимости порядка разложения потенциала гравитационного поля Луны при разных наклонениях орбиты опорного КА

Из рис. 2 можно сделать вывод о том, что количество гармоник для учета при моделировании относительного движения составляет 15, после чего колебание значений смещения остается в пределах относительно небольшого диапазона. Таким образом, в дальнейшем исследовании порядок разложения гравитационного поля будет 15×15 .

Время активного существования космического аппарата на орбите является важным параметром, который в значительной степени влияет на успешность миссии. Существуют исследования, направленные на выявление параметров лунных орбит, которые бы обеспечивали длительное время существования КА.

В таблице 1 представлены орбиты, выбранные для моделирования движения опорного КА. Орбита D считается замороженной, так как ее эксцентриситет и аргумент перицентра остаются практически неизменными. [4] Параметры этой орбиты были рассчитаны численными методами, при использовании гравитационной модели Луны LP100J порядка 50×50 . Орбиты B и C представляют собой долгосрочные орбиты, которые повторяют свое географическое положение. [5] Эти орбиты были получены полуаналитическими методами с учетом влияния гравитационного поля Земли, и с применением гравитационной модели LP150Q порядка 50×50 . Орбиты E и F – это стабильные орбиты, полученные с помощью моделирования пассивного движения. [6] Для оценки стабильности использовались такие критерии, как изменение и дисперсия параметров орбиты. В процессе моделирования применялась гравитационная модель LP165P, сокращенная до порядка 12×12 , с учетом возмущений, вызванных влиянием Земли и Солнца. Орбита A основана на результатах, показанных на графике 2.

В таблице 1 приняты следующие обозначения: a – большая полуось; Ω – долгота восходящего узла; ω – аргумент перицентра; i – наклонение; e – эксцентриситет; h_π – высота перицентра; h_a – высота апоцентра.

Таблица 1. Орбитальные характеристики опорного КА

	A	B	C	D	E	F
a (м)	1 838 000	1 861 791	1 838 000	1 838 000	1 838 000	1 838 000
Ω (°)	0	-158.95	0	0	0	0
ω (°)	0	-78.39	90	0	0	0
i (°)	30	92.98	94.08	95	27	50
e	0	0.02	0	0	0	0
h_π (м)	100 000	86 555	100 000	100 000	100 000	100 000
h_a (м)	100 000	161 027	100 000	100 000	100 000	100 000

Согласно описанным выше источникам [3–6], орбиты, представленные в табл. 1, являются наиболее предпочтительными для осуществления лунных миссий. В связи с этим, было принято решение провести исследование формирования инспекционного движения именно на этих орбитах.

Для моделирования относительной инспекционной траектории на каждой орбите опорного космического аппарата было установлено начальное положение инспектора в ОСК и его скорость. Начальные координаты и проекции скорости инспектора $x_0 = 400$ м, $y_0 = 200$ м, $v_{y0} = 0.17$ м/с. Движение рассматривалось на интервале 20 витков по орбите вокруг Луны, что соответствует 20 облетам инспектора вокруг опорного КА.

Полученные в результате моделирования смещения относительной траектории по каждой оси в ОСК представлены в табл. 2.

Таблица 2. Орбитальные характеристики опорного КА

	A	B	C	D	E	F
Смещение Δx (м)	12.97	61.93	14.70	12.58	17.4/ 4.57	29.30/42.21
Смещение Δy (м)	5.03	1.67	6.00	6.04	3.71	3.66
Смещение Δz (м)	4.38	2.20	7.34	13.28	4.60	17.63
Время существования (дни)	51	12	78	83	82	13

Время нахождения на орбите явно зависит от числа гармоник гравитационной модели. Например, в случае орбиты F аппараты находятся на ней всего 13 дней, прежде чем столкнуться с поверхностью Луны, если увеличить порядок гармоник с 12x12 до 15x15. В свою очередь, наблюдается зависимость времени существования от типа используемой модели. Орбита B, считающаяся стабильной, может утратить свою стабильность при применении модели LP165P.

В начальный момент времени начальные условия выбраны так, что относительная траектория расположена в плоскости орбиты опорного КА, однако, под воздействием возмущения она постепенно выходит за ее пределы, что приводит к отклонениям по всем трем осям. Хотя поступательное движение по оси Ox в наибольшей степени влияет на стабильность инспекционного движения (Δx принимает большие значения, чем остальные), смещения по другим осям также могут быть существенными.

Сделан вывод, что орбиты B и F не подходят для длительных миссий и, соответственно, для задач инспекции.

Наблюдается взаимосвязь между стабильностью орбиты и смещением на оси Ox . Это видно в B и F, которые демонстрируют наибольшие значения смещения Δx .

Орбита A показывает наименьшее отклонение по оси Ox и минимальные отклонения по осям Oy и Oz , занимая четвертое место из рассмотренных по времени существования на орбите. Орбиты E и F имеют два значения отклонения по оси Ox , поскольку помимо смещения орбиты, эксцентриситет эллипса также изменяется со временем. Несмотря на то, что орбита E имеет небольшие отклонения от начальной траектории и является одной из самых длинных по времени на орбите, эффект изменения эксцентриситета относительной траектории из-за увеличения длины ее большей оси влияет на ее устойчивость. Орбиты C и D показывают наибольшую стабильность относительных траекторий; важно отметить, что эти орбиты являются полярными, что совпадает с результатами других исследований, подчеркивающих преимущества лунных полярных орбит. Выбор типа орбиты всегда зависит от конкретной миссии: если для миссии с инспекционной задачей требуется неполярная орбита, то орбита A может рассматриваться в качестве подходящего варианта.

Аналогичное исследование было проведено для изучения инспекционного движения на трех высоких орбитах [5], параметры и результаты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3. Смещение по осям относительной траектории на высоких орбитах

	G	H	I
a (м)	4 996 648	5 046 738	4 400 000
Ω (°)	146.72	177.63	270
ω (°)	89.22	-4.049	220
i (°)	52.21	70.64	66
e	0.538	0.000242	0
h_{π} (м)	570 451	3 307 517	2 662 000
h_a (м)	594 685	3 309 959	2 662 000
Δx (м)	92.55	2.88	2.33
Δy (м)	29.65	0.078	0.37
Δz (м)	3.49	0.46	0.66
Время существования (дни)	>365	>365	>365

Орбиты G и H относятся к тому же классу, что и орбиты В и С. Орбита I была найдена в процессе анализа орбит, подходящих для навигационной системы на Луне, с учетом следующих возмущений: нецентральное поле Луны порядка 8×8 , а также влияние Земли и Солнца. [7]

Видно, что величина эксцентриситета орбиты опорного КА оказывает значительное влияние на стабильность относительной траектории. Как H, так и I можно рассматривать как круговые орбиты. Орбита G представляет собой эллиптическую орбиту, на которой отклонения инспекционного движения по осям достигают максимальных значений среди рассчитанных. Эксцентриситет орбиты также изменяет форму относительной траектории, что иллюстрируется на рис. 3. В связи с этим, ее больше нельзя оценивать как эллипс, и, следовательно, геометрические характеристики этой фигуры не могут служить критериями оценки.

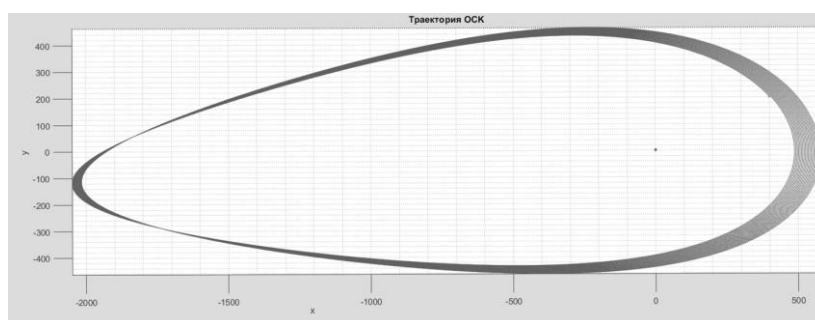


Рис. 3. Относительная траектория на эллиптической орбите опорного КА

Высота орбиты, возможно, повышает степень устойчивости относительного движения, но важно помнить, что модель движения не учитывает возмущения от третьих тел, хотя на таких высотах Земля влияет на пассивное движение КА больше, чем некоторые гармоники гравитационного поля Луны.

Заключение

В данной работе было проведено моделирование относительного движения двух КА на низких лунных круговых орбитах. В качестве орбит для опорного КА были выбраны долгосрочные, стабильные и замороженные орбиты, что позволило проанализировать их применимость для выполнения задачи инспекции.

Начальные скорости инспектора были выбраны таким образом, чтобы обеспечить выполнение замкнутых относительных траекторий при невозмущенном движении. А моделирование движения проводилось с учетом сложного гравитационного поля Луны.

По результатам исследования поведения траектории сделан вывод о том, что относительная траектория испытывает три основных вида смещения в ОСК: перемещение вдоль оси Ox , вращение вокруг осей Oy и Ox . Также показано, что для анализа относительного движения КА на орбитах вокруг Луны целесообразно использовать 15 гармоник гравитационного потенциала.

Каждая относительная траектория была проанализирована с учетом отклонений по осям. В результате исследования было установлено, что не все рассмотренные стабильные орбиты, на которых КА имеет длительное время существования, подходят для выполнения инспекционных задач. Полярные орбиты продемонстрировали свои преимущества, благодаря способности лучше адаптироваться и проявлять меньшую нестабильность в случае инспекционного движения. В ходе исследования на неполярных орбитах было выявлено, что происходит увеличение относительного эксцентриситета относительной траектории с течением времени. В дальнейшей работе планируется провести исследование связи между эксцентриситетом орбиты опорного КА и сохранением инспекционной траектории, а также связи между высотой орбиты и устойчивостью относительного движения.

Полученные результаты имеют важное значение для разработки стратегии инспекционных задач на низких лунных орбитах, позволяя улучшить эффективность и надежность будущих миссий.

Список источников

1. Vilana E.C. Study of spacecraft orbits in the gravity field of the moon [Электронный ресурс] // Projecte/Treball Final de Carrera, UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa URL: <http://hdl.handle.net/2099.1/15241> (дата обращения: 30.10.2024).
2. Konopliv A.S., Asmar S.W., Carranza E., Sjogren W.L., Yuan D.N. Recent Gravity Models as a Result of the Lunar Prospector Mission // *Icarus*. 2001. № 150. С. 1–18.
3. Scherbakov M.S., Avariaskin D.P. Studying problems on choosing stable orbits of nanosatellites to provide passive and periodic relative trajectories // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Т. 1536, № 1. 8 с.
4. Ramanan R.V., Adimurthy V. An analysis of near-circular lunar mapping orbits. // *J Earth Syst Sci*. 2005. № 114. С. 619–626.
5. Russell R., Lara M. Repeat Ground Track Lunar Orbits in the Full-Potential Plus Third-Body Problem // *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*. 2006. № 6750.
6. Чунжуй Д., Старинова О.Л. Анализ стабильности низких селеноцентрических орбит // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2020. № 10. 19 с.
7. Гордиенко Е.С., Ивашкин В.В., Симонов А.В. Анализ устойчивости орбит искусственных спутников луны и выбор конфигурации лунной навигационной спутниковой системы // *Вестник НПО им. С. А. Лавочкина*. 2016. № 34. С. 40–54.

References

1. Vilana, E. C. (2012), "Study of spacecraft orbits in the gravity field of the moon", Projecte/Treball Final de Carrera, UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa, [Online], available at: <http://hdl.handle.net/2099.1/15241> (Accessed 15 Nov 2024).

2. Konopliv, A.S., Asmak, S.W., Carranza, E., Sjogren, W.L. and Yuan, D.N. (2001), "Recent Gravity Models as a Result of the Lunar Prospector Mission", *Icarus*, no. 150, p. 1-18.
3. Scherbakov, M.S. and Avariaskin, D.P. (2020), "Studying problems on choosing stable orbits of nanosatellites to provide passive and periodic relative trajectories", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1536, no. 1, 8 p.
4. Ramanan, R.V. and Adimurthy, V. (2005), "An analysis of near-circular lunar mapping orbits", *J Earth Syst Sci*, no. 114, p. 619–626.
5. Russell, R. and Lara, M. (2006), "Repeat Ground Track Lunar Orbits in the Full-Potential Plus Third-Body Problem", *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, no. 6750, 19 p.
6. Chunzhu, D. and Starinova, O.L. (2020), "Analysis of the stability of low selenocentric orbits", *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii*, no. 10, 19 p.
7. Gordienko, E.S., Ivashkin, V.V. and Simonov, A.V. (2016) "Analysis of the stability of orbits of artificial satellites of the moon and the choice of the configuration of the lunar navigation satellite system", *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, no. 34, p. 40-54.

Информация об авторах:

Д. П. Аваряскин – кандидат технических наук, доцент, доцент межвузовской кафедры космических исследований Самарского университета им. С.П. Королева (443086, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34), член Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского, eLibrary AuthorID 820858, Scopus AuthorID: 56286796800;

Д. П. Вака Веласкес – студент Самарского университета им. С.П. Королева (443086, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34).

Information about the authors:

D. P. Avariaskin – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor; Associate Professor of Inter-University Space Research Department of Samara National Research University (34, Moskovskoye shosse, Samara, Russia, 443086); member of Russian academy of cosmonautics named after K.E. Tsiolkovskii, eLibrary AuthorID 820858, Scopus AuthorID: 56286796800;

D. P. Vaca Velasquez – student of Samara National Research University (34, Moskovskoye Shosse, Samara, Russia, 443086).

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 629.78

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-28-40

<https://elibrary.ru/fruubi>



Исследование плоского углового движения наноспутника стандарта CubeSat с помощью фазовых портретов-

Елена Витальевна Барина¹, Иван Александрович Тимбай², Евгений Миронов³

^{1,2,3}Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

¹L5545@yandex.ru

²timbai@mail.ru

³mironovevgeniy01@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается плоское движение относительно центра масс наноспутника стандарта CubeSat под действием аэродинамического и гравитационного моментов на низких околоземных орбитах. Для качественной оценки параметров движения используется метод фазовой плоскости. Получены условия, при которых происходит смена типа фазового портрета. Найдены аналитические выражения для определения положений равновесия наноспутника относительно центра масс при смещении центра давления относительно центра масс по двум координатам. Проводится сравнение двух моделей движения: исходной модели, которая учитывает форму наноспутника и его положение относительно набегающего потока, и упрощенной, в которой зависимость аэродинамического момента от угла атаки аппроксимируется синусоидой.

Ключевые слова: наноспутник; CubeSat; положения равновесия; фазовые портреты; аэродинамический момент; гравитационный момент

Для цитирования: Барина Е.В., Тимбай И.А., Миронов Е. Исследование плоского углового движения наноспутника стандарта Cubesat с помощью фазовых портретов // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 28–40. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-28-40. <https://elibrary.ru/fruubi>.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

Статья поступила в редакцию 30.01.2025; одобрена после рецензирования 17.02.2025; принята к публикации 15.03.2025.

MECHANICS

Research article

Study of Plane Angular Motion of a CubeSat Nanosatellite Using Phase Portraits

Elena V. Barinova¹, Ivan A. Timbai², Evgeniy Mironov³

^{1,2,3}Samara National Research University, Samara, Russia



Эта работа © 2025 Барина Е.В., Тимбай И.А., Миронов Е. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы посмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

¹L5545@yandex.ru

²timbai@mail.ru

³mironovevgeniy01@gmail.com

Abstract. This paper considers the plane motion relative to the center of mass of CubeSat nanosatellites under the action of aerodynamic and gravitational moments in low Earth orbits. The phase plane method is used for qualitative assessment of motion parameters. Conditions under which the type of phase portrait changes have been obtained. Analytical expressions have been found to determine the equilibrium positions of a nanosatellite relative to the center of mass in the orbital coordinate system with a displacement of the center of pressure relative to the center of mass along two coordinates. Two models of angular motion are compared: the original model, which takes into account the shape of the nanosatellite and its position relative to the oncoming flow, and a simplified one, in which the dependence of the aerodynamic moment on the angle of attack is approximated by a sinusoid.

Keywords: *nanosatellite; CubeSat; equilibrium positions; phase portraits; aerodynamic moment; gravitational moment*

For citation: Barinova, E. V., Timbai, I. A. and Mironov, E. (2025), "Study of Plane Angular Motion of a CubeSat Nanosatellite Using Phase Portraits", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 28-40. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-28-40. <https://elibrary.ru/fruubi>.

Acknowledgments: the research is supported by the Russian Science Foundation (No. 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>).

The article was submitted 30.01.2025; approved after reviewing 17.02.2025; accepted for publication 15.03.2025.

Введение

Наноспутники (НС) стандарта CubeSat [1] в настоящее время широко используются не только для учебных миссий, но и для исследования Земли и околоземного космического пространства. Успех подобных миссий во многом зависит от соблюдения заданной ориентации НС в пространстве. Для приведения и поддержания НС в требуемом угловом положении часто используют системы пассивной или комбинированной стабилизации. При этом важным этапом при их проектировании является определение положений углового равновесия наноспутника и исследование его динамики в их окрестности. Исследовать движение относительно центра масс НС можно по полной системе дифференциальных уравнений, для которой возможно определить только численное решение. При численном интегрировании довольно сложно определить причины, обуславливающие тот или иной характер движения НС. Поэтому целесообразен поиск приближенных аналитических решений, позволяющих увидеть связь между условиями полета, параметрами НС и его динамикой.

Одним из эффективных методов изучения характера углового движения является метод фазовой плоскости. В работе [2] рассматривается космический аппарат с синусоидальной зависимостью аэродинамического момента от угла атаки, что характерно для аппаратов, имеющих форму сферы или тонкого конуса. С использованием фазовых портретов проводится анализ углового движения аппарата под действием аэродинамического и гравитационного моментов.

Одной из важных особенностей НС стандарта CubeSat является то, что они имеют форму прямоугольного параллелепипеда, поэтому аэродинамический момент имеет более сложную зависимость, чем у аппаратов сферической формы. Целью данной работы является исследование движения относительно центра масс наноспутника стандарта CubeSat под действием аэродинамического и гравитационного моментов в плоскости круговой орбиты.

1. Постановка задачи

Для проведения качественного анализа движения наноспутника стандарта CubeSat относительно центра масс, используется модель углового движения в плоскости круговой орбиты под действием гравитационного момента и аэродинамического восстанавливающего момента [3]:

$$\ddot{\alpha} - (a_x \sin(\alpha) + a_z \cos(\alpha))(|\cos(\alpha)| + k_s |\sin(\alpha)|) - c \sin(2\alpha) = 0, \quad (1)$$

где α – угол атаки (угол между вектором скорости и продольной осью НС);

$a_x = \frac{x_d c_0 S q}{J_y}$, $a_z = -\frac{z_d c_0 S q}{J_y}$ – коэффициенты, обусловленные действием аэродинамического момента; $c = \frac{3(J_z - J_x) \omega_{орб}^2}{2J_y}$ – коэффициент, обусловленный действием гравитационного момента; $c_0 = 2,2$ – коэффициент, который может принимать значения от 2 до 3, в зависимости от физических свойств газа и поверхности НС, для проектных проработок принимается равным 2,2; S – характерная площадь НС; J_x , J_y , J_z – главные центральные моменты инерции НС; x_d , z_d – положение центра давления (геометрического центра) НС относительно центра масс; k_s – отношение площади одной из боковых поверхностей к характерной площади; $\omega_{орб} = \sqrt{\mu/(R_3 + H)^3}$ – орбитальная угловая скорость; $q(H) = \rho(H)[V(H)]^2/2$ – скоростной напор; H – высота полета; $V(H) = \sqrt{\mu/(R_3 + H)}$ – скорость полета; $\rho(H)$ – плотность атмосферы; R_3 – радиус Земли; μ – гравитационный параметр Земли.

2. Определение положений равновесия и фазовые портреты

Фазовые портреты позволяют качественно исследовать динамику НС в окрестности положений равновесия. Положением равновесия является такое положение, в котором тело находится все время, при условии, что в начальный момент времени тело находилось в этом положении и скорости всех его точек равнялись нулю [4]. Из уравнения (1) получим уравнение для определения положений равновесия:

$$(a_x \sin(\alpha) + a_z \cos(\alpha))(|\cos(\alpha)| + k_s |\sin(\alpha)|) + c \sin(2\alpha) = 0. \quad (2)$$

Разрешая полученное выражение относительно угла α , получим выражение для определения положений равновесия в плоском случае:

$$\alpha^* = \arccotg \left(\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4a_z \operatorname{sign}(\cos \alpha) k_s a_x \operatorname{sign}(\sin \alpha)}}{2a_z \operatorname{sign}(\cos \alpha)} \right),$$

где $B = c + k_s a_z \operatorname{sign}(\sin \alpha) + a_x \operatorname{sign}(\cos \alpha)$.

С учетом значения функций $\text{sign}(\sin \alpha)$ и $\text{sign}(\cos \alpha)$ для каждой четверти, получены формулы определения положений равновесия по углу α :

$$\begin{aligned}\alpha_{1,2}^* &= \text{arctg} \left(\frac{-a_x - k_s a_z - 2c \pm \sqrt{(a_x + k_s a_z + 2c)^2 - 4k_s a_x a_z}}{2a_z} \right), \\ \alpha_{3,4}^* &= \text{arctg} \left(\frac{-a_x + k_s a_z + 2c \mp \sqrt{(-a_x + k_s a_z + 2c)^2 + 4k_s a_x a_z}}{2a_z} \right), \\ \alpha_{5,6}^* &= \text{arctg} \left(\frac{-a_x - k_s a_z + 2c \mp \sqrt{(-a_x - k_s a_z + 2c)^2 - 4k_s a_x a_z}}{2a_z} \right) - \pi, \\ \alpha_{7,8}^* &= \text{arctg} \left(\frac{-a_x + k_s a_z - 2c \pm \sqrt{(a_x - k_s a_z + 2c)^2 + 4k_s a_x a_z}}{2a_z} \right) - \pi.\end{aligned}\quad (3)$$

Возможные комбинации этих положений, в зависимости от смещения геометрического центра относительно центра масс (x_d, z_d) и модуля коэффициента $|c|$, обусловленного действием гравитационного момента, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Положения углового равновесия в случае движения в плоскости орбиты

	$x_d > 0,$ $z_d > 0$	$x_d < 0,$ $z_d < 0$	$x_d < 0,$ $z_d > 0$	$x_d > 0,$ $z_d < 0$	Кол-во положе- ний рав- новесия
$ c < 0,5a_1$	α_2^*, α_5^*	α_1^*, α_6^*	α_4^*, α_7^*	α_3^*, α_8^*	2
$ c > 0,5a_1$	$\alpha_2^*, \alpha_3^*, \alpha_4^*, \alpha_5^*$	$\alpha_1^*, \alpha_6^*, \alpha_7^*, \alpha_8^*$	$\alpha_1^*, \alpha_2^*, \alpha_4^*, \alpha_7^*$	$\alpha_3^*, \alpha_5^*, \alpha_6^*, \alpha_8^*$	4

где $a_1 = (\sqrt{|a_x|} + \sqrt{k_s |a_z|})^2$.

Из таблицы 1 видно, что вне зависимости от значения $|c|$ существует 2 положения равновесия, а при соблюдении условия $|c| > 0,5a_1$ количество положений увеличивается до 4.

Для случая $x_d \neq 0, z_d = 0$ данными результатами воспользоваться нельзя, так как тогда $a_z = 0$. Запишем уравнение (2) для этого случая:

$$(a_x(H)|\cos \alpha| + k_s a_x(H)|\sin \alpha| + 2c(H) \cos \alpha) \sin \alpha = 0.$$

Тогда при любом соотношении коэффициентов, обусловленных действием аэродинамического и гравитационного моментов, реализуются положения равновесия $\alpha_1^* = 0$ и $\alpha_2^* = \pi$. При соблюдении условия $|c| > 0,5|a_x|$ имеют место дополнительные положения равновесия:

$$\alpha_{3,4}^* = \text{arctg} \left(\frac{-k_s a_x}{2c \pm a_x} \right), \quad \alpha_{5,6}^* = \text{arctg} \left(\frac{k_s a_x}{2c \mp a_x} \right) - \pi.$$

Если знаки величин a_x и c совпадают, то положения равновесия следует вычислять по формулам для α_4^* и α_5^* . Если знаки a_x и c противоположны, то положения равновесия следует вычислять по формулам для α_3^* и α_6^* .

Для случая $x_d = 0, z_d \neq 0$ уравнение (2) примет вид

$$(a_z(H)|\cos \alpha| + k_s a_z(H)|\sin \alpha| + 2c(H) \sin \alpha) \cos \alpha = 0.$$

Тогда при любом соотношении аэродинамического и гравитационного моментов реализуются положения равновесия $\alpha_1^* = \frac{\pi}{2}$ и $\alpha_2^* = -\frac{\pi}{2}$. И имеют место дополнительные положения равновесия при выполнении условия $|c| > 0,5|k_s a_z|$.

Если знаки величин a_z и c совпадают, то положения равновесия следует вычислять по формулам

$$\alpha_{3,4}^* = \text{arccctg} \left(\frac{2c - k_s a_z}{\pm a_z} \right).$$

Если знаки величин a_z и c противоположны, то положения равновесия следует вычислять по формулам

$$\alpha_{5,6}^* = \text{arccctg} \left(\frac{2c + k_s a_z}{\mp a_z} \right) - \pi.$$

Для выяснения общих свойств уравнения (1) воспользуемся методом фазовой плоскости. Изменение высоты круговой орбиты вследствие сопротивления атмосферы происходит очень медленно, и при рассмотрении углового движения НС на одном или нескольких витках можно принять $H = \text{const}$. Интеграл энергии при этом имеет вид:

$$a_x u - a_z v + c \cos^2 \alpha + \frac{\dot{\alpha}^2}{2} = E_0.$$

Здесь u и v – функции от α :

$$u = \frac{1}{2} \text{sign}(\cos(\alpha)) \cos^2 \alpha + \frac{k_s}{2} \text{sign}(\sin(\alpha)) \left(\frac{\sin 2\alpha}{2} - \alpha + 2\pi \cdot \left\lfloor \frac{\alpha + \pi}{2\pi} \right\rfloor \right),$$

$$v = \frac{1}{2} \text{sign}(\cos(\alpha)) \left(\frac{\sin 2\alpha_0}{2} + \alpha - \frac{\pi}{2} - 2\pi \cdot \left\lfloor \frac{\alpha + \frac{\pi}{2}}{2\pi} \right\rfloor \right) + \frac{k_s}{2} \text{sign}(\sin(\alpha)) \sin^2 \alpha,$$

где $\lfloor x \rfloor$ – антье x (наибольшее целое число, не превосходящее x), $E_0 = a_x u(\alpha_0) - a_z v(\alpha_0) + c_1 \cos^2 \alpha_0 + \frac{\dot{\alpha}_0^2}{2}$ – определяется через начальные условия углового движения, α_0 – начальное значение угла α для соответствующей фазовой траектории. Характер движения НС определяется соотношением величин a_1 , c и E_0 . Имеют место три типа фазовых портретов.

На рисунках 1–3 приведены фазовые портреты системы (1) для случая $x_d \neq 0$, $z_d = 0$.

$|c| \leq 0,5|a_x|$. В данном случае преобладающим является аэродинамический момент. Фазовый портрет аналогичен колебательной системе маятникового типа (для случая $a_x > 0$ изображен на рис. 1). В этом случае НС имеет два положения равновесия по углу атаки – устойчивое при $\alpha = 0 + 2n\pi$ ($n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots$) и неустойчивое при $\alpha = \pi + 2n\pi$ ($n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots$).

Существуют две области движения НС: вращательная и колебательная, которые разделены сепаратрисой.

Для случая $a_x < 0$ картина сдвинется на π .

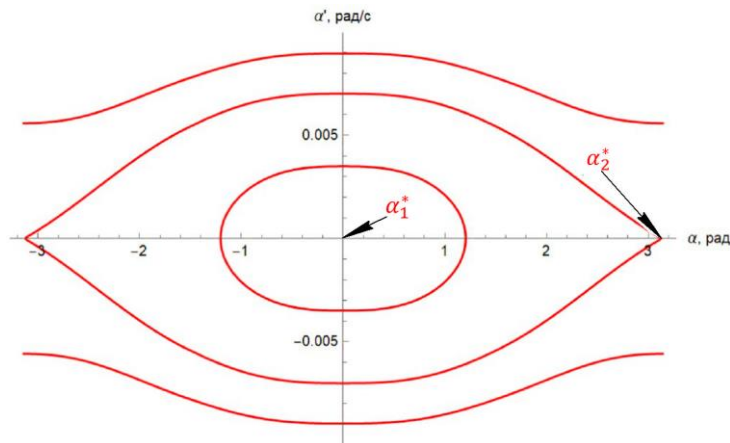


Рис. 1. Фазовый портрет: $|a| \geq 2|c|$

2. $c > 0,5|a_x|$, $c > 0$. В данном случае преобладающим является гравитационный момент. Фазовый портрет изображен на рис. 2. При таком соотношении имеют место четыре области движения НС: вращательная область и три колебательные области. В этом случае НС имеет четыре положения равновесия по углу атаки.

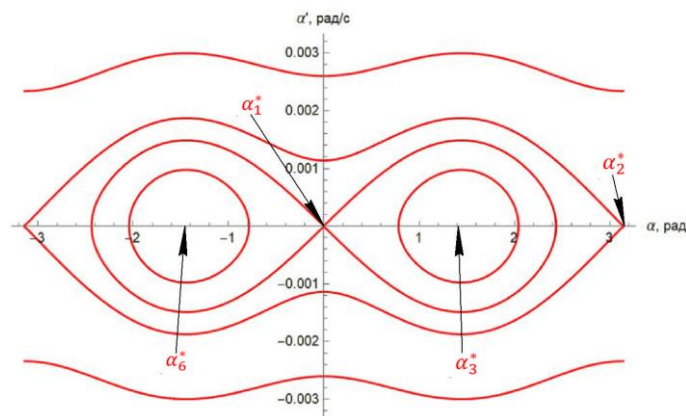


Рис. 2. Фазовый портрет: $c > 0,5|a|$, $c > 0$

3. $|c| > 0,5|a_x|$, $c < 0$. В данном случае преобладающим является гравитационный момент. При таком соотношении имеют место три области движения НС: вращательная область и две колебательные области (рис. 3). В этом случае НС имеет четыре положения равновесия по углу атаки.

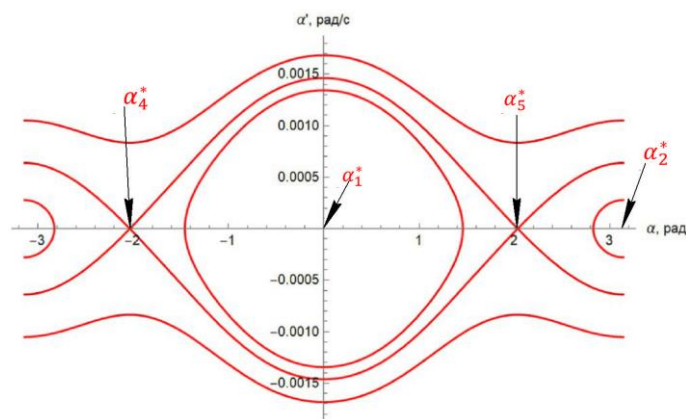


Рис. 3. Фазовый портрет: $|c| > 0,5|a|$, $c < 0$

Таким образом, в зависимости от знака коэффициента c , обусловленного действием гравитационного момента, и соотношения модулей коэффициентов возможны различные типы фазовых портретов. Для случая $x_d = 0$, $z_d \neq 0$ фазовый портрет первого типа (где преобладающим является аэродинамический момент) сдвинется на величину $\pm \frac{\pi}{2}$ в зависимости от знака z_d , а фазовые портреты второго и третьего типа кроме сдвига на $\pm \frac{\pi}{2}$ также меняются между собой местами. В более общем случае $x_d \neq 0$, $z_d \neq 0$ происходит сдвиг и деформация формы фазовых траекторий.

3. Упрощенная модель движения

В некоторых случаях качественная оценка движения НС возможна с использованием упрощенной модели плоского движения.

Рассмотрим случай, когда центр давления НС смещен только по продольной оси ($x_d \neq 0$, $z_d = 0$), в таком случае уравнение (1) примет вид:

$$\ddot{\alpha} - a_x(|\cos(\alpha)| + k_s|\sin(\alpha)|)\sin(\alpha) - c\sin(2\alpha) = 0.$$

Для упрощения вычислений разложим выражение $(|\cos(\alpha)| + k_s|\sin(\alpha)|)\sin(\alpha)$ в ряд Фурье по синусам, тогда нулевой член разложения a_0 будет иметь вид:

$$a_0 = \frac{4 + 8k_s}{3\pi}\sin(\alpha).$$

С учетом полученной аппроксимации синусом, исходное уравнение можно записать в виде:

$$\ddot{\alpha} - a \cdot \sin(\alpha) - c \cdot \sin(2\alpha) = 0, \quad (4)$$

где a – коэффициент, обусловленный аэродинамическим моментом, вычисляется по формуле:

$$a = \frac{(4 + 8k_s)c_0Sq}{3\pi J_y}x_d = \frac{(4 + 8k_s)}{3\pi}a_x.$$

Модель (4) используется в работах Белецкого [2] для анализа углового движения космического аппарата с синусоидальной зависимостью аэродинамического момента от угла атаки под действием аэродинамического и гравитационного моментов. Также эта модель использовалась в работах [3, 5] для предварительного анализа плоского движения НС CubeSat относительно центра масс.

На рис. 4 показан график сравнения величины $(|\cos(\alpha)| + k_s|\sin(\alpha)|)\sin(\alpha)$ с ее аппроксимированным значением $\frac{4+8k_s}{3\pi}\sin(\alpha)$.

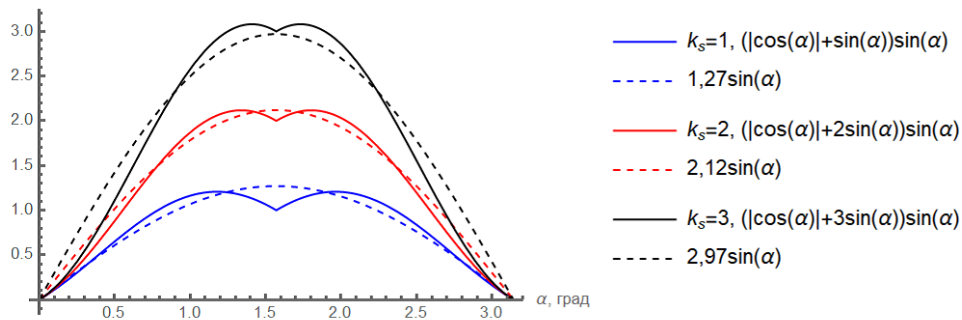


Рис. 4. Сравнение величины $(|\cos(\alpha)| + k_s|\sin(\alpha)|)\sin(\alpha)$ (сплошная линия) и ее аппроксимации синусоидальной зависимостью $\frac{4+8k_s}{3\pi}\sin(\alpha)$ (пунктирная линия)

Из графика видно, что по мере увеличения значения k_s точность снижается.

В зависимости от величин a и c возможны следующие комбинации положений равновесия:

1. При $|c| \leq 0,5|a|$ возможно 2 положения равновесия:

$$\begin{aligned}\alpha_1^s &= 0 + 2n\pi \quad (n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots), \\ \alpha_2^s &= \pi + 2n\pi \quad (n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots).\end{aligned}\quad (5)$$

2. При $|c| > 0,5|a|$ возможно 4 положения равновесия:

$$\begin{aligned}\alpha_1^s &= 0 + 2n\pi \quad (n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots), \\ \alpha_2^s &= \pi + 2n\pi \quad (n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots), \\ \alpha_3^s &= \arccos\left(-\frac{0,5a}{c}\right) + 2n\pi \quad (n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots), \\ \alpha_4^s &= -\arccos\left(-\frac{0,5a}{c}\right) + 2n\pi \quad (n = 0 \pm 1, \pm 2, \dots).\end{aligned}\quad (6)$$

Для упрощенной модели интеграл энергии имеет вид:

$$E_0 = a \cos \alpha_0 + c \cos^2 \alpha_0 + \frac{\dot{\alpha}_0^2}{2}.$$

Соответствующие фазовые портреты приведены в [2, с.128].

4. Сравнение моделей плоского движения

Проведем сравнение результатов расчета с использованием упрощенной модели, аппроксимированной синусом, и исходной модели углового движения.

Для примера рассмотрим НС формата CubeSat 3U с параметрами:

$$k_s = 3,4, S_{\text{хар}} = 0,01 \text{ м}^2, x_d = -0,012 \text{ м}, y_d = 0 \text{ м},$$

$$J_x = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J_z = 0,037 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J_y = 0,038 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Рассмотрим высоту $H = 300$ км, тогда $c = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$, $|a_1| = 2,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$, $|a| = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$. На этой высоте большее воздействие на угловое движение оказывает аэродинамический момент. Фазовый портрет имеет одну колебательную область (фазовый портрет первого типа, как показано на рис. 1) для исходной и для аппроксимированной моделей ($|c| < 0,5|a_1|$ и $|c| < 0,5|a|$). Плотность атмосферы рассчитывается по ГОСТ 4401-83 [6].

На рисунках 5–6 приведено сравнение фазовых портретов движения упрощенной модели (синяя пунктирная линия) и исходной модели (красная сплошная линия) для различных смещений z_d .

В таблицы 2 приведены значения положений равновесия, рассчитанные по исходной модели движения и по упрощенной, в зависимости от значения смещения z_d .

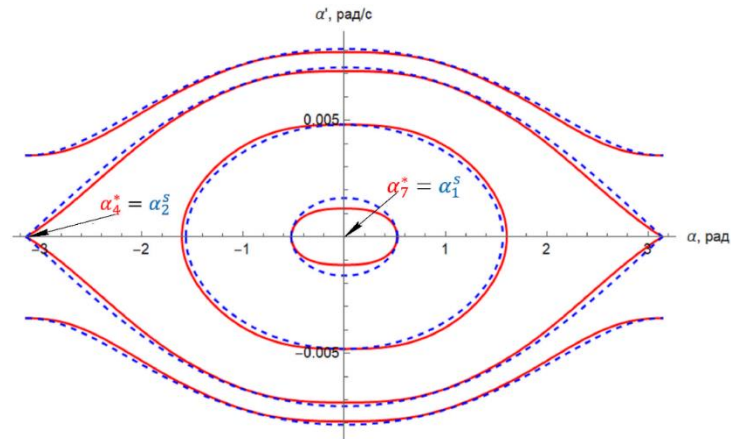


Рис. 5. Сравнение фазовых портретов при $z_d = 0$ м

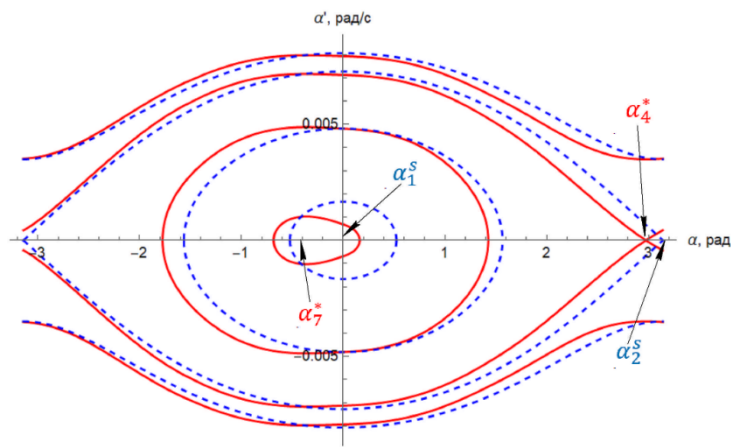


Рис. 6. Сравнение фазовых портретов при $z_d = 0,003$ м

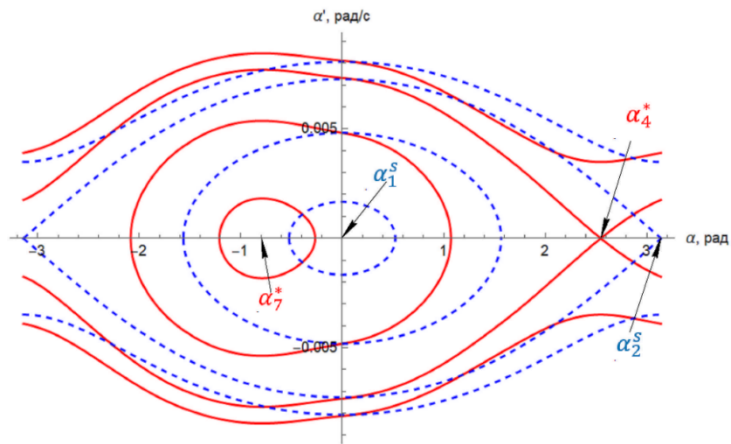


Рис. 7. Сравнение фазовых портретов при $z_d = 0,01$ м

Таблица 2. Положения равновесия для высоты $H=300$ км

z_d	0 м	0,001 м	0,003 м	0,005 м	0,008 м	0,01 м
α_1^s	0°	0°	0°	0°	0°	0°
α_7^*	0°	$-9,8^\circ$	$-21,3^\circ$	$-30,3^\circ$	$-40,7^\circ$	$-46,1^\circ$
$\Delta_1 = \alpha_1^s - \alpha_7^* $	0°	$9,8^\circ$	$21,3^\circ$	$30,3^\circ$	$40,7^\circ$	$46,1^\circ$
α_2^s	180°	180°	180°	180°	180°	180°
α_4^*	180°	$177,10^\circ$	$170,3^\circ$	$162,8^\circ$	$151,8^\circ$	$145,2^\circ$
$\Delta_2 = \alpha_2^s - \alpha_4^* $	0°	$2,9^\circ$	$9,7^\circ$	$17,2^\circ$	$28,2^\circ$	$34,8^\circ$

Можно сделать вывод, что при значении смещения $z_d = 0$, форма фазовых траекторий мало отличается (рис. 5), и положения равновесия совпадают (табл. 2). При этом при использовании упрощенной модели необходимо учитывать количественную ошибку оценки амплитуд. По мере увеличения величины z_d фазовые траектории начинают все больше расходиться, устойчивое положение равновесия α_7^* сдвигается влево (рис. 6, 7) и погрешность определения положений равновесия с использованием упрощенной модели углового движения возрастает (табл. 2).

На рисунках 8–9 приведено сравнение фазовых портретов движения упрощенной модели (синяя пунктирная линия) и исходной модели (красная сплошная линия) на высоте $H = 500$ км, для НС с приведенными выше параметрами ($c = 1,4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$, $|a_1| = 8,8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$, $|a| = 2,9 \cdot 10^{-7} \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$). Поскольку $|c| > 0,5|a_1|$, $|c| > 0,5|a|$, соблюдены оба условия существования дополнительных положений равновесия, при этом $c > 0$ и фазовый портрет имеет три колебательные области (фазовый портрет второго типа, как показано на рис. 2). В таблице 3 приведены значения положений равновесия, рассчитанные по исходной модели движения и по упрощенной, в зависимости от значения смещения z_d .

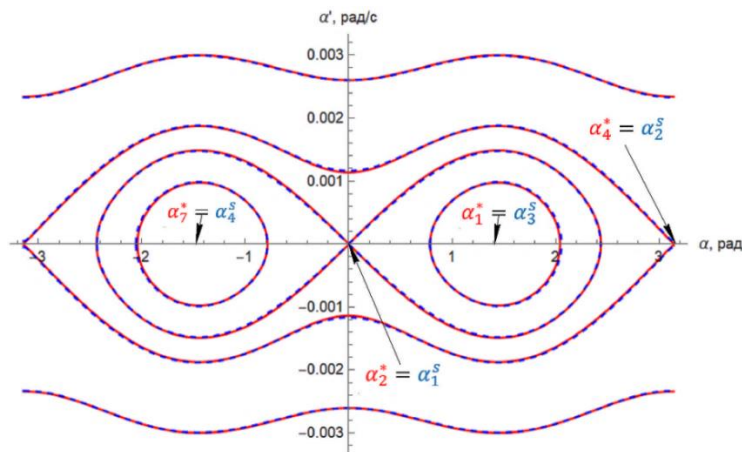


Рис. 8. Сравнение фазовых портретов при $z_d = 0$ м

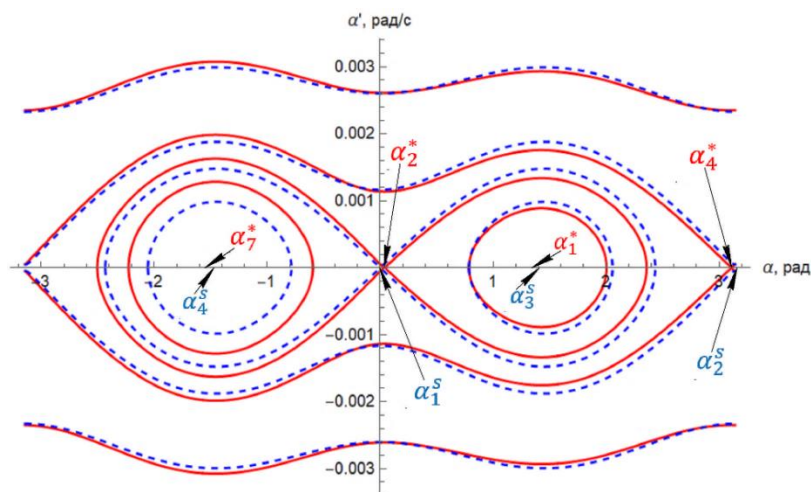


Рис. 9. Сравнение фазовых портретов при $z_d = 0,01$ м

Таблица 3. Положения равновесия для высоты $H=500$ км

z_d	0 м	0,001 м	0,003 м	0,005 м	0,008 м	0,01 м
α_1^s	0°	0°	0°	0°	0°	0°
α_2^*	0°	0,19°	0,6°	1°	1,6°	2,1°
$\Delta_1 = \alpha_1^s - \alpha_2^* $	0°	0,19°	0,6°	1°	1,6°	2,1°
α_2^s	180°	180°	180°	180°	180°	180°
α_4^*	180°	179,8°	179,5°	179,1°	178,5°	178,1°
$\Delta_2 = \alpha_2^s - \alpha_4^* $	0°	0,17°	0,5°	0,9°	1,5°	1,9°
α_3^s	83,1°	83,1°	83,1°	83,1°	83,1°	83,1°
α_1^*	82,7°	82,6°	82,5°	82,3°	82°	81,8°
$\Delta_3 = \alpha_3^s - \alpha_1^* $	0,4°	0,5°	0,7°	0,8°	1,1°	1,3°
α_4^s	-83,1°	-83,1°	-83,1°	-83,1°	-83,1°	-83,1°
α_7^*	-82,7°	-82,8°	-83,0°	-83,1°	-83,3°	-83,4°
$\Delta_4 = \alpha_4^s - \alpha_7^* $	0,4°	0,3°	0,16°	0,01°	0,2°	0,3°

Из рисунка 9 видно, что при увеличении величины z_d в исходной модели движения увеличивается левая колебательная область, а правая уменьшается, при этом устойчивые положения равновесия α_7^* и α_1^* также сдвигаются влево (рис. 9). В этом случае погрешность определения положений равновесия с использованием упрощенной модели углового движения возрастает с увеличением величины z_d (табл. 3).

Из данных, приведенных в таблицах 2 и 3, можно сделать вывод, что тип фазового портрета может влиять на величину погрешности определения положений равновесия при использовании упрощенной модели.

Сравним границу смены типа фазового портрета для упрощенной модели ($|c| > 0,5|a|$) и для исходной модели ($|c| > 0,5a_1$) на примере НС формата CubeSat 3U в зависимости от величин x_d, z_d, H (рис. 10). Пунктирной красной линией показана граница смены типа фазового портрета для упрощенной модели, сплошными линиями – для исходной при различных смещениях z_d .

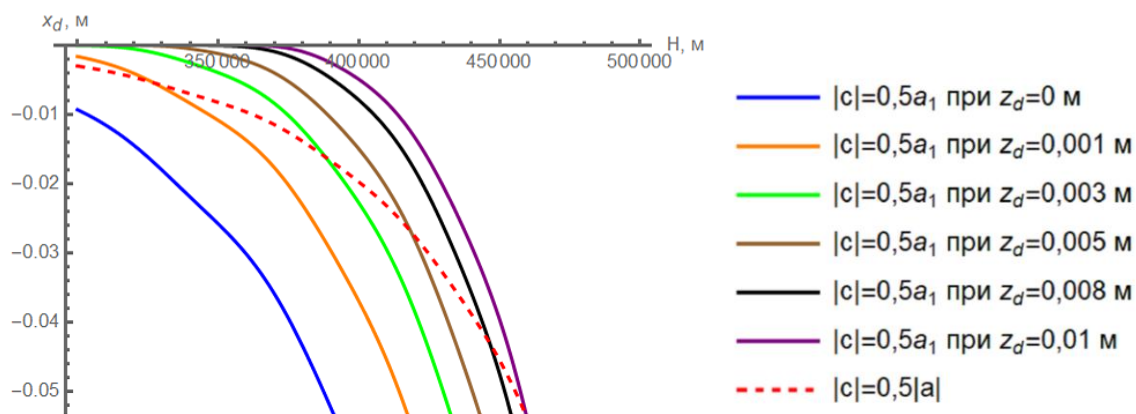


Рис. 10. Границы смены фазовых портретов

Из рисунка 10 можно найти область между пунктирной линией и соответствующей сплошной линией, где нельзя использовать упрощенную модель углового движения для анализа, поскольку в этой области качественно отличаются типы фазовых портретов.

Для иллюстрации рассмотрим точку (400 км, -0,014 м) для величины $z_d = 0,01$ м на параметрическом графике (рис. 10) для НС CubeSat формата 3U и построим фазовые портреты упрощенной (синяя пунктирная линия) и исходной (красная сплошная линия) моделей с данными параметрами (рис. 11).

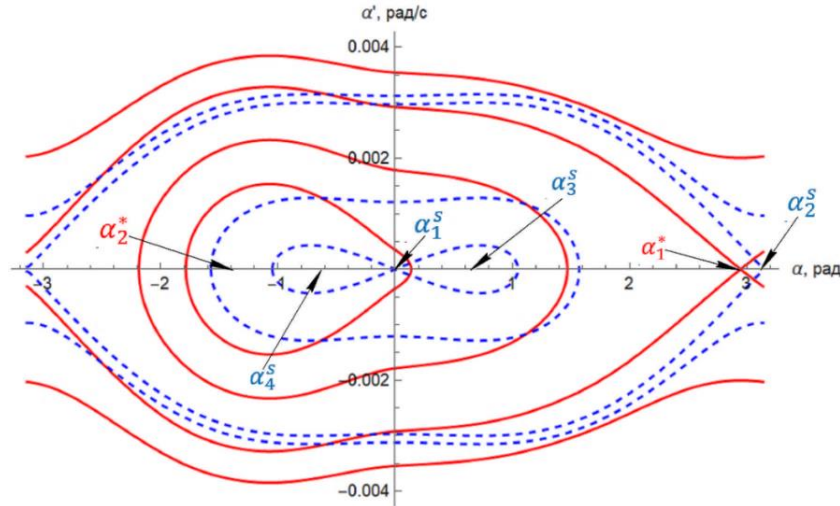


Рис. 11. Сравнение фазовых портретов при $z_d = 0,01$ м, $x_d = -0,014$ м, $H = 400$ км

Можно сделать вывод, что в данном случае нельзя использовать упрощенную модель движения для качественного анализа углового движения НС, поскольку типы фазовых портретов отличаются. Также нельзя использовать упрощенную модель углового движения для определения положений равновесия, так как при использовании формул (5) получим два угла, которые не будут являться положениями равновесия для исходной модели движения, у которой четыре положения равновесия.

Таким образом, помимо погрешности определения положений равновесия, при исследовании динамики углового движения НС стандарта CubeSat с использованием упрощенной модели необходимо учитывать ее применимость с учетом границы смены типа фазового портрета.

Заключение

В данной работе с использованием метода фазовой плоскости был проведен анализ плоского движения относительно центра масс наноспутника стандарта CubeSat под действием аэродинамического и гравитационного моментов на низких околоземных орбитах. Получены аналитические выражения для определения положений равновесий наноспутника относительно центра масс, а также условия их существования в зависимости от параметров НС и условий полета. Проведено сравнение исходной модели движения, учитывающей форму наноспутника стандарта CubeSat, и упрощенной, в которой аэродинамический момент аппроксимируется синусоидальной зависимостью от угла атаки. Определена область параметров, в которой использование упрощенной модели углового движения приводит к неверным результатам.

Список источников

1. California Polytechnic State University. Cubesat Design Specification Rev 14.1. 2022.
2. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. М.: Наука, 1965. 416 с.
3. Белоконов И.В., Тимбай И.А., Барина Е.В. Выбор проектных параметров наноспутника формата CubeSat с пассивной системой стабилизации // Гироскопия и навигация. 2020. Т 28, № 1. С. 81–100. DOI: 10.17285/0869-7035.0025. EDN: UNANOX.
4. Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике. М.: Наука, 1966. 300 с.
5. Барина Е.В., Белоконов И.В., Тимбай И.А. Предотвращение возможности возникновения резонансных режимов движения для низковысотных спутников класса CubeSat // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29, № 4. С. 1–19. DOI: 10.17285/0869-7035.0076 EDN: FUKUC.
6. ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры // Введ. 1981-02-27. М.: изд-во стандартов, 1981. 181 с.

References

1. California Polytechnic State University. Cubesat Design Specification Rev 14.1. 2022.
2. Beletskii, V.V. (1965), "Motion of an Artificial Satellite Relative to the Center of Mass" [Dvizhenie iskusstvennogo sputnika otnositel'no tsentra mass]. Moscow, Nauka, (in Russ.).
3. Belokonov, I. V., Timbai I.A. and Barinova, E. V. (2020), "Design Parameters Selection for CubeSat Nanosatellite with a Passive Stabilization System". Gyroscopy Navigation, vol. 11, № 2, pp. 149-161.
4. Gantmakher, F.R. (1966), "Lectures on analytical mechanics" (Leksii po analiticheskoi mekhanike), Moscow: Nauka, (In Russ.).
5. Barinova, E.V., Belokonov, I.V. and Timbai, I.A. (2021), "Preventing Resonant Motion Modes for Low-Altitude CubeSat Nanosatellites". Gyroscopy and Navigation, vol. 12, №4, pp. 350-362.
6. Cavcar, M. (2000), "The international standard atmosphere" (ISA). Anadolu University, Turkey, T. 30, № 9, pp. 1-6.

Информация об авторах:

Е.В. Барина – кандидат технических наук, доцент, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (443086, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34), SPIN-код: 1819-6469, Scopus Author ID: 56663083400, Web of Science Researcher ID: N-5595-2016;

И. А. Тимбай – доктор технических наук, профессор, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (443086, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34), SPIN-код: 9745-8650, Scopus Author ID: 6506069802, Web of Science Researcher ID: B-5794-2017;

Е. Миронов – студент, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (443086, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34).

Information about the authors:

E. V. Barinova – candidate of science (engineering), associate professor, Samara National Research University (34, Moskovskoye Shosse, Samara, Russia, 443086), SPIN-code: 1819-6469, Scopus Author ID: 56663083400, Web of Science Researcher ID: N-5595-2016;

I. A. Timbai – doctor of science (engineering), professor, Samara National Research University (34, Moskovskoye Shosse, Samara, Russia, 443086), SPIN-code: 9745-8650, Scopus Author ID: 6506069802, Web of Science Researcher ID: B-5794-2017;

Ye. Mironov – student, Samara National Research University (34, Moskovskoye Shosse, Samara, Russia, 443086).

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 629.7.054

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-41-51

<https://elibrary.ru/dvypdm>**Исследование влияния структуры подвеса инерционной массы стеклянного микромеханического акселерометра на его характеристики****Марина Александровна Барулина¹, Алексей Викторович Голиков²,
Елена Владимировна Панкратова³, Ольга Викторовна Маркелова⁴**^{1,2,3,4}Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук, г. Саратов, Россия¹marina@barulina.ru²golikov@iptmuran.ru³pankratova@iptmuran.ru⁴markelova@iptmuran.ru

Аннотация. В статье рассматривается перспективный микромеханический акселерометр из радиостойкого стекла, выполненный по технологии вытягивания из стеклянных стержней и трубок. Разработана альтернативная конструктивная схема маятникового акселерометра с подвесом инерционной массы, сформированном из стеклянных структур двух форм – гексагональной и трубчатой. С помощью методов конечно-элементного моделирования выполнен сравнительный анализ механических характеристик моделей акселерометра с подвесами инерционной массы из двух разных стеклянных структур, а именно, для обеих моделей выполнен расчет напряжений и деформаций при ускорениях в диапазоне до 50g, а также расчет собственных частот. Анализ полученных результатов показал, обе схемы имеют близкие значения указанных характеристик, однако детальное рассмотрение распределения напряжений в структурах подвеса позволяет сделать вывод, что гексагональная структура более устойчива к разрушению. Также сделана оценка возможной чувствительности датчика для двух вариантов подвеса инерционной массы. Показано, что в обоих случаях при ускорениях до 50g емкостной датчик обладает достаточным диапазоном изменения емкости для регистрации ускорения.

Ключевые слова: акселерометр; МЭМС; чувствительный элемент; радиостойкое стекло; инерционная масса; моделирование; конечно-элементная модель

Для цитирования: Барулина М.А., Голиков А.В., Панкратова Е.В., Маркелова О.В. Исследование влияния структуры подвеса инерционной массы стеклянного микромеханического акселерометра на его характеристики // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 41–51. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-41-51. <https://elibrary.ru/dvypdm>.



Данная работа © 2025 Барулина М.А., Голиков А.В., Панкратова Е.В., Маркелова О.В. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы государственного задания министерства образования и науки РФ №125020501400-6.

Статья поступила в редакцию 21.01.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2025; принята к публикации 16.03.2025.

MECHANICS

Research article

Investigation of the Influence of Inertial Mass Suspension Structure of Glass Micromechanical Accelerometer on its Properties

Marina A. Barulina¹, Aleksey V. Golikov², Elena V. Pankratova³, Olga V. Markelova⁴

^{1,2,3,4}Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

¹marina@barulina.ru

²golikov@iptmuran.ru

³pankratova@iptmuran.ru

⁴markelova@iptmuran.ru

Abstract. The paper deals with a promising MEMS accelerometer made of radiation-resistant glass using the technology of pulling from glass rods and tubes. An alternative structural scheme of a pendulum accelerometer with an inertial mass suspension formed from glass structures of two shapes - hexagonal and tubular - is developed. By using the finite-element modeling methods, a comparative analysis of mechanical characteristics of MEMS models with different inertial mass suspensions has been performed, namely, for both models stresses and deformations at accelerations in the range up to 50g have been calculated. The calculation of natural frequencies was also performed. The analysis of the obtained results demonstrated that both schemes have close values of these characteristics, but a detailed consideration of the stress distribution in the suspension structures allows us to conclude that the hexagonal structure is more resistant to failure. The possible sensitivity of the sensor for two variants of the inertial mass suspension is also evaluated. It is proved that in both cases at accelerations up to 50g the capacitive sensor has a sufficient range of capacitance variation for acceleration registration.

Keywords: *accelerometer; MEMS; sensing element; radiation-resistant glass; inertial mass; modeling; finite element model*

For citation: Barulina, M. A., Golikov, A. B., Pankratova, E. B. and Markelova, O. B. (2025), "Investigation of the Influence of Inertial Mass Suspension Structure of Glass Micromechanical Accelerometer on its Properties", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 41-51. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-41-51. <https://elibrary.ru/dvypdm>.

Acknowledgments: the work was financially supported by the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No 125020501400-6.

The article was submitted 21.01.2025; approved after reviewing 20.02.2025; accepted for publication 16.03.2025.

Введение

Разработка новых конструктивных схем и применяемых материалов для производства МЭМС датчиков является актуальной задачей. В частности, микромеханические акселерометры (ММА) имеют широкий спектр применения в различных технических устройствах [1, 2]. Их широкое распространение обусловлено относительно невысокой стоимостью производства, малыми габаритами и массой, низким энергопотреблением.

ММА предназначены для измерения проекции линейного ускорения на ось чувствительности.

Одной из разновидностей конструктивных схем такого датчика является ММА маятникового типа. Чувствительным элементом такого прибора является физический маятник [1–3]. При воздействии на маятник составляющей линейного ускорения в направлении измерительной оси прибора маятник отклоняется относительно корпуса. Это отклонение фиксируется емкостным датчиком и передается в измерительную схему прибора.

Данная работа является продолжением исследований авторов по разработке возможных конструктивных схем акселерометра из радиостойкого стекла [4, 5] и перспектив по его применению.

В работе решаются следующие задачи:

- разработка конструктивной схемы маятникового акселерометра из радиостойкого стекла марки К108, удовлетворяющей требованиям по допустимым напряжениям в материале прибора, собственным частотам, обеспечению достаточной чувствительности при измерении ускорений до 50g с подвесом инерционной массы (ИМ) из стеклянных трубок круглой и гексагональной формы;
- расчет и сравнительная оценка механических характеристик ММА с разными подвесами ИМ;
- расчет параметров предполагаемого емкостного датчика при различных значениях ускорения.

1. Конструкция акселерометра

Исходный прототип ММА, изображенный на рис. 1, представляет собой ММА маятникового типа, выполненный из стеклянных стержней методом вытягивания под воздействием высокой температуры. ИМ и подвес сформированы путем химического травления растворимого стекла.



Рис. 1. Прототип стеклянного ММА

В предыдущих работах [4, 5] расчеты механических свойств прототипа были сделаны с осью чувствительности, размещенной перпендикулярно плоскости ММА. В такой конфигурации полученные результаты не позволяют говорить о возможности применить прототип на практике в силу недостаточной чувствительности, так как в этом случае предполагаемый емкостной датчик работает по принципу изменяемой площади пластин конденсатора, сформированных на боковых гранях ИМ и основания, и при малых перемещениях ИМ масштабный коэффициент очень мал для регистрации ускорения.

В настоящей работе предложена альтернативная конструктивная схема. Особенности предложенной схемы состоят, во-первых, в том, что для обеспечения достаточного отклонения ИМ для регистрации ускорения структура подвеса ИМ должна быть сформирована из стеклянных трубок вместо стержней. Во-вторых, для реализации емкостного датчика для съема полезного сигнала предлагается сформировать гребенку на одной грани ИМ и соседней грани основания с интегрированной или напыленной на ее поверхности токопроводящей пластины. Предлагаемая схема и общий вид представлены на рис. 2.

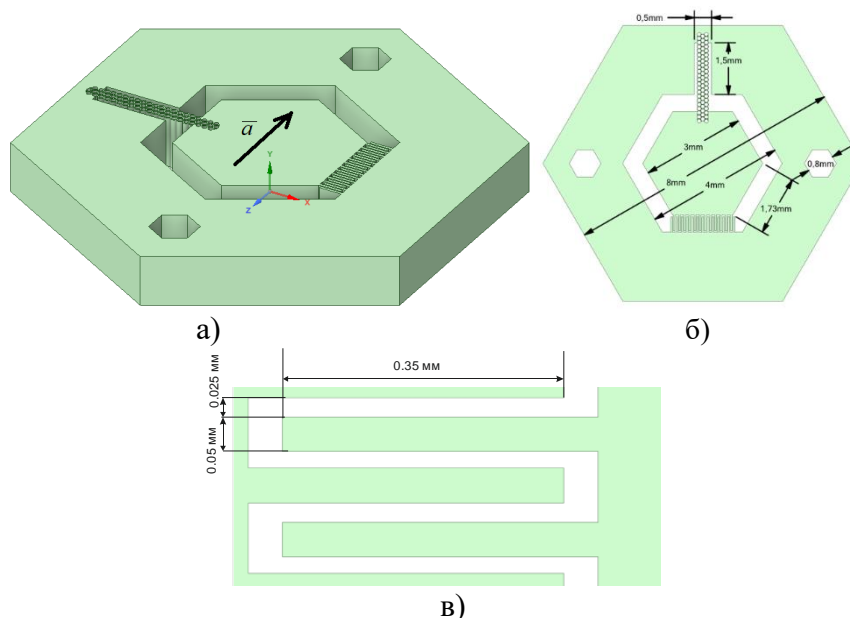


Рис. 2. Общий вид (а), размеры (б) и фрагмент гребенки с размерами (в)

При выбранных размерах ИМ и пластин гребенки возможно сформировать 12 гребенок, образующих емкостной датчик перемещений.

В представленной конструкции ММА подвес длиной 2 мм представляет собой структуру из трех рядов спаянных между собой стеклянных трубок круглой или гексагональной формы, размером 125 мкм и толщиной стенки 10–20 мкм, что должно обеспечить достаточную упругость подвеса. В данной работе толщина стенки трубок, составляющих подвес ИМ, принята равной 20 мкм. Толщина датчика – 1 мм. Общая масса модели составляет приблизительно 0.12 г, а масса ИМ – 0.02 г.

Вся конструкция ММА выполняется путем вытяжки преформы, набранной из стеклянных трубок и штабиков. На рис. 3 показаны два примера, получаемых после перетяжки структур из стеклянных трубок без откачки воздуха и с откачкой.

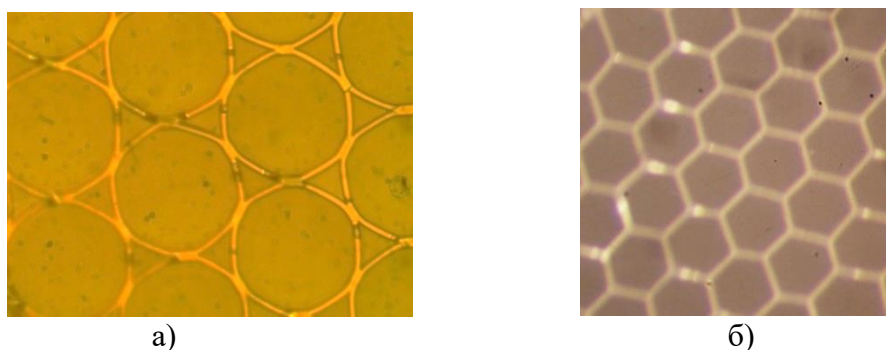


Рис. 3. Структуры, получающиеся после совместной перетяжки сборки из тонкостенных трубок; а) без откачки воздуха; б) с откачкой воздуха

В первом случае (рис. 3а) спекание происходит по линии соприкосновения трубок в пакете. Форма трубок остается близкой к круглой, между трубками образуются треугольные зазоры. Во втором случае зазоры между элементами отсутствуют, при этом форма трубок получается гексагональной. Для получения структур без воздушных зазоров между элементами используется вакуумирование при перетяжке. Структура, собранная из отдельных элементов, помещается в трубку большого диаметра (оболочку). При подаче преформы в печь, верхний конец трубки подключается через переходник к вакуумному насосу и в течение процесса поддерживается давление 0.2–0.3 атм.

На рисунке 4 показан фрагмент модели ММА с подвесом из трубок круглой и гексагональной форм, с геометрией, близкой к реально получаемой на производстве.

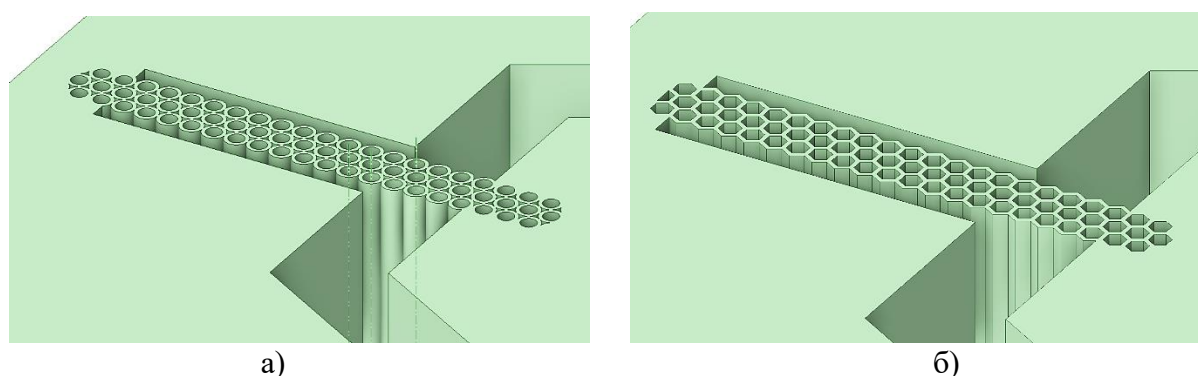


Рис. 4. Модель подвеса ИМ – а) круглой формы; б) гексагональной

2. Расчет механических параметров и частотных характеристик

В отличие от предыдущих расчетов, предложено разместить ось чувствительности ММА вдоль оси Z, перпендикулярно оси подвеса (рис. 2а). Таким образом, обеспечивается большая подвижность ИМ и, соответственно, повышается чувствительность.

Для определения механических напряжений и деформации выполнен расчет предлагаемой конструкции с разными типами подвеса в диапазоне ускорений до 50g для постоянных значений линейного ускорения.

Для расчетов в работе использовалась САПР для решения задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций. Полученные результаты по напряжениям и деформации ИМ представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Максимальные деформации, мкм

Ускорение, g	1	10	20	30	40	50
Трубчатая структура	0.24	2.39	4.78	7.17	9.56	11.96
Гексагональная структура	0.19	1.92	3.85	5.77	7.7	9.62

Таблица 2. Эквивалентные напряжения, МПа

Ускорение, g	1	10	20	30	40	50
Трубчатая структура	0.38	3.82	7.64	11.46	15.28	19.1
Гексагональная структура	0.45	4.51	9.02	13.53	18.04	22.55

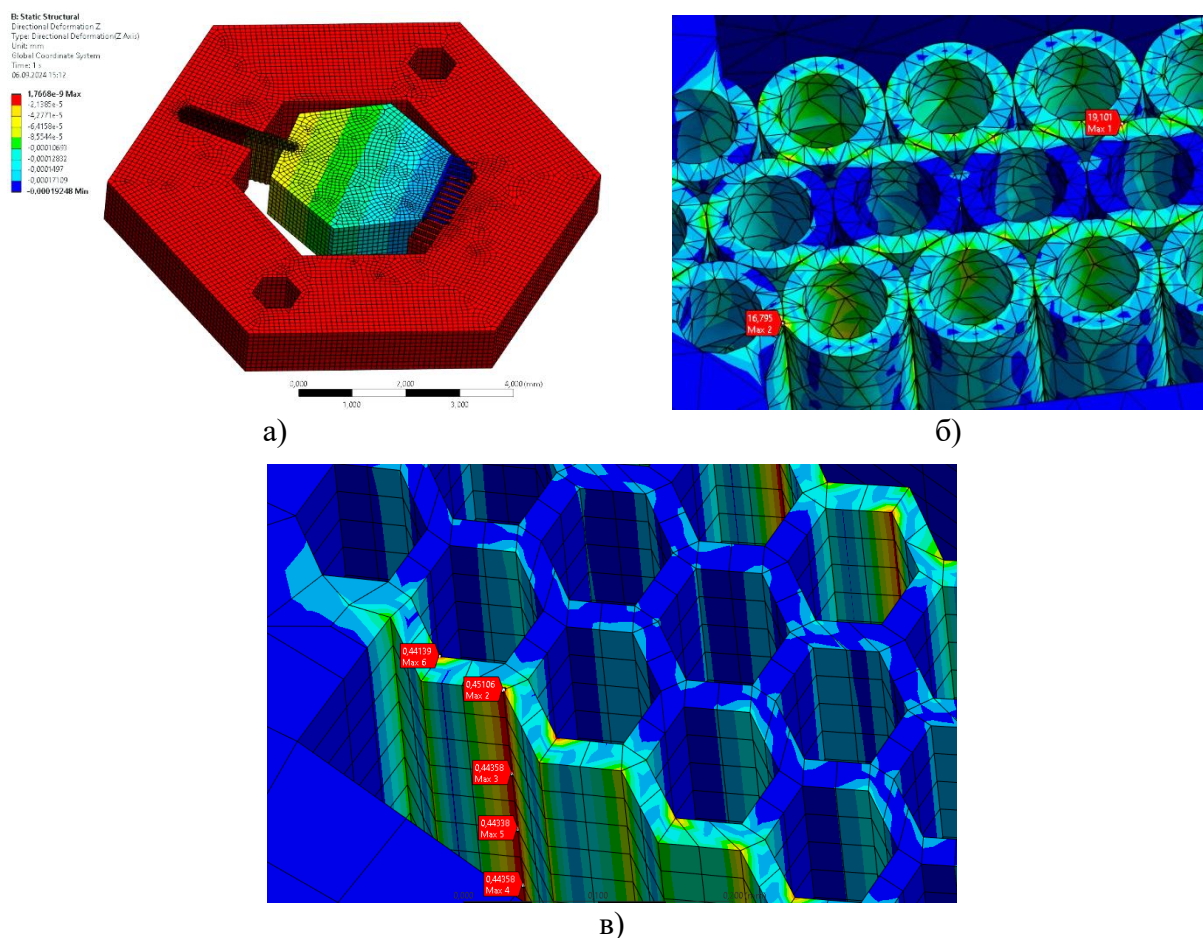


Рис. 5. Иллюстрация деформации при отклонении ИМ под воздействием линейного ускорения (а) и механических напряжений в трубчатой структуре (б) и гексагональной структуре (в)

Рассматривая поле напряжений в структуре подвеса, можно заметить важные различия в распределении напряжений. В случае трубок видно (рис. 5б), что максимальные напряжения сосредоточены в точках спекания отдельных трубок среднего и внешних рядов, в случае шестиугольников напряжения распределены сравнительно равномерно по наружной стороне внешних рядов (рис. 5в).

На графике (рис. 6) по результатам расчета приведена зависимость максимального отклонения ИМ в зависимости от приложенного ускорения.

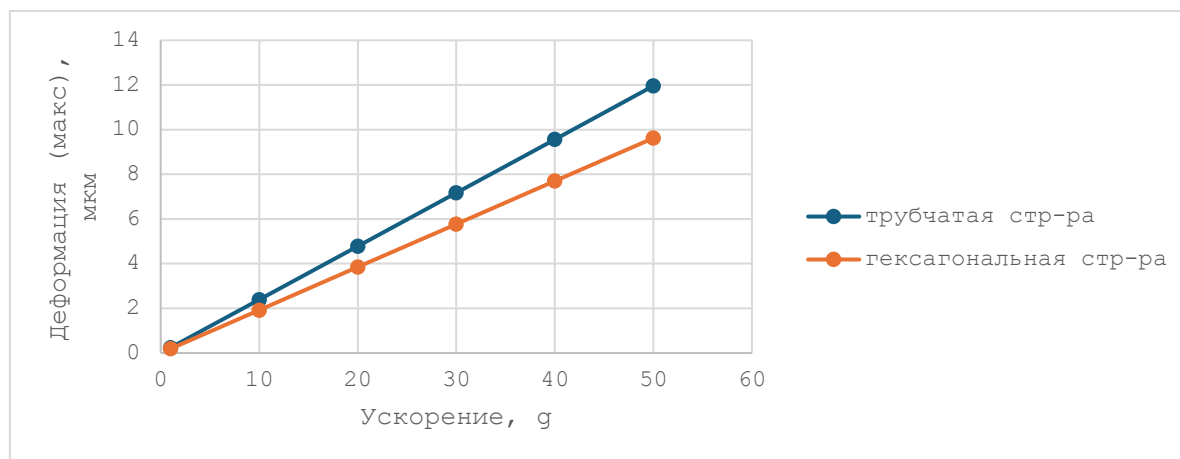


Рис. 6. Смещение ИМ

Из графика на рис. 6 видно, что отклонение ИМ носит линейный характер. Максимальное отклонение ИМ в зоне гребенки составило 11.96 мкм для трубчатой структуры и 9.62 мкм для гексагональной структуры соответственно (см. табл.). Такие значения являются достаточным для обеспечения приемлемой чувствительности датчика.

Рассмотрим частотные характеристики ММА.

В результате проведенного модального анализа получены следующие значения пяти собственных частот (Гц): для подвеса из трубчатой структуры 1223.7, 5039.6, 8998.3, 14400, 40596; для подвеса гексагональной структуры 1363.4, 3869.7, 7244.9, 15091, 36534.

Как видно из полученных результатов расчета модели, значения собственных частот для разных подвесов близки по значениям. У модели с подвесом гексагональной структуры значение первой моды несколько выше.

Предъявляемые требования по частоте вибрационных нагрузок авиакосмической техники обычно находятся в пределах до 180 Гц [6–7], поэтому полученные значения позволяют утверждать, что возникновение резонанса в рассматриваемой конструкции ММА исключено при его применении в системах управления.

3. Расчет изменения емкости датчика

Предлагаемая схема емкостного датчика является стандартной для такого типа МЭМС и представляет собой емкостной мост [8].

Оценить изменение емкости датчика можно по простой формуле, которая выводится из формулы емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора (для воздуха – 1), ε_0 диэлектрическая постоянная, S – площадь, d – расстояние между пластинами.

Изменение емкости при смещении пластин гребенки вычисляется по формуле, которая представляет собой разность емкостей на смежных пластинах конденсаторов при перемещении гребенки на расстояние x , при условии, что $x \ll d$ [9]:

$$\Delta C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d^2} x$$

где x – смещение ИМ.

Вычисленное по данной формуле ожидаемое максимальное изменение емкости при предложенной геометрии гребенки (рис. 2в), для трубчатой структуры подвеса в рассмотренном диапазоне ускорений составляет значения от 0.14 до 7.11 пФ, а для гексагональной структуры от 0.11 до 5.72 пФ соответственно.

Таким образом, величины изменения емкости датчика достаточны для регистрации ускорений в указанных диапазонах.

4. Обсуждение результатов

Предложена конструктивная схема ММА из перспективного радиостойкого стекла. Выполнено моделирование и расчет механических и частотных характеристик модели ММА при постоянных значениях линейного ускорения в диапазоне от 1 до 50g.

Полученные результаты численного моделирования позволяют сделать вывод о том, что предложенная схема имеет хорошие перспективы реального применения, однако требуется экспериментальное подтверждение полученных результатов.

Сравнительный анализ результатов расчета механических и частотных характеристик для модели с подвесом ИМ из трубок круглой и гексагональной форм показал, что различия незначительны. В случае деформаций и напряжений выигрывает трубчатая структура подвеса, у которой при одинаковых ускорениях большее смещение ИМ и меньшее напряжение, а в случае частотных характеристик большее значение первой моды имеет гексагональная структура, т.е. лучшая устойчивость к вибрационным нагрузкам. Однако эти различия незначительны, поэтому выбор подвеса ИМ, на взгляд авторов, необходимо принимать из других соображений.

Предполагается, что подвес ИМ из трубчатой структуры имеет слабую устойчивость к разрушению ввиду того, что спекание между отдельными трубками происходит по очень малой площади, в точке касания (рис. 3а) и максимальные напряжения сосредоточены именно в этих точках (рис. 5б). Поэтому при максимальных напряжениях высока вероятность разрушения подвеса. Совсем другая ситуация с гексагональной структурой подвеса. В этом случае подвес представляет собой сплошную структуру из сот, в которой напряжения распределены сравнительно равномерно по наружной стороне внешних рядов элементов, его составляющим.

Таким образом, можно сделать предположение, что гексагональная структура подвеса имеет более высокую устойчивость к разрушению при высоких ударных и вибрационных нагрузках.

Безусловно, следует учесть тот факт, что при расчетах использовалась идеальная геометрия структур подвеса, и в реальном изделии их форма будет несколько отличаться (неидеальная окружность, шестигранники со скругленными углами и т.д.), но качественно на общую картину полученных результатов это не повлияет.

Также следует отметить, что, используя разработанную модель, возможно подобрать необходимую чувствительность ММА для разных диапазонов ускорений путем изменения структуры и геометрии трубок подвеса ИМ.

Кроме того, необходим анализ возможных остаточных напряжений [10, 11] в подвесе ИМ ММА, которые характерны для рассматриваемого в статье материала, а также анализ поведения предложенной конструкции при воздействии переменных ускорений и вибрационных нагрузок, что является предметом дальнейших исследований.

На момент написания статьи ведется проработка и обсуждение возможности изготовления опытных образцов ММА по предложенной модели.

Список источников

1. *Микромеханические приборы: учеб. пособие* / В.Я. Распопов. Тул. Гос. университет. Тула, 2002. 392 с.
2. *Датчики, приборы и системы авиакосмического приборостроения в условиях тепловых воздействий* / В.Э. Джашинов, В.М. Панкратов / под ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова, СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2005. 402 с. ISBN: 5-900780-57-0 EDN: QNSEZN.
3. *Кочурина Е.С., Анчутин С.А., Калугин В.В. и др. Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра* // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 59–67. 10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67. DOI: 10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67 EDN: JPSKAX.

4. Костенко В.Д., Барулина М.А. К вопросу использования радиостойкого стекла для изготовления микромеханического акселерометра: в сб. Международный семинар "Навигация и управление движением" (NMC 2023) / под ред. В.Г. Пешехонова, академика РАН, и члена-корреспондента РАН О.А. Степанова, проф. / АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург, Россия, 2023. С. 21–24. EDN: GWBGBI.
5. Костенко В.Д., Барулина М.А., Щербаков А.В. Перспективы использования стеклянных микромеханических акселерометров для космических спутников / RusNanoSat-2023: сб. тезисов докладов пятого российского симпозиума по наноспутникам с международным участием. Самара, 06–08 сентября 2023 г. Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, 2023. С. 132–134. EDN: GNOZHI.
6. ГОСТ 23718-2014. Межгосударственный стандарт. Самолеты и вертолеты пассажирские и транспортные. Допустимые уровни вибрации в салонах и кабинах экипажа и методы измерения вибрации. Взамен ГОСТ 2371-93. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ 2019. С. 20.
7. Безмозгий И.М., Софинский А.Н., Чернягин А.Г. Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 71–80. EDN: TEMDRT.
8. Paing S.T., Kalugin V.V., Kochurina E.S. Modeling and optimization of MEMS comb type capacitive acceleration sensor. Proc. Univ. Electronics. 2023. Vol. 28, № 4. P. 452–460. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-4-452-460 EDN: LWHTER.
9. Топильский В.Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи: учеб. пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 493 с. ISBN: 978-5-9963-0635-0 EDN: QMXKKX.
10. Тажибаев К.Т. Определение остаточных и действующих напряжений поляризации-акустическим методом / К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев, М.С. Акматалиева // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 4. С. 134–139. EDN: XNKDQD.
11. Бургер И.А. Остаточные напряжения. М.: 1963.

References

1. Raspopov, V. Y. (2002), "*Mikromekhanicheskie pribory Uchebnoe posobie*" [Micro-mechanical devices Tutorial], Tula State University, Tula, Russia.
2. Dzhashitov, V. E. and Pankratov, V. M. (2005), "*Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo priborostroeniya v usloviyah teplovyh vozhdeystvij*" [Sensors, instruments and systems for aerospace instrumentation under thermal conditions], St. Petersburg, Russia.
3. Kochurina, E. S., Anchutin, S. A. and Kalugin, V. V. (2022), "Development of a sensitive element of a micromechanical accelerometer", *Izv. Vuzov. Elektronika*, vol. 27, no. 1, pp. 59-67.
4. Kostenko, V. D. and Barulina, M. A. (2023), "Toward the use of radio-resistant glass for the fabrication of a micromechanical accelerometer". *V sbornike: Mezhdunarodnyj seminar «Navigaciya i upravlenie dvizheniem» (NMC 2023)* [Proceedings of the 25th Conference of Young Scientists "Navigation and Motion Control"], Saint Petersburg, pp. 21-24.

5. Kostenko, V. D., Barulina, M. A. and Shcherbakov, A. V. (2023), "Prospects for glass micro-mechanical accelerometers for space satellites". *RusNanoSat-2023: Sbornik tezisev dokladov pyatogo rossijskogo simpoziuma po nanosputnikam s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the 5th Russian symposium on nanosatellites with international participation], Samara, Russia, pp. 132-134.
6. GOST 23718-2014. Intergovernmental standard. Passenger and transporter airplanes and helicopters. Permissible vibration levels in cabins and cockpits and methods of vibration measurement. Replacing GOST 2371-93. Introduced – 2015-01-01, М: Standartinform 2019, p. 20.
7. Bezmozgij, I. M., Sofinskij, A. N. and Chernyagin, A. G. (2014). "Modeling in problems of vibration resistance of rocket-space structures". *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, no. 3 (6), pp. 71-80.
8. Paing, S., Kalugin, V. and Kochurina, E. (2023), "Modeling and optimization of MEMS comb type capacitive acceleration sensor". *Proc. Univ. Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 452-460.
9. Topil'skij, V. B. (2012), "*Mikroelektronnye izmeritel'nye preobrazovateli: Ucheb. posobie*" [Microelectronic measuring transducers: textbook.]. М.: BINOM. Laboratoriya znaniy.
10. Tazhibaeв, K. T., Tazhibaeв, D. K. and Akmatallieva, M. S. (2018), "Identification of residual and acting stresses by polarization-acoustic method". *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk*, no. 4, pp. 134-139.
11. Birger, I. A. (1963), "*Ostatochnye napryazheniya*" [Residual stresses], Moscow, Russia.

Информация об авторах:

М. А. Барулина – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки - институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24); директор физико-математического института Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15); Действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, Действительный член Академии навигации и управления движением РАН; AuthorID: 174006, ScopusID: 51161080800, ResearcherID: B-2919-2016;

А. В. Голиков – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки – институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24), Член-корреспондент Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского; AuthorID: 8708, ScopusID: 57213826231, ResearcherID: AAF-5651-2021;

Е. В. Панкратова – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки – институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24); AuthorID: 909223, ScopusID: 57193550443, ResearcherID: ACY-2638-2022;

О. В. Маркелова – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки – институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук, (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24); AuthorID: 994464, ScopusID: 57215606494.

Information about the authors:

M. A. Barulina – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences (24, Rabochaya St., Saratov, Russia, 410028), Director of the Institute of Physics and Mathematics, Perm State University, (15, Bukireva St., Perm, Russia, 614068), Full Member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, Full member of the Academy of Navigation and Motion Control of the Russian Academy of Sciences; AuthorID: 174006 ScopusID: 51161080800, ResearcherID: B-2919-2016;

A. V. Golikov – Ph.D. (Engineering Sciences), Leading Researcher, Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences (24, Rabochaya St., Saratov, Russia, 410028), Corresponding Member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics; AuthorID: 8708, ScopusID: 57213826231, ResearcherID: AAF-5651-2021;

E. V. Pankratova – Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences (24, Rabochaya St., Saratov, Russia, 410028); AuthorID: 909223, ScopusID: 57193550443, ResearcherID: ACY-2638-2022;

O. V. Markelova – junior researcher, Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences (24, Rabochaya St., Saratov, Russia, 410028); AuthorID: 994464, ScopusID: 57215606494.

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 531.9; 514.853

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-52-66

<https://elibrary.ru/achxhc>**Движение гиристора в световом потоке
полуевклидова пространства****Николай Николаевич Макеев**

г. Саратов, Россия

nmakeyev@mail.ru

Аннотация. Исследуется движение гиристора в стационарном поле сил светового давления полуевклидова пространства. Гиристор с кинетической осевой симметрией и постоянным гиристорическим моментом движется так, что его носитель вращается вокруг центра инерции. Поле сил светового давления порождается стационарным световым потоком постоянной интенсивности, образованным параллельными лучами света, и принимается консервативным. На основе усовершенствованной термомеханической модели динамического взаимодействия светового излучения с твердой поверхностью строится динамическая система и рассматривается ограниченная задача исследования движения особого вида. В результате применения аффинного преобразования переменных, определяющих движение гиристора, получены точные решения задачи об интегрировании динамической системы гиристора в консервативном поле сил светового давления. Рассмотрены два режима движения гиристора и их аналоговая интерпретация.

Ключевые слова: гиристор; полуевклидово пространство; поле сил светового давления; аффинное преобразование переменных; годограф вектора угловой скорости

Для цитирования: Макеев Н.Н. Движение гиристора в световом потоке полуевклидова пространства // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1 (68). С. 52–66. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-52-66. <https://elibrary.ru/achxhc>.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024; одобрена после рецензирования 29.11.2024; принята к публикации 16.03.2025.

MECHANICS

Research article

**Gyrostat Motion in the Light Flow
of Semi-Euclidean Space****Nikolay N. Makeev**

Saratov, Russia

nmakeyev@mail.ru

Abstract. The motion of a gyrostat in a stationary field of light pressure forces in semi-Euclidean space is investigated. A gyrostat with kinetic axial symmetry and a constant gyrostatic moment moves so that its carrier rotates around the center of inertia. The field of light pressure forces is generated by a stationary light flux of constant intensity, formed by parallel rays of



Эта работа © 2025 Макеев Н.Н. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

light, and is assumed to be conservative. Based on an improved thermomechanical model of the dynamic interaction of light radiation with a solid surface, a dynamic system is constructed and the limited problem of studying motion of a special type is considered. As a result of applying an affine transformation of the variables determining the motion of the gyrostat, exact solutions to the problem of integrating a dynamic gyrostat system in a conservative field of light pressure forces were obtained. Two modes of gyrostat motion and their analog interpretation are considered.

Keywords: *gyrostat; semi-Euclidean space; light pressure force field; affine transformation of variables; angular velocity vector hodograph*

For citation: Makeev, N. N. (2025), "Gyrostat Motion in the Light Field Flow of Semi-Euclidean Space", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 52-66. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-52-66. <https://elibrary.ru/achxhc>.

The article was submitted 10.10.2024; approved after reviewing 29.11.2024; accepted for publication 16.03.2025.

Введение

Рассматривается движение гиростата в стационарном однородном потоке светового излучения представляемого пучком прямолинейных параллельных лучей постоянной интенсивности. Полагается, что этот поток индуцируется стационарным источником светового излучения постоянной мощности, генерирующим световую волну, взаимодействующую со средой ее распространения и вызывающую эффект светового давления на твердые поверхности (динамический эффект П.Н. Лебедева).

Световой поток формирует поле сил светового давления (СД-поле) и порождает силу давления – пондеромоторный эффект светового излучения, обусловленный передачей импульса электромагнитного поля. Это давление реализуется распределенной поверхностной силой, величина которой пропорциональна плотности энергии светового потока и непосредственно зависит от оптических и термомеханических свойств освещаемой поверхности.

В настоящей работе принята термомеханическая модель, предложенная в статье [1] и учитывающая ряд динамически значимых эффектов, которые не рассматривают традиционно принятые модели.

В цитируемой статье исследуется задача об устойчивости перманентных вращений абсолютно твердого тела в СД-поле, которое при определенных условиях может быть консервативным [1]. Свойство консервативности поля способствует получению решений аналитическими методами задачи о нахождении точных частных решений системы уравнений сферического движения тела. Такого рода задачи являются актуальными модельными задачами классической динамики твердого тела.

Многообразие точных частных решений уравнений движения механических систем имеют для исследований их характерных свойств существенное значение. Эти решения являются носителями основной информации о динамически значимых особенностях движения данного механического объекта и позволяют оценивать возможности применения приближенных методов нахождения решений уравнений его движения.

К настоящему времени не найдены какие-либо общие методы построения видов частных решений систем уравнений движения. В силу этого, как правило, рассматриваются задачи частного характера, решаемые в ограниченной постановке в рамках классической механики.

В настоящей работе рассматривается ограниченная задача о нахождении точных частных решений системы уравнений сферического движения гиростата в стационарном СД-поле неевклидова пространства, поставленная для определенного класса его движений при заданных ограничениях и стационарных связях. Эта работа является продолжением исследования, приведенного в статье [2].

1. Предварительные положения

Согласно классификации, применяемой в проективной геометрии, рассматриваемое здесь полуевклидово пространство является действительным аффинным трехмерным пространством с индексом 2 и дефектом 0. Оно может быть определено и как полугиперболическое пространство с несобственной абсолютной плоскостью.

В данной работе под движением гиростата (в смысле механического движения) понимается перемещение в конфигурационном пространстве его тела-носителя как абсолютно твердого тела. При этом все необходимые геометрические объекты и связанные с ними геометрические построения, вводимые в публикациях различными способами, приняты здесь согласно схеме, установленной в работе [2].

Вследствие существующего гомеоморфизма задача о движении гиростата в плоскости Лобачевского эквивалентна задаче о его вращении вокруг неподвижного полюса в полуевклидовом пространстве с метрическим тензором $g_{ij} = (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_j)$, отнесенном к пространству конфигураций, с компонентами $g_{11} = g_{22} = -1$, $g_{33} = 1$ при $i = j$, где, кроме того, имеем $g_{ij} = 0$ при $i \neq j$. Здесь векторы \mathbf{e}_i ($i = 1, 2, 3$) – орты осей заданной ортогональной системы координат конфигурационного пространства гиростата.

Согласно проективной модели Э. Бельтрами–Ф. Клейна плоскость Лобачевского наглядно представляется в виде внутренних точек абсолюта гиперболической плоскости

$$g_{ij}x^i x^j \equiv -(x^1)^2 - (x^2)^2 + (x^3)^2 = 0,$$

где x^i, x^j – контравариантные координаты.

Под гиростатом в полуевклидовом пространстве в общепринятом смысле понимается механический объект, расположенный внутри изотропного конуса этого пространства, а под неподвижным полюсом O , совпадающим с его центром инерции, относительно которого движется гиростат, – вершина данного конуса. Тогда для радиусов-векторов точек гиростата существует условие $\mathbf{r}_s^2 = g_{ij}r_s^i r_s^j > 0$, согласно которому данные векторы, по определению, являются собственными.

Настоящая работа является продолжением исследования задачи о нахождении точных частных решений системы уравнений движения гиростата в полуевклидовом пространстве, приведенного в статье [2].

Пусть $\mathbf{s}(s_1, s_2, s_3)$ – направляющий орт светового потока, заданный координатами s_j относительно ортобазиса, неизменно связанного с носителем гиростата.

Предполагается, что СД-поле светового потока является консервативным, характеризуемым одномерным стационарным квадратичным потенциалом [1]

$$U(s_3) = \int G(s_3) ds_3, \quad (1)$$

где функция плотности потока светового излучения G определяется равенством

$$G(s_3) = n_1 + n_2 s_3 \quad (-\infty < s_3 \leq -1), \quad (2)$$

а функция U определена в открытой регулярной односвязной области конфигурационного пространства при условии $n_2 \neq 0$. Здесь $n_1 \neq n_2$ – заданные постоянные термомеханические модельные параметры [1], характеризующие теплофизические и оптические свойства светоотражающей и лучепоглощающей абсолютно твердой поверхности гиростата.

Движение гиростата вокруг полюса O относительно ортобазиса, связанного с носителем, в силовом поле светового потока с потенциалом, заданным соотношениями (1), (2), согласно принятым предпосылкам, определяется автономной системой уравнений [2]

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{A} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{k}) &= (U_s \times \mathbf{s}), \\ \dot{\mathbf{s}} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{s}) &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где обозначено

$$U_s = \frac{\partial U}{\partial \mathbf{s}}.$$

Согласно соотношениям (1), (2) для функции U имеем [1]

$$U(s_3) = n_1 s_3 + \frac{1}{2} n_2 s_3^2, \quad (4)$$

где s_3 – соответствующий направляющий косинус орта \mathbf{s} , определенный в данном полувеклидовом пространстве.

Введем правые координатные ортобазисы с общим началом в неподвижном полюсе O : ортобазис Γ_0 , неподвижный относительно инерциального конфигурационного пространства гиростата, и ортобазис $\Gamma(Ox_1x_2x_3)$, неизменно связанный с телом-носителем гиростата, оси Ox_j которого совмещены с его главными в полюсе O осями приведенного (по Н.Е. Жуковскому) тензора инерции данного гиростата.

Обозначим: A_j – диагональные элементы матрицы тензора инерции, являющиеся главными центральными моментами инерции, соответствующими собственным значениям оператора инерции гиростата; $\mathbf{K}(K_j)$ – кинетический момент гиростата относительно полюса O ; $\mathbf{k}(k_j)$ – постоянный гиростатический вектор-момент, заданный проекциями k_j на оси ортобазиса Γ ; главные центральные моменты инерции гиростата A_1, A_2 – моменты относительно не изотропных (идеальных) главных осей Ox_1, Ox_2 , а момент A_3 – относительно собственной главной оси инерции Ox_3 ; $\boldsymbol{\omega}(\omega_j)$ – абсолютная угловая скорость тела-носителя. Здесь и всюду далее текущий индекс j принимает значения $j = 1, 2, 3$. В частности, символ (ω_j) кратко обозначает всю данную совокупность допустимых значений $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$, если иное не оговорено.

Пусть \mathbf{e}_j ($j = 1, 2, 3$) – орты осей базиса Γ . Тогда вектор абсолютной угловой скорости носителя гиростата относительно полюса O представляется в виде [2]

$$\boldsymbol{\omega} = \omega_1 \mathbf{e}_1 + \omega_2 \mathbf{e}_2 + \omega_3 \mathbf{e}_3. \quad (5)$$

Для компонент s_j собственного орта \mathbf{s} имеет место тривиальное тождество [2]

$$\|\mathbf{s}\|^2 \equiv s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = 1. \quad (6)$$

Система параметров ориентации механического объекта в неевклидовых пространствах относительно заданных ортобазисов вводится по-разному; здесь единой общепринятой схемы не существует.

Следуя конструктивной схеме построения параметров ориентации собственного базового вектора \mathbf{s} в полуевклидовом пространстве, принятой в работе [2], введем аналоги традиционно принятых классических углов Эйлера $\lambda, \vartheta, \varphi$, определяющих ориентацию ортобазиса Γ относительно Γ_0 в конфигурационном пространстве. Положим, что $\mathbf{s}(s_1, s_2, s_3) - \text{орт}$, определяющий ориентацию однородного параллельного светового потока относительно базиса Γ . Этот вектор является *направляющим ортом* светового потока, ориентированным против направления падающих на поверхность носителя пучка лучей света. Его зависимость от указанных параметров ориентации определяется равенствами [2]

$$(s_1, s_2, s_3) = (\operatorname{sh} \vartheta \sin \varphi, \operatorname{sh} \vartheta \cos \varphi, -\operatorname{ch} \vartheta), \quad (7)$$

удовлетворяющими соотношению (6). Здесь параметры ориентации ϑ, φ по аналогии с классическими углами Эйлера будем называть *параметрами нутации и собственного вращения*. При этом данные параметры (как и их классические аналоги) являются безразмерными величинами.

Система уравнений (3), согласно соотношениям (1), (2), (5)–(9) и введенным предпосылкам в проекциях на координатные оси ортобазиса Γ , принимает вид [2]

$$\begin{aligned} A_1 \dot{\omega}_1 + (A_2 + A_3) \omega_2 \omega_3 + k_3 \omega_2 + k_2 \omega_3 &= -G(s_3) s_2, \\ A_2 \dot{\omega}_2 - (A_1 + A_3) \omega_3 \omega_1 - k_1 \omega_3 - k_3 \omega_1 &= G(s_3) s_1, \\ A_3 \dot{\omega}_3 + (A_1 - A_2) \omega_1 \omega_2 - k_2 \omega_1 + k_1 \omega_2 &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{s}_1 = \omega_2 s_3 - \omega_3 s_2, \quad \dot{s}_2 = \omega_3 s_1 - \omega_1 s_3, \quad \dot{s}_3 = \omega_2 s_1 - \omega_1 s_2. \quad (9)$$

Система уравнений (9) имеет первым тривиальным интегралом тождество (6) [2].

Уравнения (8), (9) образуют многопараметрическую динамическую систему с квадратичной нелинейностью, в которой подсистема (8) имеет особые точки: точку $\mathbf{s}_q(0, 0, 1)$ и множество $\mathbf{s}(s_1, s_2, s_p)$, где критическое значение $s_p = -n_1/n_2$ соответствует статическому условию $G(s_p) = 0$ и является единственным таковым значением.

Для динамической системы (8), (9) ставится следующая ограниченная задача. Полагая, что при $t \in T = [0, +\infty)$ априорно существует точное частное решение $\{\omega_j(t), s_j(t)\}$ данной системы, удовлетворяющее начальным условиям $\boldsymbol{\omega}(0) = \boldsymbol{\omega}^0(\omega_j^0)$, $\mathbf{s}(0) = \mathbf{s}^0(s_j^0)$, найти это решение, удовлетворяющее некоторым принятым ограничениям, налагаемым на характеристики движения гиростата.

Целью настоящей работы является решение поставленной задачи, получаемое на основе динамической системы (8), (9) и предпосылок, принятых для данной задачи.

2. Движение на линейной связи

Рассмотрим решение поставленной задачи как движение гиростата на заданной стационарной связи, содержащей линейную зависимость между векторами $\boldsymbol{\omega}, \mathbf{s}$. Соотношение такого рода было априорно принято в исследованиях [3, 4], относящихся к сферическому движению твердого тела в евклидовом пространстве, и применялось в

работе [5], где рассмотрено движение гиростата в гиперболическом пространстве. В этих работах авторы, задавая возможный вид искомого решения, реализовывали гипотетические линейные зависимости, связывающие между собой переменные решаемых задач.

Из многообразия возможных движений, характеризуемых объединенной системой уравнений (8), (9), выделим движения (допуская, что они существуют), удовлетворяющие для $t \in T$ зависимости вида

$$\mathbf{s} = \mathbf{B}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{C}, \quad (10)$$

где постоянные матрица \mathbf{B} и вектор \mathbf{C} не заданы и подлежат определению. Здесь обозначено $\mathbf{B} = \text{diag}(B_1, B_2, B_3)$, $\mathbf{C} = [C_j]^T$.

Согласно равенству (10) в осях ортобазиса Γ , имеем

$$s_j = B_j \omega_j + C_j \quad (j = 1, 2, 3) \quad (11)$$

и предполагается, что $B_1 B_2 B_3 \neq 0$, $n_2 \neq 0$.

Преобразование вида (11) называется здесь и далее *линейной связью* между указанными переменными. При заданных условиях эта трансформация геометрически может быть истолкована как невырожденное аффинное преобразование, являющееся композицией центроаффинного преобразования с центром, совпадающим с неподвижным полюсом O , и параллельного переноса. При этом все постоянные B_j являются коэффициентами центроаффинного преобразования, а величины C_j – параметрами параллельного переноса. Первое из заданных ограничений выражает условие невырожденности данного преобразования [5].

Исключая из объединенной системы уравнений (8), (9) все величины s_j в силу соотношений (11), в результате получаем систему условий в форме равенств:

$$A_1 \dot{\omega}_1 + R_2 \omega_2 \omega_3 + P_2 \omega_2 + Q_2 \omega_3 + H C_2 = 0, \quad (12)$$

$$A_2 \dot{\omega}_2 - R_1 \omega_3 \omega_1 - P_1 \omega_1 - Q_1 \omega_3 - H C_1 = 0,$$

$$B_1 \dot{\omega}_1 + (B_2 - B_3) \omega_2 \omega_3 + C_2 \omega_3 - C_3 \omega_2 = 0,$$

$$B_2 \dot{\omega}_2 + (B_3 - B_1) \omega_3 \omega_1 + C_3 \omega_1 - C_1 \omega_3 = 0, \quad (13)$$

$$B_3 \dot{\omega}_3 + (B_2 - B_1) \omega_1 \omega_2 + C_2 \omega_1 - C_1 \omega_2 = 0.$$

К равенствам (12) следует присоединить третье уравнение системы (8), не изменяющееся при преобразовании (11).

В уравнениях (12) обозначено:

$$m_j = A_j + A_3, \quad m_3 = A_1 - A_2,$$

$$P_j = H B_j + k_3, \quad Q_j = n_2 B_3 C_j + k_j,$$

$$R_j = n_2 B_3 B_j + m_j \quad (j = 1, 2),$$

$$H \equiv G(C_3) = n_1 + n_2 C_3.$$

Отметим, что уравнения системы (12) по структуре соответствуют уравнениям задачи о движении гиростата с реактивным приводом, известной как задача Р. Гаммеля в динамике твердого тела, а уравнения системы (13) структурно идентичны уравнениям задачи об инерционном движении гиростата с постоянным гиростатическим моментом относительно неподвижного полюса в полувеклидовом пространстве.

Очевидно, что соответствующие уравнения систем (12), (13), рассматриваемые с учетом третьего уравнения системы (8), в силу соотношений связи (11) должны быть эквивалентны по переменным ω_j . Следовательно, эти уравнения совместны при выполнении следующих условий:

$$(A_1 - A_2)B_3 - (B_2 - B_1)A_3 = 0, \quad (14)$$

$$A_3 C_j + B_3 k_j = 0, \quad (15)$$

$$A_{3-j} C_3 + P_j B_{3-j} = 0, \quad (16)$$

$$A_{3-j} C_j - Q_j B_{3-j} = 0, \quad (17)$$

$$A_{3-j}(B_j - B_3) - R_j B_{3-j} = 0, \quad (18)$$

$$H C_j = 0 \quad (j=1, 2). \quad (19)$$

Система (14)–(19) содержит 11 однородных уравнений (среди которых имеются попарно симметричные уравнения) с шестью неизвестными B_j, C_j ($j = 1, 2, 3$), подлежащими определению в соответствии с имеющимися вариантами. Каждый из этих вариантов относится к определенному режиму движения гиростата в СД-поле, удовлетворяющему гипотезе (11), и базируется на соответствующем частном решении объединенной системы уравнений (8), (9).

Введем условие существования осевой кинетической симметрии гиростата [2]

$$A_1 = A_2 = A > A_3, \quad (20)$$

согласно которому из ограничения (14) следует:

$$m_1 = m_2 = m = A + A_3, \quad m_3 = 0, \\ B_1 = B_2 = B, \quad B \neq B_3. \quad (21)$$

В силу условий (20), (21) требование (14) тождественно удовлетворяется и тогда имеем

$$P_1 = P_2 = H B + k_3, \\ R_1 = R_2 = n_2 B B_3 + m, \quad (22)$$

вследствие чего условия (16), (18) определяющей системы сводятся к двум независимым ограничениям, приводимым далее.

Согласно принятым условиям, гиростат, состояние которого характеризуется системой уравнений (8), (9), может совершать движения следующих двух родов (соответственно, двух режимов движения).

3. Движение первого рода

Согласно ограничениям (19) для дальнейшего примем

$$H \neq 0, \quad C_1 = C_2 = 0 \quad (23)$$

и уравнения системы (12) становятся однородными по переменным ω_j . Из первого условия (23) следует $C_3 \neq s_p$, что, в силу равенства (11), соответствует требованию

$$\omega_3 \neq B_3^{-1}(s_3 - s_p).$$

К движениям первого рода отнесем состояния гиростата, при которых выполняются заданные условия (23).

Из тождества (6), примененного к точке статического равновесия гиростата, в которой $\omega = 0$, и соотношений (7), (11), (23), получаем $C_3 = -1$, откуда непосредственно следует, что $H = n_1 - n_2 \neq 0$.

Согласно условиям (22), (23) из соотношений (15), (17) следует:

$$k_1 = k_2 = 0 \quad (24)$$

и тогда определяющая система уравнений (16), (18), содержащая неизвестные параметры B, B_3 , сводится к равенствам

$$HB^2 + k_3 B - A = 0, \quad (25)$$

$$A(B - B_3) - B(n_2 B B_3 + m) = 0. \quad (26)$$

Согласно равенствам (25), (26) при выполнении условия

$$D_1 = k_3^2 + 4AH \geq 0 \quad (27)$$

для ненулевых параметров B, B_3 имеем

$$B = (2H)^{-1}(-k_3 \pm \sqrt{D_1}), \quad (28)$$

$$B_3 = \frac{(A - m)B}{A + n_2 B^2}. \quad (29)$$

В силу решения (28), (29) и зависимостей (20), (21), (23) система уравнений (13) при ограничении (27) принимает каноническую (нормализованную) форму:

$$\begin{aligned} \ddot{\omega}_j + \Omega^2 \omega_j &= 0 \quad (j = 1, 2), \\ \ddot{\omega}_3 &= 0, \end{aligned} \quad (30)$$

где обозначено

$$\Omega = B^{-1}(B - B_3)\omega_3^0.$$

Здесь и всюду далее нулевой верхний индекс относится к значениям величин при $t = 0$.

К уравнениям (30) следует присоединить систему начальных условий, заданных в виде

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1^0 &= -\Omega \omega_2^0, \quad \dot{\omega}_2^0 = \Omega \omega_1^0, \quad \dot{\omega}_3^0 = 0, \\ \omega_j(0) &= \omega_j^0 \quad (j = 1, 2, 3). \end{aligned}$$

В пространстве переменных ω_j система уравнений (30) соответствует симметричной системе трех линейных осцилляторов, находящихся на идеальных стационарных упругих связях и совершающих свободные колебания вдоль прямой линии. Эти осцилляторы связаны между собой так, что нулевой главной частоте соответствует равномерное поступательное движение данной системы, а ненулевым частотам – свободные продольные колебания ее крайних осцилляторов. Структура данной системы осцилляторов идентична структуре известной классической модели линейной трехатомной молекулы (*модель Г. Голдстейна и Дж. У. Лича*).

Система осцилляторов (30) является невырожденной при выполнении условия

$$\Omega \neq 0.$$

Таким образом, в силу системы (30) решение объединенной системы уравнений (8), (9), подчиняющееся гипотезе (10) при условиях (23), (24), представляется в виде:

$$[\omega_1(t), \omega_2(t)] = H_1 [\cos \sigma(t), \sin \sigma(t)], \quad (31)$$

$$\omega_3(t) = \omega_3^0, \quad \sigma(t) = \Omega t + \alpha,$$

$$[s_1(t), s_2(t)] = B[\omega_1(t), \omega_2(t)], \quad (32)$$

$$s_3(t) = s_3^0 \equiv B_3 \omega_3^0 - 1. \quad (33)$$

Постоянные H_1, α в равенствах (31) определяются соотношениями

$$H_1 = + \sqrt{(\omega_1^0)^2 + (\omega_2^0)^2} \neq 0, \\ (\cos \alpha, \sin \alpha) = H_1^{-1}(\omega_1^0, \omega_2^0),$$

а параметры B, B_3 в равенствах (32), (33) – формулами (28), (29).

Соотношения (31) являются параметрическими уравнениями подвижного (относительно ортобазиса Γ) годографа вектора ω с параметром t , а равенства (32), (33) – уравнениями такого же рода для орта s . Очевидно, что эти годографы являются подобными невырожденными геометрическими фигурами.

Согласно зависимостям (31), несущей поверхностью подвижного годографа вектора ω в пространстве квазикоординат ω_j является круговой цилиндр радиуса H_1 с уравнением

$$\omega_1^2 + \omega_2^2 = H_1^2, \quad (34)$$

образующие которого параллельны оси Ox_3 ортобазиса Γ . При этом параметры данной задачи взаимосвязаны тождеством

$$-(BH_1)^2 + (s_3^0)^2 = 1,$$

где величина $s_3^0 = -\operatorname{ch} \vartheta^0$ и определяется равенством (33). Здесь ϑ – аналог (в полувклидовом пространстве) угла нутации оси кинетической симметрии гиростата.

Таким образом, линейное преобразование вида (11) динамической системы (8), (9), реализованное при условиях (20), (21), (23), (24), (27), соответствующее движению первого рода, выделяет из полного множества возможных движений гиростата в стационарном консервативном СД-поле его движение, идентичное движению в пространстве квазикоординат ω_j системы трех изотропных стационарных свободных линейных осцилляторов, определяемых соотношениями (31)–(33).

Из соотношений (7), (32), (34) следуют характерные условия:

$$\dot{\lambda}(t) = N_1, \quad \dot{\phi}(t) = N_2, \quad \vartheta(t) = \vartheta^0, \quad (35)$$

где постоянные величины равны

$$N_1 = \pm H_1 (\operatorname{sh} \vartheta^0)^{-1}, \quad \vartheta^0 \neq 0, \\ N_2 = -\Omega \neq 0. \quad (36)$$

Здесь знак параметра N_1 определяет направление прецессирования оси кинетической симметрии гиростата; второе условие (36) исключает критическую точку из диапазона изменения параметра ориентации ϑ .

Итак, решение (31)–(33) системы уравнений (8), (9) при условиях (20), (23), (24), определяет *регулярную прецессию* носителя, совершаемую при моментно-силовом воздействии на гиростат стационарного однородного СД-поля.

4. Движение второго рода

Рассмотрим режим движения гиростата, при котором решение объединенной системы уравнений (8), (9) вместо ограничений (23) удовлетворяет одному характерному условию $H = 0$, согласно которому

$$C_3 = s_p, \quad (37)$$

где s_p – упомянутое ранее критическое значение параметра s_3 ; далее полагаем $(C_1, C_2) \neq 0$. Принятые здесь условия характеризуют для гиростата *движения второго рода*.

Согласно равенству (4), в критической точке потенциал $U(s_3)$ имеет изолированный локальный экстремум, характер которого определяется знаком параметра n_2 .

Введем условия

$$k_j \neq 0 \quad (j=1, 2, 3), \quad (38)$$

к которым присоединим ограничения (20), (21). В силу соотношений (20), (21), (37) условия (14)–(18) сводятся к следующим:

$$(n_2 B_3 C_j + k_j) B - A C_j = 0, \quad (39)$$

$$A_3 C_j + B_3 k_j = 0 \quad (j=1, 2), \quad (40)$$

$$A C_3 + B k_3 = 0, \quad (41)$$

$$k_1 C_2 - k_2 C_1 = 0, \quad (42)$$

причем ограничение (42) выражает коллинеарность проекций векторов \mathbf{k} , \mathbf{C} на координатную плоскость Ox_1x_2 ортобазиса Γ при условиях (38) и $(C_1, C_2) \neq 0$.

Из уравнения (41) при $n_2 k_3 \neq 0$, согласно условиям (37), (38), непосредственно следует:

$$B = \frac{A n_1}{n_2 k_3}, \quad (43)$$

а в силу соотношений (39), (40), (43) имеем

$$B_3^2 - \mu_1 k_3 B_3 - \mu_2 A_3 = 0, \quad (44)$$

где обозначено $\mu_j = n_j^{-1}$ ($j=1, 2$). Из уравнения (44) находим

$$B_3 = \frac{1}{2} \mu_1 (k_3 \pm \sqrt{D_2}), \quad (45)$$

$$D_2(k_3) = k_3^2 - 4A_3 n_1 s_p \geq 0$$

и из равенства (40) следуют выражения:

$$C_j = -A_3^{-1} B_3 k_j \quad (j=1, 2), \quad (46)$$

удовлетворяющие условию (42). При этом величина параметра k_3 ограничена условием $D_2 \geq 0$, а различные знаки перед радикалом в равенствах (45), (46) имеют место лишь при $D_2 \neq 0$.

Таким образом, для решения системы уравнений (8), (9), подчиненного гипотезе (11) и условиям (37), (38), имеем

$$\begin{aligned} s_j &= B \omega_j + C_j \quad (j=1, 2), \\ s_3 &= B_3 \omega_3 + s_p. \end{aligned} \quad (47)$$

Выделяя в системе уравнений (13) линейную комбинацию вида

$$L(\omega_1, \omega_2) = C_1 \omega_1 + C_2 \omega_2,$$

в результате получаем

$$\dot{L}(\omega_1, \omega_2) = (b\omega_3 + c)(C_1 \omega_2 - C_2 \omega_1), \quad (48)$$

где обозначено

$$b = B^{-1}(B_3 - B), \quad c = B^{-1}s_p.$$

Согласно третьему уравнению системы (13) из равенства (48), в результате интегрирования при условии (20) находим

$$L(\omega_1, \omega_2) = B_3 \left(\frac{1}{2} b \omega_3^2 + c \omega_1 + B^{-1} D \right), \quad (49)$$

где D – аддитивно входящая постоянная интегрирования.

Полагая $\omega_3 = u$ и дифференцируя по t третье уравнение системы (13), в силу выражений (46), (49) получаем

$$\ddot{\omega}_3 + P(\omega_3) = 0, \quad (50)$$

где

$$P(\omega_3) = \sum_{k=0}^3 c_k (\omega_3)^k$$

– полином с коэффициентами

$$\begin{aligned} c_0 &= B^{-2}cD, \quad c_1 = c^2 + B^{-2}bD - (A_3^2 B)^{-1} B_3 k^2, \quad c_2 = \frac{3}{2}bc, \\ c_3 &= \frac{1}{2}b^2, \quad k = +\sqrt{k_1^2 + k_2^2} \end{aligned} \quad (51)$$

и параметром k .

К выражениям (51) следует присоединить определяющие равенства (43), (45).

Уравнение (50) является результирующим, определяющим величину ω_3 , полученным в результате редуцирования системы уравнений (13). Это уравнение имеет первый интеграл

$$\pm \int \frac{du}{\sqrt{Q(u)}} = t, \quad (52)$$

где полином

$$Q(u) = -\frac{1}{2}c_3 u^4 - \frac{2}{3}c_2 u^3 - c_1 u^2 - 2c_0 u + 2H.$$

Здесь H – вторая постоянная интегрирования. Знак в левой части равенства (52) выбирается, исходя из условия $t > 0$.

Интеграл в равенстве (52) является эллиптическим интегралом первого рода, причем величина $Q^2(u)$ – алгебраическая функция жанра 1. Эта функция в фазовом пространстве геометрически интерпретируется как классическая поверхность Римана, представленная в виде односвязного невырожденного тора.

В дальнейшем предполагается, что все корни полинома $Q(u)$ являются простыми. В ином случае интеграл (52) не является эллиптическим и выражается в элементарных (круговых тригонометрических или гиперболических) функциях.

Обращая стандартным методом [6, с. 320] зависимость (52), в результате получаем

$$u(t) = u_p + \frac{1}{4} Q'(u_p) [\wp(t; g_2, g_3) - \frac{1}{24} Q''(u_p)]^{-1}, \quad (53)$$

где $\wp(t; g_2, g_3)$ – эллиптическая функция Вейерштрасса с инвариантами

$$g_2 = \frac{1}{12} c_1^2 - \frac{1}{3} c_0 c_2 - c_3 H, \\ g_3 = \frac{1}{6} \left[c_1 \left(\frac{1}{36} c_1^2 - \frac{1}{6} c_0 c_2 + c_3 H \right) - \frac{1}{3} c_2^2 H \right] + \frac{1}{8} c_0^2 c_3,$$

u_p – простой действительный корень полинома $Q(u)$; штрих обозначает производную функцию от указанной переменной.

В силу равенств (7), (47) имеем

$$\text{ch } \mathcal{G} = -(B_3 u + s_p), \quad (54)$$

откуда, согласно решению (53), следует, что в движении гиростата по параметру \mathcal{G} ось его кинетической симметрии совершает периодические перемещения в конфигурационном пространстве. Это движение реализуется в области конфигурационного пространства, находящегося между двумя соосными конусами с общей вершиной в полюсе O , расположенными внутри заданного изотропного конуса, вершина которого совмещена с тем же полюсом. При этом, согласно равенствам (45), (54), для величины k_3 имеет место следующая оценка сверху:

$$\mu_1[k_3 \pm \sqrt{D_2(k_3)}] \leq -2(1 + s_p).$$

Представляя равенство (53) в сокращенном виде, как $u = \Phi(t)$, и полагая

$$F(t) = b \Phi(t) + c \neq 0, \quad \lambda_j = B^{-1} C_j \quad (j=1, 2), \quad (55)$$

из уравнений (13) при условиях (20), (21), получаем разделенную систему:

$$\dot{\omega}_1 - F(t) \omega_2 = -\lambda_2 \Phi(t), \\ \dot{\omega}_2 + F(t) \omega_1 = \lambda_1 \Phi(t),$$

представляемую для $t \in T$ при $F \neq 0$ в виде

$$\ddot{\omega}_j - N \dot{\omega}_j + F^2 \omega_j = L_j(t) \quad (j=1, 2), \quad (56)$$

где обозначено

$$L_1(t) = b^{-1} [\lambda_1 (F - c) F - \lambda_2 c N], \\ L_2(t) = b^{-1} [\lambda_1 c N + \lambda_2 (c - F) F], \\ N(t) = \frac{\dot{F}(t)}{F(t)}. \quad (57)$$

Здесь функции $F(t)$, $\Phi(t)$ взаимосвязаны равенством (55).

Рассматривая уравнения линейной системы (56) сначала без правых частей, положим $\omega_j(t) = w_j(\tau)$ ($j=1, 2$), где новая переменная

$$\tau = \int_0^t F(s) ds. \quad (58)$$

В результате данная система уравнений приводится к виду [7, с. 430]

$$w_j'' + w_j = 0 \quad (j=1, 2), \quad (59)$$

где штрих обозначает дифференцирование по переменной τ .

Обращая зависимость вида (58) с эллиптической функцией $F(t)$, получаем

$$t = J(\tau),$$

где J – эллиптический интеграл первого рода. Сохраняя прежние обозначения, из равенств (57) находим зависимости вида $L_j(\tau)$. Тогда преобразованная система, соответствующая системе уравнений (59), имеет вид

$$w_j'' + w_j = L_j(\tau) \quad (j=1, 2). \quad (60)$$

Решение системы уравнений (60) представляется в форме

$$w_j(\tau) = w_j^0 \cos \tau + (w_j')^0 \sin \tau + \int_0^\tau L_j(s) \sin(\tau - s) ds \quad (j=1, 2), \quad (61)$$

где нулевые индексы относятся к значениям величин при $\tau = 0$.

Равенства (61) представляют параметрические уравнения ортогональной проекции подвижного годографа вектора ω на координатную плоскость базиса Γ , ортогональную оси кинетической симметрии гиростата. Этот годограф является реономной геометрической фигурой, уравнения которой параметризованы приведенным временем τ . Согласно определяющему тождеству (6) и соотношениям (47), в случае собственного кинетического момента гиростата получаем тождественное равенство

$$B^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) - B_3^2 \omega_3^2 - 2B_3 C_3 \omega_3 + 2B(C_1 \omega_1 + C_2 \omega_2) = 0,$$

где $C_3 = s_p$. Здесь использовано очевидное тривиальное тождество

$$-C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 = 1,$$

которое представляет собой уравнение эллипсоида, охватывающего область пространства квазикоординат ω_j , содержащую подвижный годограф вектора ω .

Итак, линейное преобразование вида (47) динамической системы (8), (9), реализованное при условиях (20), (21), (37), (38), $D_2 \geq 0$, соответствующее движению второго рода, выделяет из полного множества возможных движений гиростата в стационарном консервативном однородном СД-поле два вида движений: периодическое по параметру ϑ движение, соответствующее выражению (53), и движение системы двух изотропных линейных осцилляторов (30), (60), находящихся под заданным нестационарным динамическим воздействием (57).

Заключение

Рассмотренная в статье задача относится к классу задач о движении гиростата под действием стационарного однородного консервативного силового СД-поля, находящегося в заданном полуюевклидовом пространстве. Решение поставленной задачи достигается путем введения гипотетической линейной зависимости, связывающей переменные ω , s – угловой скорости носителя гиростата и направляющего орта однородного параллельного светового потока постоянной интенсивности. Этот подход является известным приемом исследования, восходящим к работам Н.Е. Жуковского и В. Вольтерра [4],

который применялся в исследованиях С.А. Чаплыгина, П.В. Харламова [3], Е.И. Харламовой [4]. Использование данного подхода в работе [3] позволило создать новую концепцию построения решений уравнений движения по инерции твердого тела, ограниченного многосвязной поверхностью, в покоящейся безграничной идеальной однородной жидкости, и произвести классификацию найденных точных решений.

Данный прием реализован в работе [4], где задача о движении гиростата в центральном гравитационном поле сведена к классической задаче Н.Е. Жуковского об интегрировании уравнений движения твердого тела с полостями, полностью заполненными идеальной однородной жидкостью, разрешенной в квадратурах.

Класс задач, в которых применяется упомянутая гипотетическая линейная зависимость, обусловлен характерными свойствами аффинного преобразования, связывающего линейной зависимостью переменные ω , s . Применение этого преобразования позволяет из всего возможного многообразия движений гиростата выделить движения, обладающие свойством композиции гомотетии и перемещения в кинетике. Это свойство явно отражено в соотношениях (32), (47), соответствующих движениям первого и второго рода, соответственно.

Таким образом, линейное $\omega - s$ преобразование исходной динамической системы для изображающей точки в пространстве квазиординат ω_j приводит к движениям двух видов: к линейным колебаниям, совершаемым под воздействием заданной внешней нестационарной динамической нагрузки $L_1(\tau)$, $L_2(\tau)$, и к периодическому движению в одномерном пространстве с квазиординатой $w_3 = u$. Такая интерпретация соответствует известной осцилляторной модели движения твердого тела в стационарных силовых полях.

Список источников

1. Коган А.Ю., Кирсанова Т.С. Термомеханические явления в движении относительно центра масс космического аппарата с солнечным стабилизатором // Космические исследования. 1992. Т. 30, вып. 3. С. 312–320.
2. Макеев Н.Н. Динамика гиростата в световом поле полуевклидова пространства // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2024. Вып. 3(66). С. 35–46. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-3-35-46 EDN: FQYVKC.
3. Харламов П.В. О решениях уравнений динамики твердого тела // Прикладная математика и механика. 1965. Т. 29, вып. 3. С. 567–572.
4. Харламова Е.И. Некоторые решения задачи о движении тела, имеющего закрепленную точку // Прикладная математика и механика. 1965. Т. 29, вып. 4. С. 733–737.
5. Макеев Н.Н. К задаче приведения уравнений динамики твердого тела в гиперболическом пространстве // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2023. Вып. 4 (63). С. 70–79. DOI: 10.17072/1993-0550-2023-4-70-79 EDN: DUFGMT.
6. Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж. Н. Курс современного анализа: в 2 ч. М.: Физматгиз. Ч. 2, 1963. 516 с.
7. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Физматгиз, 1961. 704 с.

References

1. Kogan, A. Yu. and Kirsanova, T. S. (1992), "Termomekhanicheskie yavleniya v dvizhenii otnositel'no tsentra mass kosmicheskogo apparata s solnechnym stabilizatorom", *Kosmicheskie issledovaniya*, vol. 30, issue 3, pp. 312-320.
2. Makeev, N. N. (2024), "Dvizhenie girostata vokrug tsentra inertsii v poluevklidovom prostranstve", *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika*, issue 2 (65), pp. 42–53. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-2-42-53. Russia.
3. Kharlamov, P. V. (1965), "O resheniyakh uravneniy dinamiki tverdogo tela", *Prikladnaya matematika i mekhanika*, vol. 29, issue 3, pp. 567-572.
4. Kharlamova, E. I. (1965), "Nekotorye resheniya zadachi o dvizhenii tela, imeyushchego zakreplennuyu tochku", *Prikladnaya matematika i mekhanika*, vol. 29, issue 4, pp. 733-737.
5. Makeev, N. N. (2023), "K zadache privedeniya uravneniy dinamiki tverdogo tela v giperbolicheskom prostranstve", *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika*, issue 4 (63), pp. 70-79. DOI: 10.17072/1993-0550-2023-4-70-79. Russia.
6. Uitteker, E. T. and Watson, Dzh. N. (1963), "Kurs sovremennogo analiza. V 2 Ch." [A course in modern analysis. In 2 parts], Fizmatgiz, Moscow, Ch.2, 516 pp. Russia.
7. Kamke, E. (1961), "Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam", Fizmatgiz, Moscow, 704 pp. Russia.

Информация об авторе:

H. H. Makeev – доктор физико-математических наук, профессор (410000, Россия, г. Саратов), AuthorID: 374535.

Information about the author:

N. N. Makeev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Saratov, Russia, 410000), AuthorID: 374535.

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 536

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-67-78

<https://elibrary.ru/ostkua>**Специфика изготовления образцов
из смолы горячего отверждения для возможного
использования в условиях открытого космоса****Ксения Александровна Мохирева¹, Константин Юрьевич Кузнецов²,
Ирина Викторовна Осоргина³**¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия^{2,3}Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия¹lyadovaka@icmm.ru²kostya.kuzneczov.2002@mail.ru³osorgina@psu.ru

Аннотация. Развертываемые надувные конструкции – это новый виток развития в производстве комплектующих элементов (отсеки и модули, системы связи и электроснабжения) для космических аппаратов. Несмотря на все многообразие предложенных инженерных подходов и решений, наиболее перспективной идеей является развертывание в космосе многослойных надувных конструкций на основе композиционного материала (препрега). Препрег представляет собой волокнистый армирующий наполнитель, пропитанный смолой (связующим), которая отверждается в условиях открытого космоса. Это позволяет создавать в космосе легкие и прочные конструкции различных форм. Целью работ, ведущихся в этом направлении, было найти отечественный материал в качестве связующего, который может отвечать ряду необходимых требований. Наиболее важными из них являются высокая температура отверждения материала, низкое газовыделение при отверждении и большой срок хранения в неотвержденном состоянии. В работе предлагается использование специальной смолы ВСТ-1208, отвечающей указанным требованиям, для изготовления препрегов. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) проведен анализ проходящих при отверждении реакций. Ввиду невозможности проведения экспериментов в реальных условиях, требовалось определить оптимальный режим производства образцов из предлагаемой смолы в земных условиях. Для этого необходимо смоделировать и проанализировать процесс нагрева образцов в вакуумном термошкафу. Рассматривались ситуации, когда образец находится в экспериментальных условиях – в вакуумном термошкафу на теплопроводящей подложке, и в условиях, приближенных к космическому пространству, – в вакуумном термошкафу без теплопроводящей подложки (например, на теплоизолирующей подложке). После анализа полученных данных подтвердилась возможность использования данного материала при определенных температурных режимах.

Ключевые слова: *цианат-эфирное связующее; горячее отверждение; дифференциальная сканирующая калориметрия; численное моделирование*



Эта работа © 2025 Мохирева К.А., Кузнецов К.Ю., Осоргина И.В. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы посмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Для цитирования: Мохирева К.А., Кузнецов К.Ю., Осоргина И.В. Специфика изготовления образцов из смолы горячего отверждения для возможного использования в условиях открытого космоса // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 67–78. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-67-78. <https://elibrary.ru/ostkua>.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А20-120022590044-7) и при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта №С-26/1025.

Статья поступила в редакцию 25.10.2024; одобрена после рецензирования 12.03.2025; принята к публикации 20.03.2025.

MECHANICS

Research article

Production Peculiarities of Hot-Curing Resin Samples for Potential Use in Open Space Conditions

Kseniia A. Mokhireva¹, Konstantin Yu. Kuznetsov², Irina V. Osorgina³

¹Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

^{2,3}Perm State University, Perm, Russia

¹lyadovaka@icmm.ru

²kostya.kuznecov.2002@mail.ru

³osorgina@psu.ru

Abstract. Deployable structures ensure a new round in manufacturing spacecraft components (compartments and modules, communication and power supply systems). Although there is a great number of engineering approaches and solutions in this field of research, we favor the idea of unfolding in space multi-layer inflatable structures based on a composite material (prepreg). Prepreg consists of reinforcing fibers impregnated with resin (binder) cured under open space conditions. This approach makes it possible to create light and strong structures of various shapes in space. The purpose of this study is to find a domestic material that can serve as a binder and is able to meet the requirements for binders: high curing temperature, low outgassing during curing and long storage life in an uncured state. The paper proposes to use a special resin VST-1208, which meets these requirements, for the production of prepregs. The differential scanning calorimetry method (DSC) was used to analyse the reactions occurring during resin curing. Due to the impossibility of conducting experiments in real conditions, the main step of our study is identifying an optimal strategy for production of resin samples. To this end, it is necessary to model and analyze the process of heating the samples in a vacuum thermo-cabinet. We considered the situations when the sample is in experimental conditions – in a vacuum thermo cabinet on a thermally conductive substrate, and in conditions close to outer space – in a vacuum thermo cabinet without a thermally conductive substrate (for example, on a thermally insulating substrate). Analysis of the data obtained confirmed that the considered material can be used at specified temperatures.

Keywords: cyanate-ether binder; hot curing; differential scanning calorimetry; numerical modeling

For citation: Mokhireva, K. A., Kuznetsov, K. Yu. and Osorgina, I. V. (2025), "Production Peculiarities of Hot-Curing Resin Samples for Possible Use in Open Space Conditions", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 67-78. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-67-78. <https://elibrary.ru/ostkua>.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject no. АААА-А20-120022590044-7) and with the financial support of the Government of the Perm Territory within the framework of scientific project № С-26/1025.

The article was submitted 25.10.2024; approved after reviewing 12.03.2025; accepted for publication 20.03.2025

Введение

Перспективным направлением в освоении космоса является использование космических аппаратов, в которых важную роль играют надувные элементы конструкций. Их использование дает важные преимущества перед металлическими элементами конструкций. Они имеют меньшую массу, более высокий коэффициент упаковки, более надежны в процессе перевода из транспортного в рабочее состояние, не ломаются при перегрузках во время вывода космического аппарата на орбиту. Первые исследования по созданию надувных космических конструкций велись еще в конце 1950-х гг. XX века, а в 1960-х гг. уже активно применялись в космосе (американский спутник Echo1 и шлюзовая камера "Волга" для корабля "Восход") [1]. Данные разработки представляли собой оболочки из "мягких" материалов, приобретающих жесткость под давлением, таким образом, устранялись деформации изгиба. Сейчас надувные элементы в космических аппаратах применяют в качестве жилых модулей (модуль ВЕАМ на МКС), рефлекторов (экспериментальный надувной рефлектор на орбите фирмы L'Garde), пневматических тормозных устройств (устройство "Демонстратор-2Р" для спуска из космоса на Землю), солнечных батарей с несущим отверждаемым надувным каркасом (на космическом аппарате IRIS), надувного каркаса у рефлектора и другие. Но основная проблема заключается в продолжительности использования такой конструкции из-за отсутствия возможности поддерживать необходимое внутреннее давление на продолжительный период времени и из-за риска возникновения повреждений. Поэтому для решения ряда задач в условиях открытого космоса остается необходимым наличие жесткого каркаса или создание надувных элементов, которые становятся жесткими после развертывания с течением времени.

Для придания жесткости надувным конструкциям после их развертывания ученые используют различные методы [1, 2], учитывающие наличие протекающих в них химических, физических и механических процессов. На наш взгляд, наиболее перспективным является использование препрега – полуфабриката композиционного материала, состоящего из волокнистого наполнителя и неотвержденной смолы (связующего). Препрег представляет собой гибкие листы материала, который может стать жестким в результате температурного (горячее отверждение) или химического (холодное отверждение) воздействия. Процесс отверждения можно осуществить в космических условиях после разворачивания конструкции (практически любой формы) за счет солнечной радиации.

В научных работах под солнечной радиацией понимают электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца. В частности, это излучение Солнцем света и тепла. Солнечной радиации подвергается дневная сторона поверхности Земли. В результате происходит ее нагревание. За счет излучения от Земли в космос происходит остывание. В результате поддерживается тепловое равновесие Земли, если рассматривать интервал времени, равный одному году. Поэтому перспективной кажется данная технология. Нужно изготавливать надувные элементы космических аппаратов из препрегов, которые будут отверждаться в космосе под действием высоких температур в результате нагрева от солнечного и земного излучения.

Несмотря на то, что в данной области активно ведутся исследования [2–7], очень важно выбрать отвечающий требуемым условиям материал в качестве отверждаемого связующего. Как было отмечено в статье [3], не любой препрег применим при создании космических объектов. Необходимо, чтобы материал обладал следующими характеристиками: 1) долгий срок хранения в неотвержденном состоянии; 2) незначительное газовыделение при отверждении; 3) работоспособность в большом диапазоне температур и при наличии радиационного излучения; 4) высокие удельная прочность и жесткость, и ряд других требований [3, 5]. В результате наличия большого количества заданных критериев, круг поиска подходящих материалов существенно ограничен.

Кроме этого, ввиду невозможности достижения условий космоса в земных лабораториях исследования в значительной степени затруднены и занимают большое количество времени. Но, несмотря на все трудности, производство легких и прочных конструкций произвольных форм в условиях открытого космоса имеет колоссальную востребованность.

1. Свойства материала

В исследованиях рассматривалось связующее ВСТ-1208 производства российской компании ФГУП "ВИАМ", г. Москва. Неотвержденная смола ВСТ-1208 представляет собой однородный высоковязкий продукт на основе арилдицианата, модифицированного термопластом [8–10]. Матрица с полу-взаимопроникающими сетками на основе циановых эфиров и термопластичного полимера сочетает в себе достоинства термореактивных полимеров (термостойкость, газо-, хемо- и влагостойкость, устойчивость к воздействию ионизирующего излучения, высокая жесткость в отвержденном состоянии) и термопластов, которые позволяют улучшить трещиностойкость материала [8–11]. В результате полимерные матрицы на основе связующего ВСТ-1208 отличаются прочностью и пластичностью и имеют температуру стеклования T_g до 230°C [8]. Кроме того, данная смола обладает рядом необходимых характеристик:

- отверждение смолы происходит за счет сшивания полимерных цепей, что позволяет отказаться от применения растворителей. Так как смола находится в твердом состоянии при комнатной температуре, в ней почти нет подвижности молекул отвердителя. При нагревании смола плавится, подвижность молекул становится большой и начинается реакция отверждения;
- в результате отверждения выделение летучих продуктов составляет не более 3 %;
- может храниться в неотвержденном виде (при температуре $-18 \pm 3^\circ\text{C}$) до 1 года (при комнатной температуре – до 3 месяцев).

2. Экспериментальные исследования

С помощью калориметра фирмы "Mettler-Toledo" были построены ДСК-кривые для связующего ВСТ-1208. Исследуемый материал хранился примерно восемь месяцев при температуре около 18°C, прежде чем был подвергнут испытаниям. Такие условия наиболее реалистичны для соблюдения на космодроме до отправки материала в открытый космос. На рисунке 1 представлены кривые изменения теплового потока в зависимости от температуры при скорости нагрева 10°C/мин. На рисунке 1а видно проявление двух экзотермических тепловых эффектов, что говорит нам о протекании двух химических реакций при отверждении материала. В целях изучения особенностей отверждения проводилось термостатирование исходного материала при разных температурах T_c перед проведением исследования с помощью ДСК. На графиках 1б, 1в, 1г представлены ДСК-кривые для связующего ВСТ-1208, проходящего термостатирование при температурах $T_c=160^\circ\text{C}$, 180°C и 200°C в течение разных промежутков времени. В диапазоне рассматриваемых температур идет отверждение материала. Однако выбранные значения T_c ниже температуры активной стадии второй химической реакции, а самое главное – ниже температуры стеклования T_g материала. Согласно рис. 1, видно, что первая химическая реакция частично или полностью реализуется в материале во время термостатирования. При исследовании материала после термостатирования на калориметре видно, что химические реакции проходят с выделением меньшего количества тепла. Это значит, что материал, подвергнутый термостатированию, частично отвержден. Чем дольше будет идти термостатирование, тем больше вероятность, что материал будет полностью отвержден без необходимости последующего нагрева.

При взвешивании материала после его плавления при 80°C в силиконовой формочке и после термостатирования в течение 2–4 часов при температуре $T_c = 120^{\circ}\text{C}$ или 160°C было замечено, что отсутствует выделение летучих веществ (от 0 до 0,1 %). Далее при взвешивании после отверждения при $T_c = 230^{\circ}\text{C}$ потеря в массе была не более 3 %. Таким образом, в процессе отверждения без продолжительного термостатирования – быстрый прогрев – потеря в массе выше, но не существенна. При частичном отверждении материала во время термостатирования тормозится подвижность молекул реакционной смеси. Смола после плавления переходит в твердое состояние во время реакции отверждения при заданной температуре термостатирования. В результате замедляются массообменные процессы. Меняется условие совместимости среды с молекулами, выделяемыми в ходе реакции. Газ перестает выходить из связующего.

Согласно полученным данным, выдвигалось предположение о целесообразности ограничения максимальной температуры изготовления образцов. Для этого необходимо проводить отверждение материала с помощью длительного термостатирования в диапазоне предложенных температур. В космосе это будет происходить естественным образом за счет инсоляции, на Земле – в вакуумном термощкафу. Отверждение в области предложенных температур позволит приобрести материалу лучшие механические свойства. Иначе в условиях нагрева, превышающих температуру стеклования T_g , произойдет размягчение связующего, и это может привести к значительным деформациям формы конструкции.

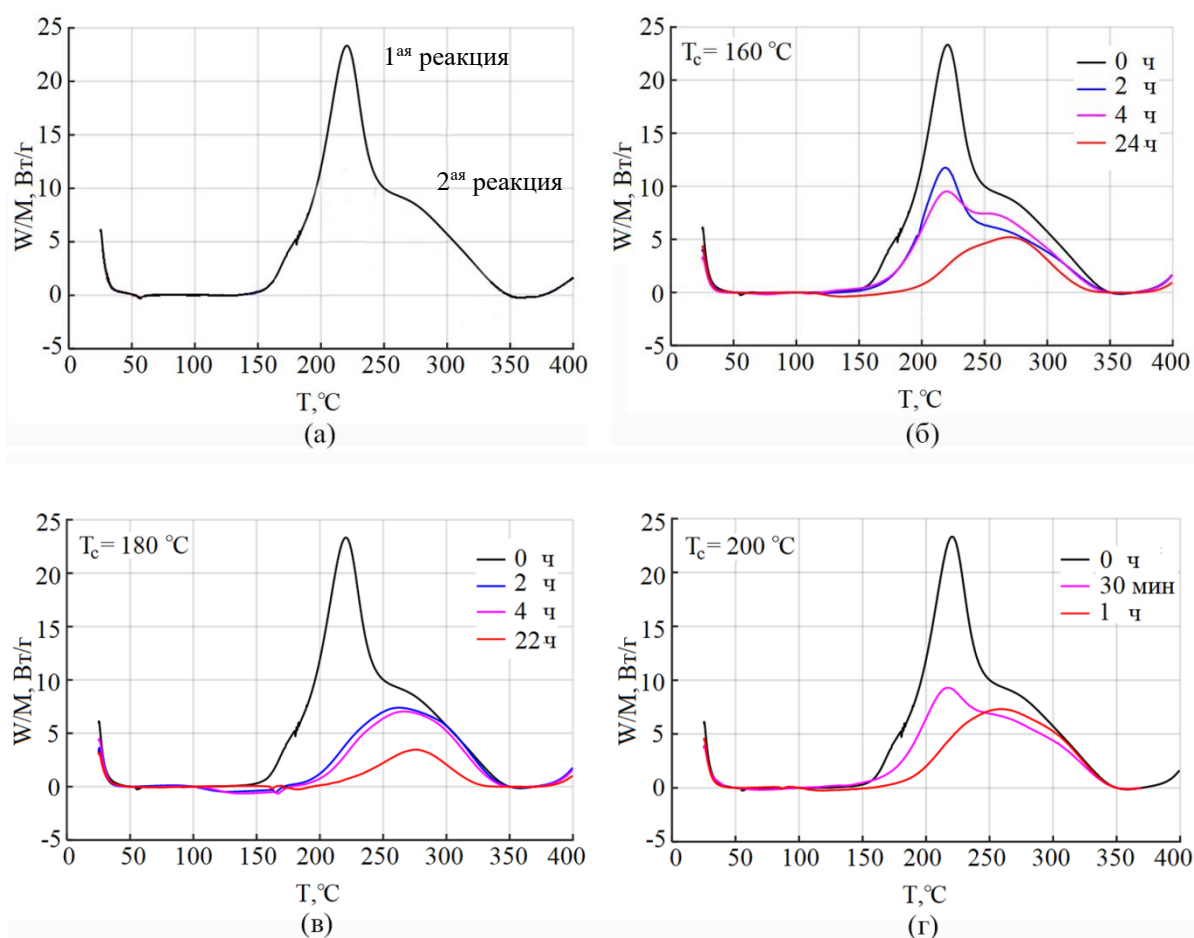


Рис. 1. Кривые ДСК для полимера ВСТ-1208: а) без предварительного термостатирования; с термостатированием при температурах б) 160°C , в) 180°C и г) 200°C

В результате, в последующих расчетах было интересно рассмотреть следующие температурные режимы – 120°C, 150°C и 180°C – и сделать численную оценку по особенностям нагрева материала для выбранных условий термостатирования. Кроме того, данные расчеты позволят определить время прогрева образца для дальнейшего учета при отверждении образцов материала.

3. Постановка задач

Рассматриваемый при моделировании объект исследования представляет собой силиконовую форму для изготовления образца материала заданных размеров и отверждаемую смолу, залитую в эту форму (рис. 2) и накрытую сверху силиконовой пленкой. Отметим, что в рамках данной работы не ставилась задача получить точные данные по нагреву образцов связующего ВСТ-1208 конкретной геометрии в реальных условиях космоса. Но необходимо было смоделировать эксперимент в условиях Земли при задании простой геометрии образцов материала. И, согласно численному эксперименту, определить, сколько времени прогревается образец до необходимой температуры. Поэтому было сформулировано две задачи. *Задача 1*: моделирование прогрева образца в вакуумном термошкафу с теплопроводящей подложкой (за счет излучения от стенок термошкафа и за счет подвода тепла через поверхность, на которой лежит форма с образцом, рис. 2а). *Задача 2*: моделирование прогрева образца в вакуумном термошкафу без теплопроводящей подложки (только за счет теплового излучения стенок термошкафа), то есть в условиях, приближенных к открытому космосу. В рамках постановки второй задачи данных требований можно экспериментально добиться, если разместить форму с образцом на теплоизолирующую подложку (т.е. исключить контакт с теплопроводящей подложкой).

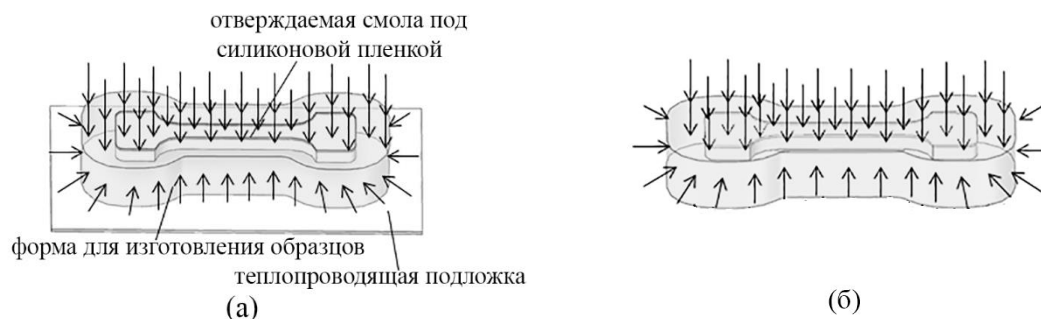


Рис. 2. Схематичное представление образца связующего ВСТ-1208, налитого в силиконовую форму, в условиях прогрева: а) в вакуумном термошкафу на теплопроводящей подложке и б) в вакуумном термошкафу без теплопроводящей подложки

Отметим, что во всех случаях смола, залитая в форму, закрывается сверху тонкой силиконовой пленкой. Таким образом, исследуемый образец материала со всех сторон окружен силиконом и с вакуумом контактирует только силикон. Наличие силиконовой прослойки позволяет смоле не слипаться, находясь в неотвержденном состоянии (в период хранения). Кроме того, силикон незначительно ускоряет процесс прогрева образца, так как он обладает низкой теплоемкостью (табл. 2) и прогревается быстрее.

Исходя из поставленных задач, учитывая ограниченность пространства в термошкафу, а также необходимость последующего экспериментального исследования отвержденного материала, была рассмотрена следующая геометрия образца, представленная на рис. 3. Согласно заданным размерам, масса смолы составляла чуть более 5 граммов.

Следует добавить, что все расчеты проводились на образцах единой формы и размера. Чем меньше будет размер образца, тем быстрее он будет прогреваться и, соответственно, наоборот.

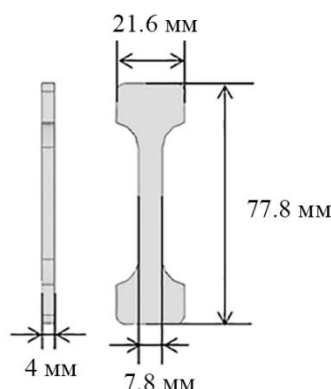


Рис. 3. Расчетные размеры исследуемого образца смолы

Таким образом, в работе была рассмотрена конечно-элементная модель, описывающая прогрев образца смолы заданных размеров в силиконовой форме при смешанных граничных условиях (первого и второго рода – задача 1) и при граничных условиях второго рода (задача 2). Образец смолы в силиконовой форме с начальной температурой в 22°C помещался в среду, нагретую до температуры в 120°C, 150°C или 180°C, на подложку, прогретую до той же температуры (задача 1) или без нее (задача 2). Обе задачи рассматриваются в трехмерной постановке, при разбивке использовались 8-узловые элементы с квадратичным геометрическим порядком. При разбивке для всего объекта исследования обеспечивалась регулярная сетка, и размер элемента не превышал 0.1 мм. Критерием выбора размеров было следующее условие: дальнейшее изменение их значений в два раза давало несущественную разницу в результатах. Во второй задаче дополнительно рассматривалась силиконовая форма с образцом, обернутая по всей поверхности в тонкую алюминиевую фольгу. Наличие фольги можно объяснить тем, что алюминий обладает высокой теплопроводностью, что, вероятно, обеспечит равномерный прогрев изделий малой толщины. Кроме того, фольга может обеспечить в космосе нагрев материала до нужной температуры за счет удачного соотношения коэффициентов отражения и излучения [12].

4. Теоретическая часть

В расчетах на всех поверхностях, которые контактируют с вакуумом, – рассматриваемая силиконовая форма и силиконовая пленка, закрывающая образец смолы – ставится следующее условие: поток тепла q всегда направлен по нормали n к поверхности. Этот поток тепла состоит из двух слагаемых:

$$q = q_1 + q_2. \quad (1)$$

Первое слагаемое в формуле (4.1) – это излучение по закону Стефана–Больцмана:

$$q_1 = C_\sigma T^4 n, \quad (2)$$

где $C_\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная Стефана–Больцмана, T – температура образца в Кельвинах, n – вектор нормали.

Тепловой поток со стороны стенок термошкафа за счет излучения (задача 1 и задача 2), а также со стороны теплопроводящей подложки за счет теплопередачи (задача 2) принимается постоянным вектором потока тепла, таким образом, второе слагаемое можно задать формулой:

$$q_2 = qn. \quad (3)$$

Когда в рассматриваемой силиконовой форме с образцом смолы выравнивается температура, и ее значение станет равной некому значению T_0 , то поток через поверхность будет равен нулю. То есть,

$$q_1 + q_2 = C_\sigma T_0^4 n + qn = 0. \quad (4)$$

и, как следствие, $q = -C_\sigma T_0^4$.

Изменение температуры по всей толщине формы и образца рассчитывалось в соответствии с уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_V T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \quad (5)$$

где ρ – плотность материала, c_V – теплоемкость среды при постоянном объеме, T – температура, λ – коэффициент теплопроводности.

При решении задач использовались следующие данные о материалах, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Физические свойства материалов

Материал	ВСТ-1208	Силикон	Алюминиевая фольга
Плотность, кг/м ³	1300	2330	2700
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0.2	0.2	235
Коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·К)	1100	0.84	920
Коэффициент отражения	0.3	0.3	0.91
Коэффициент излучения (степень черноты)	0.7	0.7	0.04

5. Результаты

При решении первой задачи было задано, что силиконовая форма с залитой в нее смолой лежит на основании, которое прогрето до нужной нам температуры T_0 (120°C, 150°C или 180°C). Эта температура все время поддерживается постоянной. Рассчитаем тепловой поток от поверхности подложки:

$$q = -\varepsilon C_\sigma T_0^4 = -0.7 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (T_0 + 273.15)^4, \quad (6)$$

где ε – спектральная степень черноты (для абсолютно черного тела $\varepsilon = 1$). В термошкафу также поддерживается постоянной заданная температура T_0 . Чтобы учесть тепловое излучение от стенок термошкафа, аналогичное значение теплового потока задается и на поверхностях контакта формы с образцом и вакуумом (рис. 2а). Во втором случае учитывалось излучение только от стенок термошкафа.

В ходе решения обеих задач были получены следующие температурно-временные зависимости, представленные на рис. 4 и в табл. 2.

Согласно полученным результатам видно, что наличие теплопроводящей подложки незначительно ускоряет процесс прогрева материала. Но при этом изменение температуры происходит достаточно неравномерно по объему образца. Наличие алюминиевой фольги, в которую обернута форма с образцом, увеличивает время прогрева почти в 3.5 раза, но изменение температуры происходит равномерно по всему объему.

Очевидно, что чем выше мощность теплового потока, тем прогрев происходит быстрее. Но в рамках данной геометрии образца время прогрева незначительно меняется, как в случае наличия теплопроводящей подложки, так и без ее учета. Алюминиевая фольга обладает высоким коэффициентом отражения, поэтому время прогрева увеличивается, но возрастает не критически. А высокий коэффициент теплопроводности алюминия позволяет равномерно перераспределять температуру по объему, что пригодится в условиях открытого космоса для конструкций сложной геометрии.

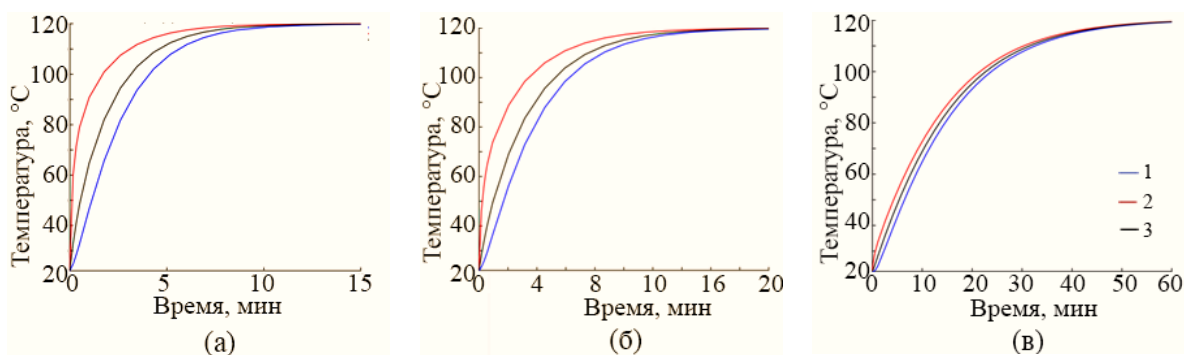


Рис. 4. Графики температурно-временной зависимости для образцов смолы BCT-1208 (налитой в форму и со всех сторон закрытой силиконом) в условиях предварительного прогрева до температуры 120°C а) в вакуумном термошкафу с теплопроводящей подложкой; б) в термошкафу без теплопроводящей подложки и в) в термошкафу без теплопроводящей подложки и дополнительно обернутой алюминиевой фольгой.

1– минимальная температура,
2– максимальная температура и 3– средняя температура в образце

Таблица 2. Время нагрева образца смолы BCT-1208 до необходимой температуры в вакуумном термошкафу с учетом наличия теплопроводящей подложки и/или алюминиевой фольги, в которую обернута форма со смолой

Температура прогрева, °C	Время, мин		
	теплопроводящая подложка	без теплоизолирующей подложки	без теплоизолирующей подложки + фольга
120	11.97	17.83	57.43
150	11.68	16.83	53.10
180	11.35	15.28	48.10

Заключение

В ходе исследований была показана перспективность работы со смолой BCT-1208 для создания отверждаемых конструкций в космосе. Экспериментально установлено, что при отверждении в материале протекают две химические реакции.

При этом первая химическая реакция идет в диапазоне температур 120–200°C, другими словами, происходит отверждение. Длительная выдержка при заданных температурах уменьшает влияния второй химической реакции на свойства материала. Отверждение и последующая эксплуатация материала в условиях нагрева, не превышающих температуру стеклования, обеспечивают необходимую жесткость и геометрическую стабильность конструкций.

Благодаря вычислительным экспериментам установлено, что небольшие образцы смолы (весом около 5 граммов), помещенные в специальную силиконовую форму, могут быть успешно прогреты до заданных температур в вакуумном термошкафу за счет теплового излучения. При этом наличие или отсутствие теплопроводящей подложки (вспомогательного прогрева за счет теплопередачи) не оказывает существенного влияния на процесс прогрева. Расчеты также показали, что время прогрева образцов смолы до заданных температур незначительно. Поэтому его можно не учитывать при изготовлении образцов для дальнейших исследований.

Использование алюминиевой фольги в качестве поверхностного слоя с высокой теплопроводностью и удачным соотношением коэффициентов отражения и излучения при создании образцов замедляет процесс прогрева смолы, но позволяет равномернее перераспределять температуру по всему объему образца. Этот подход может быть эффективно применен для достижения однородного отверждения конструкций в условиях неравномерного нагрева. Проведенные нами исследования и публикации в других источниках также подтверждают целесообразность создания многослойных образцов на основе смолы ВСТ-1208 для последующих экспериментальных исследований. Материал демонстрирует хороший потенциал для использования в создании элементов, предназначенных для работы в космических условиях.

Список источников

1. *Litteken D.A.* Inflatable technology: using flexible materials to make large structures // *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXI*. 2019. Vol. 10966. P. 1096603. DOI: 10.1117/12.2500091.
2. *Schenk M., Viquerat A.D., Seffen K.A., Guest S.D.* Review of Inflatable Booms for Deployable Space Structures: Packing and Rigidization // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2014. Vol. 51, № 3. P. 762–778. DOI: 10.2514/1.A32598.
3. *Елисеева А.Ю., Комар Л.А., Кондюрин А.В.* Вычислительное моделирование отверждения каркаса надувной антенны спутника на околоземной орбите // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2020. Т. 13, № 4. С. 414–423. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.4.32 EDN: PDFKAL.
4. *Поморцева Т.Н., Комар Л.А.* О возможности создания крупногабаритных конструкций в условиях открытого космоса // *Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика*. 2023. № 3 (62). С. 64–75. DOI: 10.17072/1993-0550-2023-3-64-75 EDN: QHASCC.
5. *Cadogan D.P., Scarborough S.E.* Rigidizable materials for use in gossamer space inflatable structures. *Proceedings of 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Anaheim, CA, USA. 2001. p. 2001–1417. DOI: 10.2514/6.2001-1417.
6. *Liu T.W., Bai J.B.* Folding behavior of a deployable composite cabin for space habitats – part 1: Experimental and numerical investigation // *Composite Structures*. 2022. Vol. 302. P. 16244. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116244 EDN: SZRHUJ.

7. Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Rusakov S.V., Kondyurin A.V. Curing of large prepreg shell in solar synchronous Low Earth Orbit: Precession flight regimes // *Acta Astronautica*. 2018. Vol. 151. P. 342–347. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.06.029 EDN: YBODMD.
8. Mukhametov R.R., Merkulova Yu.I., Dolgova E.V., Dushin M.I. Synthesis of heat-resistant polymer matrices via polycyclotrimerization of cyanate esters // *Polymer Science. Series D*. 2015. Vol. 8, № 1. P. 22–26. DOI: 10.1134/S1995421215010104 EDN: WQZZSN.
9. Железняк В.Г., Чурсова Л.В., Григорьев М.М., Косарина Е.И. Исследование повышения сопротивляемости ударным нагрузкам полицианурата с модификатором на основе линейных термостойких полимеров // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 2 (27). С. 26–28. EDN: QCHAEZ.
10. Славин А.В., Старцев О.В. Свойства авиационных стеклопластиков и углепластиков на ранней стадии климатического воздействия // *Труды ВИАМ*. 2018. №9 (69). С. 71–82. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-71-82 EDN: VAJJYG.
11. Гусева М.А. Циановые эфиры – перспективные термореактивные связующие (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2. С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-45-50 EDN: TQKEPZ.
12. Фагалов А.Р., Беляев А.Ю. Моделирование стационарного теплового режима цилиндрического элемента каркаса на орбите // *Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика*. 2024. № 4 (67). С. 78–94. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-4-78-94 EDN: QZXOIZ.

References

1. Litteken, D. A. (2019), "Inflatable technology: using flexible materials to make large structures", *Proceedings of SPIE. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXI*, vol. 10966, p. 1096603. DOI: 10.1117/12.2500091.
2. Schenk, M., Viquerat, A. D., Seffen, K. and Guest, S. D. (2014), "Review of Inflatable Booms for Deployable Space Structures: Packing and Rigidization", *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 51, no. 3, pp. 762-778. DOI: 10.2514/1.A32598.
3. Eliseeva, A. Yu., Komar, L. A. and Kondyurin, A. V. (2021), "Computational modeling of the curing of a frame of an inflatable satellite antenna in near-earth orbit", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 62, pp. 1234-1242. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.4.32 EDN: PDFKAL.
4. Pomorceva, T. N. and Komar, L. A. (2023), "About the Possibility of Creating Large-Scale Structures in the Open Space Conditions", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 3(62), pp. 64-75. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2023-3-64-75 EDN: QHASCC.
5. Cadogan, D. P. and Scarborough, S.E. (2001), "Rigidizable materials for use in gossamer space inflatable structures", *Proceedings of 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Anaheim, USA, p. 2001-1417. DOI: 10.2514/6.2001-1417.
6. Liu, T.W. and Bai, J.B. (2022), "Folding behavior of a deployable composite cabin for space habitats – part 1: Experimental and numerical investigation", *Composite Structures*, vol. 302, p. 16244. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116244 EDN: SZRHUJ.

7. Pestrenin, V. M., Pestrenina, I. V., Rusakov, S. V. and Kondyurin, A. V. (2018), "Curing of large prepreg shell in solar synchronous Low Earth Orbit: Precession flight regimes", *Acta Astronautica*, vol. 151, pp. 342-347. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.06.029 EDN: YBODMD.
8. Mukhametov, R. R., Merkulova, Yu. I., Dolgova, E. V. and Dushin, M. I. (2015), "Synthesis of heat-resistant polymer matrices via polycyclotrimerization of cyanate esters", *Polymer Science. Series D*, vol. 8, no. 1, pp. 22-26. DOI: 10.1134/S1995421215010104 EDN: WQZZSN.
9. Zheleznyak, V. G., Chursova, L. V., Grigor'ev, M. M. and Kosarina, E. I. (2013), "Study of an increase in shock resistance of polycyanurate with modifier based on linear heat-resistant polymers", *Aviation Materials and Technologies*, no. 2(27), pp. 26-28. (In Russ.). EDN: QCHAEZ.
10. Slavin, A. V. and Startsev, O. V. (2018), "Properties of aircraft glass- and carbonfibers reinforced plastics at the early stage of natural weathering", *Trudy VIAM*, no. 9(69), pp. 71-82. (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-71-82 EDN: VA-JJYG.
11. Guseva, M. A. (2015), "Cyanic esters are prospective thermosetting binders (review)", *Aviation Materials and Technologies*, no. 2, pp. 45-50. (In Russ.). DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-45-50 EDN: TQKEPZ.
12. Fagalov, A. R. and Beliaev, A. Yu. (2024), "Modeling of Stationar Thermal Regime of Cylindrical Frame Element in Orbit", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 4(67), pp. 78-94. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-4-78-94. <https://elibrary.ru/QZXOIZ> (In Russ.).

Информация об авторах:

К. А. Мохирева – младший научный сотрудник лаборатории микромеханики структурно-неоднородных сред Института механики сплошных сред УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1), AuthorID: 882444;

К. Ю. Кузнецов – студент магистратуры кафедры вычислительной и экспериментальной механики Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15);

И. В. Осоргина – инженер кафедры вычислительной и экспериментальной механики Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15), AuthorID: 146978.

Information about the authors:

K. A. Mokhireva – junior researcher of the laboratory of Micromechanics of structurally inhomogeneous media, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS (1, Akademika Koroleva St., Perm, Russia, 614013), AuthorID: 882444;

K. Yu. Kuznetsov – master student of the department of Computational and experimental mechanics, Perm State University (15, Bukireva St., Perm, Russia, 614990);

I. V. Osorgina – engineer of the department of Computational and experimental mechanics, Perm State University (15, Bukireva St., Perm, Russia, 614990), AuthorID: 146978.

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 532.685

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-79-90

<https://elibrary.ru/alqwze>**Применение метода многих масштабов к задаче
о возникновении концентрационной конвекции
в прямоугольной области пористой среды****Михаил Романович Хабин¹, Борис Сергеевич Марышев²**^{1,2}Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия^{1,2}Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия¹khabin.m@icmm.ru²bmaryshev@icmm.ru

Аннотация. Концентрационная конвекция оказывает значительное влияние на транспорт примеси в пористых средах. Такие транспортные процессы могут возникать в различных геофизических системах. Концентрационная конвекция часто рассматривается по аналогии с термогравитационной конвекцией в пористых средах. Обычно не учитывается тот факт, что примесь может адсорбироваться на скелете пористой среды. Одним из подходов позволяющим учесть этот факт, является МИМ (mobile-immobile media) подход. В статье исследуется возникновение концентрационной конвекции в вытянутой прямоугольной области заполненной пористой средой, в поле силы тяжести при постоянном перепаде давления и концентрации. В качестве модели фильтрации используется закон Дарси–Буссинеска. Задача решается аналитически методом многих масштабов в приближении слабой силы плавучести. Получены аналитические выражения полей концентрации и давления для основного состояния (случай отсутствия тяжести) и первого порядка малости. Проведено сравнение результатов численного счета с аналитическим решением. Показано, что бесконвективный случай является неустойчивым при сколь угодно малом перепаде концентрации, а возникающее течение представляет собой уединенную конвективную ячейку. Положение область наибольшей неоднородности концентрации зависит от соотношения чисел Пекле и Релея–Дарси.

Ключевые слова: пористая среда; концентрационная конвекция; метод многих масштабов; МИМ-подход

Для цитирования: Хабин М. Р., Марышев Б. С. Применение метода многих масштабов к задаче о возникновении концентрационной конвекции в прямоугольной области пористой среды // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 79–90. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-79-90. <https://elibrary.ru/alqwze>.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124021600038-9.

Статья поступила в редакцию 20.10.2024; одобрена после рецензирования 13.01.2025; принята к публикации 20.03.2024.



Эта работа 2025 © Хабин М.Р., Марышев Б.С. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

MECHANICS

Research article

Application of the Method of Multiple Scales to the Problem of Occurrence of Solute Convection in Rectangular Region of Porous Medium

Mikhail R. Khabin¹, Boris S. Maryshev²^{1,2}Institute of Continuous Media Mechanic, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia^{1,2}Perm State University, Perm, Russia¹khabin.m@icmm.ru²bmaryshev@icmm.ru

Abstract. Concentration convection has a significant effect on the transport of impurity in porous media. Such transport processes can occur in a variety of geophysical systems. Concentration convection is often considered by analogy with thermogravitational convection in porous media without taking into account the fact that the impurity can be adsorbed on the skeleton of the porous medium. One of the approaches allowing to take this fact into account is the MIM (mobile-immobile media) approach. The paper studies the occurrence of concentration convection in an elongated rectangular region filled with porous medium in the field of gravity at a constant pressure and concentration drop. The Darcy-Boussinesq law is used as a filtration model. The problem is solved analytically by the method of many scales in the approximation of weak buoyancy force. Analytical expressions of concentration and pressure fields for the ground state (the case of no gravity) and the first order of smallness are obtained. The results of numerical calculation are compared with the analytical solution. It is shown that the convective-free case is unstable at any small concentration drop, and the resulting flow is a solitary convective cell. The position of the region of the largest concentration inhomogeneity depends on the ratio of the Peclet and Rayleigh-Darcy numbers.

Keywords: *porous medium; solutal convection; method of multiple scales; MIM approach*

For citation: Khabin, M. R. and Maryshev, B. S. (2025), "Application of the Method of Multiple Scales to the Problem of Occurrence of Solute Convection in Rectangular Region of Porous Medium", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 79-90. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-79-90. <https://elibrary.ru/alqwze>.

Acknowledgments: the work was performed within the framework of the state assignment; the registration number of the topic is 124021600038-9.

The article was submitted 20.10.2024; approved after reviewing 13.01.2025; accepted for publication 20.03.2024

Введение

Использование природных геологических систем в производственной и промышленной деятельности человека сопряжено с рядом осложняющих факторов. Эти системы состоят из различных пород, грунтов и почв, которые являются пористыми средами. При фильтрации жидкости через эти среды могут происходить процессы, в результате которых частицы твердых веществ и примесей переносятся жидкостью, а также частично растворяются в ней. Эти процессы могут привести к техногенным катастрофам. Учет этих процессов при добыче и обработке полезных ископаемых на рудниках помогает предотвратить опасные последствия, для этого, например, может быть рассчитана прочность конструкции при добыче сырья из пластов.

Риск загрязнения почвы возникает при эксплуатации полигонов, на которых собираются бытовые и промышленные отходы. Снег и дождевая вода с высокой концентрацией загрязнений могут проникать в грунт, перенося с собой вредные вещества. Это может привести к загрязнению водных объектов, включая источники питьевой воды.

Проблемы, связанные с переносом примесей в пористой среде, возникают при очистке фильтров и разработке строительных материалов, когда важно поддерживать чистоту материала для сохранения его свойств. В таких системах могут быть значительные различия в плотности жидкости и примесей, что приводит к неустойчивости и возникновению концентрационной конвекции, а также усложняет процесс транспорта веществ. Одной из первых работ, в которой экспериментально наблюдалась концентрационная конвекция в пористых средах, является [1].

Основываясь на вышеперечисленных причинах, можно сказать, что изучение переноса примеси с учетом адсорбционно-десорбционных свойств необходимо для большого числа технологических фильтрационных процессов, а также для предотвращения экологических катастроф. Для изучения сорбции в пористых средах существует стандартный эксперимент, заключающийся в прокачке конечного объема смеси через массив пористой среды при заданном перепаде давления или при фиксированном расходе. В ряде подобных экспериментов [2] обнаруживалось влияние гравитационной неустойчивости на ход экспериментов. Исследование концентрационной конвекции для корректного учета этого влияния необходимо при подготовке и проведении экспериментов по изучению процессов сорбции в пористых средах.

Наиболее популярным подходом к описанию сорбции в пористых средах является МИМ (mobile-immobile media) подход [3], заключающийся в разделении примеси на две фазы: мобильную и иммобильную. Мобильная фаза примеси – частицы, перемещающиеся вместе с потоком несущей жидкости, иммобильная фаза – частицы, осевшие на скелете пористой среды за счет, например, сил Ван дер Ваальса. Обмен примесью между фазами обычно описывается некоторым кинетическим уравнением, выбор уравнения зависит от характера взаимодействия частиц со стенками пористой среды. В литературе представлено множество форм кинетических уравнений в рамках МИМ-подхода, представим наиболее распространенные из них:

Стандартная модель МИМ [4] – скорости адсорбции и десорбции прямо пропорциональны концентрациям в мобильной и иммобильной фазе соответственно. Фрактальная (дробная) модель МИМ [5] – предполагает, что частицы примеси, находящиеся в пористой среде, могут оставаться связанными на непредсказуемо долгие периоды времени. Распределение времени этой связанности не имеет среднего значения, что свидетельствует о субдиффузионном переносе. Следовательно, кинетическое уравнение можно выразить через линейную зависимость потока частиц в неподвижной фазе от дробной производной Капуто от концентрации частиц в подвижной фазе по времени. Данная модель имеет экспериментальное подтверждение, в основном для низких концентраций примеси [6]. Нелинейная МИМ-модель с насыщением [7] – описывает транспорт в пористых средах для высоких концентраций растворенного вещества. В модели задается некоторое предельное значение концентрации иммобилизованной примеси, при котором процесс осаждения частиц (адсорбции) останавливается. В [7] этот эффект описывается кинетической моделью второго порядка, в которой скорость адсорбции прямо пропорциональна разнице между предельной концентрацией насыщения и концентрацией в немобильной фазе.

В настоящей статье решается двумерная задача устойчивости течения смеси через вытянутую прямоугольную область пористой среды. Предполагается, что горизонтальный размер области больше вертикального в 10 раз. Между вертикальными границами задается перепад концентрации и давления, на горизонтальных границах является условие отсутствия потоков несущей жидкости и примеси. Задача решается в приближении Дарси–Буссинеска [8], транспорт примеси описывается в рамках линейной МИМ-модели [4].

Статья состоит из пяти разделов. В первом обсуждается актуальность исследования и приведен обзор литературы. Второй раздел посвящен постановке задачи. Третий подробно раскрывает методику решения. Четвертый раздел представляет полученные результаты. В последнем пятом разделе приведены основные выводы.

Постановка задачи

Рассматривается двумерная задача транспорта примеси через прямоугольный массив пористой среды с отношением сторон $H/L = 0.1$. Фильтрация примеси происходит за счет заданного на вертикальных границах постоянного перепада давления $P_+ - P_-$, на которых так же задается и постоянный перепад концентрации $C_+ - C_-$. На горизонтальных границах – условие непротекания несущей жидкости и непроницаемости для растворенного в ней вещества (рис. 1).

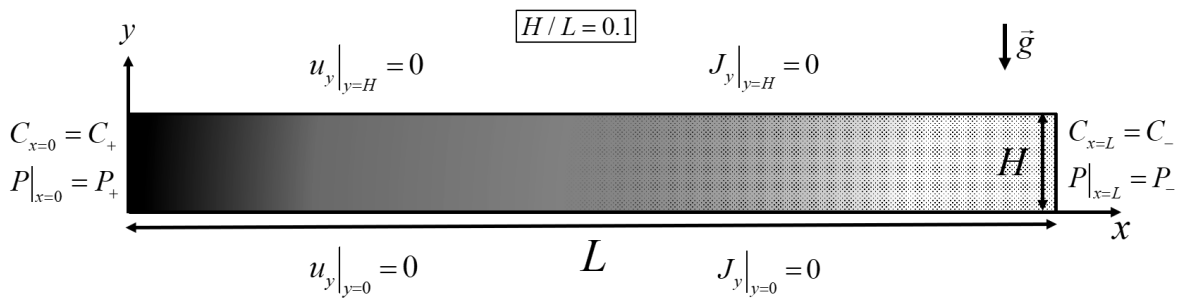


Рис. 1. Принципиальная схема решаемой задачи

Транспорт примеси моделируется в рамках МИМ-подхода [3]. Концентрация примеси разделяется на две фазы мобильности: мобильную и иммобильную. Примесь в мобильной фазе может переноситься потоком несущей жидкости. Иммобильная фаза формируется частицами, осевшими (адсорбированными) на стенки пор, такие частицы не могут переноситься потоком несущей жидкости. Уравнение переноса для МИМ подхода (1) имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(\phi C + Q)}{\partial t} = \text{div}(\phi \mathbf{J}), \quad \mathbf{J} = -D \nabla C + \mathbf{u} C, \quad (1)$$

где C, Q – объемные концентрации мобильной и иммобильной примеси, \mathbf{u} – скорость фильтрации, ϕ – пористость среды, D – эффективный коэффициент диффузии.

Фильтрация описывается законом Дарси–Буссинеска [8], учитывающим изменение плотности раствора за счет изменения концентрации примеси. Неоднородность плотности в поле силы тяжести позволяет описать возникновение концентрационной конвекции.

Жидкость считаем несжимаемой. Математически это выражается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= -\frac{\kappa}{\eta}(\nabla P' + \rho_0 g \beta_C C \mathbf{k}), \quad P' = P + \rho_0 g y, \\ \operatorname{div} \mathbf{u} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{u} – скорость фильтрации, κ – коэффициент проницаемости, η – динамическая вязкость, ρ_0 – плотность несущей жидкости, β_C – коэффициент концентрационного расширения, C – концентрация мобильной фазы, g – ускорение свободного падения, \mathbf{k} – орт вектор оси y , P – давление жидкости, P' – полное давление жидкости (с добавком гидростатического распределения). При дальнейшем употреблении формулы (2) штрих у давления под знаком градиента будет опущен.

Уравнение (1) должно быть дополнено так называемым кинетическим уравнением, описывающим фазовый переход между фазами мобильности.

В данной работе мы используем наиболее простую линейную МІМ-модель [4]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \alpha(C - K_d Q), \quad (3)$$

где α – коэффициент переноса примеси, K_d – коэффициент распределения примеси.

Итоговая система уравнений, описывающая транспорт примеси в пористой среде с учетом процессов сорбции и конвекции, имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\phi C + Q)}{\partial t} &= \phi D \Delta C - \mathbf{u} \cdot \nabla C, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} &= \alpha(C - K_d Q), \\ \mathbf{u} &= -\frac{\kappa}{\eta}(\nabla P + \rho_0 g \beta_C C \mathbf{k}), \\ \operatorname{div} \mathbf{u} &= 0; \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве граничных условий для задачи имеем постоянный перепад давления и концентрации, заданные между вертикальными границами и непроницаемые для вещества и несущей жидкости горизонтальные границы:

$$\begin{aligned} P(x=0, y, t) &= P_+, \quad P(x=L, y, t) = P_-, \\ C(x=0, y, t) &= C_+, \quad C(x=L, y, t) = C_-, \\ (\mathbf{J} \cdot \mathbf{k})|_{y=0, H} &= 0, \quad (\mathbf{u} \cdot \mathbf{k})|_{y=0, H} = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

Постановка задачи для двумерного случая

Для удобства перепишем уравнения (4) в безразмерной форме. Для этого выберем следующие масштабы: концентрация мобильной компоненты $[C] = C_+ - C_-$, концентрация немобильной компоненты $[Q] = \phi(C_+ - C_-)$, время $[t] = L^2 / D$, длина $[l] = L$, скорость фильтрации $[\mathbf{u}] = \phi D / L$, давление $[P] = P_+ - P_-$.

Тогда система (4) переписывается в безразмерном виде:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(c+q)}{\partial t} &= \Delta c - \mathbf{u} \cdot \nabla c, \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= ac - bq, \\ \mathbf{u} &= -(\text{Pe} \nabla p + \text{Rpr} \mathbf{k}), \\ \text{div } \mathbf{u} &= 0;\end{aligned}\tag{6}$$

где $\text{Pe} = \kappa(P_+ - P_-) / \phi \eta D$ – диффузионное число Пекле, $\text{Rp} = \kappa \rho_0 g \beta_c (C_+ - C_-) / \phi \eta D$ – число Рэлея–Дарси, $a = \alpha L^2 / \phi D$ – коэффициент адсорбции, $b = \alpha K_d L^2 / D$ – коэффициент десорбции. Число Пекле Pe характеризует отношение сил давления к вязким силам, а число Рэлея–Дарси Rp отношение сил плавучести к силам вязкости. За интенсивность перехода между фазами мобильности отвечают коэффициенты сорбции (a, b).

Перепишем систему (6) для двухмерного случая, исключив скорость фильтрации:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(c+q)}{\partial t} &= \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \text{Pe} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \text{Rpr} \frac{\partial c}{\partial y} \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= ac - bq \\ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} &= -\frac{\text{Rp}}{\text{Pe}} \frac{\partial c}{\partial y}\end{aligned}\tag{7}$$

Граничные условия (5) в безразмерном виде:

$$\begin{aligned}c(x=0, y, t) &= 1, \quad c(x=1, y, t) = 0, \\ p(x=0, y, t) &= 1, \quad p(x=1, y, t) = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=0, h} &= -\frac{\text{Rp}}{\text{Pe}} c \Big|_{y=0, h}, \quad \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0, h} = 0;\end{aligned}\tag{8}$$

в случае отсутствия сил плавучести ($\text{Rp} = 0$) задача имеет решение:

$$c_0(x) = \frac{e^{\text{Pe} \cdot x} - e^{\text{Pe}}}{1 - e^{\text{Pe}}}, \quad q_0(x) = \frac{a}{b} c_0(x), \quad p_0(x) = 1 - x.\tag{9}$$

Метод решения задачи

При малых значениях числа Рэлея–Дарси к системе уравнений (6) может быть применен метод разложения по малому параметру.

Система уравнений (6) после введения малого безразмерного параметра ε :

$$\begin{aligned}\frac{\partial(c+q)}{\partial t} &= \Delta c + \text{Pe} \left((\nabla p \cdot \nabla c) + \varepsilon \xi c \frac{\partial c}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= ac - bq, \\ \Delta p &= -\varepsilon \xi \frac{\partial c}{\partial y};\end{aligned}\tag{10}$$

где $\text{Rp}/\text{Pe} = \xi \varepsilon$, ε – безразмерный малый параметр, Rp число Рэлея–Дарси, Pe число Пекле.

Граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned}\left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=0,h} &= -\varepsilon \xi c|_{y=0,h}, \quad \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0,h} = 0, \\ p(x=0, y, t) &= 1, \quad p(x=1, y, t) = 0, \\ c(x=0, y, t) &= 1, \quad c(x=1, y, t) = 0.\end{aligned}\tag{11}$$

Согласно методу многих масштабов [9], искомые функции раскладываются в ряд по малому параметру:

$$\begin{aligned}c(x, y, t) &= c_0(x) + \varepsilon c_1 + \varepsilon^2 c_2 + \dots \\ q(x, y, t) &= q_0(x) + \varepsilon q_1 + \varepsilon^2 q_2 + \dots \\ p(x, y, t) &= p_0(x) + \varepsilon p_1 + \varepsilon^2 p_2 + \dots \\ \partial / \partial t &= \partial / \partial t_0 + \varepsilon \partial / \partial t_1 + \varepsilon^2 \partial / \partial t_2 + \dots\end{aligned}\tag{12}$$

В нулевом порядке распределение концентрации и давления определяются стационарным решением системы (10):

$$c_0(x) = \frac{e^{\text{Pe} \cdot x} - e^{\text{Pe}}}{1 - e^{\text{Pe}}}, \quad q_0(x) = \frac{a}{b} c_0(x), \quad p_0(x) = 1 - x.\tag{13}$$

Система уравнений (10) в первом в порядке малости ε^1 имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(c_1 + q_1)}{\partial t_0} &= \Delta c_1 + \text{Pe} (\nabla p_0 \cdot \nabla c_1 + \nabla p_1 \cdot \nabla c_0), \\ \frac{\partial q_1}{\partial t_0} &= ac_1 - bq_1, \\ \Delta p_1 &= 0;\end{aligned}\tag{14}$$

граничные условия в этом же порядке запишутся следующим образом для давления:

$$\begin{aligned}\left. \frac{\partial p_1}{\partial y} \right|_{y=0} &= -\xi c_0(x), \quad \left. \frac{\partial p_1}{\partial y} \right|_{y=h} = -\xi c_0(x), \\ p_1(0, y, t) &= -\xi y, \quad p_1(1, y, t) = 0;\end{aligned}\tag{15}$$

и концентрации:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial c_1}{\partial y} \right|_{y=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial c_1}{\partial y} \right|_{y=h} = 0, \\ c_1(0, y, t) &= 0, \quad c_1(1, y, t) = 0; \end{aligned} \quad (16)$$

Для сведения задачи к однородному виду, можно ввести замену для переменной давления:

$$p_1(x, y, t) = \tilde{p}_1(x, y, t) - \xi c_0(x) y. \quad (17)$$

В результате замены (17) граничные условия (15) становятся аналогичны условиям (16):

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \tilde{p}_1}{\partial y} \right|_{y=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial \tilde{p}_1}{\partial y} \right|_{y=h} = 0, \\ \tilde{p}_1(0, y, t) &= 0, \quad \tilde{p}_1(1, y, t) = 0; \end{aligned} \quad (18)$$

при таких граничных условиях задача имеет аналитическое решение в виде ряда Фурье.

Результаты

Уравнение для концентрации мобильной компоненты:

$$\begin{aligned} c_1(x, y, t) &= \sum_{n,m} \left(A_{nm} e^{\gamma_1 t} + B_{nm} e^{\gamma_2 t} \right) e^{\frac{Pe}{2} x} \sin(\pi m x) \cos\left(\frac{\pi n y}{h}\right) + \\ &+ \sum_{n,m} \left(\frac{F_{nm}}{\lambda_{nm}^2} \right) e^{\frac{Pe}{2} x} \sin(\pi m x) \cos\left(\frac{\pi n y}{h}\right), \end{aligned} \quad (19)$$

уравнение для концентрации иммобильной фазы:

$$\begin{aligned} q_1(x, y, t) &= \sum_{n,m} \left(\frac{a e^{\gamma_1 t} A_{nm}}{(b + \gamma_1)} + \frac{a e^{\gamma_2 t} B_{nm}}{(b + \gamma_2)} \right) e^{\frac{Pe}{2} x} \sin(\pi m x) \cos\left(\frac{\pi n y}{h}\right) + \\ &+ \frac{a}{b} \sum_{n,m} \left(\frac{F_{nm}}{\lambda_{nm}^2} \right) e^{\frac{Pe}{2} x} \sin(\pi m x) \cos\left(\frac{\pi n y}{h}\right). \end{aligned} \quad (20)$$

Уравнение для давления:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_1(x, y) &= - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\xi}{(\pi^2 k^2 + Pe^2)} f_k(Pe) P_k(y) \sin \pi k x, \\ f_k(Pe) &= \frac{((-1)^k - 1)}{\pi^2 n^2} \frac{Pe^2 e^{Pe}}{(1 - e^{Pe})} - \operatorname{cth}\left(\frac{Pe}{2}\right), \\ P_k(y) &= \frac{(1 - \operatorname{ch} \pi k h)}{\operatorname{sh} \pi k h} \operatorname{ch} \pi k y + \operatorname{sh} \pi k y; \end{aligned} \quad (21)$$

где показатели $\gamma_{1,2}$ временной экспоненты всегда меньше нуля и определяются выражением:

$$\gamma_{1,2} = \frac{-(a+b+\lambda_{nm}^2) \pm \sqrt{(a+b+\lambda_{nm}^2)^2 - 4\lambda_{nm}^2 b}}{2}. \quad (22)$$

На больших временах зависящая от времени часть решения (19) и (20) обращается в ноль и распределение концентрации определяется коэффициентами (23) и (24):

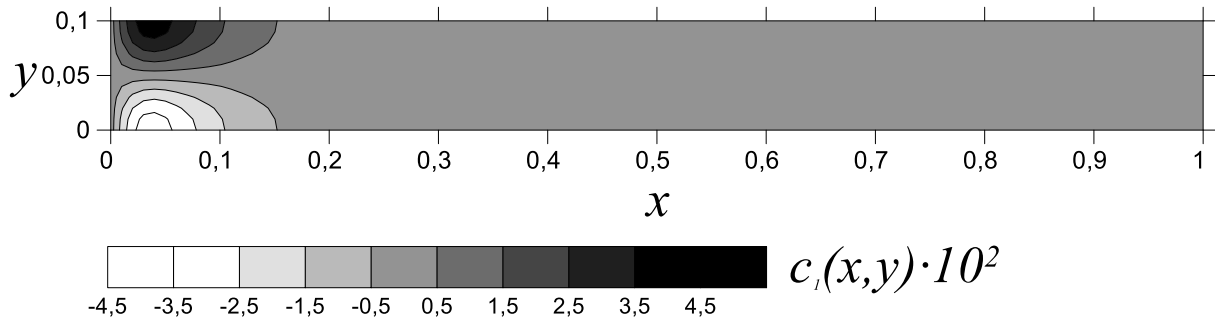
$$\lambda_{nm} = \sqrt{\left(\frac{\pi n}{h}\right)^2 + \pi^2 m^2 + \frac{\text{Pe}^2}{4}} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} F_{nm} = & -\frac{4\xi}{h} \frac{\text{Pe}^3}{(1-e^{\text{Pe}})^2} \frac{h^2((-1)^n - 1)}{\pi^2 n^2} \frac{4\pi m \left(e^{\frac{3}{2}\text{Pe}} (-1)^m - 1 \right)}{4\pi^2 m^2 + 9\text{Pe}^2} + \\ & + \frac{4}{h} \frac{\text{Pe}^2}{(1-e^{\text{Pe}})} \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{-2\xi}{(\pi^2 k^2 + \text{Pe}^2)} \left(\frac{((-1)^k - 1)}{\pi^2 k^2} \frac{\text{Pe}^2 e^{\text{Pe}}}{(1-e^{\text{Pe}})} - \text{cth}\left(\frac{\text{Pe}}{2}\right) \right) \times \right. \\ & \left. \times \left(\frac{h^2 k^2((-1)^n - 1)}{(h^2 k^2 + n^2)} \right) \frac{4\pi m \left(1 + (-1)^{1+k+m} e^{\frac{\text{Pe}}{2}} \right) (4\pi^2(m^2 - k^2) + \text{Pe}^2)}{(4\pi^2(k+m)^2 + \text{Pe}^2)(4\pi^2(k-m)^2 + \text{Pe}^2)} \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

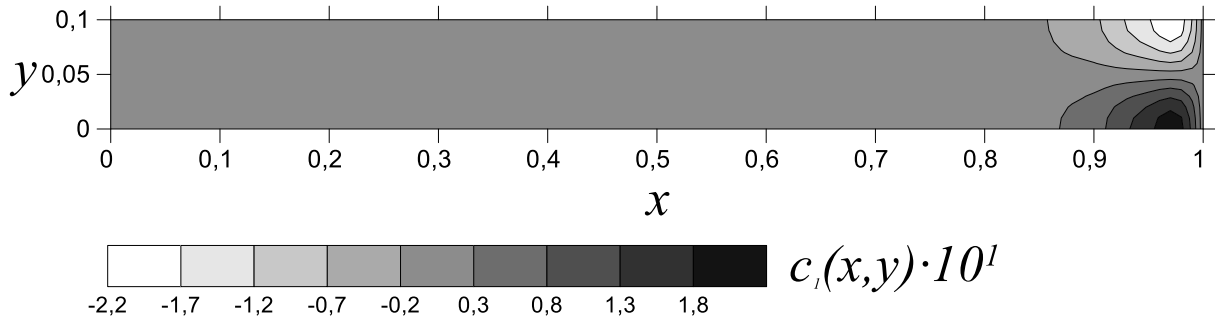
Используя тот факт, что в момент времени $t=0$ возмущения в области отсутствуют $c_1(x, y, t=0)=0$ и $q_1(x, y, t=0)=0$ можно определить коэффициенты A_{nm} и B_{nm} :

$$\begin{aligned} A_{nm} &= -\frac{\gamma_2}{\gamma_2 - \gamma_1} \frac{b + \gamma_1}{b} \frac{F_{nm}}{\lambda_{nm}^2}, \\ B_{nm} &= \frac{\gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1} \frac{b + \gamma_2}{b} \frac{F_{nm}}{\lambda_{nm}^2}. \end{aligned} \quad (25)$$

Представлены результаты расчетов при суммировании следующего количества членов рядов (19), (21) и (24): $n=0..40, m=1..40, k=1..100$. Согласно постановке задачи, рассматривается вытянутая вдоль оси x область, поэтому отношение сторон h принимается равным 0.1. Параметр h не влияет на количество образующихся конвективных ячеек, но может влиять на интенсивность. Таким образом, чем длиннее рассматриваемая область, тем более вытянута будет одна из конвективных ячеек и тем меньше будет ее интенсивность. Величина ε – это порядок отношения числа $\text{Rp}/\text{Pe} = \varepsilon\xi$. Для малости ε требуется, чтобы $\text{Rp} < \text{Pe}$, с физической точки зрения этого можно добиться увеличением перепада давления (ростом числа Пекле – Pe) или уменьшением перепада концентрации (уменьшение числа Рэлея–Дарси – Rp). В связи с тем, что решение получено для $\varepsilon \ll 1$ при суммировании поправки с основным решением наблюдается незначительное искривление полей (рис. 2–3).



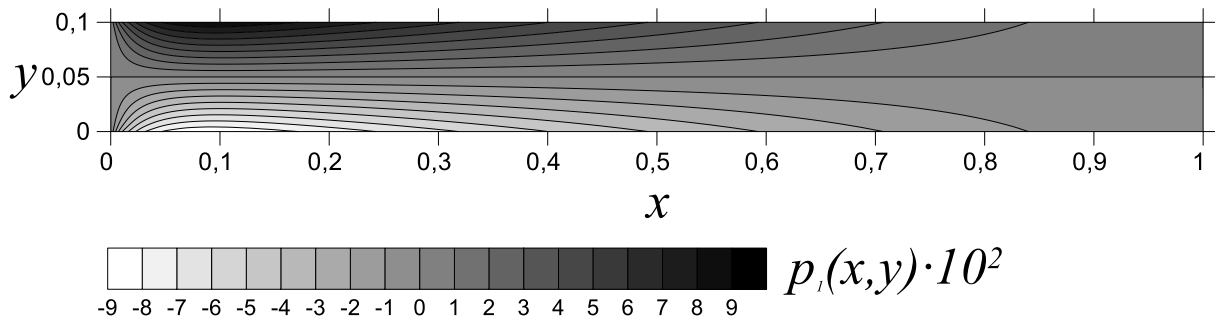
(a)



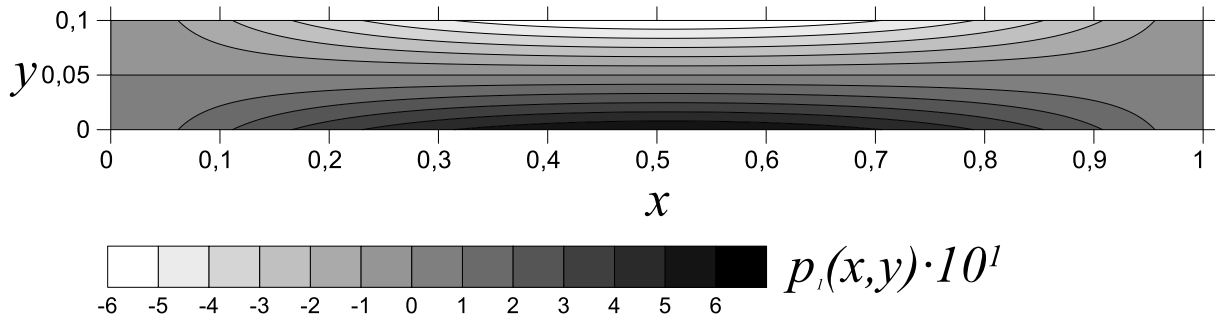
(b)

Рис. 2. Поле возмущения мобильной концентрации $c_1(x, y)$ для параметров

a) $\xi=1$, $Pe=1$, б) $\xi=1$, $Pe=10$



(a)



(b)

Рис. 3. Поле возмущения давления $\tilde{p}_1(x, y)$ для параметров а) $\xi=1$, $Pe=1$,

б) $\xi=1$, $Pe=10$

Показано, что поле концентрации в первом порядке малости представляет собой конвективную ячейку, таким образом возникают области с повышенной и пониженной концентрацией примеси. Также видно, что с увеличением числа Пекле течение стабилизируется, снижается интенсивность конвекции. Наблюдаемое смещение ячейки с ростом числа Пекле связано с тем, что в области организуются две ячейки (см. [10] рис. 2а) одна из которых сильно вытянута, и, как следствие, интенсивность возмущения такой ячейки значительно ниже. Увеличение числа Пекле приводит к тому, что левая ячейка вытягивается, а правая сжимается у выхода из области. Смена интенсивности ячеек приводит к тому, что области пониженной и повышенной концентрации на входе с ростом числа Пекле меняются местами на выходе из рабочей области. Качественно результаты аналитического расчета полученная структура возмущений и их локализация совпадают с результатами численного счета, описанного в работе [10]. Разница же в количественном описании связана с тем, что для построения аналитических результатов зависимость от времени не учитывается, так как полученное решение рассматривается в пределе больших времен, при которых распределение давления и концентрации являются стационарными.

Заключение

Решена задача об устойчивости одномерного течения в прямоугольной области пористой среды в присутствии горизонтального перепада давления и концентрации. При малых значениях числа Рэлея–Дарси получены аналитические выражения для полей возмущений давления и концентрации. Показано, что результат численного и аналитического расчета качественно совпадают. Результаты численного и аналитического расчетов показывают, что в случае непроницаемых горизонтальных границ установившееся течение для бесконвективного случая является неустойчивым даже при малых числах Рэлея–Дарси.

Список источников

1. *Schincariol R.A., Schwartz F.W.* An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media // *Water Resources Research*. 1990. Vol. 26, № 10. P. 2317–2329. DOI: 10.1029/WR026i010p02317.
2. *Maryshev B.S., Khabin M.R., Evgrafova A.V.* Identification of transport parameters for the solute filtration through porous media with clogging // *Journal of Porous Media*, 2023. Vol. 26, № 6. P. 31–35. DOI: 10.1615/JPorMedia.2022044645 EDN: RAEQIQ.
3. *Deans H.A.* A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media // *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1963. Vol. 3, № 01. P. 49–52. DOI: 10.2118/493-PA.
4. *van Genuchten M.T., Wierenga P.J.* Mass transfer studies in sorbing porous media I. Analytical solutions 1 // *Soil Science Society of America Journal*. 1976. Vol. 40, №4. P. 473–480.
5. *Schumer R., Benson D.A., Meerschaert M.M., Baeumer B.* Fractal mobile/immobile solute transport // *Water Resources Research*, 2003. Vol. 39, № 10. DOI: 10.1029/2003WR002141 EDN: LRUGJB.
6. *Gouze P., Le Borgne T., Leprovost R., Lods G., Poidras T., Pezard P.* Non-Fickian dispersion in porous media: 1. Multiscale measurements using single-well injection withdrawal tracer tests // *Water Resources Research*, 2008. Vol. 44, № 6, W06426. DOI: 10.1029/2007WR006278.
7. *Selim H.M.* Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multi-reaction models // *Environmental Health Perspectives*. 1989. Vol. 83. P. 69–75. DOI: 10.2136/essaj2006.0422.

8. Nield D., Bejan A. Convection in Porous Media. Cham, Switzerland: Springer, 2017. 988 p. DOI: 10.1007/978-3-319-49562-0.
9. Найфэ А. Введение в методы возмущений. М.: Наука, 1984. 535 с.
10. Хабин М.Р., Марышев Б.С. Возникновение концентрационной конвекции в длинной прямоугольной области пористой среды // Вестник Пермского университета. Физика, 2023. № 4. С. 10–21. DOI: 10.17072/1994-3598-2023-4-10-21 EDN: BFWVXA.

References

1. Schincariol, R. A. and Schwartz, F. W. (1990), "An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media", *Water Resources Research*, vol. 26, no. 10, pp. 2317-2329.
2. Maryshev, B. S., Khabin, M. R. and Evgrafova, A. V. (2023), "Identification of transport parameters for the solute filtration through porous media with clogging", *Journal of Porous Media*, vol. 26, no. 6, pp. 31-35.
3. Deans, H. A. (1963), "A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media", *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 3, no. 01, pp. 49-52.
4. van Genuchten, M. T. and Wierenga, P. J. (1976), "Mass transfer studies in sorbing porous media I. Analytical solutions 1", *Soil Science Society of America Journal*, vol. 40, no. 4, pp. 473-480.
5. Schumer, R., Benson D. A., Meerschaert M. M. and Baeumer, B. (2003), "Fractal mobile/immobile solute transport", *Water Resources Research*, vol. 39, no. 10.
6. Gouze P., Le Borgne, T., Leprovost, R., Lods, G., Poidras, T. and Pezard, P. (2008), "Non-Fickian dispersion in porous media: 1. Multiscale measurements using single-well injection withdrawal tracer tests", *Water Resources Research*, vol. 44, no. 6, W06426.
7. Selim, H. M. (1989), "Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multireaction models", *Environmental Health Perspectives*, vol. 83, pp. 69-75.
8. Nield, D. and Bejan, A. (2017), "Convection in Porous Media", *Cham, Switzerland: Springer*, 988 p.
9. Naifeh, A. (1984), "Introduction to methods of perturbations", *Moscow: Nauka*, 535 p. (In Russ.).
10. Khabin, M. R. and Maryshev, B. S. (2023), "The onset of concentration convection in a long rectangular domain of a porous medium", *Bulletin of Perm University. Physics*, no.4, pp. 10-23. (In Russ.).

Информация об авторах:

М. Р. Хабин – аспирант, инженер-исследователь лаборатории подземной утилизации углерода, ИМСС УрО РАН (614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1), AuthorID: 1114312;

Б. С. Марышев – кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории подземной утилизации углерода, ИМСС УрО РАН, (614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1), AuthorID: 148020.

Information about the authors:

M. R. Khabin – Postgraduate, Research Engineer, Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Academician Korolev St., Perm, Russia, 614018), AuthorID: 1114312;

B. S. Maryshev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Academician Korolev St., Perm, Russia, 614018), AuthorID: 148020.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 004.89

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-91-108

<https://elibrary.ru/ccjape>**Базовый алгоритм автоматической коррективы
орфографии текстов на русском языке:
разработка, оценка и перспективы****Екатерина Владимировна Исаева¹, Бехруз Зафарович Сафарбеков²**¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия²Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", г. Москва, Россия¹ekaterinaisae@psu.ru²behruzsaфарbekov3@gmail.com

Аннотация. Автоматическая проверка орфографических ошибок и корректура текстов на русском языке являются актуальной задачей в области обработки естественного языка. Целью исследования является разработка, оценка и описание программы ЭВМ для исправления орфографических ошибок с высокой точностью.

Предложенный метод основан на построчной обработке текста с использованием правил для выявления ошибок в орфографии и капитализации, а также вероятностной модели предложения слов-кандидатов для исправления ошибок. Данный алгоритм работает на уровне отдельных слов, что ограничивает его способность учитывать контекст. Для проверки качества модели использованы метрики: Precision, Recall и F1 Score. Для удобства использования и доработки программы в ее алгоритм были интегрированы автоматический анализ ошибок и формирование детализированного отчета, что позволяет выявлять сильные и слабые стороны алгоритма. Детализированное описание разработки обеспечивает воспроизводимость алгоритма и соответствует идеологии "Open-source" (Открытого программного обеспечения).

Результаты показали, что алгоритм обладает высокой точностью (Precision = 1.00), т.е. исправляет только те орфографические ошибки, которые были указаны в контрольном тексте. Однако полнота исправлений (Recall = 0.84) подчеркивает необходимость дальнейшей доработки, включая обработку контекстозависимых ошибок и работу с устойчивыми выражениями. Значение F1 Score = 0.91 подтверждает сбалансированность работы алгоритма и обосновывает его использование в качестве базовой модели корректуры текста на русском языке.

Выводы исследования подчеркивают потенциал алгоритма в задачах автоматической корректуры русскоязычного текста, а также предлагают перспективные направления для улучшения исходного кода, такие как использование n-грамм и языковых моделей.

Данная работа закладывает основу для дальнейших исследований в области автоматической корректуры текстов на русском языке.



Эта работа © 2025 Исаева Е.В., Сафарбеков Б.З. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Ключевые слова: орфографические ошибки; грамматические ошибки; русский язык; автоматическая корректура текста; обработка естественного языка; точность, полнота; F1 Score

Для цитирования: Исаева Е.В., Сафарбеков Б.З. Базовый алгоритм автоматической корректуры орфографии текстов на русском языке: разработка, оценка и перспективы // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1 (68). С. 91–108. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-91-108. <https://elibrary.ru/ccjape>.

Статья поступила в редакцию 25.12.2025; одобрена после рецензирования 17.02.2025; принята к публикации 20.03.2025.

COMPUTER SCIENCE

Research article

Basic Algorithm for Automatic Spelling Correction of Russian Texts: Development, Evaluation and Prospects

Ekaterina V. Isaeva¹, Behruz Z. Safarbekov²

¹Perm State University, Perm, Russia

²National University of Science and Technology "MISIS"

¹ekaterinaisae@psu.ru

²behruzsafarbekov3@gmail.com

Abstract. Automatic spelling check and correction of texts in Russian is an urgent task in the field of natural language processing. Our research is aimed at developing, evaluating, and describing a computer programme for correcting spelling errors with high accuracy.

The proposed method is based on line-by-line text processing using rules for spelling and capitalisation accuracy and a probabilistic model for proposing candidate words for error correction. Our algorithm operates at the level of individual words, which limits its ability to take context into account. The metrics used to test the quality of the model are Precision, Recall, and F1 Score. For ease of use and program refinement, we integrated automated error analysis and detailed report generation to identify the strengths and weaknesses of the algorithm. The detailed development description ensures the reproducibility of the algorithm and is in line with the Open-source ideology.

The results showed that the algorithm has high Precision = 1.00, i.e., it corrects only those spelling errors that were specified in the reference text. However, the Recall = 0.84 emphasises the need for further refinement, including handling context-dependent errors and processing sye expressions. The F1 Score = 0.91 confirms the balanced performance of the algorithm and justifies its use as a basic model of text correction in Russian.

The conclusions of the study emphasise the potential of the algorithm in the tasks of automatic correction of Russian-language text, and suggest prospective areas for improving the source code, such as the use of n-grams and language models. This work lays the foundation for further research in the field of automatic correction of Russian-language texts.

Keywords: spelling errors; grammatical errors; Russian language; automatic text correction; natural language processing, accuracy; completeness; F1 Score

For citation: Isaeva, E. V. and Safarbekov, B. Z. (2025), "Basic Algorithm for Automatic Spelling Correction of Russian Texts: Development, Evaluation and Prospects", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 91-108. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-91-108. <https://elibrary.ru/ccjape>.

The article was submitted 25.12.2025; approved after reviewing 17.02.2025; accepted for publication 20.03.2025

Введение

Коррективы орфографии имеет важное значение для улучшения качества текста в различных сферах, включая научную, образовательную и коммерческую деятельность. Инструменты для коррективы орфографии повышают производительность труда, улучшают знание языка и повышают уверенность в письменной коммуникации. В связи с этим проблема автоматической коррективы текста уже несколько десятилетий не утрачивает свою актуальность и до сих пор находится в развитии. Сложность проверки орфографии варьируется в зависимости от орфографической структуры языка. В то время как программы проверки орфографии в английском языке достаточно хорошо зарекомендовали себя, языки с развитой морфологической системой, такие как русский, требуют специальных подходов для коррективы орфографических ошибок. К ним относятся статистические модели (n-граммы, байесовские методы) для оценки вероятности появления слов в контексте [1], методы логического сжатия словарей для оптимизации хранения и поиска слов (префиксные деревья, булевы функции) [2], и глубокие нейросетевые модели (Bi-LSTM, трансформеры) для контекстозависимого исправления ошибок [3]. Комплексный подход на основе этих методов позволит повысить точность обнаружения и исправления ошибок в морфологически сложных языках.

В статье представлено описание разработки базового метода проверки орфографии в русском языке, который может послужить основой для надстройки функций проверки контекстозависимой проверки грамматических, синтаксических и стилистических ошибок. Разработанный метод показал достаточную эффективность для коррективы технических текстов, что продемонстрировано в данной статье на примере текста о беспилотных авиационных системах.

1. Обзор методов орфографической коррективы текста

В данном разделе рассмотрены основные подходы к автоматической коррективы орфографии, которые применяются в различных языках.

Традиционным подходом к решению задачи коррективы орфографии является обращение к методам на основе лексикологических и грамматических правил. В одной из ранних работ (1997 г.) предлагается автоматическое обучение лингвистическим правилам для коррективы орфографии, при этом подчеркивается важность простоты и доступности изложения: приобретенные знания хранятся в виде небольшого набора простых правил, что позволяет наилучшим образом использовать человеческую интуицию для понимания и улучшения знаний, накопленных системой [4]. В другой статье предлагается метод автоматического морфемного анализа, проверки написания заданного слова по правилам языка и имеющимся словарям и коррективы неверно написанных слов [5]. В более поздних работах используется метод n-грамм для повышения точности в обнаружении и исправлении ошибок. В работе [6] описывается эффективный метод орфографической проверки, использующий лексикон Microsoft и стандартные наборы слов с орфографическими ошибками на английском языке для обнаружения и замены неправильно написанных слов. Рассмотренные методы просты в реализации, но имеют ограниченную эффективность при обработке сложных грамматических конструкций русского языка и контекстозависимых ошибок.

В основе статистических подходов к коррективы орфографии в текстах на разных языках лежат вероятностные модели, показывающие свою эффективность для языков с богатой омонимией, таких как китайский и русский. Вероятностные модели включают в себя такие компоненты, как модули подстановок и тематического языкового моделирования. Тематические языковые модели могут передавать более обширную семантическую информацию из строки слов (символов), тогда как обычные языковые n-граммные модели могут сохранять только информацию о локальных закономерностях [7].

В английском языке были предложены подходы, основанные на байесовской теории принятия решений и расстоянии Дамерау–Левенштейна [8].

Интересный подход предлагается в одной из ранних работ [9]. В основе данного подхода лежит вероятностная модель генерации искаженных слов из правильных. Программа может удалять или вставлять символы в слово, а также заменять один или несколько символов другими. Далее, рекурсивным образом программа вычисляет правильное слово из искаженного. Авторы подчеркивают высокую эффективность работы алгоритма, в т. ч. при работе с искаженными словами, полученными из относительно коротких слов длиной менее 6 символов.

Вероятностные языковые модели, обученные на больших текстовых корпусах, становятся все более популярной альтернативой традиционным подходам, основанным на грамматике. Эти модели находят применение в различных задачах обработки естественного языка, включая распознавание речи, оптическое распознавание символов и коррекцию орфографии. Исследования сосредоточены на решении таких задач, как сглаживание моделей n -грамм, индукция статистических грамматик и двуязычное выравнивание предложений, с акцентом на решение проблемы разреженных данных и выявления скрытых структур [10].

В последних исследованиях описываются решения задачи орфографической корректуры текста с помощью моделей трансформеров. Например, разработчики представили объединенную модель зашумленного канала с языковыми моделями для корректуры грамматических ошибок с использованием ограниченного количества ресурсов. Полученная модель генерирует наборы данных с ошибками на основе истории правок статей Википедии. Используются предобученная модель BERT, настроенная на конкретные типы ошибок, и GPT-2, оперирующая предыдущими предложениями как контекстом. Оптимальные комбинации корректур определяются с помощью лучевого поиска (beam search) качественного метода сэмплирования, при котором на каждом шаге корректуры текста выбирается несколько вероятных токенов, разветвляются пути генерации и получается несколько вариантов сгенерированного текста. Такой подход не лишен своих недочетов, связанных с повышенными вычислительными требованиями, ограничениями в наборе ошибок, которые встречаются в истории правок Википедии, а лучевой поиск может стать причиной усугубления ошибок [11].

Предобученная модель BERT с включением контекстной информации используется для решения дефицита аннотированных данных, необходимых для обучения больших языковых моделей. Задача решается в два этапа. На первом этапе осуществляется попытка определить, к какому участку оригинального текста будет применена правка. Для этого формулируется задача маркировки последовательности, в которой лексемы маркируются одной из следующих меток {оставить, заменить, вставить, удалить}. Для второго этапа (исправления) используется предварительно обученная модель типа BERT. Метки, полученные на этапе идентификации ошибок, определяют маскировку входов (где маскируются все лексемы, помеченные метками замены или вставки), и для каждой замаскированной лексемы определяются кандидаты правки. Сложности данного подхода заключаются в ограничениях в длине маркировок ошибок, избыточных правках, потере и искажении потере исходной информации [12].

Современные подходы к автоматической корректуры текста сосредоточены на использовании продвинутых языковых моделей и сложных архитектур нейронных сетей, таких как Sequence-to-Sequence и Sequence Tagging, как, например, модели GECToR [13] и SAGE (Spell checking via Augmentation and Generative distribution Emulation) [14], показавшие высокую эффективность в корректуры текста.

Статистические, вероятностные и современные нейросетевые модели хорошо справляются с коррективкой текста, но требуют больших объемов данных для обучения, что вызывает сложности для реализации с учетом дефицита размеченных, особенно специализированных технических, медицинских и др. данных на русском языке для данной задачи в доступных на открытых репозиториях, таких как Kaggle [15] и Hugging Face [16]. Кроме того, генеративные модели, сфокусированные на коррективке целых предложений, а не отдельных слов, могут вызывать проблемы интерпретации, генерируя исправленный текст, но не объясняя, почему было предложено то или иное исправление.

2. Результаты

В представленной разработке используется библиотека **LanguageTool**, используемая для коррективы орфографии в текстовом редакторе OpenOffice, которая сочетает в себе как правила, так и вероятностные модели, и предоставляет API для проверки текстов на наличие ошибок [17]. Библиотека поддерживает множество языков, включая русский, и использует набор грамматических правил и лексикографическую базу для выявления ошибок и предложения исправлений.

При сравнении LanguageTool с аналогичными инструментами было выявлено, что в отличие от морфологического анализатора Hunspell [18, 19], работающего на основе словарей, LanguageTool использует не только статические словари, но и систему правил.

Другой инструмент, SymSpell, скоростной алгоритм орфографической коррекции на основе n-грамм и расстояния Дамера–Левенштейна [20, 21], работает только на уровне отдельных слов и используется в основном для английского языка.

Важными преимуществами использования библиотеки LanguageTool является ее доступность для использования и модификации, что соответствует идеологии Открытого кода (Open-source), расширяемость, что позволяет добавлять новые правила, и обширность методов для коррективы орфографии, грамматики и стилистики текста на разных языках.

Предложенный в данной статье подход позволяет автоматически предлагать варианты исправления ошибок, что повышает точность коррективы. В работе используется метод *tool.check*, предоставляемый *language_tool_python*. Данный метод выполняет анализ текста, выявляя потенциальные ошибки, и возвращает список объектов, содержащих тип ошибки (орфографическая, грамматическая и т. д.), диапазон символов, в котором найдена ошибка, возможные исправления в порядке убывания вероятности. Данный метод выбран в качестве основного, поскольку он позволяет автоматически анализировать текст без необходимости вручную формулировать правила исправления ошибок. Это делает его удобным инструментом для базовой орфографической проверки, в частности, для исправления ошибок в отдельных словах и ошибочного употребления прописных и строчных букв.

Несмотря на свою простоту, предложенный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с продвинутыми языковыми моделями: эффективность на уровне отдельных слов, предъявляет минимальные требования к ресурсам, прост для интерпретации, может быть адаптирован под конкретные задачи, не требует обучения на больших данных.

Таким образом, разработанный алгоритм позиционируется как базовый для коррективы орфографии в русских текстах. Функциональность алгоритма может быть расширена с помощью добавления других методов LanguageTool, которые позволяют не только исправлять орфографические ошибки, но и выявлять грамматические и синтаксические неточности, анализировать смысловую структуру текста и улучшать его стилистическое качество [22]. Разработанный алгоритм может быть использован на этапе подготовки текста для других, вычислительно более сложных методов, таких как языковые модели и логистическая регрессия [23].

Программа¹ нацелена на автоматическую корректировку текстов для устранения орфографических и ошибок капитализации предложений на русском языке. Алгоритм работы программы включает следующие блоки (рис. 1).

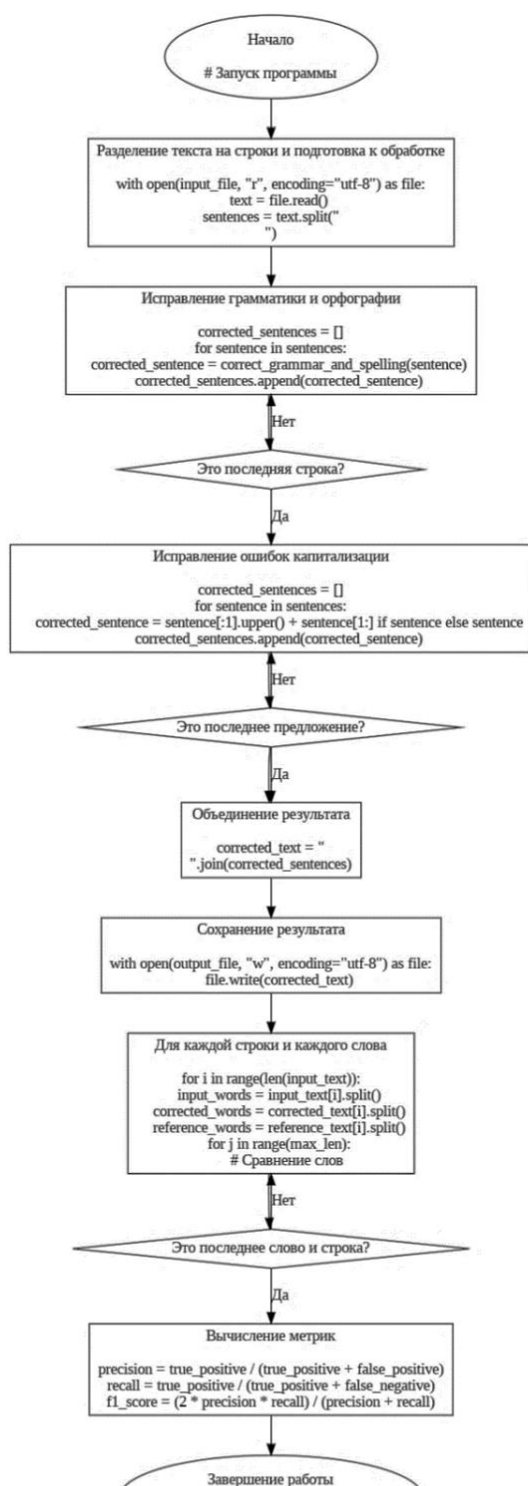


Рис. 1. Схематическое представление алгоритма программы для корректировки орфографических ошибок на русском языке

Блок 1. Начало: запуск программы, установка библиотек и инициализация инструмента для проверки ошибок. Для проверки орфографических ошибок используется библиотека *language_tool_python*, которая предоставляет доступ к инструменту *LanguAgeTool*. В момент написания данной статьи актуальной является версия *language_tool_python-2.8.1*. Для работы с русским языком выполняется соответствующая языковая инициализация:

```
tool = language_tool_python.LanguageTool('ru-RU')
```

Блок 2. Разделение текста на строки и подготовка к обработке: функция *process_text_file*. Следующим блоком программы является обработка текста из файла. Функция *process_text_file* предназначена для автоматической обработки текста, хранящегося в файле, с последующим сохранением результата в другой файл. Она объединяет этапы чтения текста, исправления ошибок и капитализации, обеспечивая полный цикл обработки.

В данной программе настроено считывание исходного текста из файла с расширением *.txt* (например, *input.txt*) для последующей обработки. Для корректного считывания текста на русском языке используется режим чтения ('r') и кодировка *UTF-8*:

```
with open(input_file, 'r', encoding='utf-8') as file:  
text = file.read()
```

На данном этапе весь текст файла загружается в строковую переменную *text*.

Далее для построчной обработки разделяем считанный текст на строки. Такой подход к считыванию текста полезен по ряду причин. Во-первых, многие тексты, особенно статьи и документы, могут содержать абзацы, разделенные пустыми строками, строки, разделенные символами переноса строки (*\n*), например для маркировки заголовков, списков или отдельных предложений и т. д. Если такой текст обработать как одну большую строку, то есть риск нарушения его структуры: разные абзацы, списки и заголовки могут слиться в единый блок.

¹Проект (исходный код, примеры текстового файла с ошибками и файла эталонного текста) размещен в открытом доступе на репозитории GitHub https://github.com/Kate-PSU/Spelling_cheque_RUS.

Построчная обработка текста позволяет сохранить особенности исходного форматирования. Кроме того, разделение текста на строки упрощает обработку текста, позволяя обрабатывать каждую строку отдельно, исправляя ошибки в тех строках, в которых они присутствуют, пропуская строки, не требующие изменений. Данный способ способствует повышению читаемости обработанного текста: результат можно собрать обратно в текст, сохраняя исходное форматирование. Также отметим такие плюсы построчной обработки текста, как локализация и точечная обработка ошибок, и гибкость обработки (возможность добавления дополнительных этапов обработки для отдельного прохождения по заголовкам, спискам, таблицам и др., так как к ним могут применяться специфические правила орфографии).

В данном блоке определяются переменные: *input_file*, указывающая имя входного файла, который содержит исходный текст для обработки (здесь *input.txt*), и *output_file*, указывающая имя выходного файла, в который записывается исправленный текст (здесь *corrected_output.txt*):

```
input_file = 'input.txt' # Имя входного файла
```

```
output_file = 'corrected_output.txt' # Имя выходного файла
```

Далее вызывается функция *process_text_file*, которая выполняет весь цикл обработки текста: чтение исходного файла, исправление орфографических ошибок и капитализации и сохранение обработанного текста в новый файл. Функция принимает два параметра: *input_file* и *output_file*:

```
process_text_file(input_file, output_file)
```

После успешного выполнения функции в консоль выводится сообщение: *Обработка завершена. Исправленный текст сохранен в файл: corrected_output.txt*. Это подтверждает, что файл обработан и результат успешно сохранен.

Функция *process_text_file* оборачивается в блок *try...except* для обработки возможных ошибок, таких как невозможность открыть файл и ошибок при записи в файл: *except Exception as e: print(f"Ошибка при обработке файла: {e}")*.

При возникновении ошибки выводится сообщение с ее описанием. Например, если в текущую сессию не загружен файл *input.txt*, или загружен одноименный файл с другим расширением, то программа выдает ошибку: *Ошибка при обработке файла: [Errno 2] No such file or directory: 'input.txt'*

На рис. 2 приведен пример исходного кода функции обработки текста:

```
1 # Функция для обработки текста из файла
2 def process_text_file(input_file, output_file):
3     try:
4         # Открываем файл для чтения
5         with open(input_file, 'r', encoding='utf-8') as file:
6             text = file.read()
7
8         # Корректируем текст
9         corrected_sentences = []
10        for sentence in text.split('\n'):
11            corrected_sentence = correct_grammar_and_spelling(sentence)
12            corrected_sentences.append(corrected_sentence)
13
14        # Объединяем предложения в текст
15        corrected_text = '\n'.join(corrected_sentences)
16
17        # Исправляем капитализацию в тексте
18        fully_corrected_text = correct_capitalization(corrected_text)
19
20        # Сохраняем исправленный текст в новый файл
21        with open(output_file, 'w', encoding='utf-8') as file:
22            file.write(fully_corrected_text)
23
24        print(f"Обработка завершена. Исправленный текст сохранен в файл: {output_file}")
25
26    except Exception as e:
27        print(f"Ошибка при обработке файла: {e}")
```

Рис. 2. Функция обработки текста из файла (пример исходного кода)

Блок 3. Исправление грамматики и орфографии: функция *correct_grammar_and_spelling*. После разбиения на строки каждая строка передается на вход функции *correct_grammar_and_spelling* для исправления орфографических ошибок. Каждая строка текста обрабатывается функцией, которая вызывает инструмент *LanguageTool* для проверки строки, анализирует список обнаруженных ошибок, исправляет текст, заменяя фрагменты с ошибками на предложенные кандидаты корректировок. Логика работы функции *correct_grammar_and_spelling* может быть представлена следующим образом:

1) Анализ текста на наличие орфографических ошибок. Функция *correct_grammar_and_spelling* принимает предложение (*sentence*) в качестве входного параметра. Далее, помощью метода *tool.check* анализируется текст и возвращается список ошибок (*matches*). Каждый элемент списка *matches* содержит информацию о найденной ошибке, а именно местоположение ошибки (начальная и конечная позиции в строке), тип ошибки (грамматическая, орфографическая и т. д.), кандидаты корректировок (список предложений).

2) Обработка ошибок. Для корректного исправления ошибок они обрабатываются в обратном порядке (с конца предложения к началу). Это предотвращает смещение индексов текста при внесении исправлений. Для каждой найденной ошибки функция проверяет наличие кандидатов для замены (*if match.replacements*), извлекает начальную (*start*) и конечную (*end*) позиции ошибки, заменяет часть текста с орфографической ошибкой на первый вариант корректировки из списка кандидатов (*match.replacements[0]*). Текст с исправлениями последовательно обновляется, создавая новую строку *corrected_sentence*.

3) Возврат результата. После обработки всех ошибок функция возвращает исправленное предложение (рис. 3).

```

1 # Функция для исправления грамматических и орфографических ошибок в предложении
2 def correct_grammar_and_spelling(sentence):
3     matches = tool.check(sentence)
4     corrected_sentence = sentence
5     for match in reversed(matches): # Обрабатываем ошибки в обратном порядке
6         if match.replacements: # Проверяем, есть ли замены для ошибки
7             start = match.offset
8             end = match.offset + match.errorLength
9             corrected_sentence = corrected_sentence[:start] + match.replacements[0]\
10                 + corrected_sentence[end:]
11     return corrected_sentence

```

Рис. 3. Функция для исправления орфографических ошибок (пример исходного кода)

По нашему наблюдению, использованный метод (*tool.check*) в той конфигурации, которая используется в представленной разработке, эффективен только при работе с орфографическими ошибками, но не корректирует грамматические ошибки, такие, например, как согласование числа существительного и глагола или прилагательного и существительного, управление глагола, согласование падежей прилагательного и существительного и др. В связи с этим, данный алгоритм описывается как базовый метод для корректировки орфографических ошибок.

Далее приводится пример работы функции *correct_grammar_and_spelling* для корректировки профессионально-ориентированного текста из области беспилотных авиационных систем. На вход функции подается предложение с ошибками:

Пример 1 (исходный текст): *Например, с помощью беспилотников можно быстро обнаружить нарушение экологических норм.*

Шаги корректировки текста:

- 1) LanguageTool обнаруживает следующие ошибки:
 - a. *помощю*
 - b. *быстро*
 - c. *екалогических*
- 2) Функция *correct_grammar_and_spelling* исправляет ошибки, начиная с конца предложения:
 - a. *екалогических* → *экологических*
 - b. *быстро* → *быстро*
 - c. *помощю* → *помощь*
- 3) Исправленное предложение:
 - a. *Например, с помощь беспилотников можно быстро обнаружить нарушения экологических норм.*

Пример иллюстрирует, что орфографическая ошибка в слове *помощю* устранена, однако, появилась новая грамматическая ошибка – ошибка управления (несогласованность падежа существительного и предлога): *с помощь* (правильный вариант – *с помощью*).

Блок 4. Исправление ошибок капитализации. Функция *correct_capitalization* разработана для исправления ошибок капитализации в тексте. Она автоматически преобразует первую букву каждого предложения в заглавную, сохраняя общую структуру текста. Алгоритм работы функции включает следующие этапы:

- 1) Разделение текста на предложения. Текст разбивается на отдельные предложения по разделителю ". " (точка с пробелом), что позволяет отдельно работать с каждым предложением:

```
sentences = text.split('. ').
```

Пример 2.

Исходный текст:

также бас применяются в сельском хозяйстве для оптимизации расходов и повышения эффективности. однак, их использование требует учёта вопросов безопасности и конфиденциальности данных.

Текст после разделения:

```
sentences = [  
    " также бас применяются в сельском хозяйстве для оптимизации расходов и повышения эффективности",  
    " однак, их использование требует учёта вопросов безопасности и конфиденциальности данных "  
]
```

- 2) Корректировка первой буквы предложения. В каждом предложении первая буква преобразуется в заглавную с помощью метода *.upper()*:

```
corrected_sentence = sentence[1].upper() + sentence[1:] if sentence else sentence
```

Оставшаяся часть предложения сохраняется неизменной.

Пример 3 (исправленный текст):

Также бас применяются в сельском хозяйстве для оптимизации расходов и повышения эффективности.

Однак, их использование требует учёта вопросов безопасности и конфиденциальности данных.

В примере 3 проиллюстрировано только действие функции *correct_capitalization*, другие ошибки остались без изменения.

После этого все предложения объединяются обратно в текст, используя "." в качестве разделителя: `return '. '.join(corrected_sentences)`

Рисунок 4 иллюстрирует исходный код функции капитализации предложений текста.

```
1 # Функция для исправления ошибок капитализации
2 def correct_capitalization(text):
3     # Разбиваем текст на предложения
4     sentences = text.split('. ')
5     corrected_sentences = []
6     for sentence in sentences:
7         # Исправляем первую букву предложения
8         corrected_sentence = sentence[:1].upper() + sentence[1:] if sentence else sentence
9         corrected_sentences.append(corrected_sentence)
10    return '. '.join(corrected_sentences)
```

Рис. 4. Функция для исправления ошибок капитализации (пример исходного кода)

Блок 5. Объединение результата. Исправленные строки объединяются в единый текст, разделенный символами новой строки (`\n`), для сохранения исходной структуры: `corrected_text = '\n'.join(corrected_sentences)`.

Объединенный текст передается в функцию *correct_capitalization* для исправления ошибок капитализации. Функция обрабатывает каждое предложение, делая первую букву заглавной: `fully_corrected_text = correct_capitalization(corrected_text)`.

Блок 6. Сохранение результата. Исправленный текст записывается в новый файл в режиме записи ('w') с использованием кодировки *UTF-8*:

with open(output_file, 'w', encoding='utf-8') as file:
file.write(fully_corrected_text)

Блоки 7–8. Сравнение слов и вычисление метрик: функция *compare_files_and_calculate_metrics*, данный раздел программы является дополнительным. Он позволяет провести автоматизированную оценку работы программы: автоматическое вычисление метрик эффективности корректировки текста и "ручную" проверку результатов по детализированному описанию ошибок.

Оценка качества работы алгоритма проводится по метрикам: *Precision* (точность), *Recall* (полнота) и *F1 Score* (средневзвешенная гармоническая метрика).

Для оценки качества алгоритма корректировки текста была разработана функция *compare_files_and_calculate_metrics*, которая сравнивает три текстовых файла:

- 1) Исходный файл (с ошибками) – текст до обработки (*input.txt*).
- 2) Файл с исправлениями – текст, полученный после работы алгоритма (*corrected_output.txt*).

3) Контрольный файл – эталонный текст без ошибок (*reference.txt*).

Примеры заполнения текстовых файлов представлены в Приложении 1.

Функция *compare_files_and_calculate_metrics* вычисляет метрики:

- Precision (доля правильно исправленных ошибок среди всех внесенных исправлений):

$$(1) \text{ Precision} = \frac{TP}{TP+FP}$$

- Recall (доля правильно исправленных ошибок среди всех ошибок, которые необходимо было исправить):

$$(2) \text{ Recall} = \frac{TP}{TP+FN}$$

- F1Score (гармоническое среднее между долей правильно исправленных ошибок среди всех внесенных исправлений и долей правильно исправленных ошибок среди всех ошибок, которые необходимо было исправить):

$$(3) \text{ F1 Score} = 2 * \frac{\text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

где:

- True Positive (TP) – исправленное слово совпадает с эталонным;
- False Positive (FP) – исправленное слово не совпадает с эталонным, при этом исходное слово было правильным;
- False Negative (FN) – исправленное слово не совпадает с эталонным, при этом исходное слово было неверным.

Алгоритм работы функции *compare_files_and_calculate_metrics* работает следующим образом:

- 1) чтение файлов – все три файла загружаются построчно, каждая строка текста разделяется на слова для построчного и пословного анализа;
- 2) сравнение слов – для каждой строки алгоритм анализирует слова из исходного, исправленного и контрольного файлов, определяются параметры для вычисления метрик.

Для возможности экспертной оценки работы программы с помощью *Pandas*, библиотеки с открытым исходным кодом, предоставляющей простые в использовании структуры данных и инструменты анализа данных [24], была сформирована таблица (датафрейм), в который записывались следующие данные:

- *Исходное слово* – слово из файла с ошибками.
- *Исправленное слово* – слово, предложенное алгоритмом.
- *Ожидаемое слово* – слово из контрольного файла.
- *Статус* – результат анализа (*True Positive*, *False Positive*, *False Negative*).

Рисунок 5 демонстрирует пример исходного кода функции сравнения двух текстовых файлов: до обработки и после исправления орфографических ошибок с помощью представленной программы и вычисления метрик качества работы программы.

```

1 import pandas as pd
2 def compare_files_and_calculate_metrics(input_file, corrected_file, reference_file):
3     try:
4         # Чтение файлов
5         with open(input_file, 'r', encoding='utf-8') as f:
6             input_text = f.read().splitlines()
7         with open(corrected_file, 'r', encoding='utf-8') as f:
8             corrected_text = f.read().splitlines()
9         with open(reference_file, 'r', encoding='utf-8') as f:
10             reference_text = f.read().splitlines()
11         # Проверка длины файлов
12         if not (len(input_text) == len(corrected_text) == len(reference_text)):
13             raise ValueError("Файлы должны содержать одинаковое количество строк для корректного сравнения.")
14         # Инициализация счетчиков
15         true_positive = 0 # Правильно исправленные ошибки
16         false_positive = 0 # Ложные исправления (там, где не было ошибки)
17         false_negative = 0 # Пропущенные ошибки
18         # Список для формирования датафрейма
19         error_details = []
20         # Сравнение строк на уровне слов
21         for i in range(len(input_text)):
22             input_words = input_text[i].split()
23             corrected_words = corrected_text[i].split()
24             reference_words = reference_text[i].split()
25             max_len = max(len(input_words), len(corrected_words), len(reference_words))
26             for j in range(max_len):
27                 input_word = input_words[j] if j < len(input_words) else ''
28                 corrected_word = corrected_words[j] if j < len(corrected_words) else ''
29                 reference_word = reference_words[j] if j < len(reference_words) else ''
30                 # Если ошибка исправлена правильно
31                 if input_word != reference_word and corrected_word == reference_word:
32                     true_positive += 1
33                     error_details.append({
34                         'Исходное слово': input_word,
35                         'Исправленное слово': corrected_word,
36                         'Ожидаемое слово': reference_word,
37                         'Статус': 'True Positive'
38                     })
39                 # Если алгоритм внёс исправление, но ошибки не было
40                 elif input_word == reference_word and corrected_word != reference_word:
41                     false_positive += 1
42                     error_details.append({
43                         'Исходное слово': input_word,
44                         'Исправленное слово': corrected_word,
45                         'Ожидаемое слово': reference_word,
46                         'Статус': 'False Positive'
47                     })
48                 # Если ошибка не исправлена
49                 elif input_word != reference_word and corrected_word != reference_word:
50                     false_negative += 1
51                     error_details.append({
52                         'Исходное слово': input_word,
53                         'Исправленное слово': corrected_word,
54                         'Ожидаемое слово': reference_word,
55                         'Статус': 'False Negative'
56                     })
57             # Вычисление метрик
58             precision = true_positive / (true_positive + false_positive) if (true_positive + false_positive) > 0 else 0
59             recall = true_positive / (true_positive + false_negative) if (true_positive + false_negative) > 0 else 0
60             f1_score = (2 * precision * recall) / (precision + recall) if (precision + recall) > 0 else 0
61             # Создание датафрейма
62             error_df = pd.DataFrame(error_details)
63             return precision, recall, f1_score, error_df
64     except Exception as e:
65         print(f"Ошибка при вычислении метрик: {e}")
66     return 0, 0, 0, pd.DataFrame()

```

Рис. 5. Функция сравнения файлов и вычисления метрик (пример исходного кода)

Далее производится загрузка исходного, скорректированного и эталонного файлов, к которым применяется функция *compare_files_and_calculate_metrics*, выводятся показатели метрик и детализация ошибок в формате датафрейма (рис. 6).

```

1 # Пример использования
2 input_file = 'input.txt' # Исходный файл с ошибками
3 corrected_file = 'corrected_output.txt' # Файл с исправлениями
4 reference_file = 'reference.txt' # Контрольный файл без ошибок
5
6 precision, recall, f1_score, error_df = compare_files_and_calculate_metrics(
7     input_file, corrected_file, reference_file
8 )
9
10 print(f"Precision: {precision:.2f}")
11 print(f"Recall: {recall:.2f}")
12 print(f"F1 Score: {f1_score:.2f}")
13
14 # Вывод датафрейма
15 if not error_df.empty:
16     print("\nДетализация ошибок:")
17     print(error_df)

```

Рис. 6. Сравнение исходного, обработанного и эталонного файлов и вывод метрик (пример исходного кода)

В проведенном эксперименте были полученные следующие данные (см. таблицу):

Таблица. Детализация ошибок алгоритма исправления текста: исходные, исправленные и ожидаемые слова с указанием статуса

Исходное слово	Исправленное слово	Исправленное слово	Ожидаемое слово
беспилотные	Беспилотные	Беспилотные	Беспилотные
(бас)	(бас)	(бас)	(БАС)
находят	находят	находят	находят
применение	применение	применение	применение
используются	используются	используются	используются
например,	Например,	Например,	Например,
помощь	помощь	помощь	помощью
быстро	быстро	быстро	быстро
экологических	экологических	экологических	экологических
также	Также	Также	Также
применяются	применяются	применяются	применяются
хозяйстве	хозяйстве	хозяйстве	хозяйстве
оптимизации	оптимизации	оптимизации	оптимизации
эффективности.	эффективности.	эффективности.	эффективности.
однако,	Однако,	Однако,	Однако,
вопросов	вопросов	вопросов	вопросов
безопасности	безопасности	безопасности	безопасности
конфиденциально-сти	конфиденциальности	конфиденциальности	конфиденциально-сти
данных.	данных.	данных.	данных.

На основе этих данных были получены следующие метрики качества:

- *Precision: 1.00*
- *Recall: 0.84*
- *F1 Score: 0.91*

Сформированная таблица ошибок позволяет детально проанализировать каждый случай коррективы ошибок, выделяя успешные исправления и упущения. Отметим успешные показатели работы программы. Высокая точность (*Precision = 1.00*) свиде-

тelleствует о том, что в приведенном примере алгоритм вносит изменения только в местах, где это необходимо. Большинство ошибок исправлены правильно, что выражается в высокой *F1 Score* (0.91).

В качестве недочетов отметим пропущенные ошибки (*False Negative*) – выявленные слабые места алгоритма: например, ошибки в написании аббревиатур ("бас" → "(БАС)") и грамматические ошибки или ошибки управления ("с помощью" → "с помощью"), которые не были исправлены или были исправлены не корректно.

4. Обсуждение результатов

В ходе апробации алгоритм продемонстрировал высокую точность в исправлении орфографических ошибок в тексте, что подтверждается значением соответствующей *Precision* = 1.00 (100 %). Это означает, что все исправления, внесенные алгоритмом, были корректными и соответствовали контрольному тексту. Высокое значение меры *F1 Score* = 0.91 (91 %) указывает на хороший баланс между точностью и полнотой исправлений.

Кроме того, сформированная таблица ошибок позволяет детально анализировать результаты работы программы. Такая детализация особенно полезна для выявления проблемных областей и целенаправленного улучшения алгоритма.

Несмотря на высокую точность на тестовом образце текста, результаты выявили ряд ограничений, которые требуют внимания. Во-первых, отметим недостаточную полноту исправлений. Относительно невысокое значение метрики *Recall* = 0.84 (84 %) говорит о том, что часть ошибок осталась не исправленной. Это связано с тем, что алгоритм не всегда распознает сложные или контекстозависимые ошибки, например: ошибка в слове *помощью* была исправлена на не корректный вариант *помощь*, который не согласуется с предлогом *с*. Ошибка в аббревиатуре (бас) осталась необработанной (не была применена капитализация). Обработка подобных ошибок требует добавления более сложных блоков контекстного анализа текста. Алгоритм работает на уровне отдельных слов, не использует *n*-граммы и не учитывает контекстные связи между словами. Это приводит к пропущенным ошибкам, особенно в устойчивых словосочетаниях или фразах. Например, слово "быстро" не было исправлено на "быстро" из-за отсутствия анализа зависимости между словами в предложении.

С учетом выявленных недочетов можно отметить перспективы дальнейшей оптимизации алгоритма: расширение словарей и правил исправлений (обработка аббревиатур, устойчивых выражений и *n*-граммов), интеграция модулей работы с морфологией (согласование падежей, числа, рода, управления и др.) и синтаксисом (разделение предложений не только по точке (.), но и другим знакам препинания, проверка корректности пунктуации).

Заключение

Разработанный алгоритм автоматической корректировки текста продемонстрировал высокую точность в исправлении базовых орфографических ошибок и способность к обработке ошибок капитализации. Значение метрики *Precision* = 1.00 (100 %) свидетельствует о том, что все предложенные программой исправления были корректными, а *F1 Score* = 0.91 (91 %) подтверждает высокий баланс между точностью и полнотой исправлений. Эти результаты показывают, что разработанная программа способна эффективно решать задачу проверки и корректировки орфографии текста на русском языке в условиях ограниченного набора правил.

Однако экспертный анализ работы алгоритма выявил его текущие ограничения, такие как неспособность обрабатывать контекстозависимые ошибки, например, "с по-

мощь" → "с помощью" или "(бас)" → "(БАС)". Основной причиной этих недочетов является работа алгоритма на уровне отдельных слов без учёта контекста и зависимости между словами.

Дальнейшая работа будет направлена на интеграцию более сложных методов, таких как анализ n-грамм, контексто-зависимых языковых моделей и дополнительных правил для обработки аббревиатур и устойчивых выражений. Это позволит повысить полноту исправлений (*Recall*) и адаптировать алгоритм к более сложным текстам, содержащим не только орфографические, но и грамматические, синтаксические и стилистические ошибки. Таким образом, предлагаемый алгоритм представляет собой основу для дальнейших исследований и развития методов автоматической коррективы текста на русском языке.

Приложение

Пример результатов работы программы

1) Исходный файл:

беспилотные авиационные системы (БАС) находят широкое применение в гражданских целях. Они используются для наблюдения за состоянием окружающей среды, контроля за лесными пожарами и мониторинга разливов рек. например, с помощью беспилотников можно быстро обнаружить нарушения экологических норм. также бас применяются в сельском хозяйстве для оптимизации расходов и повышения эффективности. однако, их использование требует учета вопросов безопасности и конфиденциальности данных.

2) Файл с исправлениями:

беспилотные авиационные системы (БАС) находят широкое применение в гражданских целях. Они используются для наблюдения за состоянием окружающей среды, контроля за лесными пожарами и мониторинга разливов рек. Например, с помощью беспилотников можно быстро обнаружить нарушения экологических норм. Также бас применяются в сельском хозяйстве для оптимизации расходов и повышения эффективности. Однако, их использование требует учёта вопросов безопасности и конфиденциальности данных.

3) Контрольный файл:

беспилотные авиационные системы (БАС) находят широкое применение в гражданских целях. Они используются для наблюдения за состоянием окружающей среды, контроля за лесными пожарами и мониторинга разливов рек. Например, с помощью беспилотников можно быстро обнаружить нарушения экологических норм. Также бас применяются в сельском хозяйстве для оптимизации расходов и повышения эффективности. Однако, их использование требует учёта вопросов безопасности и конфиденциальности данных.

Список источников

1. Zukarnain N. et al. Spelling Checker Algorithm Methods for Many Languages // 2019 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech). IEEE, 2019. P. 198–201. DOI: 10.1109/ICIMTech.2019.8843801.
2. Hamrouni B.M. Logic compression of dictionaries for multilingual spelling checkers // Proceedings of the 15th conference on Computational linguistics Morristown, NJ, USA: Association for Computational Linguistics, 1994. P. 292. DOI: 10.3115/991886.991936.
3. Lokhande H.A. et al. Enhancing Text Quality with Bi-LSTM: An Approach for Automated Spelling and Grammar Correction // 2024 International Conference on Advances

- in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS). IEEE, 2024. P. 01–07. DOI: 10.1109/ADICS58448.2024.10533521.
4. *Mangu L., Brill E.* Automatic Rule Acquisition for Spelling Correction // Proceedings of the Fourteenth International Conference on Machine Learning (ICML '97). San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1997. P. 187–194.
5. *Davrondjon G., Janowski T.* Developing a Spell-Checker for Tajik Using RAISE // Formal Methods and Software Engineering. ICFEM 2002. Lecture Notes in Computer Science / ed. George C., Miao H. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. Vol. 2495. P. 401–405. DOI: 10.1007/3-540-36103-0_41 EDN: XNBRMD.
6. *Atawy S.M. El, ElGhany A.A.* Automatic Spelling Correction based on n-Gram Model // Int J Comput Appl. 2018. Vol. 182, № 11. P. 5–9.
7. *Chen K.-Y., Wang H.-M., Chen H.-H.* A Probabilistic Framework for Chinese Spelling Check // ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing. 2015. Vol. 14, № 4. P. 1–17. DOI: 10.1145/2826234.
8. *Sasu L.* A Probabilistic Model for Spelling Correction // Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series III: Mathematics, Informatics, Physics. 2011. Vol. 4(53), № 2. P. 141–146.
9. *Kashyap R.L., Oommen B.J.* Spelling correction using probabilistic methods // Pattern Recognit Lett. 1984. Vol. 2, № 3. P. 147–154. DOI: 10.1016/0167-8655(84)90038-2
10. *Chen S.F.* Building Probabilistic Models for Natural Language. 1996.
11. *Flachs S., Lacroix O., Søgaard A.* Noisy Channel for Low Resource Grammatical Error Correction // Proceedings of the Fourteenth Workshop on Innovative Use of NLP for Building Educational Applications. Stroudsburg, PA, USA: Association for Computational Linguistics, 2019. P. 191–196. DOI: 10.18653/v1/W19-4420.
12. *Li Y., Anastasopoulos A., Black A.W.* Towards Minimal Supervision BERT-Based Grammar Error Correction (Student Abstract) // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. Vol. 34, № 10. P. 13859–13860. DOI: 10.1609/aaai.v34i10.7202 EDN: QHFSCJ.
13. *Khabutdinov I.A. et al.* RuGECToR: Rule-Based Neural Network Model for Russian Language Grammatical Error Correction // Programming and Computer Software. Pleiades Publishing, 2024. Vol. 50, № 4. P. 315–321. DOI: 10.1134/S0361768824700129 EDN: XCUPYE.
14. *Martynov N. et al.* A Methodology for Generative Spelling Correction via Natural Spelling Errors Emulation across Multiple Domains and Languages. 2023.
15. *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community* [Electronic resource]. URL: <https://www.kaggle.com/> (accessed: 07.02.2025).
16. *Hugging Face – The AI community building the future.* [Electronic resource]. URL: <https://huggingface.co/> (accessed: 07.02.2025).
17. *Language-tool-python.PyPI* [Electronic resource]. URL: <https://pypi.org/project/language-tool-python/> (accessed: 11.12.2024).
18. *Hunspell download* | SourceForge.net [Electronic resource]. URL: <https://sourceforge.net/projects/hunspell/> (accessed: 02.02.2025).
19. *Goslin K., Hofmann M.* English Language Spelling Correction as an Information Retrieval Task Using Wikipedia Search Statistics // Proceedings of the 13th Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2022). Marseille: European Language Resources Association (ELRA), 2022. P. 458–464.
20. *SymSpell*, Github [Electronic resource]. URL: <https://github.com/wolfgarbe/SymSpell> (accessed: 02.02.2025).
21. *Audah H.A., Yuliawati A., Alfina I.* A Comparison Between SymSpell and a Combination of Damerau-Levenshtein Distance with the Trie Data Structure // 2023 10th International Conference on Advanced Informatics: Concept, Theory and Application (ICAICTA). IEEE, 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICAICTA59291.2023.10390399.

22. Проверка орфографии, грамматики и стилистики онлайн – LanguageTool [Electronic resource]. URL: <https://languagetool.org/ru> (accessed: 02.02.2025).
23. Sorokin A.A., Shavrina T. Automatic spelling correction for Russian social media texts // Dialogue, International Conference on Computational Linguistics. Moscow: URL: https://www.researchgate.net/publication/303813582_Automatic_spelling_correction_for_Russian_social_media_texts, 2016. EDN: XMWHDK (accessed: 02.02.2025).
24. Pandas 2.2.3 documentation [Electronic resource]. URL: <https://pandas.pydata.org/docs/> (accessed: 02.02.2025).

References

1. Zukarnain, N., Abbas, B. S., Wayan, S., Trisetyarso, A. and Kang, C. H. (2019), "Spelling Checker Algorithm Methods for Many Languages", in: *2019 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)*. IEEE, pp. 198-201. <https://doi.org/10.1109/ICIMTech.2019.8843801>.
2. Hamrouni, B. M. (1994), "Logic compression of dictionaries for multilingual spelling checkers, in: *Proceedings of the 15th Conference on Computational Linguistics*", *Association for Computational Linguistics*, Morristown, NJ, USA, p. 292. <https://doi.org/10.3115/991886.991936>.
3. Lokhande, H. A., Kinage, L. J., Kolunkar, P. M., Salunkhe, J. M. and Kale, S. (2024), "Enhancing Text Quality with Bi-LSTM: An Approach for Automated Spelling and Grammar Correction", in: *2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS)*, IEEE, pp. 01-07, <https://doi.org/10.1109/ADICS58448.2024.10533521>.
4. Mangu, L. and Brill, E. (1997), "Automatic Rule Acquisition for Spelling Correction", in: *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Machine Learning (ICML '97)*, Morgan Kaufmann Publishers Inc, San Francisco, CA, USA, pp. 187-194.
5. Davrondjon, G. and Janowski, T. (2002), "Developing a Spell-Checker for Tajik Using RAISE", in: George, C., Miao, H. (Eds.), *Formal Methods and Software Engineering, ICFEM 2002. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 401-405. https://doi.org/10.1007/3-540-36103-0_41.
6. Atawy, S. M. El, and ElGhany, A. A. (2018), "Automatic Spelling Correction based on n-Gram Model". *Int J Comput Appl* 182, pp. 5-9. <https://doi.org/10.5120/ijca2018917724>.
7. Chen, K.-Y., Wang, H.-M. and Chen, H.-H. (2015), "A Probabilistic Framework for Chinese Spelling Check", *ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing*, vol. 14, no. 4, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1145/2826234>.
8. Sasu, L. (2011), "A Probabilistic Model for Spelling Correction", *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series III: Mathematics, Informatics, Physics*, vol. 4(53), no. 2, pp. 141-146.
9. Kashyap, R. L. and Oommen, B. J. (1984), "Spelling correction using probabilistic methods", *Pattern Recognit, Lett*, vol. 2, no. 3, pp. 147-154. [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(84\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0167-8655(84)90038-2).
10. Chen, S. F. (1996), "Building Probabilistic Models for Natural Language".
11. Flachs, S., Lacroix, O. and Søgaard, A. (2019), "Noisy Channel for Low Resource Grammatical Error Correction", in: *Proceedings of the Fourteenth Workshop on Innovative Use of NLP for Building Educational Applications. Association for Computational Linguistics*, Stroudsburg, PA, USA, pp. 191-196. <https://doi.org/10.18653/v1/W19-4420>.
12. Li, Y., Anastasopoulos, A. and Black, A. W. (2020), "Towards Minimal Supervision BERT-Based Grammar Error Correction (Student Abstract)", *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* vol. 34, no. 10, pp. 13859-13860. <https://doi.org/10.1609/aaai.v34i10.7202>.

13. Khabutdinov, I. A., et al. (2024), "RuGECToR: Rule-Based Neural Network Model for Russian Language Grammatical Error Correction", *Programming and Computer Software. Pleiades Publishing*, vol. 50, no. 4, pp. 315-321.
14. Martynov, N. et al. (2023), "A Methodology for Generative Spelling Correction via Natural Spelling Errors Emulation across Multiple Domains and Languages".
15. Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community [Electronic resource]. URL: <https://www.kaggle.com/> (accessed: 07.02.2025).
16. Hugging Face – The AI community building the future. [Electronic resource]. URL: <https://huggingface.co/> (accessed: 07.02.2025).
17. Language-tool-python.PyPI [Electronic resource]. URL: <https://pypi.org/project/language-tool-python/> (accessed: 11.12.2024).
18. Hunspell download | SourceForge.net [Electronic resource]. URL: <https://sourceforge.net/projects/hunspell/> (accessed: 02.02.2025).
19. Goslin, K. and Hofmann, M. (2022), "English Language Spelling Correction as an Information Retrieval Task Using Wikipedia Search Statistics", *Proceedings of the 13th Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2022)*. Marseille: European Language Resources Association (ELRA), pp. 458-464.
20. SymSpell, Github [Electronic resource]. URL: <https://github.com/wolfgarbe/SymSpell> (accessed: 02.02.2025).
21. Audah, H. A., Yuliawati, A. and Alfina I. (2023) "A Comparison Between SymSpell and a Combination of Damerau-Levenshtein Distance with the Trie Data Structure, 2023 10th International Conference on Advanced Informatics: Concept, Theory and Application (ICAICTA). IEEE, pp. 1-6.
22. Spelling, grammar and style checker online – LanguageTool [Electronic resource] URL: <https://languagetool.org/ru> (accessed: 02.02.2025).
23. Sorokin, A. A. and Shavrina, T. (2016), "Automatic spelling correction for Russian social media texts", in: *Dialogue, International Conference on Computational Linguistics*, https://www.researchgate.net/publication/303813582_Automatic_spelling_correction_for_Russian_social_media_texts, Moscow.
24. Pandas 2.2.3 documentation [Electronic resource]. URL: <https://pandas.pydata.org/docs/> (accessed: 02.02.2025).

Информация об авторах:

Е. В. Исаева – кандидат филологических наук, доцент, зав. кафедрой английского языка профессиональной коммуникации, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15), Scopus Author ID: 57204498718, ResearcherID: O-6777-2015;

Б. З. Сафарбеков – студент 2-го курса магистратуры, Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС" (НИТУ "МИСиС") (119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1).

Information about the authors:

E. V. Isaeva – Candidate of Science (in philology), Associate Professor, Head of the Department of English Language of Professional Communication, Perm State University (15, Bukireva St., Perm, Russia, 614990), Scopus Author ID: 57204498718, ResearcherID: O-6777-2015;

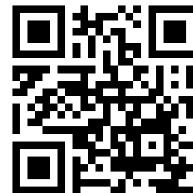
B. Z. Safarbekov – 2nd year Master's student, National University of Science and Technology "MISIS" (4, B. 1, Leninsky pr., Moscow, Russia, 119049).

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 681.5

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-109-117

<https://elibrary.ru/poyssz>**Разработка системы управления сервопривода
с параметрической адаптацией для поворотных
испытательных стендов****Вячеслав Александрович Лазарев¹, Павел Алексеевич Иванов²**^{1,2}Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ имени В.И. Ульянова–Ленина, г. Санкт-Петербург, Россия¹lazarevvy4eslav@yandex.ru²ivanov_etu@mail.ru

Аннотация. Предложено решение задачи параметрической адаптации системы управления сервопривода поворотного испытательного стенда под текущий момент инерции полезной нагрузки (объекта испытаний). Определение текущего момента инерции полезной нагрузки основано на реализации обратной связи от датчика тока обмоток сервомотора при воспроизведении движения с постоянным угловым ускорением. Динамическое изменение моментов инерции полезной нагрузки компенсируется адаптивными алгоритмами перенастройки этой системы, что приводит к сохранению и поддержанию заданных параметров качества управления движением. В работе проведено исследование частотных характеристик контура управления скоростью вращения планшайбы поворотного испытательного стенда при различных значениях моментов инерции полезной нагрузки, установленной на планшайбе стенда, с целью определения зависимости характеристик контура от значения текущего момента инерции полезной нагрузки.

Ключевые слова: поворотный испытательный стенд; система управления сервопривода; частотные характеристики системы; параметрическая адаптация; динамический момент двигателя; момент инерции полезной нагрузки; контур управления скоростью вращения

Для цитирования: Лазарев В.А., Иванов П.А. Разработка системы управления сервопривода с параметрической адаптацией для поворотных испытательных стендов // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 109–117. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-109-117. <https://elibrary.ru/poyssz>.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №20-19-00412-П.

Статья поступила в редакцию 28.01.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2025; принята к публикации 20.03.2025.



Эта работа © 2025 Лазарев В.А., Иванов П.А. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

COMPUTER SCIENCE

Research article

Development of a Servo Control System With Parametric Adaptation for Rotary Test Stands

Vyacheslav A. Lazarev¹, Pavel A. Ivanov²

^{1,2}Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia

¹lazarevvy4eslav@yandex.ru

²ivanov_etu@mail.ru

Abstract. A solution to the problem of parametric adaptation of the servo control system of a rotary test stand to the current moment of inertia of the payload (test object) is proposed. The determination of the current moment of inertia of the payload is based on the implementation of feedback from the current sensor of the servo motor windings when reproducing motion with constant angular acceleration. The dynamic change in the moments of inertia of the payload is compensated by adaptive reconfiguration algorithms of this system, which leads to the preservation and maintenance of the set motion control quality parameters. The paper investigates the frequency characteristics of the control circuit for the rotation speed of the faceplate of a rotary test bench at various values of the moments of inertia of the payload mounted on the faceplate of the stand in order to determine the dependence of the contour characteristics on the value of the current moment of inertia of the payload.

Keywords: *rotary test stand; servo control system; frequency characteristics of the system; parametric adaptation; dynamic torque of the motor; moment of inertia of the payload; speed control circuit*

For citation: Lazarev, V. A. and Ivanov, P. A. (2025), "Development of a Servo Control System With Parametric Adaptation for Rotary Test Stands", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 109-117. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-109-117. <https://elibrary.ru/poyssz>.

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 20-19-00412-P.

The article was submitted 28.01.2025; approved after reviewing 20.02.2025; accepted for publication 20.03.2025

Введение

Для определения параметров навигации и ориентации подвижных объектов с высокой точностью применяются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). В настоящее время для калибровки и испытания инерциальных чувствительных элементов, входящих в состав БИНС, используются поворотные испытательные стенды, способные с заданной точностью воспроизводить и измерять угловые положения планшайбы (на которую устанавливается объект испытаний) относительно одной или нескольких взаимно-перпендикулярных осей [1, 2].

1. Система управления сервопривода

Для воспроизведения движения планшайбы в структуре стендов обычно используются следящие сервоприводы на основе бесколлекторных двигателей постоянного тока (ДПТ) с возбуждением от постоянных магнитов с обратной связью по инкрементному или абсолютному датчику угла [3, 4].

На рисунке 1 представлена традиционная схема трехконтурной системы управления сервопривода с подчиненным регулированием для систем позиционирования.

В такой схеме контур тока управляет моментом двигателя, контур скорости управляет контуром тока, а контур положения – контуром скорости.

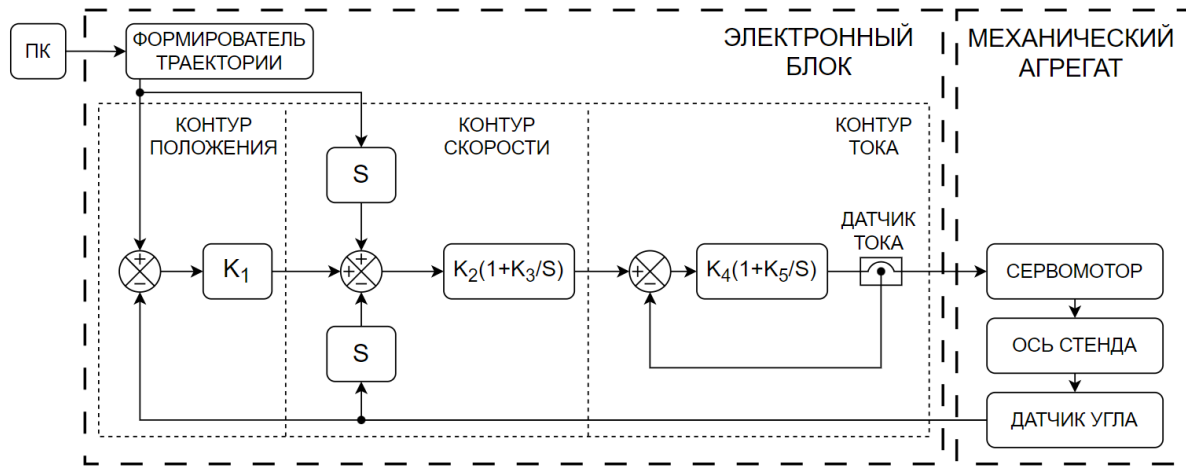


Рис. 1. Схема трехконтурной системы управления сервопривода

Настройка системы управления сводится к выбору коэффициентов регуляторов и параметров фильтров (на схеме не указаны). Выбор зависит как от параметров электро-механической системы стенда (частотные характеристики (ЧХ) контура тока и механического агрегата, эквивалентный момент инерции (МИ), приведенный к валу сервомотора (привода), так и от заданных критериев качества управления (быстродействие контура, величина перерегулирования, запас устойчивости и т.д.).

2. Система управления сервопривода с параметрической адаптацией

При изменении массогабаритных характеристик полезной нагрузки и/или ее расположения на планшайбе стенда изменяется эквивалентный МИ, приведенный к валу привода. Таким образом, система управления может перестать удовлетворять заданным критериям качества управления движением. Задача параметрической адаптации системы управления заключается в идентификации этого МИ с последующей корректировкой коэффициентов регуляторов системы управления движением.

Крутящий момент M привода определяется совокупностью момента $M_{ст}$ (Н·м) его статических сопротивлений и динамического момента $M_{дин}$ (Н·м) [5]:

$$M = M_{ст} + M_{дин}.$$

Момент $M_{дин}$ определяется следующим выражением:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt},$$

где: ω – угловая скорость ротора привода, рад/с; J – приведенный к валу двигателя эквивалентный МИ, кг·м².

Применительно к поворотным испытательным стендам, в рамках одного эксперимента, примем $\frac{dJ}{dt} = 0$, тогда:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Согласно уравнению момента ДПТ:

$$k \cdot \Phi \cdot I = k \cdot \Phi \cdot (I_{\text{ст}} + I_{\text{дин}}) = M = M_{\text{ст}} + J \frac{d\omega}{dt},$$

$$k \cdot \Phi \cdot I_{\text{дин}} = k \cdot \Phi \cdot (I - I_{\text{ст}}) = J\varepsilon,$$

$$\frac{\varepsilon}{I_{\text{дин}}} = \frac{k \cdot \Phi}{J} = k_{\text{МИ}},$$

где: k – конструктивный коэффициент привода; Φ – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, Вб; ε – угловое ускорение ротора привода, рад/с²; I – полный ток обмоток привода, А; $I_{\text{ст}}$ – статический ток, используемый для преодоления момента $M_{\text{ст}}$, А; $I_{\text{дин}}$ – динамический ток, используемый для разгона ротора привода, А; $k_{\text{МИ}}$ – коэффициент, связывающий приведенный к валу двигателя эквивалентный МИ с динамическим током $I_{\text{дин}}$ привода, (рад/с²)/А.

Для ДПТ с постоянными магнитами $\Phi = \text{const}$, следовательно, $k \cdot \Phi = \text{const}$ (паспортная характеристика привода). Таким образом, идентификацию эквивалентного МИ, приведенного к валу привода можно выполнить с помощью обратной связи по коэффициенту $k_{\text{МИ}}$. Для этого предлагается использовать систему управления с дополнительной параметрической обратной связью по величине $k_{\text{МИ}}$ и блока параметрической адаптации (рис. 2).

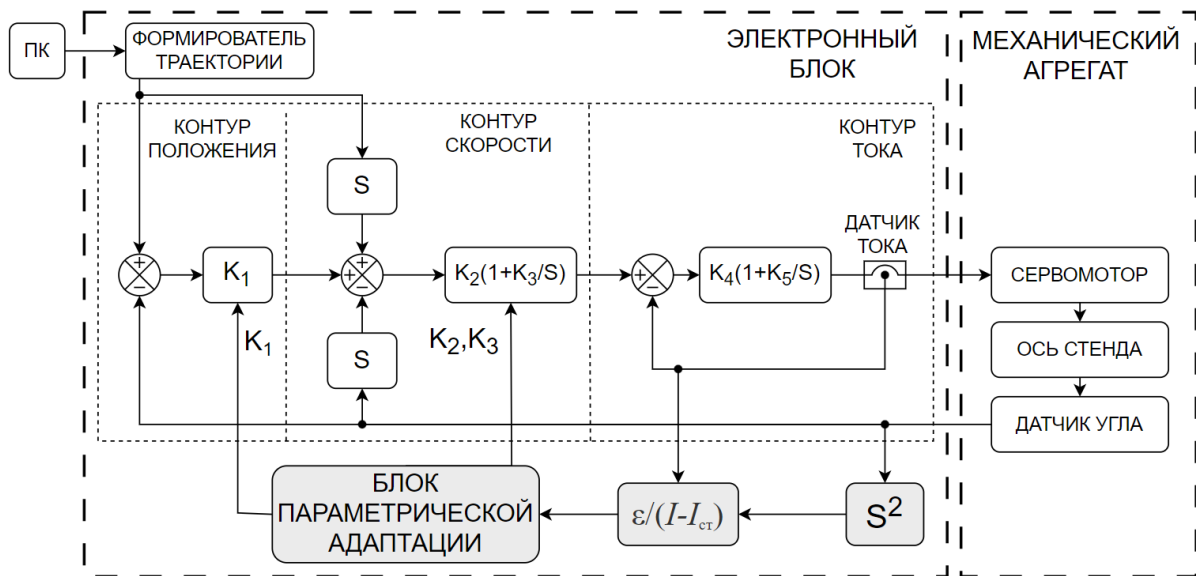


Рис. 2. Схема трехконтурной системы управления сервопривода с параметрической адаптацией

В этом случае необходима априорная информация зависимости настраиваемых параметров $K_1 - K_3$ от коэффициента $k_{\text{МИ}}$ для всего диапазона используемых значений МИ полезной нагрузки. Зависимость настраиваемых параметров K можно определить экспериментальным путем на этапе первичной настройки системы управления.

3. Экспериментальное исследование

Было проведено исследование ЧХ контура управления скоростью вращения планшайбы двухосного поворотного испытательного стенда СДА-15 (рис. 3) вокруг его внутренней оси при различных значениях МИ полезной нагрузки.



Рис. 3. Стенд СДА-15 (ИНЕРТЕХ)

В каждом эксперименте регулятор контура настраивался на максимальное быстродействие с запасом устойчивости разомкнутой системы по амплитуде и фазе 12 дБ и 40 °, соответственно. Запас устойчивости при настройке системы удобно определять по диаграмме Блэка–Николса, которая показывает зависимость ЛАЧХ от ФЧХ для разомкнутой системы с регулятором. Для построения диаграммы экспериментальным образом определяется ЧХ разомкнутой системы и подбирается регулятор таким образом, чтобы обеспечивался заданный запас устойчивости. На диаграмме запасы устойчивости по амплитуде и фазе – расстояния от точки неустойчивости до ЧХ по оси ординат и по оси абсцисс, соответственно. На рисунке 4 представлена диаграмма Блэка–Николса для различных значений МИ полезной нагрузки.

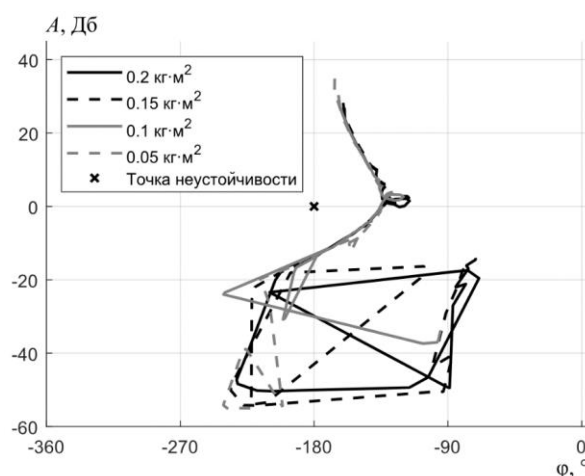


Рис. 4. Диаграмма Блэка–Николса контура скорости сервопривода внутренней оси стенда при различных значениях МИ полезной нагрузки

На рисунке 5 представлены графики ЛАЧХ и ФЧХ замкнутого контура скорости для различных значений МИ полезной нагрузки.

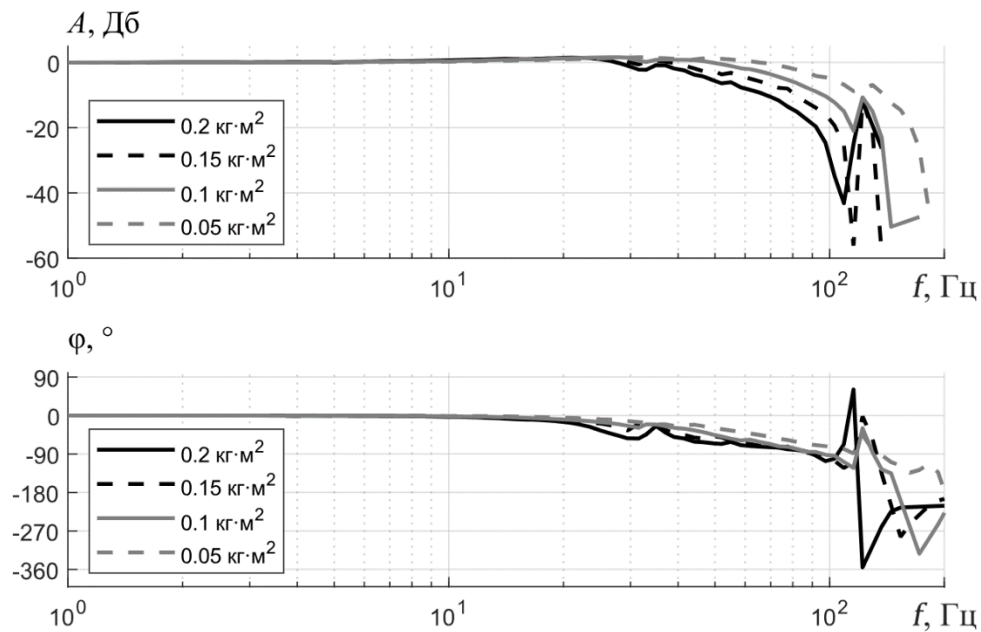


Рис. 5. ЛАЧХ и ФЧХ контура скорости сервопривода внутренней оси стэнда при различных значениях МИ полезной нагрузки

На рисунке 6 представлены графики ЛАЧХ и ФЧХ замкнутого контура скорости для значений МИ 0,2 кг·м² и 0,05 кг·м² при настройках контура на 0,05 кг·м² и 0,2 кг·м², соответственно.

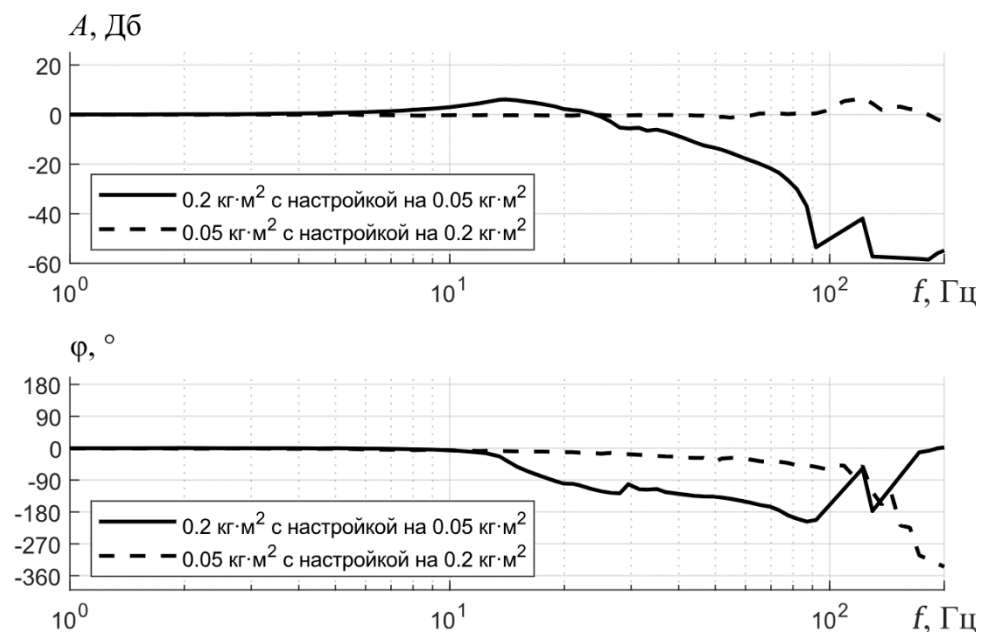


Рис. 6. ЛАЧХ и ФЧХ контура скорости сервопривода внутренней оси стэнда при несоответствии МИ полезной нагрузки настройке системы

При анализе данных, проиллюстрированных на рис. 6, видно, что заданного запаса устойчивости системы недостаточно в случае несоответствия значений МИ текущей нагрузки и нагрузки, используемой при настройке системы.

В первом случае наблюдается нежелательный "подъем" характеристики на частоте 12 Гц, а полоса пропускания по уровню -3 дБ снижается с 42 Гц до 27 Гц в сравнении с системой, настроенной при соответствующей нагрузке (рис. 5).

Во втором случае видно, что заданного запаса устойчивости недостаточно – система неустойчива. Решить данные проблемы можно увеличением запаса устойчивости разомкнутой системы, однако, это приведет к уменьшению полосы пропускания, и, как следствие, к снижению быстродействия контура управления.

Для определения коэффициента $k_{МИ}$ для каждой нагрузки было воспроизведено равноускоренное движение планшайбы стенда с ускорением $1000 \text{ }^\circ/\text{с}^2$.

На рисунке 7 представлена взаимосвязь между параметрами движения планшайбы и значением тока привода I для нагрузки различного номинала.

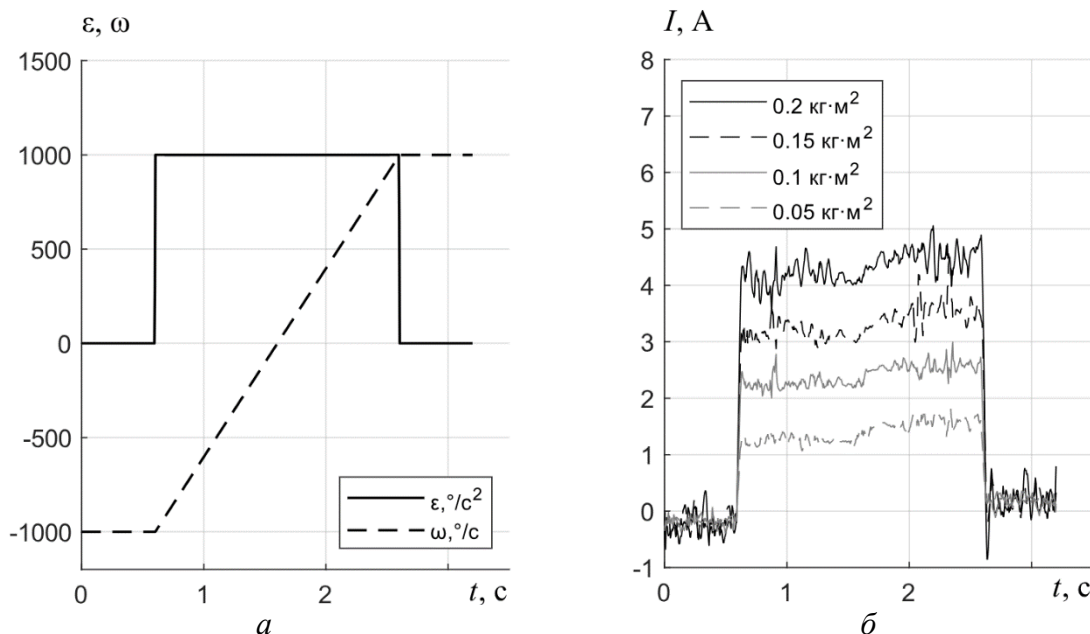


Рис. 7. Заданные скорость и ускорение планшайбы стенда (а) и измеренный ток обмоток соответствующего привода (б)

Видно, что для ускоренного и замедленного вращения планшайбы требуется различное значение тока (из-за действия момента статических сил). Среднее значение тока привода при симметричном относительно нуля равноускоренном движении не будет содержать в себе статический ток, следовательно, его можно использовать для определения $k_{МИ}$.

Были получены средние значения тока: 1,4 А; 2,4 А; 3,3 А и 4,3 А, что соответствует полезной нагрузке $0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и $0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

На рис. 8, а изображена зависимость коэффициента $k_{МИ}$ от значения текущего момента инерции полезной нагрузки, а на рис. 8, б – зависимость коэффициентов K_2 и K_3 регулятора контура управления скоростью от коэффициента $k_{МИ}$.

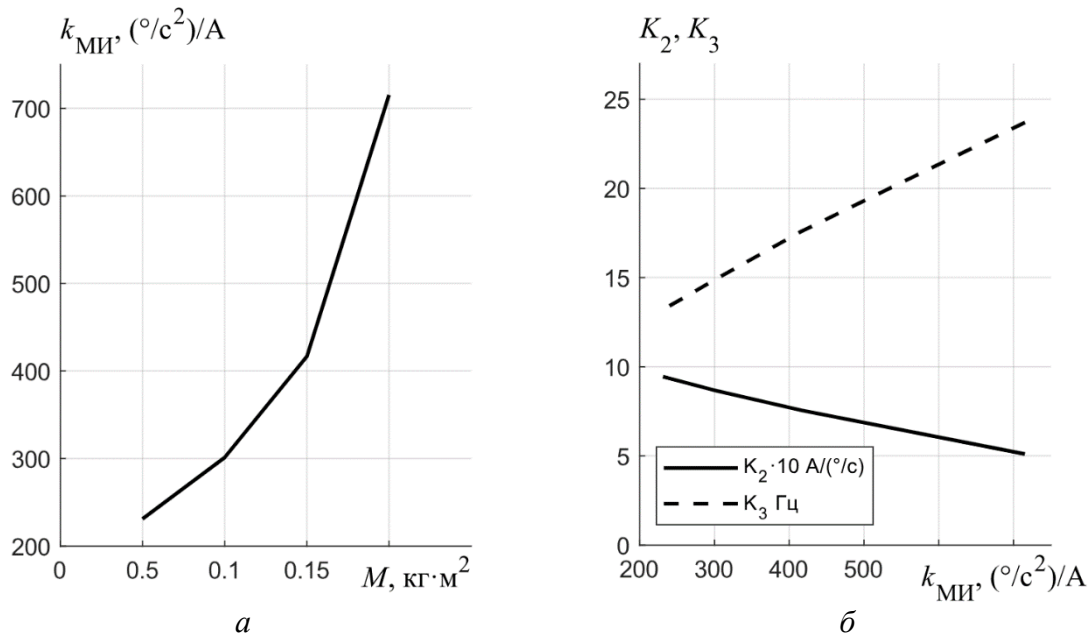


Рис. 8. а – коэффициент $k_{\text{МИ}}$, б – коэффициенты K_2 и K_3 регулятора контура скорости

По рис. 8, б видно, что коэффициенты K_2 и K_3 имеют линейную зависимость от коэффициента $k_{\text{МИ}}$, что, в свою очередь, говорит о возможности применения линейной интерполяции для определения коэффициентов K_2 и K_3 во всем диапазоне значений МИ полезной нагрузки.

Заключение

Предложен вариант построения системы управления сервопривода поворотного испытательного стенда, основанный на традиционной схеме трехконтурной системы с дополнительной параметрической обратной связью по динамическому току при равноускоренном движении.

Использование системы управления сервоприводами с параметрической адаптацией позволит сохранить устойчивость и быстродействие системы при варьировании значений МИ полезной нагрузки за счет корректировки коэффициентов контура управления. При отсутствии соответствующих корректировок диапазон возможных МИ полезной нагрузки снижается, уменьшается быстродействие системы и качество регулирования, что показано на рис. 6.

Список источников

1. Иванов П.А., Лазарев В.А., Бохман Е.Д., Павлов П.А., Филатов Ю.В. Исследование характеристик трехосного стенда для испытаний навигационных систем // Гироскопия и навигация. Т. 30, № 3(118), 2022. DOI: 10.17285/0869-7035.00100 EDN: KOPARD.
2. Боронахин А.М., Иванов П.А., Бохман Е.Д., Филатов Ю.В., Суров И.Л. Средства испытаний инерциальных систем и их чувствительных элементов // Материалы

- XVIII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ, 2011. 338 с.
3. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издат. Дом МЭИ, 2010. ISBN: 978-5-383-00457-9 EDN: QXSHYA.
 4. Самыгина, Е.К. Сравнение линейных алгоритмов управления положением для прямых сервоприводов / Е.К. Самыгина, Л.Н. Рассудов, А.П. Балкова // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 57–64. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-57-64 EDN: ZBLXEL
 5. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 232 с.

References

1. Ivanov, P. A., Lazarev, V. A., Bokhman, E. D., Pavlov, P. A. and Filatov, Y. V. (2022), "Investigation of the characteristics of a three-axis stand for navigation systems", *Giroskopiya I navigatsiya*, vol. 30, no. 3(118). (In Russ.).
2. Boronakhin, A. M., Ivanov, P. A., Bokhman, E. D., Filatov, Yu. V. and Surov, I. L. (2011), "Means of testing inertial systems and their sensitive elements", *Materialy XVIII Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferencii po integrirovannym navigacionnym sistemam*, SPb.: GNC RF CNII. 338 p. (In Russ.).
3. Balkov, A. P. and Tsatsenkin, V. K. (2010), "Precision electric drive with valve motors". М.: Izdat. Dom MEI. (In Russ.).
4. Samygina, E. K. (2019), "Comparison of linear position control algorithms for direct servos ", E. K., Samygina, L. N., Rassudov, A. P., Balkova, *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, Vestnik MEI, no. 2, pp. 57-64. (In Russ.).
5. Dementiev, Yu. N., Chernyshev, A. Yu. and Chernyshev, I. A. (2010), "Electric drive: a textbook", Tomsk: Izd-vo TPU, 232 p. (In Russ.).

Информация об авторах:

В. А. Лазарев – аспирант кафедры ЛИНС, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет–ЛЭТИ имени В.И. Ульянова–Ленина (197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5 б);

П. А. Иванов – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет–ЛЭТИ имени В.И. Ульянова–Ленина (197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5 б).

Information about the authors:

V. A. Lazarev – PhD student of the LINS Department, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5b Professora Popova St., Saint Petersburg, Russia, 197022);

P. A. Ivanov – PhD in Engineering, Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5b Professora Popova St., Saint Petersburg, Russia, 197022).

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Обзорная статья

УДК 004.89

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-118-144

<https://elibrary.ru/pqgfhj>**Применение искусственного интеллекта
для привлечения клиентов в социальных сетях:
обзор российского и зарубежного опыта****Андрей Валерьевич Соколов¹, Алексей Сергеевич Шуткин², Екатерина Максимовна Епифанова³, Алина Андреевна Попкова⁴, Армен Левонович Бекларян⁵, Марина Александровна Барулина⁶**¹АНО ВО "Университет Иннополис", Россия^{1,2,3,4,6}Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия⁵НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия¹asokolov@interprogram.ru²ashutkin@mail.ru³Kateryna.epifanowa@yandex.ru⁴alina.k-r@mail.ru⁵abeklaryan@hse.ru⁶mab@psu.ru

Аннотация. Искусственный интеллект в современных реалиях играет ключевую роль в маркетинге в общем и, безусловно, в привлечении новых пользователей в социальных сетях, в частности. Нейронные сети и другие методы машинного обучения широко применяются в различных рекомендательных системах, однако, их применение для привлечения новых клиентов недостаточно проработано. Как известно, масштабирование любого бизнеса напрямую связано с увеличением числа новых клиентов, что обуславливает значимость изучения вопроса нейромаркетинга. Цель данного исследования – провести сравнительный анализ существующих российских и зарубежных сервисов для привлечения новых пользователей и определить эффективные методы, применяемые для этих целей.

Ключевые слова: социальные сети; нейронные сети; SMM; привлечение клиентов; искусственный интеллект; анализ социальных сетей; классификация; регрессия; генеративный интеллект

Для цитирования: Соколов А.В., Шуткин А.С., Епифанова Е.М., Попкова А.А., Бекларян А.Л., Барулина М.А. Применение искусственного интеллекта для привлечения клиентов в социальных сетях: обзор российского и зарубежного опыта // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 118–144. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-118-144. <https://elibrary.ru/pqgfhj>.

Благодарности: авторы выражают благодарность декану факультета современных иностранных языков и литератур ПГНИУ Хорошевой Наталье Владимировне (к.ф.н., доц.), доценту ка-



Эта работа © 2025 Соколов А.В., Шуткин А.С., Епифанова Е.М., Попкова А.А., Бекларян А.Л., Барулина М.А. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

федры лингвистики и перевода ПГНИУ Красноборовой Людмиле Анатольевне (к.ф.н.) за все-стороннюю поддержку и помощь в процессе подготовки статьи.

Статья поступила в редакцию 30.01.2025; одобрена после рецензирования 14.03.2025; принята к публикации 24.03.2025.

COMPUTER SCIENCE

Review article

Artificial Intelligence Implementation for Customer Engagement in Social Networks: an Overview of Russian and Foreign Experience

Andrey V. Sokolov¹, Aleksey S. Shutkin², Ekaterina M. Epifanova³, Alina A. Popkova⁴,
Armen L. Beklaryan⁵, Marina A. Barulina⁶

¹Innopolis University, Russia

^{1,2,3,4,6}Perm State University, Perm, Russia

⁵HSE University, Moscow, Russia

¹asokolov@interprogram.ru

²ashutkin@mail.ru

³Kateryna.epifanova@yandex.ru

⁴alina.k-r@mail.ru

⁵abeklaryan@hse.ru ⁶mab@psu.ru

⁶mab@psu.ru

Abstract. In modern realities, artificial intelligence plays a key role in marketing, in general, and certainly in engaging new users in social networks, in particular. Neural networks and other machine learning methods are widely used in various recommendation systems, but their application for attracting new customers is underdeveloped. As we know, upscaling of any business is directly related to increasing the number of new consumers, which determines the significance of studying the issue of neuromarketing. The purpose of this study is to conduct a comparative analysis of existing Russian and foreign services for the engagement of new clients and to identify effective methods used for these purposes.

Keywords: *social networks; neural networks; SMM; customer engagement; artificial intelligence; social network analysis; classification; regression; generative intelligence*

For citation: Sokolov, A. V., Shutkin, A. S., Epifanova, E. M., Popkova, A. A., Beklaryan, A. L. and Barulina, M. A. (2025), "Artificial Intelligence Implementation for Customer Engagement in Social Networks: an Overview of Russian and Foreign Experience", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 118-144. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-118-144. <https://elibrary.ru/pqgfhj>.

Acknowledgments: authors would like to thank Natalia Vladimirovna Khorosheva, Candidate of Science (philology), Associate Professor, Dean of the Modern Foreign Languages and Literatures Faculty, and Lyudmila Anatolyevna Krasnoborova, Candidate of Science (philology), Associate Professor of the Linguistics and Translation Department, for comprehensive support and assistance in the article preparation.

The article was submitted 30.01.2025; approved after reviewing 14.03.2025; accepted for publication 24.03.2025.

Введение

С каждым годом количество пользователей социальных сетей увеличивается, соответственно, растет и интерес бизнеса к этой сфере, как источнику новых клиентов [1]. Крупные компании тратят колоссальные бюджеты на привлечение новых пользователей в свои группы и сообщества, конкурируя между собой, а небольшие компании, также стремясь быть представленными в социальных сетях, ищут менее затратные, но более нестандартные подходы к привлечению потенциальной аудитории на свои страницы. Независимо от степени развития бизнеса, основную ценность в smm-маркетинге для каждого из них представляет увеличение эффективности рекламных кампаний при снижении вложенных в социальные сети затрат.

Существует множество сервисов анализа рекламного контента конкурентов для повышения эффективности привлечения пользователей в новые сообщества в социальных сетях, но практически все они являются зарубежными. Необходимо отметить, что только часть этих сервисов анализирует, ставшую основной в России, социальную сеть ВКонтакте. Решение по автоматизированному анализу пользователей и привлечению их на целевые страницы в социальных сетях весьма актуально для российского бизнеса.

Так, например, широкое распространение систем искусственного интеллекта, в частности, рекомендательных систем, является общепризнанным фактом и подтверждено их повсеместным использованием в различных отраслях [2]. Однако, несмотря на высокую эффективность в работе с существующей клиентской базой, исследования, направленные на адаптацию рекомендательных систем для работы с новыми пользователями, демонстрируют существенный пробел. Существующие работы, посвященные применению рекомендательных систем, заявляют возможность их работы с новыми пользователями системы, но не предусматривают практически применимых методов, ориентированных непосредственно на привлечение новых пользователей в систему [3].

Анализ существующих методов искусственного интеллекта позволяет утверждать, что применение нейронных сетей и других алгоритмов машинного обучения обладает потенциалом для решения задачи привлечения новых клиентов. Следует отметить, что данный процесс сопряжен с определенными сложностями, обусловленными работой в условиях "холодного старта" на примере рекомендательных систем [4, 5], характеризующихся ограниченным объемом информации о потенциальном клиенте и факторах, влияющих на его выбор. Холодный старт представляет собой процесс первоначального построения и обучения систем, когда еще нет исторических данных о предпочтениях пользователей или информации о покупках, что является одной из ключевых проблем, с которыми сталкиваются разработчики систем искусственного интеллекта, особенно в контексте глубокого обучения [2]. Тем не менее, доступность API социальных сетей, предоставляющих возможность сбора первичных данных о пользователях и их принадлежности к группам по интересам, позволяет существенно смягчить проблему "холодного старта" в автоматизации smm-маркетинга. Более того, нейронные сети, благодаря своей архитектуре и алгоритмам обучения, эффективно справляются с обработкой больших объемов данных, что делает их перспективным инструментом для решения такой задачи.

Данная работа состоит из четырех частей. В первой части описаны зарубежные сервисы в области аналитики социальных сетей. Вторая часть предполагает обзор литературы

использования ИИ в анализе социальных сетей. В третьей части будут рассмотрены методы искусственного интеллекта, используемые в анализе социальных сетей. В заключение будет представлена архитектура системы привлечения клиента в социальной сети.

1. Обзор зарубежных сервисов-конкурентов в области аналитики социальных сетей

В последние годы использование искусственного интеллекта (ИИ) в аналитике социальных сетей стало важным трендом в цифровом маркетинге. Платформы, такие как Hootsuite, Brand Analytics, All Ears, Metricool, Sprout Social и другие, активно внедряют ИИ для улучшения контента, анализа аудитории и конкурентов, взаимодействия с пользователями и оптимизации рекламных кампаний. Современные сервисы предлагают разнообразные инструменты, включая мониторинг упоминаний, анализ вовлеченности, прогнозирование вовлеченности и генерацию контента, что помогает маркетологам более точно планировать свои действия и повышать эффективность работы с соцсетями.

Несмотря на продвинутое использование ИИ в контексте SMM, существуют значительные пробелы в функционале некоторых сервисов. Например, несмотря на то, что Semrush и Sprout Social предоставляют широкий функционал для мониторинга социальных сетей, они не поддерживают все возможности предиктивного анализа [6, 7]. Также важно отметить, что зарубежные сервисы не поддерживают русский язык и мониторинг российских социальных сетей и платформ, что делает их менее доступными для русскоязычного сегмента рынка. С другой стороны, Brand Analytics поддерживает русский язык, так как является изначально российской разработкой, вышедшей на международный рынок, и предоставляет богатые возможности для анализа репутации бренда, но и он не использует все возможности интеграции ИИ, например, не предлагает возможности автоматической генерации постов, функции создания нативной рекламы и автоматизированного выкладывания постов [8].

Помимо Brand Analytics, большим игроком на российском рынке в сфере SMM-инструментов является LiveDune. Так же, как и Brand Analytics, этот сервис доступен и на английском языке. По данным с официального сайта, LiveDune предоставляет возможности для изучения базы данных статистики соцсетей до пяти лет, инструменты для автопостинга, модерации соцсетей клиента, анализа конкурентов и аудитории, проверки на накрутку лайков и репостов, а также выставление KPI. При использовании сервиса возможно также создавать отчеты с учетом потребностей пользователя платформы. Несмотря на явное наличие интеграции некоторых возможностей ИИ, сервис все же не располагает важными для современных маркетинговых кампаний ИИ-инструментами, как, например, автоматизированная генерация постов и другого рода контента, улучшение уже имеющихся постов с помощью ИИ и др. [9]. На российском рынке присутствуют и другие сервисы для настраивания и ведения соцсетей компаний: trendHERO, Popsters, Panda Rank, SMMplanner, Sked Social и многие другие, – однако они не отличаются уникальными решениями и предлагают уже стандартные инструменты и возможности. К примеру, анализ конкурентов и аудитории, автопостинг и кроссплатформенный мониторинг соцсетей [10].

Metricool, в свою очередь, предлагает более универсальный подход, интегрируя инструменты для кроссплатформенного мониторинга и анализа контента с функциями автоматической публикации. С помощью Smart Scheduler и AI Content Recommender

сервис помогает маркетологам выбирать лучшие временные интервалы для публикации контента и генерировать более релевантные посты для привлечения конкретной аудитории. Сервис также использует ИИ для поиска потенциальных рекламных партнеров бренда в социальных сетях – инфлюенсеров по актуальной тематике. Хотя все еще не поддерживает функцию показа рекомендаций для создания нативной рекламы [11].

Говоря о возможностях внедрения нативной рекламы, стоит упомянуть, что другой сервис, Loomly, предоставляет полезные инструменты для создания наиболее приближенных к понятию нативной рекламы постов, но не располагает всеми преимуществами ИИ для внедрения такого типа рекламных предложений. Наиболее значимыми особенностями Loomly, тем не менее, являются инструменты для эффективной командной работы и создания контента. Используя ИИ для генерации идей, хештегов и оптимизации публикаций, Loomly помогает быстро адаптировать контент под текущие тренды. Однако, как и в случае с Brand Analytics, Loomly не предоставляет инструментов для полностью автоматизированной генерации постов, что ограничивает его функциональность для маркетологов, стремящихся к максимальному отстранению от рутинных задач [12].

Одним из самых универсальных решений является сервис Hootsuite, который не только предоставляет все возможности интегрированного ИИ, как всесторонний анализ аудитории и конкурентов, предиктивный анализ, рекомендации по новому контенту, подбор возможных рекламных партнеров и т.д., но и возможности автоматической генерации и выкладывания постов, а также трансформации уже существующих популярных постов в нативную рекламу через собственный чат ИИ – OwlyWriter AI [13].

На фоне всех описываемых сервисов All Ears выделяется своей уникальной специализацией на углубленном анализе аудио-контента. Платформа использует ИИ для транскрипций аудиофайлов, таких как подкасты и радиопередачи, а также для анализа эмоций и контекста, что позволяет компаниям более точно понимать реакцию своей аудитории. Однако All Ears не предоставляет таких инструментов, как автоматическая генерация постов, что ограничивает ее функциональность в рамках комплексных SMM-кампаний [14].

Платформа Sprout Social обладает ИИ-инструментами Smart Inbox, который помогает классифицировать и приоритизировать сообщения от пользователей, и ViralPost, который служит для анализа активности аудитории и предлагает оптимальное время для публикаций постов, исходя из промежутков времени, в которые аудитория наиболее активна в сети. Однако, несмотря на широкий набор возможностей, сервис не предоставляет инструментов для автоматической генерации контента и, как уже было отмечено ранее, предиктивного анализа, что делает его менее подходящим для более комплексных SMM-стратегий [7].

Semrush тоже включает инструменты для анализа социальных сетей, более того, его ИИ-инструменты Content Shake AI и Social Content AI могут улучшить или даже сгенерировать контент на основе ключевых слов и анализировать его эффективность. Однако Semrush также не обладает функционалом для предиктивного анализа и подбора рекламных партнеров, что ограничивает возможности платформы в рамках полноценной SMM-аналитики [6].

Outbrain сосредоточен на нативной рекламе и использует алгоритмы машинного обучения для рекомендации контента пользователям на основе их интересов и поведения.

Однако Outbrain не предоставляет возможности для анализа данных и конкурентов, а также создания контента, поэтому данный сервис подходит для непосредственного воплощения рекламных кампаний, но не для комплексного анализа медиапространства и корректировки маркетинговой стратегии [15].

Сервисы Buffer и Simplified предоставляют базовые инструменты для управления контентом в социальных сетях, но их функциональность ограничена по сравнению с более комплексными платформами. Buffer помогает оптимизировать время публикации, проанализировать аудиторию и сгенерировать идеи для написания текста постов; в отличие от Simplified этот сервис предоставляет возможности для анализа данных о пользователях. Simplified фокусируется на генерации контента и визуальных материалов с помощью ИИ. Однако обе платформы не обладают функциями анализа конкурентов или предиктивного моделирования, что ограничивает их использование в крупных проектах [16, 17].

В целом, сервисы для анализа социальных сетей, использующие ИИ, продолжают развиваться, предлагая пользователям все более сложные и удобные инструменты для управления контентом и анализа данных. Важно отметить, что каждый сервис имеет свои сильные стороны, но и ограниченные возможности в некоторых областях. Для выбора подходящего инструмента необходимо учитывать конкретные потребности бизнеса, такие как необходимость в кроссплатформенном мониторинге, анализе конкурентов, автоматической генерации контента или предиктивном анализе.

Для подведения выводов и обобщения результатов исследования авторы считают нужным составить сравнительную таблицу всех рассмотренных сервисов. Таблица 1 позволяет наглядно оценить, какие функции и возможности предлагают платформы, а также продемонстрировать ключевые отличия и особенности их работы с искусственным интеллектом.

Таблица 1. Сравнение возможностей сервисов-конкурентов

Характеристики/Сервисы	Brand Analytics	Live Dune	Hootsuite	All Ears	Sprout Social	Semrush	Metri cool..	Loomly	Outbrain	Buffer	Simplified
Русский язык	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Интегрированный ИИ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Анализ конкурентов	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Анализ аудитории	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Нативная реклама	-	-	+	-	-	-	-	-/+	+	-	-
Генерация постов ИИ	-	-	+	-	-	+	+	-/+	-	-/+	+

Окончание таблицы 1											
Характеристики/Сервисы	Brand Analytics	Live Dune	Hootsuite	All Ears	Sprout Social	Semrush	Metriool.	Loomly	Outbrain	Buffer	Simplified
Автопостинг	-	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+
Кроссплатформенный мониторинг	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Предиктивный анализ	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-
Рекомендации по контенту	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+
Подбор рекламных партнеров	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-
Расширенная аналитика аудио-контента	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-

В представленной табл. 1 сравниваются лидирующие позиции на рынке SMM-сервисов по критериям, отражающим их функциональные возможности. В этот список включены не только базовые возможности платформ, но и инновационные, которые только начинают применяться. Наличие интерфейса на русском языке было выделено как необходимое условие для работы на русскоязычном рынке; остальные критерии, выделенные для сравнения сервисов, отображают наличие (+), отсутствие (-) или частичное присутствие (-/+) требующихся для сферы SMM функций сбора и аналитики данных, выявления новых тенденций и создания контента. Данное сравнение наглядно показывает преимущества и недостатки текущих лидеров в области маркетинга в социальных сетях.

2. Обзор литературы по теме использования ИИ в анализе социальных сетей

В последние годы наблюдается стремительный рост использования ИИ и маркетинга в социальных сетях (SMM). Технологии искусственного интеллекта, такие как машинное обучение, обработка естественного языка и анализ данных, значительно изменили способы взаимодействия компаний с потребителями в социальных сетях [18, 19, 20]. Исследователи выделяют такие ключевые тенденции использования ИИ в социальных сетях, как сбор и анализ данных на различных платформах с помощью API (например, показатели CTR, CR, CSAT, PER, ROI, ROAS, CSI, SOV, NPS, средний

охват профиля, охваченная аудитория, посещения профиля, охват профиля, показы профиля и т. д.), создание контента, автоматизированное взаимодействие с клиентами, персонализация, предиктивная аналитика и оптимизация рекламных кампаний в режиме реального времени [21, 22]. Важной тенденцией является персонализация рекламных объявлений: ИИ-системы анализируют огромные объемы данных о потребителях, что позволяет компаниям адаптировать свой контент под индивидуальные предпочтения пользователей [23, 24]. Еще одной заметной тенденцией является автоматизация обслуживания клиентов с помощью внедрения чат-ботов и виртуальных помощников на базе ИИ, которые позволяют компаниям обеспечивать круглосуточное консультирование, что положительно сказывается на удовлетворенности клиентов полученными услугами и вовлеченность аудитории [25, 26].

Хотя произошел значительный прогресс в области применения ИИ для SMM, остается ряд пробелов в исследованиях, одним из которых является понимание того, как ИИ влияет на долгосрочную лояльность к бренду и доверие потребителей. Несмотря на то, что ИИ доказал свою эффективность в привлечении клиентов и увеличении продаж, проведено недостаточно исследований о его влиянии на долгосрочные отношения брендов со своими клиентами [27]. Кроме того, большая часть существующих исследований посвящена крупным бизнесам, использующим ИИ для SMM, при этом научных работ, рассматривающих малые и средние предприятия, сравнительно мало [28]. Также недостаточно изучена этическая сторона внедрения ИИ в сферу SMM — в особенности это касается конфиденциальности данных потребителей и прозрачности процесса принятия решений ИИ-инструментов [29].

Многочисленные исследования подчеркивают положительное влияние ИИ на SMM. Например, анализ Линь Шань, показывает, что ИИ может значительно повысить точность таргетированной рекламы, что приводит к более высокой окупаемости инвестиций [30]. Более того, ИИ-алгоритмы, анализирующие поведение потребителей, могут вычислить наилучшее время для размещения контента, максимизируя вовлеченность аудитории и узнаваемость бренда или его товаров [31]. Помимо рекламы, такие инструменты помогают специалистам оптимизировать маркетинговые стратегии, предлагая темы и ключевые слова, которые с большой вероятностью найдут отклик у определенной аудитории [32]. Способность ИИ анализировать большой объем данных также играет на руку брендам, стремящимся выявлять новые тенденции и адаптировать свои стратегии в соответствии с ними [33]. В этом контексте алгоритмы машинного обучения часто используются для прогнозирования поведения потребителей, что позволяет брендам продумать следующие шаги рекламных кампаний наперед [34]. В данной сфере исследований существует мнение, что решения, принятые ИИ-механизмами, могут стать более эффективными в социальных сетях [19, 35].

Несмотря на бесспорные преимущества применения ИИ в SMM, существуют исследования, которые выявляют и его негативные аспекты. Одной из основных проблем является этическая сторона ИИ-маркетинга, особенно в отношении конфиденциальности данных и согласия потребителей [36]. Поскольку ИИ-системы собирают и анализируют огромные объемы персональных данных, существует риск утечки конфиденциальной информации потребителей, и это может привести к потере доверия к брендам. Кроме того, использование таргетированной рекламы для воздействия на поведение потребителей с помощью ИИ вызывает опасения по поводу манипулирования потребителями и их независимости [37; 38]. Наряду с этим, использование ИИ может привести

к сокращению рабочих мест в сфере маркетинга, так как автоматизация таких задач, как создание контента, консультирование клиентов и управление рекламными кампаниями, может заметно снизить востребованность маркетологов, особенно для небольших компаний [32]. Еще одной проблемой является тот факт, что ИИ-инструменты часто уступают человеку в креативности, что в итоге приводит к менее новаторским маркетинговым приемам [39].

При обзоре литературы несколько авторов уделили особое внимание роли ИИ в повышении вовлеченности клиентов: например, С. Гош с коллегами рассматривает, как чат-боты, работающие на базе технологии обработки естественного языка (NLP), могут улучшить взаимодействие компаний с клиентами в социальных сетях, предоставляя мгновенные ответы и персонализированные рекомендации. В этой работе подчеркивается потенциал ИИ в повышении эффективности обслуживания и уровня удовлетворенности клиентов, что особенно полезно для репутации брендов [25]. Еще одной областью, которой уделяется немало внимания, является роль ИИ в создании визуального контента. По словам М. Ислама, ИИ можно использовать для создания визуального контента, который находит отклик у целевой аудитории, путем анализа текущих тенденций и визуальных предпочтений пользователей. Автоматизируя создание контента, бренды могут оптимизировать свои усилия по контент-маркетингу, сохраняя при этом высокий уровень актуальности и вовлеченности аудитории [21].

Многие исследователи сходятся во мнении, что ИИ обладает новаторским потенциалом в области SMM, в частности, в плане повышения операционной эффективности. Такие авторы, как Г. Приянга [32] и А.А. Шевердин [20], сходятся во мнении, что ИИ способствует автоматизации повторяющихся задач, позволяя маркетологам сосредоточиться на более сложных стратегических решениях. Помимо того, все согласны с утверждением, что способность ИИ к анализу поведения потребителей может улучшить процесс принятия решений и оптимизации рекламных кампаний [31; 33]. Существует общее мнение, что будущее SMM заключается в повышении персонализации; так, например, в исследовании С. Бабатунде [24], подчеркивается, что персонализированные маркетинговые стратегии, основанные на ИИ, с большей вероятностью найдут отклик у потребителей и приведут к более высокому уровню вовлеченности и конверсии клиентов.

Несмотря на общее согласие по многим аспектам, сохраняются разногласия, особенно в отношении этики применения ИИ в маркетинге. В то время как некоторые исследователи утверждают, что ИИ можно применять ответственно, другие [37; 38] выражают обеспокоенность по поводу манипулирования выбором потребителей с помощью ИИ-методов. Еще одной областью разногласий является влияние искусственного интеллекта на креативность в маркетинге: в то время как некоторые исследования показывают, что ИИ может повысить креативность человека, предлагая идеи и автоматизацию процессов создания контента, другие утверждают, что контенту, сгенерированному ИИ, может не хватать эмоциональности и оригинальности, в отличие от созданного человеком [39; 40].

В связи с обилием узконаправленной терминологии, принадлежащей к сфере маркетинга в социальных сетях и к области искусственного интеллекта, был составлен глоссарий для улучшения читаемости статьи и обеспечения единообразного восприятия ключевых понятий (табл. 2).

Таблица 2. Глоссарий

Термин на английском языке	Обозначение на русском языке	Пояснение
API (Application Programming Interface)	Используется английская аббревиатура	Код, который позволяет приложениям взаимодействовать друг с другом и получать доступ к функционалу другой программы
CR (Conversion Rate)	Коэффициент конверсии	Процент пользователей, взаимодействующих с вашим контентом, которые совершили целевое действие
CSAT (Customer Satisfaction Score)	Используется английская аббревиатура/оценка удовлетворенности клиентов	Показатель того, насколько клиенты удовлетворены продуктом, услугой или опытом взаимодействия с компанией, измеряется в процентах.
CSI (Customer Satisfaction Index)	Используется английская аббревиатура	Индекс удовлетворенности клиентов позволяет оценить уровень удовлетворенности клиентов после взаимодействия с компанией
CTR (Click-Through Rate)	Используется английская аббревиатура	Показатель того, насколько часто пользователи нажимают на ссылку, объявление или другой контент, по сравнению с тем, сколько раз этот элемент был показан, измеряется в процентах
KPI (key performance indicators)	Используется английская аббревиатура/ (Ключевые показатели эффективности)	Числовые выраженные в абсолютных или относительных (процентных) значениях показатели для измерения результативности и эффективности принятых действий
Native advertising	Нативная реклама (естественная реклама)	Полезная информация, направленная на конкретную аудиторию. Она не продвигает продукт напрямую, не нарушает пользовательский опыт и гармонично вливается в общий контент, что делает ее менее навязчивой и более привлекательной для аудитории
NLP (Natural Language Processing)	Используется английская аббревиатура/ Обработка естественного языка	Технология машинного обучения, которая дает компьютерам возможность интерпретировать, манипулировать и понимать человеческий язык
NPS (Net Promoter Score)	Используется английская аббревиатура	Индекс потребительской лояльности, отражающий готовность рекомендовать компанию другим клиентам
PER (Page Engagement Rate)	Используется английская аббревиатура/показатель вовлеченности на странице	Показатель активности взаимодействий пользователей со страницей в социальных сетях или на веб-сайте
Posts ROI (Return on Investment)	Используется английская аббревиатура/окупаемость инвестиций в публикации	Показатель эффективности публикаций в соцсетях или на других платформах, какую прибыль они приносят и достигают ли других желаемых рекламодателем результатов
Profile Daily Average Reach	Средний охват профиля за день	Среднее количество пользователей, которые видели хотя бы одну публикацию профиля в течение суток
Profile Impressions	Показы профиля	Показатель того, сколько страница была показана пользователям в социальной сети

Окончание таблицы 2		
Термин на английском языке	Обозначение на русском языке	Пояснение
Profile Reach	Охват профиля	Количество пользователей, которые видели хотя бы одну публикацию профиля за определенный период
Profile Visits	Посещения профиля	Показатель того, сколько раз пользователи заходили на страницу в социальной сети за определенный период
Reached Audience	Охваченная аудитория	Количество пользователей, которые увидели контент профиля хотя бы один раз за определенный период
ROAS (Return on Ad Spend)	Используется английская аббревиатура/окупаемость инвестиций в рекламу	Показатель рентабельности рекламных вложений, который показывает, какой доход был получен от конкретного объявления или кампании
SMM (Social Media Marketing)	Используется английская аббревиатура	Комплекс действий, направленных на продвижение бренда, продукта или услуги с помощью социальных медиа-платформ
Social listening	Используется английская аббревиатура/социальное прослушивание	Автоматизированное отслеживание любых упоминаний, репостов, комментариев в режиме онлайн, что позволяет компаниям получить представление о том, как и что говорят о них пользователи в онлайн-среде
SOV (Share of voice)	Доля голоса	Показатель рекламной активности бренда или отдельного товара, означающий долю рекламного сообщения бренда в потоке рекламных сообщений

В представленной табл. 2 каждый термин приведен сначала на английском языке в его полной форме и в виде аббревиатуры (если есть), затем указан его русскоязычный эквивалент и краткое определение.

3. Обзор методов ИИ, используемых в анализе социальных сетей

Анализ данных в социальных сетях набирает все большую важность для компаний благодаря тому, что способствует лучшему пониманию аудитории и помогает сделать маркетинговые стратегии более конкурентоспособными. В последнее время методы анализа соцсетей зачастую реализуются с применением искусственного интеллекта, что помогает обрабатывать большие объемы данных, а социальные сети, в свою очередь, содержат огромный объем данных (в основном, текстовых). Ниже будут представлены основные методы ИИ, которые используются для анализа социальных сетей.

NLP, или обработка естественного языка – это метод искусственного интеллекта, который позволяет компьютерам обрабатывать письменную и устную речь и широко используется для анализа соцсетей. NLP извлекает нужную информацию из большого объема данных, например, из постов и описаний групп и пользователей.

Некоторые из решаемых задач в соцсетях этим методом – распознавание именованных сущностей, тематическое моделирование. NER или распознавание именован-

ных сущностей – это извлечение конкретной информации из текста. Например, данный метод был применен для распознавания имен в соцсетях, написанных на персидском языке [41]. Также было проведено исследование с использованием этого метода для автоматического мониторинга стихийных бедствий по публикациям в социальных сетях [42]. Topic Modeling, или тематическое моделирование, состоит в автоматическом выявлении тематики в больших наборах текстовых данных. Тематическое моделирование активно используется научным сообществом в анализе соцсетей, например, для изучения основных тем обсуждения на Reddit [43] и для анализа дискуссий о продовольственной безопасности в Twitter [44].

Классификация – это систематическая группировка наблюдений по категориям. В анализе соцсетей классификация применяется для анализа настроений, обнаружения спама и классификации изображений. Sentiment Analysis, или анализ настроений, представляет собой инструмент автоматизированного выявления в текстах эмоционально окрашенной лексики и эмоциональной оценки авторов. Зачастую эмоциональную оценку делят на положительную, отрицательную или нейтральную. Анализ настроений используется при анализе соцсетей, например, для классификации мнений с помощью различных классификаторов машинного обучения [45]. Анализ настроений используют еще и при глубоком анализе для текстов на английском и урду, которыми делятся в социальных сетях [46]. Обнаружение спама в соцсетях применяется зачастую для распознавания рекламных сообщений или комментариев ботов. Например, было проведено глубокое обучение на основе текста и метаданных для выявления спам-аккаунтов в социальной сети Twitter [47]. Был также проведен и систематический обзор литературы по обнаружению и классификации спам-контента [48]. Классификация изображений в соцсетях, в основном, используется для распознавания объектов на изображениях или определения к какой категории относятся фото или другие изображения. В научной сфере этот метод используется, например, для полуконтролируемой классификации изображений [49] и автоматизированного анализа контента для визуального представления политических деятелей и событий [50].

Кластеризация – это метод для группировки объектов наподобие классификации. От классификации он отличается тем, что при использовании данного метода не назначаются предварительные метки. Кластеризация используется для выявления неочевидных закономерностей при анализе данных. В соцсетях данный метод используется для кластеризации пользователей, обнаружения схожих сообществ и анализа контента. Кластеризация пользователей в данном случае – это группировка пользователей по общим, но неочевидным признакам. Данный метод рассматривается в следующих статьях: "Группировка пользователей Twitter по содержанию их твитов" [51], "Комплексная модель оценки намерений пользователей на основе искусственного интеллекта по отзывам в Интернете и социальных сетях" [52] и "Определение моделей передвижения групп посетителей города: применение методов искусственного интеллекта к данным социальных сетей" [53]. Обнаружение сообществ подразумевает выявление групп взаимосвязанных пользователей через связи между собой, например, наличие общих подписок на группы или пользователей.

Среди научных работ, рассмотревших данную тему более подробно, можно назвать следующие: "Соединение профилей пользователей социальных сетей с помощью кластеризации на основе близости" [54], "Глубокий алгоритм кластеризации графов на основе анализа социальных сетей" [55].

Анализ контента, что в соцсетях представляет собой группировку постов или комментариев по тематикам, часто применяется для анализа социальных сетей, например, в статье "Кластеризация данных социальных сетей для маркетинговых стратегий" [56].

Регрессия – это метод анализа данных, который позволяет предсказывать ценность неизвестных, но нужных данных с помощью других известных значений данных. В соцсетях регрессия используется для прогнозирования активности, определения трендов и оценки ROI. Прогнозирование активности в соцсетях определяется как совокупный показатель, основанный на известных показателях поста, например, на лайках, комментариях и репостах. Данный метод более подробно рассматривается в исследовании "Прогнозирование доходов от рекламы на сайтах с контентом, ориентированным на социальные сети: на пути к более эффективным и устойчивым публикациям в социальных сетях" [57]. Определение трендов в соцсетях это анализ доступных данных, например, постов и комментариев для прогнозирования изменений популярности хэштегов и различных тенденций. Примеры статей на данную тематику: "О способности социальных сетей анализировать угрожающие тенденции" [58], "Прогнозирование популярности вирусного контента в социальных сетях с помощью пространственно-временной каскадной системы сверточного обучения" [59]. Оценка ROI – это прогнозирование рекламных доходов относительно вложений и других факторов. В качестве примера использования этого показателя в научной деятельности можно привести работу "Искусственный интеллект в рекламе: достижения, проблемы и этические аспекты в области таргетинга, персонализации, создания контента и оптимизации рекламы" [60], "Анализ настроений в социальных сетях с помощью сверточной нейронной сети (CNN) и управляемого рекуррентного блока (GRU)" [61].

Generative AI, или генеративные модели, – это модели искусственного интеллекта, предназначенные для создания новых данных, которые могут быть представлены в виде текста, аудио, изображений или видео. Генеративные модели в соцсетях используются в основном для создания контента (генерация текста постов и изображений или видео к ним для публикаций). Существует множество статей на данную тему, например: "Влияние контента, созданного искусственным интеллектом, на привычки потребления контента пользователями китайских социальных сетей через приложение Xiaohongshu" [62], "Существование и творчество: медиаобразование в эпоху генераторов контента на основе искусственного интеллекта" [63].

Обучение с подкреплением – это метод машинного обучения, в ходе которого искусственный интеллект обучается, получая обратную связь. Обучение с подкреплением решает такие задачи в анализе соцсетей, как улучшение эффективности рекламы и адаптирование чат-ботов. Улучшение эффективности рекламы в соцсетях в данном случае – это автоматический выбор времени и места для публикации для достижения лучшего результата, что более подробно рассматривается в исследовании "Использование искусственного интеллекта и машинного обучения для расширения возможностей социальных сетей в сфере телемедицины и удаленного мониторинга пациентов" [64]. Адаптация чат-ботов заключается в лучшей обработке чат-ботом контекста общения с пользователями через обучение на основе обратной связи, что, например, рассматривается в статье "Социально ориентированный искусственный интеллект позволяет извлекать уроки из взаимодействия с людьми" [65].

Далее приведем примеры использования данных методов именно для маркетинга в соцсетях: 1) применение NLP: "NLP для анализа настроений в маркетинге в социальных сетях" [66], 2) применение классификации: "Улучшение маркетинга в социальных сетях с помощью классификации рекламы на основе машинного обучения" [67], 3) применение кластеризации: "Маркетинг в социальных сетях и покупательское поведение потребителей: сочетание SEM и подходов машинного обучения без учителя" [68], 4) применение регрессии: "Таргетированная реклама в социальных сетях с использованием гибридного метода сверточного обучения и эффективных весов признаков" [69], 5) применение генеративной модели: "Генеративный искусственный интеллект в маркетинге: применение, возможности, проблемы и программа исследований" [70], 6) применение обучения с подкреплением: "Маркетингу пора перейти на обучение с подкреплением" [71].

Алгоритмов и моделей использования ИИ для привлечения клиентов в социальных сетях обнаружено не было, поэтому было решено создать новую модель. В данной модели будут использоваться следующие методы искусственного интеллекта для анализа социальных сетей: классификация, регрессия и генеративная модель. Классификация будет использоваться для проведения анализа принадлежности групп к определенной категории. Также для анализа принадлежности постов группы будет применяться классификация, например является ли пост рекламным или нет. Регрессия будет использоваться для прогнозирования увеличения количества подписчиков с учетом активности группы, активности аудитории под постами, (лайки, репосты и т.д.) для прогнозирования увеличения подписчиков после публикации поста. Генеративная модель будет использоваться для создания новых постов на основе наиболее эффективных из тех, что были опубликованных ранее.

4. Проектирование системы привлечения клиента в социальных сетях

Реализуемая автоматизированная система привлечения клиентов на основе искусственного интеллекта, состоит из пяти модулей.

Первый модуль решает проблему определения эффективных целевых групп. Это могут быть целевые группы для строительства, доставки или любые другие. Следует подчеркнуть, что эффективными группами являются те, у которых быстро увеличивается количество подписчиков. Проблема в том, что из VK API можно получить только статические данные, а системе нужны данные в динамике. Поэтому данный модуль решает две задачи. Первая – определение целевых групп по ограниченным данным. Вторая – получение начальных данных в базу системы. Условно систему можно разделить на два этапа: холодный старт, когда идет работа только с VK API, и второй этап, когда идет работа с накопленными данными из базы данных.

Второй модуль определяет эффективные посты, то есть приносящие новых подписчиков в группах, которые были отобраны в первом модуле. Пост, в свою очередь, обладает следующими атрибутами: лайками, комментариями, репостами и просмотрами.

Несмотря на то, что информация об изменении количества подписчиков изначально недоступна, а в открытом доступе можно увидеть только конечное число подписчиков, основываясь на косвенных данных показателей поста, можно спрогнозировать эти данные.

Следующий модуль прогнозирует прирост подписчиков после публикации поста. На основе эффективного поста из прошлого модуля, который с большой вероятностью является "рекламным", собирается вся информация, необходимая нейронной сети для прогно-

зирования прироста подписчиков, чтобы впоследствии определять, насколько будет эффективным пост только по данным, которые можно получить в открытом доступе.

Четвертый модуль генерирует рекламные посты. Была разработана собственная модель нейронной сети, а также используются внешние модели – ChatGPT, DeepSeek, Llama и другие. Затем выбирается тот вариант, который лучше справляется с задачей.

Последний, пятый, модуль решает одну из самых важных задач. Для сгенерированного поста, который по прогнозам принесет много подписчиков, нужно найти рекламные группы, в которых при публикации будет добиваться наилучших результатов за меньшую стоимость.

Разрабатываемая система представляет собой интегрированное решение на основе современной микросервисной архитектуры, позволяющей разделить функциональность на независимые компоненты [72]. Такой подход обеспечивает высокую масштабируемость, отказоустойчивость и гибкость, что существенно упрощает разработку, сопровождение и адаптацию системы под изменяющиеся требования рынка.

Диаграмма начальных компонентов разрабатываемой системы представлена на рисунке.

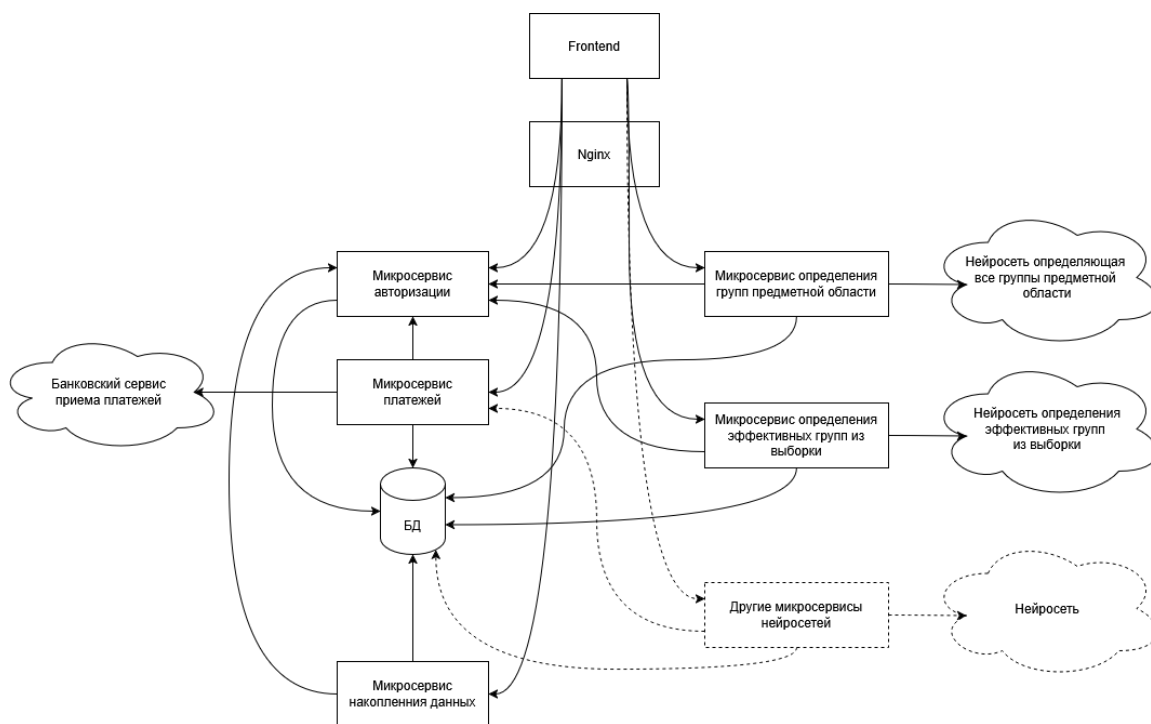


Диаграмма начальных компонентов разрабатываемой системы

Из рисунка видно, что система состоит из базы данных, микросервиса накопления данных, нейросетевых микросервисов, и вспомогательных микросервисов для платежей и авторизации. Сервис накопления и первичной обработки данных собирает и хранит информацию, необходимую для аналитики и работы других модулей системы. Этот сервис используется для сбора данных для первых двух модулей. Так же каждая из используемых нейронных сетей обслуживается отдельным микросервисом.

Так, на рисунке представлены два микросервиса с нейронными сетями, необходимые для первого модуля. Другие нейросети не представлены ввиду сильной загроможденности рисунка.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует некоторую асимметрию в развитии автоматизированных решений по привлечению клиентов в социальных сетях на глобальном и российском рынках. Несмотря на обилие зарубежных сервисов, использующих искусственный интеллект для анализа контента, отечественный сегмент остается недостаточно развитым. Ключевым ограничением как иностранных, так и российских платформ выступает их преимущественная ориентация на оптимизацию взаимодействия с существующей аудиторией при отсутствии алгоритмов, направленных на привлечение новых пользователей. Литературные источники, в свою очередь, говорят о широком распространении применения ИИ в сфере маркетинга, особенно в отрасли SMM. Учитывая такие тенденции, нейро-маркетинг развивается настолько стремительно, что, несмотря на все преимущества внедрения механизмов машинного обучения и функций нейросетей, уязвимыми остаются пользователи и их персональные данные, открытым остается и вопрос этичности и оригинальности использования ИИ в маркетинговых целях. Очевидно, что при создании современных решений необходимо сохранить баланс между эффективностью и этичностью.

Систематизация современных методов искусственного интеллекта, применяемых в анализе социальных сетей, выявила пробелы в алгоритмах работы привлечения новых пользователей. Несмотря на декларируемую значимость данной задачи в научных работах, большинство авторов не предлагают конкретных механизмов ее реализации, что только подчеркивает актуальность дальнейших изысканий и разработок в данном направлении [3].

В качестве ответа на выявленные пробелы предложена система привлечения клиентов, интегрирующая нейросетевые модели для прогнозирования и таргетирования потенциальных клиентов. Данное решение не только обладает потенциалом для повышения эффективности маркетинговых стратегий, но и актуализирует необходимость развития ИИ-инструментов для привлечения новых клиентов. Настоящая работа носит обзорный характер и формирует теоретико-методологическую базу для последующих исследований. Система, на момент составления статьи находящаяся на начальных этапах разработки, впоследствии послужит концептуальной основой для дальнейшей разработки алгоритмов работы системы автоматизированного SMM-маркетинга с целью расширения клиентской базы отечественных компаний при снижении операционных затрат. Перспективы исследования связаны с апробацией предложенной модели и ее адаптацией к особенностям современного цифрового рынка в социальных сетях.

Список источников

1. Number of worldwide social network users 2028 | Statista: [сайт]. URL: <https://www.statista.com/statistics/278414/number-of-worldwide-social-network-users/> (дата обращения: 10.02.2025).
2. Соколов А.В., Сычев И.А., Соколова О.Л., Волкова Д.Б., Селетков И.П., Яшичев Д.Л., Ясницкий Л.Н. Теоретические и практические аспекты построения рекомендательных моделей: типология, архитектура и направления проектирования // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика, 2024.

- Вып. 3(66). С. 64–77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ajuxpc> (дата обращения: 10.02.2025).
3. *Soumaya Lamrhari, Hamid El Ghazi, Mourad Oubrich, Abdellatif El Faker*. A social CRM an-alytic framework for improving customer retention, acquisition, and conversion, *Technological Forecasting and Social Change*. 2022. Vol. 174. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162521007095> (дата обращения: 10.02.2025).
 4. *Yassine Himeur, Abdullah Alsalemi, Ayman Al-Kababji, Faycal Bensaali, Abbes Amira, Christos Sardianos, George Dimitrakopoulos, Iraklis Varlamis*. A survey of recommender systems for energy efficiency in buildings: Principles, challenges and prospects, *Information Fusion*. 2021. Vol. 72. P. 1–21. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253521000178> (дата обращения: 10.02.2025).
 5. *Mian Muhammad Talha, Hikmat Ullah Khan, Saqib Iqbal, Mohammed Alghobiri, Tassawar Iqbal, Muhammad Fayyaz*. Deep learning in news recommender systems: A comprehensive survey, challenges and future trends, *Neurocomputing*. 2023. Vol. 562. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925231223010044> (дата обращения: 10.02.2025).
 6. *Semrush* URL: <https://www.semrush.com/> (дата обращения: 15.01.2025).
 7. *Sprout Social* URL: <https://sproutsocial.com/> (дата обращения: 15.01.2025).
 8. *Brand Analytics* URL: https://brandanalytics.ru/en_RU/ (дата обращения: 13.01.2025).
 9. *LiveDune* URL: <https://livedune.com/ru> (дата обращения: 21.01.2025).
 10. *TrendHERO* URL: <https://trendhero.io/ru/blog/livedune-analogues/> (дата обращения: 21.01.2025).
 11. *Metricool* URL: <https://metricool.com/> (дата обращения: 14.01.2025).
 12. *Loomly* URL: <https://www.loomly.com/> (дата обращения: 14.01.2025).
 13. *Hootsuite* URL: <https://www.hootsuite.com/> (дата обращения: 15.01.2025).
 14. *All Ears* URL: <https://en.allears.ai/> (дата обращения: 13.01.2025).
 15. *Outbrain* URL: <https://www.outbrain.com/> (дата обращения: 13.01.2025).
 16. *Buffer* URL: <https://buffer.com/> (дата обращения: 13.01.2025).
 17. *Simplified* URL: <https://simplified.com/> (дата обращения: 13.01.2025).
 18. *Ms. Anshu, Dr. Monika. Sharma* AI in SocialMedia Marketing: Opportunities and Challenges // *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2024. Vol. 10. P. 195–204. DOI: 10.32628/cseit24105104 EDN: XTOMIB19. Sah V., Akki S.N.R., Shastry H.K. Artificial intelligence in social media marketing. *AIP Conf. Proc.* 20 December 2024; 3217 (1): 020015.
 20. *Шевердин А.А.* Автоматизация маркетинговых процессов с помощью искусственного интеллекта: Преимущества и вызовы // *Вестник науки*. 2024. №1(70). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-marketingovyh-protses-sov-s-pomoschyu-iskusstvennogo-intellekta-preimuschestva-i-vyzovy> (дата обращения: 17.01.2025). EDN: CGSJPV.
 21. *Islam M.A., Fakir S.I., Masud S.B., Hossen M.D., Islam M.T., Siddiky M.R.* Artificial intelligence in digital marketing automation: Enhancing personalization, predictive analytics, and ethical integration. *Edelweiss Applied Science and Technology*. 2024. 8(6). P. 6498–6516.
 22. *Durmus Senyapar H.N.* Artificial Intelligence in Marketing Communication: A Comprehensive Exploration of the Integration and Impact of AI. *Technium Social Sciences Journal*, 2024. 55(1). P. 64–81. DOI: 10.47577/tssj.v55i1.10651 EDN: VFWPTG.

23. *Odejide O., Edunjobi T.* Ai in project management: exploring theoretical models for decision-making and risk management // *Engineering Science & Technology Journal*. 2024. Vol. 5. P. 1072–1085. DOI: 10.51594/estj.v5i3.959 EDN: TIXTZG
24. *Babatunde S., Odejide O., Edunjobi T., Ogundipe D.* The role of ai in marketing personalization: a theoretical exploration of consumer engagement strategies // *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*. 2024. Vol. 6. P. 936–949. DOI:10.51594/ijmer.v6i3.964 EDN: LUETQI.
25. *Ghosh S., Ness S., Salunkhe Sh.* The Role of AI Enabled Chatbots in Omnichannel Customer Service // *Journal of Engineering Research and Reports*. 2024. Vol. 26. P. 327–345. DOI: 10.9734/jerr/2024/v26i61184 EDN: AYNEO.I.
26. *Rani Y. A., Balaram A., Sirisha M. R., Nabi S. A., Renuka P., Kiran A.* AI Enhanced Customer Service Chatbot // *International Conference on Science Technology Engineering and Management (ICSTEM)*. 2024. P. 1–5.
27. *Ojha A.K.* Navigating the Algorithmic Marketplace: How AI is Changing Consumer Psychology and Brand Loyalty // *Journal of Psychology and Political Science*. 2023. Vol. 3. P. 25–29. DOI: 10.55529/jpps.32.25.29 EDN: DTLRSP.
28. *Schönberger M.* Artificial intelligence for small and medium-sized enterprises: Identifying key applications and challenges // *Journal of Business Management*. 2023. Vol. 21. P. 89–112.
29. *Abhulimen A.O., Ejike O.G.* Ethical considerations in AI use for SMEs and supply chains: Current challenges and future directions // *International Journal of Applied Research in Social Sciences*. 2024. Vol. 6. P. 1653–1679. DOI: 10.51594/ijarss.v6i8.1391 EDN: MKNTUT.
30. *Shan L.* Computing advertising intelligent computing and push based on artificial intelligence in the big data era // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e37252 EDN: VCSMFN.
31. *Okeleke P.A., Ajiga D., Folorunsho S.O., Ezeigweneme C.* Predictive analytics for market trends using AI: A study in consumer behavior // *International Journal of Engineering Research Updates*. 2024. № 07(01). P. 36–49.
32. *Priyanga, G.* The effects of artificial intelligence on digital marketing. *ShodhKosh Journal of Visual and Performing Arts*. 2023. 4(1SE). DOI: 10.29121/shodhkosh.v4.i1se.2023.431 EDN: RSBVU.
33. *Rane N., Paramesha M., Choudhary S., Rane J.* Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning for Advanced Business Strategies: a Review // *Partners Universal International Innovation Journal*. 2024. Vol. 2. P. 147–171.
34. *Zhang Yixuan.* Utilizing machine learning algorithms for consumer behaviour analysis // *Proceedings of the fourth International Conference on Signal Processing and Machine Learning*. 2024. P. 213–219.
35. *Krajčovič P.* The Impact of Artificial Intelligence on Social Media // *Proceedings of the 11th European Conference on Social Media - ECSM*. 2024. Vol. 11. P. 103–110.
36. *Swati Sharma, Koneti Chaitanya, Alaulddin B. Jawad, Irudhayamary Premkumar, Juhi Vinod Mehta, Deepak Hajoary.* Ethical Considerations in AI-Based Marketing: Balancing Profit and Consumer Trust // *Journal of Propulsion Technology*. 2023. Vol. 44. P. 1301–1309. DOI: 10.52783/tjjpt.v44.i3.474 EDN: OZSGCF.
37. *Quinelato P.D.* Consumer manipulation through behavioral advertising: regulatory proposal by the Data Services Act // *Brazilian Journal of Law, Technology and Innovation*. 2024. Vol. 2. P. 1–24. DOI: 10.59224/bjlti.v2i1.1-24 EDN: IAQQRI.
38. *Marcello Ienca* On Artificial Intelligence and Manipulation // *Topoi*. 2023. Vol. 42. P. 833–842. DOI: 10.1007/s11245-023-09940-3 EDN: MNQQUZ.

39. *Atkinson P., Barker R.* AI and the social construction of creativity // *Convergence: The Inter-national Journal of Research into New Media Technologies*. 2023. Vol. 29. P. 1054–1069.
40. *Eapen T.T., Finkenshtadt D.J., Folk J., Venkataswamy L.* How Generative AI Can Augment Human Creativity // *Harvard Business Review*. 2023. Vol. 101. P. 56–64.
41. *Forouzandeh A., Feizi-Derakhshi M.-R., Gholami-Dastgerdi P.* Persian Named Entity Recognition by Gray Wolf Optimization Algorithm, *Scientific Programming*, 2022. P. 12. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.1155/2022/6368709 EDN: LIBXYG.
42. *F. K. Sufi, I. Khalil.* Automated Disaster Monitoring From Social Media Posts Using AI-Based Location Intelligence and Sentiment Analysis, *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. Vol. 11, № 4. P. 4614–4624. Aug. 2024. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9737676/> (дата обращения: 10.02.2025).
43. *Zhao Y.* Exploring Redditors' Topics with Natural Language Processing, *Polytechnic University of Valencia Congress, CARMA 2022*. № 4. P. 32. URL: <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CARMA/CARMA2022/paper/view/15022> (дата обращения: 10.02.2025).
44. *Molenaar A, Lukose D, Brennan L, Jenkins EL, McCaffrey TA.* Using Natural Language Processing to Explore Social Media Opinions on Food Security: Sentiment Analysis and Topic Modeling Study, *J Med Internet Res*, 2024. P. 26. URL: <https://www.jmir.org/2024/1/e47826> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.2196/47826 EDN: YACOPP.
45. *Ito R.A., Shaikh Y., Tanwani S.* Classifying Opinions and Sentiments on Social Networking Sites using Machine Learning Classifiers, *Ijaset*, 2024. P. 13. URL: <https://www.ijaset.com/best-journal/classifying-opinions-and-sentiments-on-social-networking-sites-using-machine-learning-classifiers> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.22214/ijaset.2024.58664 EDN: YUTCRS.
46. *Khan L., Amjad A., Afaq K.M., Chang H.-T.* Deep Sentiment Analysis Using CNN-LSTM Architecture of English and Roman Urdu Text Shared in Social Media, *Applied Sciences*. 2022. № 5. P. 12. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/5/2694> (дата обращения: 10.02.2025).
47. *Alhassun A.S., Rassam M.A.* A Combined Text-Based and Metadata-Based Deep-Learning Framework for the Detection of Spam Accounts on the Social Media Platform Twitter Processes. 2022. Vol. 10(3). P. 439. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/3/439> (дата обращения: 10.02.2025).
48. *Kaddoura S., Chandrasekaran G., Elena Popescu D., Duraisamy J. H.* A systematic literature review on spam content detection and classification, *PeerJ Computer Science*. 2022. Vol. 8. P. 830. URL: <https://peerj.com/articles/cs-830/> (дата обращения: 10.02.2025).
49. *Zhang J., Yang J., Yu J., Fan J.* Semisupervised image classification by mutual learning of multiple self-supervised models, *Int J Intell Syst*. 2022. Vol. 37. P. 3117–3141. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.1002/int.22814 EDN: NNAWGC.
50. *Joo J., Steinert-Threlkeld Z. C.* Image as Data: Automated Content Analysis for Visual Presentations of Political Actors and Events, *Computational Communication Research*, 2022. URL: <https://www.aup-online.com/content/journals/10.5117/CCR2022.1.001.JOO> (дата обращения: 10.02.2025).
51. *Naznin F., Kakoti Mahanta A.* Grouping of Twitter users according to contents of their tweets, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2023. Vol. 31, № 2. P. 876–884. Aug. 2023. ISSN 2502-4760. URL:

- <https://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJEECS/article/view/30731> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.11591/ijeecs.v31.i2.pp876-884 EDN: YGYCUA.
52. *Sharma A., Shafiq M.O.* A Comprehensive Artificial Intelligence Based User Intention Assessment Model from Online Reviews and Social Media, *Applied Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 36(1). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.1080/08839514.2021.2014193 EDN: OFVRFQ.
53. *Orama J. A., Huertas A., Borràs J., Moreno A., Anton Clavé S.* Identification of Mobility Patterns of Clusters of City Visitors: An Application of Artificial Intelligence Techniques to Social Media Data, *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(12). P. 5834. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/12/5834> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.3390/app12125834 EDN: NQGGXU.
54. *C.R., Kodabagi M.M.* Connecting user profiles social networks using proximity-based clustering // *Malaysian Journal of Computer Science*. 2022. P. 1–15. URL: <https://ejournal.um.edu.my/index.php/MJCS/article/view/40401> (дата обращения: 10.02.2025).
55. *Escobedo F., Garay Canales H.B., Aguirre Reyes, E.M., Lamadrid Vela C.A., Montoya Perez O.N., Caballero Jimenez G.E.* Dep Attentional Implanted Graph Clustering Algorithm for the Visualization and Analysis of Social Networks // *Journal of Internet Services and Information Security*. 2024. Vol. 14, Issue 1. P. 153–164. URL: <https://jisis.org/article/2024.II.010/71006/> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.58346/jisis.2024.i1.010 EDN: JQSFC.
56. *Chebil M., Jallouli R., Bach Tobji M.A.* Clustering Social Media Data for Marketing Strategies: Literature Review Using Topic Modelling Techniques // *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*. 2024. Vol. 12(1). P. 510–537. URL: <https://jtde.telsoc.org/index.php/jtde/article/view/889> (дата обращения: 10.02.2025).
57. *Li S.-C., Chen Y.-C., Chen Y.-W., Huang Y.* Predicting Advertisement Revenue of Social-Media-Driven Content Websites: Toward More Efficient and Sustainable Social Media Posting, *Sustainability*. 2022. Vol. 14(7). P. 4225. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/7/4225> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.3390/su14074225 EDN: YFHLUX.
58. *J. R. Sánchez et al.* On the Power of Social Networks to Analyze Threatening Trends, in *IEEE Internet Computing*. 2022. Vol. 26. 1 March–April, № 2. P. 19–26. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9721598> (дата обращения: 10.02.2025).
59. *Xu Z., Qian M.* Predicting Popularity of Viral Content in Social Media through a Temporal-Spatial Cascade Convolutional Learning Framework, *Mathematics*. 2023. 11(14):3059. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/14/3059> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.3390/math11143059 EDN: SXZZHY.
60. *Gao B., Wang Y., Xie H., Hu Y., Hu Y.* Artificial Intelligence in Advertising: Advancements, Challenges, and Ethical Considerations in Targeting, Personalization, Content Creation, and Ad Optimization, *Sage Open*. 2023. Vol. 13(4). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.1177/21582440231210759 EDN: WHNSNE.
61. *Adam A., Setiawan E.* Social Media Sentiment Analysis using Convolutional Neural Network (CNN) dan Gated Recurrent Unit (GRU) // *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*. 2023. Vol. 9. P. 119–131. 62. URL: https://www.researchgate.net/publication/370262265_Social_Media_Sentiment_Analysis_using_Convolutional_Neural_Network_CNN_dan_Gated_Recurrent_Unit_GRU (дата обращения: 10.02.2025).
62. *Zhe C., Srijinda P.* The impact of AI-generated content on content consumption habits of Chinese social media users through Xiaohongshu application // *Edelweiss Applied Science and Technology*. 2024. Vol. 8(6). P. 1504–1516, URL: [137](https://learning-
</div>
<div data-bbox=)

- gate.com/index.php/2576-8484/article/view/2268 (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.55214/25768484.v8i6.2268 EDN: RHMMOK.
63. *Bender S.M.* Coexistence and creativity: screen media education in the age of artificial intelligence content generators, *Media Practice and Education*. 2023. Vol. 24(4). P. 351–366. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/?scroll=top&needAccess=true> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.1080/25741136.2023.2204203 EDN: PBVLRC.
64. *Leung R.* Using AI-ML to Augment the Capabilities of Social Media for Telehealth and Remote Patient Monitoring, *Healthcare*. 2023. Vol. 11(12). P. 1704. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9032/11/12/1704> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.3390/healthcare11121704 EDN: DFEMXY.
65. *Krishna R., Lee D., Fei-Fei L., Bernstein M.S.* Socially situated artificial intelligence enables learning from human interaction // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 119 (39), (2022). URL: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2115730119> (дата обращения: 10.02.2025).
66. *Pandey K.K., Thorat M., Joshi A., D, S., Hussein A., Alazzam M.B.* Natural Language Processing for Sentiment Analysis in Social Media Marketing. 2023 // third International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE), Greater Noida, India. 2023. P. 326–330. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10182590> (дата обращения: 10.02.2025).
67. *Reddy r.D.V.K., Likhitha N., Navya Sri M.* Enhancing Social Media Marketing with Machine Learning Based Ads Classification, *IJSREM*. 2024. P. 9. URL: <https://ijsrem.com/download/enhancing-social-media-marketing-with-machine-learning-based-ads-classification/> (дата обращения: 10.02.2025).
68. *Ebrahimi P., Basirat M., Yousefi A., Nekmahmud M., Gholampour A., Fekete-Farkas M.* Social Networks Marketing and Consumer Purchase Behavior: The Combination of SEM and Unsupervised Machine Learning Approaches, *Big Data and Cognitive Computing*. 2022. Vol. 6(2). P. 35. URL: <https://www.mdpi.com/2504-2289/6/2/35> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.3390/bdcc6020035 EDN: IZWBOR.
69. *Jokandan S.M.E., Bayat P., Farrokhbakht Foumani M.* Targeted Advertising in Social Media Platforms Using Hybrid Convolutional Learning Method besides Efficient Feature Weights // *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022. P. 17. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/6159650> (дата обращения: 10.02.2025).
70. *Kshetri N., Dwivedi Y.K., Davenport T.H., Panteli N.* Generative artificial intelligence in marketing: Applications, opportunities, challenges, and research agenda // *International Journal of Information Management*. 2024. Vol. 75.
71. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026840122300097X> (дата обращения: 10.02.2025).
71. *Murphy L., Perales F., Gopal A., Gyurdieva Y., Gueorguiev V., Shandilya P.* Time for marketing to embrace reinforcement learning // *Journal of Digital & Social Media Marketing*. 2022. Vol. 10, № 2. URL: <https://hstalks.com/article/7309/time-for-marketing-to-embrace-reinforcement-learn/?business> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.69554/moуx6262 EDN: HGAHHF.
72. *Шитько А.М.* Проектирование микросервисной архитектуры программного обеспечения / Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2017. № 9(200). С. 122–125. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-mikroservisnoy-arhitektury-programmnogo-obespecheniya> (дата обращения: 07.02.2025). EDN: ZWZZPR.

References

1. Number of worldwide social network users 2028 | Statista: [сайт]. URL: <https://www.statista.com/statistics/278414/number-of-worldwide-social-network-users/> (Accessed: 10 February 2025).
2. A.V. Sokolov, I.A. Sychev, O.L. Sokolova, D.B. Volkova, I.P. Seletkov, D.L. Yashichev, L.N. Yasnitsky (2024), "Theoretical and practical aspects of building recommendation models: typology, architecture and design directions", *Vestnik of Perm University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, vol. 66, no. 3, pp. 64-77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ajuxpc> (Accessed: 10 February 2025).
3. Soumaya Lamrhari, Hamid El Ghazi, Mourad Oubrich, Abdellatif El Faker (2022), "A social CRM analytic framework for improving customer retention, acquisition, and conversion", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 174, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162521007095> (Accessed: 10 February 2025).
4. Yassine Himeur, Abdullah Alsalemi, Ayman Al-Kababji, Faycal Bensaali, Abbes Amira, Christos Sardianos, George Dimitrakopoulos, Iraklis Varlamis (2021), "A survey of recommender systems for energy efficiency in buildings: Principles, challenges and prospects", *Information Fusion*, vol. 72, pp. 1-21. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253521000178> (Accessed: 10 February 2025).
5. Mian Muhammad Talha, Hikmat Ullah Khan, Saqib Iqbal, Mohammed Alghobiri, Tassawar Iqbal, Muhammad Fayyaz(2023), "Deep learning in news recommender systems: A comprehensive survey, challenges and future trends", *Neurocomputing*, vol. 562, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925231223010044> (Accessed: 10 February 2025).
6. Semrush URL: <https://www.semrush.com/> (Accessed: 15 January 2025).
7. Sprout Social URL: <https://sproutsocial.com/> (Accessed: 15 January 2025).
8. Brand Analytics URL: https://brandanalytics.ru/en_RU/ (Accessed: 13 January 2025).
9. LiveDune URL: <https://livedune.com/ru> (Accessed: 21 January 2025).
10. TrendHERO URL: <https://trendhero.io/ru/blog/livedune-analogues/> (Accessed: 21 January 2025).
11. Metricool URL: <https://metricool.com/> (Accessed: 14 January 2025).
12. Loomly URL: <https://www.loomly.com/> (Accessed: 14 January 2025).
13. Hootsuite URL: <https://www.hootsuite.com/> (Accessed: 15 January 2025).
14. All Ears URL: <https://en.allears.ai/> (Accessed: 13 January 2025).
15. Outbrain URL: <https://www.outbrain.com/> (Accessed: 13 January 2025).
16. Buffer URL: <https://buffer.com/> (Accessed: 13 January 2025).
17. Simplified URL: <https://simplified.com/> (Accessed: 13 January 2025).
18. Ms. Anshu, Dr. M. Sharma (2024), "AI in SocialMedia Marketing: Opportunities and Challenges", *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 10, issue 5. pp. 195-204.
19. Sah, V., Akki, S., Shastry, H. (2024), "Artificial intelligence in social media marketing", *AIP Conf. Proc.*, 20 December 2024; 3217 (1): 020015.
20. Sheverdin, A. A. (2024), "AUTOMATION OF MARKETING PROCESSES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE: ADVANTAGES AND CHALLENGES", *Bulletin of Science*, № 1(70). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-marketingovyh-protsessov-s-pomoschyu-iskusstvennogo-intellekta-preimushchestva-i-vyzovy> (Accessed: 17 January 2025).

21. Islam, M. A., Fakir, S. I., Masud, S. B., Hossen, M. D., Islam, M. T., Siddiky, M. R. (2024), "Artificial intelligence in digital marketing automation: Enhancing personalization, predictive analytics, and ethical integration", *Edelweiss Applied Science and Technology*, 8(6), pp. 6498–6516.
22. Senyapar, D. (2024), "Artificial Intelligence in Marketing Communication: A Comprehensive Exploration of the Integration and Impact of AI", *Technium Social Sciences Journal*, 55(1), pp. 64–81.
23. Odejide, O.A., Edunjobi, T.E. (2024), "AI IN PROJECT MANAGEMENT: EXPLORING THEORETICAL MODELS FOR DECISION-MAKING AND RISK MANAGEMENT", *Engineering Science & Technology Journal*, vol. 5, issue 3. pp. 1072-1085.
24. Babatunde, S., Odejide, O., Edunjobi, T., Ogundipe, D. (2024), "THE ROLE OF AI IN MARKETING PERSONALIZATION: A THEORETICAL EXPLORATION OF CONSUMER ENGAGEMENT STRATEGIES", *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, vol. 6. pp. 936-949.
25. Ghosh, S., Ness, S., Salunkhe, Sh. (2024), "The Role of AI Enabled Chatbots in Omnichannel Customer Service", *Journal of Engineering Research and Reports*, vol.26. pp. 327-345.
26. Rani, Y.A., Balaram, A., Sirisha, M.R., Nabi, S.A., Renuka, P., Kiran, A. (2024), "AI Enhanced Customer Service Chatbot", *International Conference on Science Technology Engineering and Management (ICSTEM)*, pp. 1-5.
27. Ojha A.K. (2023), "Navigating the Algorithmic Marketplace: How AI is Changing Consumer Psychology and Brand Loyalty", *Journal of Psychology and Political Science*, vol. 3. pp. 25-29.
28. Schönberger, M. (2023), "Artificial intelligence for small and medium-sized enterprises: Identifying key applications and challenges", *Journal of Business Management*, vol. 21, pp. 89-112.
29. Abbulimen, A.O., Ejike, O.G. (2024), "Ethical considerations in AI use for SMEs and supply chains: Current challenges and future directions", *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, vol.6, pp. 1653-1679.
30. Shan, L. (2024), "Computing advertising intelligent computing and push based on artificial intelligence in the big data era", *Heliyon*, 10(17), p.e37252. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37252>.
31. Azuka, P., Ajiga, N.D., Olaoluwa, S. and Ezeigweneme, N.C. (2024), "Predictive Analytics for Market Trends Using AI: a Study in Consumer Behavior", *International Journal of Engineering Research Updates*, [online] 7(1), pp.036–049. doi:<https://doi.org/10.53430/ijeru.2024.7.1.0032>.
32. Priyanga, G. (2023), "The effects of artificial intelligence on digital marketing", *ShodhKosh Journal of Visual and Performing Arts*, 4(1SE). doi:<https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v4.i1se.2023.431>.
33. Rane, N., Mallikarjuna Paramesha, Choudhary, S. and Rane, J. (2024), "Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning for Advanced Business Strategies: a Review", *Social Science Research Network*. [online] doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.4835661>.
34. Yixuan, Z. (2024), "Utilizing machine learning algorithms for consumer behaviour analysis", *Applied and computational engineering*, 49(1), pp.213–219. doi:<https://doi.org/10.54254/2755-2721/49/20241186>.
35. Krajčovič, P. (2024), "The Impact of Artificial Intelligence on Social Media", *European Conference on Social Media*, [online] 11(1), pp.103–110. doi:<https://doi.org/10.34190/ecsm.11.1.2237>.

36. Sharma, S., Chaitanya, K., Jawad, A.B., Premkumar, I., Mehta, J.V., Hajoary, D. (2023), "Ethical Considerations in AI-Based Marketing: Balancing Profit and Consumer Trust. Tuijin Jishu", *Journal of Propulsion Technology*, 44(3), pp.1301–1309. doi:<https://doi.org/10.52783/tjpt.v44.i3.474>.
37. Pietra Daneluzzi Quinelato (2024), "Consumer manipulation through behavioral advertising", 2(1), pp.1–24. doi:<https://doi.org/10.59224/bjlti.v2i1.1-24>.
38. Ienca, M. (2023), "On Artificial Intelligence and Manipulation", *On Artificial Intelligence and Manipulation*, 42. doi:<https://doi.org/10.1007/s11245-023-09940-3>.
39. Dr Paul Atkinson and Dr Richie Barker (2023), "AI and the social construction of creativity", *Convergence: The International Journal of Research into New Media Technologies*, 29(4). doi:<https://doi.org/10.1177/13548565231187730>.
40. Eapen, T., Finkenstadt, D.J., Folk, J. and Lokesh Venkataswamy (2024), "How Generative AI Can Augment Human Creativity", *SSRN Electronic Journal*. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.4759930>.
41. Forouzandeh, A., Feizi-Derakhshi, M.-R., Gholami-Dastgerdi, P. (2022), "Persian Named Entity Recognition by Gray Wolf Optimization Algorithm", *Scientific Programming*, pp. 12. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/6368709> (Accessed: 10 February 2025).
42. F. K. Sufi and I. Khalil (2024), "Automated Disaster Monitoring From Social Media Posts Using AI-Based Location Intelligence and Sentiment Analysis", *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 4614-4624. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9737676/> (Accessed: 10 February 2025).
43. Zhao, Y. (2022), "Exploring Redditors' Topics with Natural Language Processing", *Polytechnic University of Valencia Congress, CARMA*, no. 4, pp 32. URL: <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CARMA/CARMA2022/paper/view/15022> (Accessed: 10 February 2025).
44. Molenaar, A, Lukose, D, Brennan, L, Jenkins, EL, McCaffrey, TA, (2024), "Using Natural Language Processing to Explore Social Media Opinions on Food Security: Sentiment Analysis and Topic Modeling Study", *J Med Internet Res*, pp. 26. URL: <https://www.jmir.org/2024/1/e47826> (Accessed: 10 February 2025).
45. Itoo, R. A., Shaikh, Y., Tanwani, S., (2024), "Classifying Opinions and Sentiments on Social Networking Sites using Machine Learning Classifiers", *Ijrasnet*, pp. 13. URL: <https://www.ijrasnet.com/best-journal/classifying-opinions-and-sentiments-on-social-networking-sites-using-machine-learning-classifiers> (Accessed: 10 February 2025).
46. Khan, L., Amjad, A., Afaq, K. M., Chang, H.-T., (2022), "Deep Sentiment Analysis Using CNN-LSTM Architecture of English and Roman Urdu Text Shared in Social Media", *Applied Sciences*, no. 5, pp. 12. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/5/2694> (Accessed: 10 February 2025).
47. Alhassun, A. S., Rassam, M. A., A (2022), "Combined Text-Based and Metadata-Based Deep-Learning Framework for the Detection of Spam Accounts on the Social Media Platform Twitter", *Processes*, vol. 10(3), pp. 439. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/3/439> (Accessed: 10 February 2025).
48. Kaddoura, S., Chandrasekaran, G., Elena Popescu, D., Duraisamy, J. H. (2022), "A systematic literature review on spam content detection and classification", *PeerJ Computer Science*, 8:e830, URL: <https://peerj.com/articles/cs-830/> (Accessed: 10 February 2025).
49. Zhang, J., Yang, J., Yu, J., Fan, J. (2022), "Semisupervised image classification by mutual learning of multiple self-supervised models", *Int J Intell Syst*, vol. 37, pp. 3117-3141. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/int.22814> (Accessed: 10 February 2025).

50. Joo, J. and Steinert-Threlkeld, Z. C. (2022), "Image as Data: Automated Content Analysis for Visual Presentations of Political Actors and Events", *Computational Communication Research*, URL: <https://www.aup-online.com/content/journals/10.5117/CCR2022.1.001.JOO> (Accessed: 10 February 2025).
51. NAZNIN, F., KAKOTI MAHANTA, A.(2023), "Grouping of Twitter users according to contents of their tweets", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 31, no. 2, pp. 876-884. ISSN 2502-4760. URL: <https://ijeecs.aescore.com/index.php/IJEECS/article/view/30731> (Accessed: 10 February 2025).
52. Sharma, A., & Shafiq, M. O. (2022), "A Comprehensive Artificial Intelligence Based User Intention Assessment Model from Online Reviews and Social Media", *Applied Artificial Intelligence*, vol. 36(1). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/08839514.2021.2014193> (Accessed: 10 February 2025).
53. Orama, J. A., Huertas, A., Borràs, J., Moreno, A., & Anton Clavé, S. (2022), "Identification of Mobility Patterns of Clusters of City Visitors: An Application of Artificial Intelligence Techniques to Social Media Data", *Applied Sciences*, vol. 12(12), p. 5834. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/12/5834> (Accessed: 10 February 2025).
54. C, R., & Kodabagi, M. M. (2022), "CONNECTING USER PROFILES OF SOCIAL NETWORKS USING PROXIMITY-BASED CLUSTERING", *Malaysian Journal of Computer Science*, pp. 1–15. URL: <https://ejournal.um.edu.my/index.php/MJCS/article/view/40401> (Accessed: 10 February 2025).
55. Escobedo, F., Garay Canales, H. B., Aguirre Reyes, E. M., Lamadrid Vela, C. A., Montoya Perez, O. N., Caballero Jimenez, G. E. (2024), "Deep Attentional Implanted Graph Clustering Algorithm for the Visualization and Analysis of Social Networks", *Journal of Internet Services and Information Security*, vol. 14, no. 1, pp. 153-164. URL: <https://jisis.org/article/2024.II.010/71006/> (Accessed: 10 February 2025).
56. Chebil, M., Jallouli, R., & Bach Tobji, M. A. (2024), "Clustering Social Media Data for Marketing Strategies: Literature Review Using Topic Modelling Techniques", *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*, vol. 12(1), pp. 510–537. URL: <https://jtde.telsoc.org/index.php/jtde/article/view/889> (Accessed: 10 February 2025).
57. Li, S.-C., Chen, Y.-C., Chen, Y.-W., Huang, Y. (2022), "Predicting Advertisement Revenue of Social-Media-Driven Content Websites: Toward More Efficient and Sustainable Social Media Posting", *Sustainability*, vol. 14(7), p. 4225. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/7/4225> (Accessed: 10 February 2025).
58. J. R. Sánchez et al. (2022), "On the Power of Social Networks to Analyze Threatening Trends", in *IEEE Internet Computing*, 2022, 1 March-April, vol. 26, no. 2, pp. 19-26, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9721598> (Accessed: 10 February 2025).
59. Xu, Z., Qian, M. (2023), "Predicting Popularity of Viral Content in Social Media through a Temporal-Spatial Cascade Convolutional Learning Framework", *Mathematics*, vol. 11(14), pp.3059. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/14/3059> (Accessed: 10 February 2025).
60. Gao, B., Wang, Y., Xie, H., Hu, Y., & Hu, Y. (2023), "Artificial Intelligence in Advertising: Advancements, Challenges, and Ethical Considerations in Targeting, Personalization, Content Creation, and Ad Optimization", *Sage Open*, vol. 13(4). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/21582440231210759> (Accessed: 10 February 2025).
61. Adam, A. & Setiawan, E. (2023), "Social Media Sentiment Analysis using Convolutional Neural Network (CNN) dan Gated Recurrent Unit (GRU) ", *Journal Ilmiah*

- Teknik Elektro Komputer dan Informatika*, vol. 9, pp. 119-131. URL: https://www.researchgate.net/publication/370262265_Social_Media_Sentiment_Analysis_using_Convolutional_Neural_Network_CNN_dan_Gated_Recurrent_Unit_GRU (Accessed: 10 February 2025).
62. Zhe, C., & Srijinda, P. (2024), "The impact of AI-generated content on content consumption habits of Chinese social media users through Xiaohongshu application", *Edelweiss Applied Science and Technology*, vol. 8(6), pp. 1504–1516. URL: <https://learning-gate.com/index.php/2576-8484/article/view/2268> (Accessed: 10 February 2025).
63. Bender, S. M. (2023), "Coexistence and creativity: screen media education in the age of artificial intelligence content generators", *Media Practice and Education*, vol. 24(4), pp. 351–366. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/25741136.2025.2204203?scroll=top&needAccess=true> (Accessed: 10 February 2025).
64. Leung, R. (2023), "Using AI–ML to Augment the Capabilities of Social Media for Telehealth and Remote Patient Monitoring", *Healthcare*, vol. 11(12), pp. 1704. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9032/11/12/1704> (Accessed: 10 February 2025).
65. Krishna, R., Lee, D., Fei-Fei, L., & Bernstein, M.S. (2022), "Socially situated artificial intelligence enables learning from human interaction", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 119 (39) e2115730119, URL: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2115730119> (Accessed: 10 February 2025).
66. Pandey, K. K., Thorat, M., Joshi, A., D, S., Hussein, A. and Alazzam, M. B. (2023), "Natural Language Processing for Sentiment Analysis in Social Media Marketing," *2023 3rd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, Greater Noida, India, pp. 326-330. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10182590> (Accessed: 10 February 2025).
67. Reddy, r.D.V.K., Likhitha, N., Navya Sri, M. (2024), "Enhancing Social Media Marketing with Machine Learning Based Ads Classification", *IJSREM*, p. 9. URL: <https://ijsrem.com/download/enhancing-social-media-marketing-with-machine-learning-based-ads-classification/> (Accessed: 10 February 2025).
68. Ebrahimi, P., Basirat, M., Yousefi, A., Nekmahmud, M., Gholampour, A., Fekete-Farkas, M. (2022), "Social Networks Marketing and Consumer Purchase Behavior: The Combination of SEM and Unsupervised Machine Learning Approaches", *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 6(2), p. 35. URL: <https://www.mdpi.com/2504-2289/6/2/35> (Accessed: 10 February 2025).
69. Jokandan, S. M. E., Bayat, P., Farrokhbakht Foumani, M. (2022), "Targeted Advertising in Social Media Platforms Using Hybrid Convolutional Learning Method besides Efficient Feature Weights", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, p. 17. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/6159650> (Accessed: 10 February 2025).
70. Kshetri, N., Dwivedi, Y. K., Davenport, T. H., Panteli, N. (2024), "Generative artificial intelligence in marketing: Applications, opportunities, challenges, and research agenda", *International Journal of Information Management*, vol. 75. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026840122300097X> (Accessed: 10 February 2025).
71. Murphy, L., Perales, F., Gopal, A., Gyurdieva, Y., Gueorguiev, V. and Shandilya, P. (2022), "Time for marketing to embrace reinforcement learning", *Journal of Digital & Social Media Marketing*, vol. 10, no. 2. URL: <https://hstalks.com/article/7309/time-for-marketing-to-embrace-reinforcement-learn/?business> (Accessed: 10 February 2025).

72. Shitko A.M. (2017), "Designing microservice architecture of software", *Proceedings of BSTU. Series 3: Physical and Mathematical Sciences and Informatics*, no. 9(200), pp. 122-125. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-mikroser-visnoy-arhitektury-programmnogo-obespecheniya> (Accessed: 10 February 2025).

Информация об авторах:

А. В. Соколов – аспирант АНО ВО "Университет Иннополис" (420500, Россия, г. Иннополис, ул. Университетская, 1), ассистент, Физико-математический институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15);

А. С. Шуткин – магистрант 2-го года обучения кафедры прикладной математики и информатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15);

Е. М. Епифанова – студентка 5 курса по специальности Перевод и переводоведение, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15);

А. А. Попкова – студентка 5 курса по специальности Перевод и переводоведение, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15);

А. Л. Бекларян – кандидат технических наук, доцент, Факультет компьютерных наук, НИУ ВШЭ (Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20);

М. А. Барулина – доктор физико-математических наук, доцент, Физико-математический институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15).

Information about the authors:

A. V. Sokolov – Postgraduate student of the Innopolis University Autonomous Educational Institution (1 Universitetskaya St., Innopolis, Russia, 420500); Assistant, Institute of Physics and Mathematics, Perm State University (15 Bukireva St., Perm, Russia, 614068);

A. S. Shutkin – 2nd-year Master's student at the Department of Applied Mathematics and Computer Science of Perm State University (15 Bukireva St., Perm, Russia, 614068);

E. M. Epifanova – 5th-year student specializing in Translation and Translation Studies at Perm State University (15 Bukireva St., Perm, Russia, 614068);

A. A. Popkova – 5th-year student specializing in Translation and Translation Studies at Perm State University (15 Bukireva St., Perm, Russia, 614068);

A. L. Beklaryan – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Computer Science, HSE University, (20, Myasnitskaya St., Moscow, Russia, 101000);

M. A. Barulina – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Institute of Physics and Mathematics, Perm State University (15 Bukireva St., Perm, Russia, 614068).

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 004.89

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-145-159

<https://elibrary.ru/lzqeqn>**Методы и средства виртуальной семантической интеграции
данных из распределенных разнородных источников**Светлана Игоревна Чуприна¹, Ксения Вадимовна Гимашева²¹Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, г. Пермь, Россия²Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия¹chuprinas@inbox.ru²gimashevkv@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам автоматизации обработки текстовых данных из распределенных разнородных источников на принципах их виртуальной семантической интеграции. Основная цель интеграции данных заключается в предоставлении пользователю унифицированного доступа к распределенным данным как к единому виртуальному хранилищу для выполнения запросов на естественном языке безотносительно формата хранения данных и их местоположения. В статье рассматриваются основные подходы, ориентированные на виртуальную семантическую интеграцию данных, и описана предлагаемая концепция построения онтологически управляемого инструментального окружения на базе технологии фабрик данных, что позволяет унифицировать и автоматизировать обработку данных за счет промежуточного слоя онтологий. Описывается реализация предложенной концепции в виде инструментального средства NuCoBoShell с сервисом запросов на естественном языке, который в отличие от поисковых сервисов интернет предоставляет возможность получения более полных ответов на запросы посредством автоматического извлечения необходимой информации из виртуальных источников, представляющих собой результат семантической интеграции не только разнородных веб-ресурсов, но и текстовых документов, хранящихся в доступных хранилищах данных и на локальном компьютере пользователя, без необходимости их физического копирования в единое хранилище.

Ключевые слова: *семантическая интеграция данных; виртуальная интеграция; онтология; онтологически управляемое решение; технология фабрик данных*

Для цитирования: Чуприна С.И., Гимашева К.В. Методы и средства виртуальной семантической интеграции данных из распределенных разнородных источников // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. Вып. 1(68). С. 145–159. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-145-159. <https://elibrary.ru/lzqeqn>.

Статья поступила в редакцию 08.08.2024; одобрена после рецензирования 28.02.2025; принята к публикации 24.03.2025.



Эта работа © 2025 Чуприна С.И., Гимашева К.В. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Methods and Tools for Virtual Semantic Integration of Data from Distributed Heterogeneous Sources

Svetlana I. Chuprina¹, Kseniya V. Gimasheva²

¹Perm State Humanitarian Pedagogical University, Perm, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

¹chuprinas@inbox.ru

²gimashevakv@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the natural language processing from distributed heterogeneous sources based on the principles of their virtual semantic integration. The main purpose of data integration is to provide the user with unified access to distributed data as a single virtual storage for performing natural language queries, regardless of the data storage format and location. The article discusses the main approaches focused on virtual semantic data integration, and describes the proposed concept of building an ontology driven instrumental environment based on Data Fabric technology, which allows to automate data processing via intermediate layer of ontologies in a unified form. The article describes NuCoBoShell that is the instrumental environment implementing the proposed approach. NuCoBoShell uses ontology-driven semantic integration mechanism to provide the answering, which, unlike traditional Internet answering services, provides the opportunity to obtain more pertinent answers automatically extracting the necessary information from not only heterogeneous web resources, but also text documents stored in accessible data warehouses and user's local computer without the need to copy data to a single repository.

Keywords: *semantic data integration; virtual integration; ontology; ontology-driven development; data fabric technology*

For citation: Chuprina, S. I. and Gimasheva, K. V. (2025), "Methods and Tools for Virtual Semantic Integration of Data from Distributed Heterogeneous Sources", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 1(68), pp. 145-159. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2025-1-145-159. <https://elibrary.ru/lzqeqn>.

The article was submitted 08.08.2024; approved after reviewing 28.02.2025; accepted for publication 24.03.2025.

Введение

В условиях всеобщей цифровизации объем получаемой и производимой человеком информации непрерывно растет. В связи с этим проблема автоматизации и унификации обработки данных с целью адаптации к персональным предпочтениям пользователей является актуальным направлением развития информационных технологий. Под обработкой данных понимаются как процессы автоматического сбора и извлечения данных из различных ресурсов, так и выполнение виртуальной семантической интеграции данных.

Необходимость семантической интеграции данных связана с распределенностью и разнородностью информационных ресурсов и выполняется с целью предоставления пользователям возможности работать с данными из множества произвольных ресурсов как с единым целым. Данные из различных источников могут быть не только структурированными, неструктурированными или полуструктурированными и иметь различный формат представления, но и отличаться по местоположению: располагаться в локальных и/или корпоративных, в том числе облачных, хранилищах, в сети интернет или в виде файлов разного формата на локальных компьютерах пользователей.

В ситуации, когда отсутствуют источники, которые содержали бы полный ответ на поставленный пользователем вопрос, возникает потребность в ручном сопоставлении и смысловой интеграции данных из различных источников, так как отсутствуют ориентированные на конечного пользователя (неспециалиста в области ИТ) общедоступные высокоуровневые средства, позволяющие унифицированным образом выполнять автоматизированную обработку данных на принципах семантической интеграции.

Для решения этой проблемы используются разные методы, большинство из которых основано на консолидации данных. Консолидация предполагает создание единого хранилища, в котором происходит интеграция данных из разных источников за счет их автоматизированного извлечения, преобразования и загрузки (англ., ETL – Extract, Transform, Load) специальными средствами. На данный момент наиболее перспективные методы направлены на реализацию другого подхода – виртуальной интеграции, при которой не происходит физического перемещения данных в единое хранилище [1, 2]. Среди технологий, основанных на виртуальной интеграции данных и активно развивающихся в последнее время, можно выделить технологии построения интеллектуальных фабрик данных – нового поколения хранилищ данных [3]. Концепция построения фабрик данных предполагает установление между источниками данных и интерфейсом конечного пользователя промежуточного слоя в виде графа знаний (англ., Knowledge Graph), представленного, например, онтологиями [4], который описывает предметное содержание и метаданные различных распределенных разнородных источников данных, а также интерфейсы для доступа к необходимым программным сервисам их обработки.

В статье описан подход к разработке инструментального окружения, позволяющего автоматизировать и унифицировать семантическую интеграцию распределенных разнородных данных посредством построения виртуального хранилища данных. В качестве технологий виртуальной интеграции данных были выбраны технологии построения интеллектуальных фабрик данных, что не предъявляет повышенных требований к уровню ИТ-квалификации пользователя, ведь интерфейс конечного пользователя представляет собой простую строку для задания поискового запроса по аналогии с поисковыми сервисами интернет. При вводе поискового запроса, благодаря онтологически управляемым решениям, пользователь получает подсказки, учитывающие контекст запроса и специфику предметной области тех информационных ресурсов, которые были выбраны пользователем как доверительные. Отличительной особенностью реализации таких подсказок является управляемый онтологиями механизм семантической фильтрации.

В статье представлена реализация предложенного подхода в виде инструментального средства NuCoBoShell. В отличие от поисковых сервисов интернет, NuCoBoShell позволяет получать более полные с точки зрения содержания ответы на ЕЯ-запросы (запросы на естественном языке) посредством автоматического извлечения необходимой информации из виртуального источника, генерируемого в результате семантической интеграции не только разнородных веб-ресурсов, но и текстовых документов, хранящихся в доступных хранилищах данных и/или на локальном компьютере пользователя без необходимости их физического копирования в единое хранилище и использования больших предобученных языковых моделей (англ., LLM – Large Language Model).

1. Необходимость семантической интеграции данных из распределенных разнородных источников

Потребность в интегрированной обработке как структурированных, так и неструктурированных, а также полуструктурированных текстовых данных, приводит к необходимости унификации методов и средств их автоматизированной обработки, не зависящей ни от специфики предметной области, ни от степени структурированности и формата данных. При этом, несмотря на успехи в решении задач автоматической обработки текстов (АОТ или англ., NLP – Natural Language Processing) методами глубинного машинного обучения (МО), в частности, генеративного искусственного интеллекта (ИИ), когда используются упомянутые выше LLM со множеством параметров (иногда, миллиардами), они далеко не всегда подходят для решения конкретных задач, особенно в тех случаях, когда по тем или иным причинам, например по соображениям безопасности, текстовые данные никогда не выкладывались в общий доступ.

Кроме того, использование для решения задач АОТ методов глубинного МО не оправдано и в тех случаях, когда компания или небольшая исследовательская группа, не говоря уже об индивидуальных исследователях, не обладает достаточными финансовыми и вычислительными ресурсами для дообучения этих моделей, особенно при незначительных объемах исходных данных. Поэтому применение для решения задач АОТ методов, отличных от МО, например, основанных на правилах и лексико-синтаксических шаблонах, методах онтологического инжиниринга или других методах инженерии знаний, по-прежнему остается актуальным направлением развития ИИ. Во многих практических задачах АОТ требуется интеграция указанных методов и средств с методами и средствами МО.

Все вышесказанное напрямую относится и к решению задач семантической интеграции данных, когда в отдельных исходных ресурсах нет полного ответа на сложный комплексный запрос и традиционная поисковая система фактически ранжирует ответы не по степени их пертинентности и релевантности, а раздельно в порядке их релевантности каждой из составных частей запроса. Это можно продемонстрировать на примере такого комплексного запроса как "рецепты с содержанием витамина B12, кальция и магния", в ответ на который традиционный интернет-поисковик сначала выдает две страницы ссылок на одну часть комплексного запроса (см. рис. 1), а затем отдельно – на другую часть, причем в начале выдачи приводятся рецепты безотносительно указанных в запросе нутриентов. Проблема остается и в случае, если из текста запроса убрать кавычки.

Основная цель интеграции данных состоит в том, чтобы объединить информацию из различных источников и представить ее в едином формате, что позволяет пользователю получать доступ к множеству данных без необходимости учитывать внутреннюю структуру и содержание каждого ресурса. Задача семантической интеграции данных усложняется в случае, когда источники данных представляют собой разнородные неструктурированные ресурсы на естественном языке. АОТ представляет собой трудно формализуемую задачу [5], для качественной эффективной обработки текстовых данных необходимо учитывать синонимы и контекст при извлечении и интеграции разнородной информации.

Виртуальная семантическая интеграция данных позволяет не только привести данные к некоторому единому формату или единой структуре, но и повысить качество данных за счет установления смысловых связей между различными понятиями предметной области.

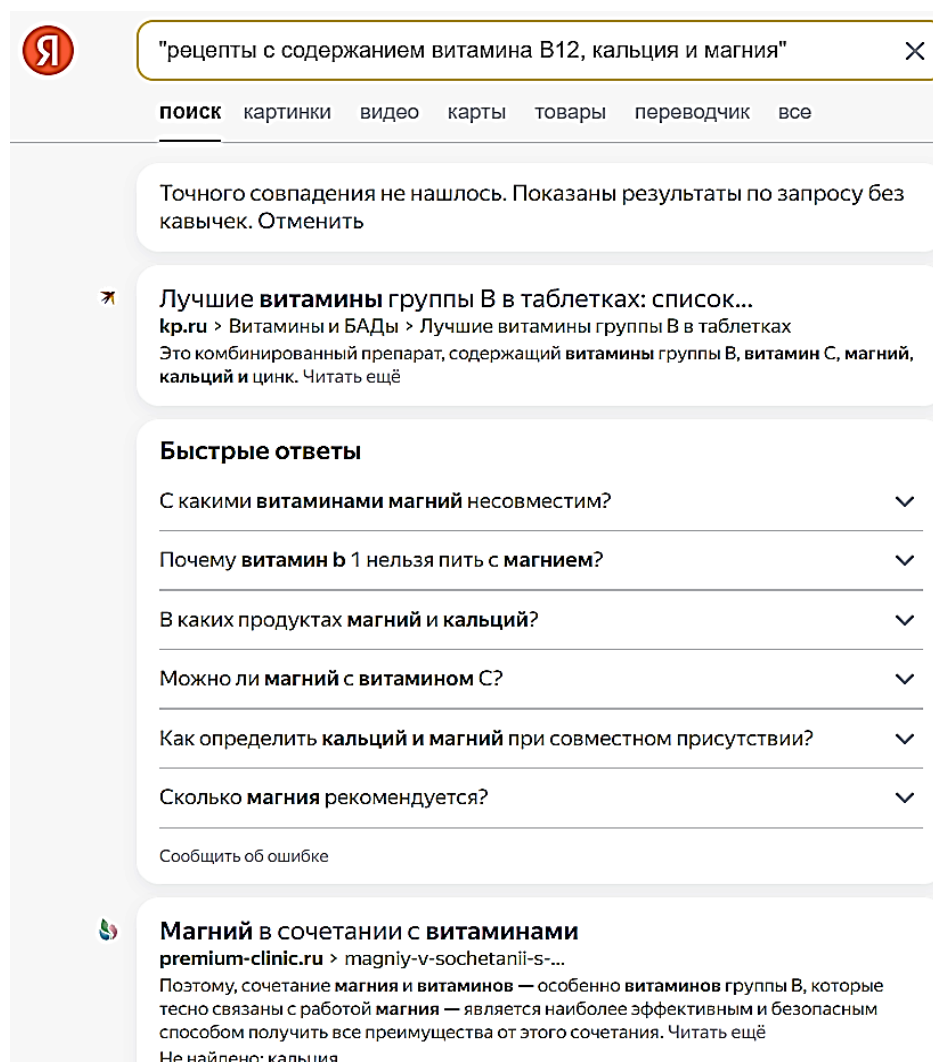


Рис. 1. Пример нерелевантной интернет-выдачи информации в ответ на комплексный запрос

В результате появляется возможность выполнять запросы на естественном языке к разнородному виртуальному пространству данных, скрывая от пользователя не только формат и структуру исходных данных, но и их местоположение, так как обработка данных выполняется независимо от того, расположен ли информационный ресурс в сети интернет, в корпоративном хранилище или на локальном компьютере.

2. Описание подходов к семантической интеграции данных

С точки зрения способов интеграции данных в настоящее время существует два основных подхода [1] – консолидация и федерирование. Консолидация, или материализованная интеграция, предполагает создание единого ETL-хранилища данных из интегрируемых информационных ресурсов, которое будет периодически пополняться за счет извлечения, преобразования и загрузки данных специальными средствами. Запросы задаются уже после интеграции данных в единое хранилище, что порождает проблему "свежести" данных.

Федерирование данных или виртуальная интеграция основана на использовании посредников и адаптеров, где посредник представляет собой центральный компонент системы интеграции, а адаптеры обеспечивают единообразное взаимодействие посредника с источниками данных. Ключевая идея подхода состоит в том, что центральный элемент системы интеграции (посредник), благодаря онтологическому слою метаданных, выполняет преобразование запросов, которые трансформируются в подзапросы к отдельным информационным ресурсам (источникам данных). Выполнение подзапросов поддерживается специальными модулями (адаптерами), которые позволяют оптимизировать взаимодействие посредника с источниками данных.

Основное отличие федерирования от консолидации заключается в том, что при виртуальной интеграции происходит извлечение данных из разнородных источников с последующим объединением и анализом в режиме реального времени без их физического перемещения в единое хранилище – местоположение данных не меняется, они остаются у владельцев, а результаты запросов формируются подобно так называемым удаленным представлениям (remote views) и выдаются по требованию. Благодаря виртуальной интеграции данных появляется возможность оперативно учитывать изменения в источниках данных и настраивать ограничения прав доступа как к отдельным распределенным разнородным ресурсам, так и ко всему виртуальному пространству данных.

На рис. 2 продемонстрирована упрощенная схема двух подходов к интеграции данных [6]: слева представлен традиционный подход, основанный на принципах консолидации; справа – подход к виртуальной интеграции данных на принципах федерализации.

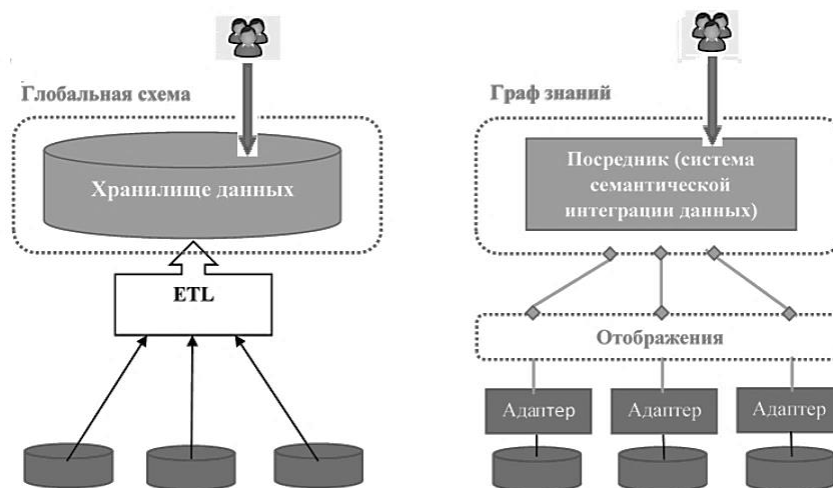


Рис. 2. Упрощенная схема интеграции на принципах консолидации и федерирования

Как отмечалось выше, одним из подходов к реализации семантической интеграции данных является применение методов машинного обучения [7], которые позволяют автоматизировать обработку текстов на естественном языке за счет обучения моделей для извлечения закономерностей и прогнозирования результатов на основе исходных данных. Использование методов глубинного МО, например LLM, позволяет генерировать связный и семантически корректный текст с учетом контекста ЕЯ-запроса и синонимов. Однако в случае загрузки данных в открытые общедоступные сервисы, основанные на

LLM, например OpenAI, нет достаточных гарантий защищенности и конфиденциальности исходных данных, а полученные результаты и весь контекст их получения (сам запрос, уточняющие запросы и промежуточные результаты) также становятся общедоступными, так как учитываются генеративным ИИ при поиске и генерации ответов для решения задач других пользователей. Альтернативой является использование локальных языковых моделей, но при этом, как уже отмечалось, для хранения большой предобученной языковой модели и ее дообучения требуются значительные вычислительные ресурсы [8], иначе качество генерируемых ЕЯ-ответов и синтезируемых текстов резко падает.

В обоих случаях возникают проблемы с валидацией полученных результатов, так как корректность ответов в значительной степени зависит от правильно сформулированного контекста запроса. Кроме того, при извлечении закономерностей и связей встает вопрос вообще о целесообразности и необходимости решения этих задач на основе LLM в случае, когда эти закономерности или их часть уже известны пользователю, и он ищет простого легковесного способа их применения для решения своих задач и, возможно, интеграции соответствующих ресурсов в свои или сторонние системы. Поэтому перспективной представляется интеграция подходов на базе методов машинного обучения и инженерии знаний, в частности, онтологического инжиниринга, который играет основную роль в современных технологиях семантического веба (англ., Semantic Web) [3, 9].

Технологии Semantic Web позволяют унифицированным образом выполнять обработку текстов за счет использования единой онтологической модели представления данных. Благодаря единой модели, отвечающей принятым стандартам, а также разработанным стандартизированным языкам запросов, которые являются частью стека технологий Semantic Web, повышается качество реализации поисковых запросов. Однако Semantic Web создавалось как расширение WWW (англ., World Wide Web), которое позволяет представить опубликованную в интернете информацию и данные вместе с машинно-интерпретируемыми метаданными. И хотя концепция представления знаний о предметной области в виде графа знаний может быть использована и для представления содержания локальных текстовых ресурсов, сами технологии предназначены для обработки именно веб-ресурсов.

Данная работа предлагает унифицированный онтологически управляемый подход к смысловой интеграции данных из разнородных ресурсов вне зависимости от их формата, местоположения и контента. В онтологии хранятся знания не только о структуре и содержании разнородных ресурсов, но и метаданные и декларативные знания об их местоположении, необходимых сервисах для их интерпретации, пред- и пост-обработки. Отличительной особенностью нашего подхода является то, что унифицированные способы семантической интеграции распространяются также и на локальные текстовые ресурсы пользователя без их перемещения и/или выкладывания в общий доступ. Однако с увеличением количества ресурсов и, соответственно, объема и/или числа онтологий, описывающих метаданные об этих ресурсах, возникает необходимость в интеграции самих онтологий [9]. В связи с этим встает вопрос о корректности построенных онтологий, необходимости оценки полноты и качества разработанной онтологической модели и самих онтологий.

Для автоматизации этого процесса мы разрабатываем средства визуальной аналитики и обращаемся к сервисам генеративного ИИ. Таким образом, мы используем LLM не для генерации ЕЯ-ответов и синтеза текстов на ЕЯ, а для автоматизации построения онтологий.

3. Виртуальная интеграция данных с использованием технологии Data Fabric

Подход к виртуальной интеграции данных прежде всего направлен на решение проблемы вариативности данных. При обработке большого количества распределенных разнородных ресурсов при условии непрерывно поступающего потока запросов к данным централизованное единое хранилище данных перестает быть эффективным и требует значительных вложений в вычислительные ресурсы. В связи с этим в последнее время активно развивается подход к созданию виртуального хранилища данных на основе технологий построения интеллектуальных фабрик данных [3].

Фабрика данных представляет собой интегрированное виртуальное хранилище, архитектура и сервисы которого обеспечивают смысловую взаимосвязь между данными, хранящимися в разнородных источниках вне зависимости от формата их хранения и технологии создания систем – источников данных [6]. Преимущество технологии построения фабрик данных заключается в управлении процессом поиска и обработки данных из распределенных разнородных источников без их физического перемещения в единое хранилище посредством промежуточного слоя графа знаний, представляемого чаще всего в виде онтологий. Этот граф знаний располагается между интерфейсом конечного пользователя и источниками данных и описывает предметное содержание этих источников в терминах онтологии, а также метаданные об организации ресурсов, включая местоположение, формат и другое. Такой подход позволяет оперативно учитывать изменения в источниках, так как доступ к данным осуществляется по ЕЯ-запросу в терминах онтологии сразу ко всему виртуальному пространству данных, а семантическая интеграция выполняется в режиме реального времени. Для реализации произвольных ЕЯ-запросов используются NLP-сервисы, устанавливающие смысловое соответствие между терминами из ЕЯ-запроса и терминами графа онтологии с учетом синонимов в контексте, обобщающих и конкретизирующих понятий.

На рис. 3 приведена обобщенная архитектура системы виртуальной интеграции данных, представленных не только в различных текстовых форматах, но и в форматах структурированных и полуструктурированных данных.

Центральным компонентом системы интеграции на принципах федерализации является так называемый посредник (англ., mediator), который интегрирует данные, полученные от адаптеров (англ., wrappers), обеспечивающих единообразное взаимодействие посредника с источниками данных в терминах единой модели глобального графа знаний, описывающего метаданные и смысловое содержание ресурсов. Посредник осуществляет интеграцию через сопоставление глобальных и локальных моделей данных.

Пользовательский запрос, сформулированный в терминах предметной области, описанной графом знаний, автоматически декомпозируется на множество подзапросов, адресованных к нужным источникам данных, в том числе локальным. На основе результатов их обработки генерируется более полный ответ на запрос.

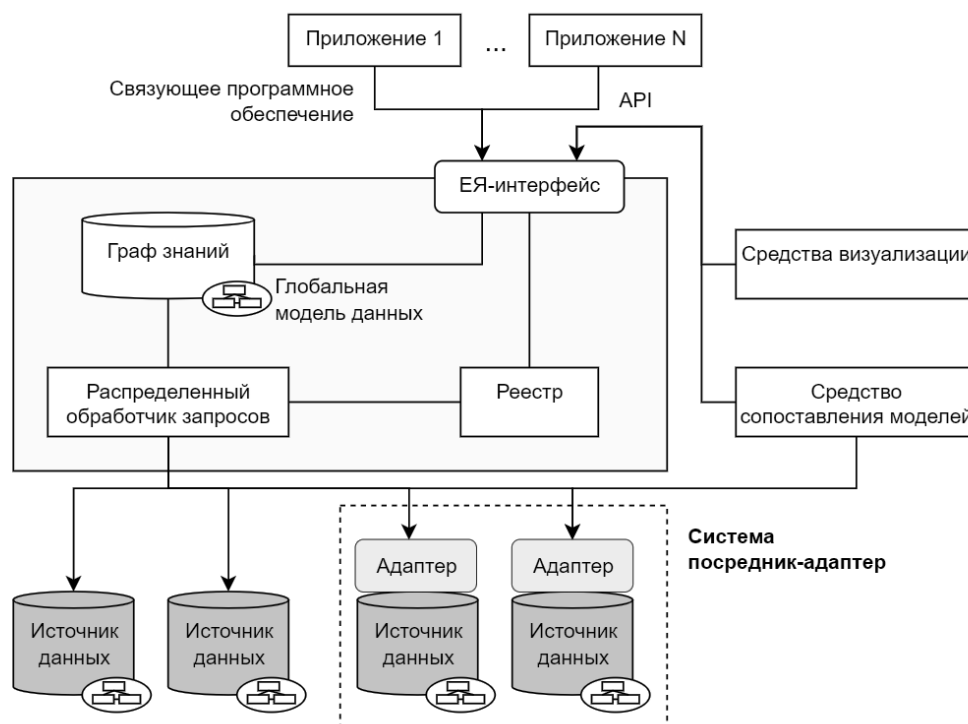


Рис. 3. Обобщенная архитектура системы виртуальной интеграции данных

4. Онтологически управляемое инструментальное средство виртуальной семантической интеграции данных

Концепция предлагаемого подхода к разработке инструментального окружения, позволяющего автоматизировать и унифицировать виртуальную семантическую интеграцию распределенных разнородных текстовых ресурсов, основана на использовании описанных выше принципов построения интеллектуальных фабрик данных. Реализация указанных принципов выполнена в среде программной платформы NuCoBoShell, которая является онтологически управляемым инструментальным окружением и использует технологию веб-сервисов для автоматического извлечения необходимых данных из коллекций неструктурированных документов и их семантической интеграции.

Для более качественного решения этих задач дополнительно используются сторонние лингвистические ресурсы и унаследованные базы данных. В результате разработанное в соответствии с предлагаемым подходом инструментальное окружение позволяет получать более полные ответы на пользовательские ЕЯ-запросы за счет автоматически выполняемой предварительной виртуальной интеграции данных. Задача автоматического определения необходимости в указанной предварительной интеграции информационных ресурсов решается специальными интеллектуальными программными средствами, которые анализируют доступные ресурсы на предмет того, имеются ли отдельные источники, содержащие достаточно полный ответ на запрос, или требуется интеграция нескольких ресурсов. Описание этих программных средств выходит за рамки данной работы и является предметом обсуждения в [11].

На рисунке 4 представлена упрощенная схема работы инструментального NuCoBoShell, ориентированного на поиск пертинентной информации посредством виртуальной смысловой интеграции данных из распределенных разнородных ресурсов и позволяющего адаптироваться к новым источникам данных и/или к новым предметным областям за счет пополнения общего репозитория онтологий, управляющих функционированием системы, без необходимости внесения изменений в исходный программный код. Представленный на рис. 4 репозиторий онтологий является частью Реестра, указанного на рис. 3, при этом в нашем подходе к реализации виртуальной интеграции распределенных ресурсов доступ к репозиторию онтологий организован унифицированным образом по аналогии с доступом к другим ресурсам системы, включая доступ к исходным текстовым документам.

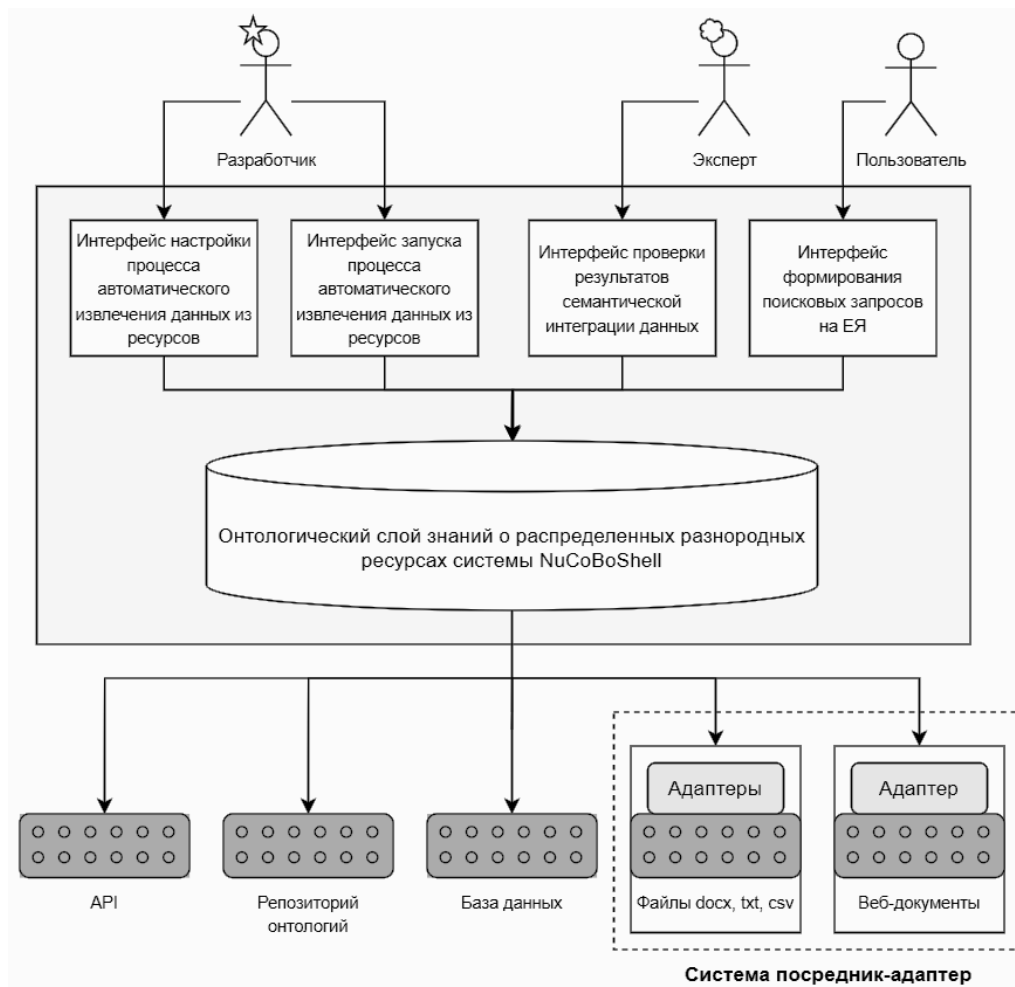


Рис. 4. Обобщенная архитектура NuCoBoShell

Для реализации подхода к виртуальной интеграции на основе предлагаемой концепции достаточно использования так называемых "легковесных" (англ., *lightweight*) онтологий, которые состоят из описания понятий предметной области с указанием их свойств и взаимосвязей с другими понятиями, но не включают спецификацию аксиом. Помимо того, что "тяжеловесная" онтология (англ., *heavyweight*) включает контент, аналогичный "легко-

весной", она включает в себя также явную спецификацию аксиом на основе некоторой дескриптивной модели, например декларацию всякого рода правил и ограничений. Это позволяет не только получить более богатую семантическую модель онтологии, но и выводить из имеющейся онтологии новые знания с использованием стандартных средств логического вывода, например, языка SPARQL (подробнее см. [12, 13]). Однако, как показывает наш опыт (см., например [11, 14–17] и библиографию к ним), использование легковесных онтологий позволяет унифицированным образом расширять возможности системы и адаптировать их под новые требования и/или изменения в предметной области для решения широкого круга задач из разных областей, если визуальный редактор онтологий позволяет, как в нашем случае [6], хранить в вершинах и дугах онтологии атрибуты с описанием нужных метаданных.

Согласно Дэвису [13] и др. исследователям, из-за того, что легковесные онтологии не включают описание аксиоматики и обычно состоят из иерархии понятий и набора отношений, существующих между этими понятиями, их легче понимать, адаптировать, управлять, обновлять и использовать. Как следствие, создание легковесной онтологии требует меньше времени и усилий, чем создание тяжеловесной онтологии, что делает их более доступными как для широкого круга ИТ-разработчиков, так и экспертов в других предметных областях, не являющихся ИТ-специалистами, например в области биомедицины. Как уже отмечалось, для автоматизации построения легковесных онтологий мы на этапе создания онтологий используем также сервисы генеративного ИИ [11], но по известным причинам не применяем их для интеграции разнородных ресурсов (см. раздел 2 настоящей статьи) и не встраиваем их в инфраструктуру NuCoBoShell.

Подчеркнем, что наш подход предполагает при необходимости использование вместо одной онтологии целого семейства взаимосвязанных онтологий, причем все они имеют общую модель и поддерживают один и тот же набор типов связей между понятиями. В частности, для интерпретации взаимосвязей типа "is_a" (обратное отношение к "класс–подкласс") и "a_part_of" ("часть–целое") используется одна и та же функция для разных онтологий. Это позволяет применять один интерпретатор для разных онтологий (подробнее см. [6]).

В соответствии с технологией фабрик данных инструментальное окружение NuCoBoShell реализуется на принципах микросервисной архитектуры. Использование микросервисов позволяет унифицированным образом адаптировать систему к различным предметным областям и распределенным разнородным ресурсам, а также конфигурировать и подключать независимые программные модули для обработки данных внутри системы. На рис. 5 представлена диаграмма компонентов инструментального окружения NuCoBoShell.

Благодаря микросервисной архитектуре и онтологически управляемому решению, добавление новых сервисов в систему унифицировано и не требует внесения изменений в программный код других компонентов: достаточно пополнить репозиторий онтологий новыми метаданными о подключаемых сервисах и ресурсах. Это позволит в перспективе обогатить NuCoBoShell дополнительными средствами, в первую очередь, продвинутыми средствами визуальной аналитики. Создание онтологий и просмотр с целью валидации результатов генерации онтологий средствами генеративного ИИ выполняются в среде разработанного в ПГНИУ визуального редактора онтологий ОНТОЛИС 2.0 (см. [6] и библиографию к этой статье).

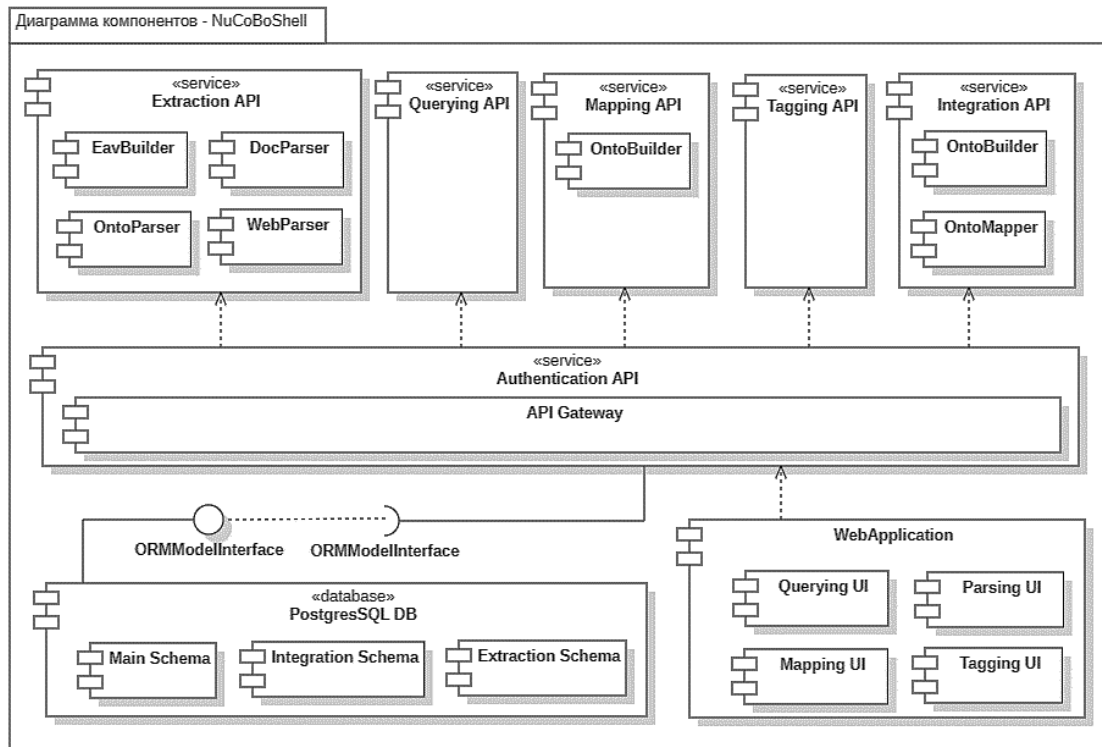


Рис. 5. Диаграмма компонентов NuCoBoShell

Заключение

В статье на основе сравнения разных подходов к интеграции распределенных разнородных ресурсов делается обоснованный вывод в пользу интеграции на принципах федерализации и построения виртуальных хранилищ с использованием технологий интеллектуальных фабрик данных без физического копирования данных. Описан новый управляемый легковесными онтологиями подход к реализации виртуальных хранилищ на принципах федерализации для семантической интеграции данных из различных ресурсов, содержащих коллекции документов как в текстовых, так и в веб-форматах, безотносительно их местоположения: в традиционных хранилищах данных, в сети Интернет или на локальном компьютере пользователя. Этот подход позволяет в ситуации, когда в отдельных ресурсах нет полного ответа на поставленный вопрос, а использование современных средств генеративного ИИ затруднено или невозможно по соображениям безопасности данных или другим описанным в статье причинам, генерировать более полные, по сравнению с традиционными поисковыми системами, пертинентные ответы на ЕЯ-запросы пользователей.

Реализация предложенного подхода в рамках инструментального окружения NuCoBoShell на принципах микросервисной архитектуры и модельно-ориентированного подхода с использованием онтологической модели позволяет унифицированным образом адаптировать систему к семантической обработке данных из разных предметных областей и добавлять новые функциональные возможности без внесения изменений в исходный программный код.

Данная работа входит в серию авторских статей, посвященных вопросам онтологически управляемой виртуальной семантической интеграции текстовых данных.

Помимо данной работы, по указанной тематике нами опубликована работа [11], осящающая вопросы применения методов визуального анализа данных для автоматизированного выявления потребности в семантической интеграции данных и готовится к публикации статья, посвященная более подробному описанию разрабатываемых высокоуровневых средств визуального анализа данных для автоматизации работ по подбору наиболее адекватных специфике конкретной предметной области метрик семантической близости понятий и комплексной проверке качества построенных онтологий.

Список источников

1. Тузовский А.Ф., Ямпольский В.З. Интеграция информации с использованием технологий semantic web // Проблемы информатики. 2011. № 2. С. 51–58.
2. Ballard C. IBM Informix: Integration through data federation / C. Ballard, N. Davies, M. Gavazzi, J. Stephani, M. Lurie // IBM International Technical Support Organizat, 2003. 270 p. URL: <http://www.iitg.org/library/ids/technical/sg247032.pdf> (дата обращения: 30.06.2024).
3. Patel A., Debnath, N.C., Bhushan, B. (Eds.). Semantic Web Technologies: Research and Applications (1st ed.). CRC Press. 2022. 404 p. DOI: 10.1201/9781003309420.
4. Gruber T.R. A Translation approach to portable ontology specifications // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5, № 2. P. 199–220.
5. Большакова Е.И. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и анализ данных: учеб. пособие / Е.И. Большакова, К.В. Воронцов, Н.Э. Ефремова, Э.С. Клышинский, Н.В. Лукашевич, А.С. Сапин М.: НИУ ВШЭ, 2017. 269 с.
6. Chuprina S.I. Using Data Fabric Architecture to Create Personalized Visual Analytics Systems in the Field of Digital Medicine // Scientific visualization. 2023. Vol. 15(5). P. 50–63. DOI: 10.26583/sv.15.5.05.
7. Найденова, К.А., Невзорова О.А. Машинное обучение в задачах обработки естественного языка: обзор современного состояния исследований // Учен. зап. Казан. ун-та. Серия Физико-матем. науки. 2008. № 4. С. 5–24.
8. Нурутдинов А.Р., Латыпов Р.Х. Перспективы биоинспирированного подхода в разработке систем искусственного интеллекта (обзор тенденций) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физико-матем. науки. 2022. Т. 164, кн. 2–3. С. 244–265. DOI: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.244-265.
9. Semantic Web W3C. URL: <https://www.w3.org/standards/> (дата обращения: 30.06.2024).
10. Calvanese D., De Giacomo G., Lenzerini M. Ontology of integration and integration of ontologies // Proc. of the 14th Int. Workshop on Description Logics (DL 2001). 1-3 August 2001, Stanford, CA, USA. Vol. 49. P. 10–19.
11. Чуприна С.И., Гимашева К.В. Применение методов визуального анализа данных для выявления потребности в семантической интеграции данных // Труды международного конф. по компьютерной графике и машинному зрению "Графикон 2024". 17–19 сентября 2024, Омск. С. 389–402. DOI: 10.25206/978-5-8149-3873-2-2024-389-402.
12. Gomes-Perez A., Fernandez-Lopez M., Corcho O. Ontological Engineering: with examples from the areas of Knowledge Management, e-Commerce and the Semantic Web (1st ed.). Springer-Verlag, London. 2004. 403 p.
13. Davies J. Lightweight Ontologies // Theory and Applications of Ontology: Computer Applications. 2010. P. 197–229. DOI: 10.1007/978-90-481-8847-5_9.

14. Ryabinin K., Chuprina S. Development of ontology-based multiplatform adaptive scientific visualization system // *Journal of Computational Science*. Elsevier. 2015. Vol. 10. P. 370–381. DOI: 10.1016/j.jocs.2015.03.003.
15. Ryabinin K., Chuprina S., Belousov K. Ontology-Driven Automation of IoT-Based Human-Machine Interfaces Development // *Computational Science – ICCS 2019* / Edit by J. M. F. Rodrigues. – Cham: Springer International Publishing, 2019. P. 110–124.
16. Chuprina S.I. Ontology-Driven Visual Analytics Software Development / S. Chuprina, K. Ryabinin, K. Matkin, D. Koznov// *Programming and Computer Software*. 2022. T. 48, № 3. P. 208–214. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0361768822030033>.
17. Ryabinin K., Chuprina S., Labutin I. Tackling IoT Interoperability Problems with Ontology-Driven Smart Approach // *Science and Global Challenges of the 21st Century - Science and Technology* / Edit by A. Rocha, E. Isaeva. Cham: Springer International Publishing. 2022. P. 77–91.

References

1. Tuzovskiy, A. F. and Yampolskiy, V. Z. (2011), "Integration of information using semantic web technologies", *Problemy informatiki*, no. 2, pp. 51-58.
2. Ballard, C., Davies, N., Gavazzi, M., Stephani, J. and Lurie, M. (2003), *IBM Informix: Integration through data federation*, IBM International Technical Support Organizat, USA, available at: <http://www.iitg.org/library/ids/technical/sg247032.pdf> (Accessed: 30.06.2024).
3. Patel, A., Debnath, N. C. and Bhushan, B. (2022), *Semantic Web Technologies: Research and Applications*, 1st ed., CRC Press, USA, 404 p. DOI: 10.1201/9781003309420.
4. Gruber, T. R. (1993), "A Translation approach to portable ontology specifications", *Knowledge Acquisition*, vol. 5, no. 2, pp. 199-220.
5. Bolshakova, E. I., Vorontsov, K. V., Efremova, N. E., Klyshinskiy, E. S., Lukashevich, N. V. and Sapin, A. S. (2017), *Avtomaticheskaya obrabotka tekstov na estestvennom yazyke i analiz dannyh* [Automatic text processing in natural language and data analysis], HSE University, Moscow, Russia.
6. Chuprina, S. I. (2023), "Using Data Fabric Architecture to Create Personalized Visual Analytics Systems in the Field of Digital Medicine", *Scientific visualization*, vol. 15(5), pp. 50-63. DOI: 10.26583/sv.15.5.05.
7. Naidenova, X. A. and Nevzorova, O. A. (2008), "Machine Learning for Natural Language Processing: Contemporary State", *Uchebye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki*, no. 4, pp. 5-24.
8. Nurutdinov, A. R. and Latypov, R. Kh. (2022), "Potentials of the bio-inspired approach in the development of artificial intelligence systems (trends review)", *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, vol. 164, no. 2–3, pp. 244-265. DOI:10.26907/2541-7746.2022.2-3.244-265.
9. Semantic Web W3C. URL: <https://www.w3.org/standards/> (Accessed: 30.06.2024).
10. Calvanese, D., De Giacomo, G. and Lenzerini, M. (2001), "Ontology of integration and integration of ontologies", *Proceedings of the 14th Int. Workshop on Description Logics (DL 2001)*, Stanford, CA, USA, 1-3 August 2001, vol. 49, pp. 10-19.
11. Chuprina, S. I. and Gimasheva, K. V. (2024), "Using visual data analysis methods to identify the need for semantic data integration", *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii po komputernoy grafike b mashinnomu zreniyu "GraphiCon"*, Omsk, Russia, 17–19 September 2024, pp. 389–402. DOI: 10.25206/978-5-8149-3873-2-2024-389-402.

12. Gomes-Perez, A., Fernandez-Lopez, M. and Corcho, O. (2004), *Ontological Engineering: with examples from the areas of Knowledge Management, e-Commerce and the Semantic Web*, 1st ed., Springer-Verlag, London. 403 p.
13. Davies, J. (2010), "Lightweight Ontologies", *Theory and Applications of Ontology: Computer Applications*, pp. 197–229. DOI: 10.1007/978-90-481-8847-5_9.
14. Ryabinin, K. and Chuprina, S. (2015), "Development of ontology-based multiplatform adaptive scientific visualization system", *Journal of Computational Science*, Elsevier, vol. 10, pp. 370-381. DOI: 10.1016/j.jocs.2015.03.003.
15. Ryabinin, K., Chuprina, S. and Belousov, K. (2019), "Ontology-Driven Automation of IoT-Based Human-Machine Interfaces Development", in Rodrigues, J. (eds), *Computational Science – ICCS 2019*, ICCS 2019, Lecture Notes in Computer Science, vol. 11540, Springer, Cham, pp. 110-124. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22750-0_9.
16. Chuprina, S., Ryabinin, K., Matkin, K. and Koznov, D. (2022), "Ontology-Driven Visual Analytics Software Development", *Programming and Computer Software*, vol. 48, no. 3, pp. 208-214. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0361768822030033>.
17. Ryabinin, K., Chuprina, S. and Labutin, I. (2022), "Tackling IoT Interoperability Problems with Ontology-Driven Smart Approach", in Rocha, A., Isaeva, E. (eds), *Science and Global Challenges of the 21st Century - Science and Technology*, Perm Forum 2021, Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 342, Springer, Cham, pp. 77-91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89477-1_9.

Информация об авторах:

С. И. Чуприна – кандидат физико-математических наук; до сентября 2024 – профессор кафедры математического обеспечения вычислительных систем Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15); с ноября 2024 – доцент кафедры прикладной информатики, информационных систем и технологий Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета (614990, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 24); почетный работник высшего профессионального образования РФ, член-корреспондент Международной академии информатизации, AuthorID: 11124;

К. В. Гимашиева – магистрант кафедры математического обеспечения вычислительных систем Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15), AuthorID: 1178188.

Information about the authors:

S. I. Chuprina – PhD in Physics and Mathematics; before September 2024 – Prof. at the Dept. of Computer Science, Perm State University (15, Bukireva St., Perm, Russia, 614068); since November 2024 – Associate Professor at the Dept. of Applied Mathematics, Information Systems and Technologies, Perm State Humanitarian Pedagogical University (24, Sibirskaya St., Perm, Russia, 614990); Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Corresponding Member of the International Academy of Informatization, AuthorID: 11124;

K. V. Gimacheva – Master's student of Computer Science Dept. at Perm State University (15, Bukireva St., Perm, Russia, 614068), AuthorID: 1178188.

Научный периодический журнал "Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика" зарегистрирован в 2007 г. как самостоятельное издание, являющееся продолжением серии журнала "Вестник Пермского университета", издаваемого с 1994 г. В каждом номере научного журнала автору разрешается опубликование в любом разделе не более одной статьи, в том числе в соавторстве.

Статьи, оформленные в соответствии с нижеизложенными правилами, должны быть отправлены через **личный кабинет автора на сайте журнала**. Статьи отправляются в двух форматах: текстовый документ и pdf-файл без данных об авторе (для организации слепого рецензирования). Вместе с рукописью отправляются контактные данные авторов в свободной форме в текстовом документе (ФИО, должность, место работы с указанием полного адреса, e-mail, номер телефона) и **экспертное заключение о возможности открытого опубликования**. Для публикации статьи необходимо заполнить и подписать **договор**.

Аннотация статьи (на русском и английском языках) должна содержать основные краткие сведения: описание проблемы, включая цели и задачи исследования; методы исследования с указанием новизны, если имеется; полученные результаты и выводы. Объем аннотации примерно 250 слов

Текст статьи должен содержать разделы: Введение, Постановка задачи, Методы исследования, Результаты, Обсуждения, Заключение, **Благодарности** для русскоязычной статьи; Introduction, Materials and Methods, Results, Discussion, Conclusion, Acknowledgements для англоязычной статьи. Объем рукописи – не менее 6 страниц машинописного текста.

Оформление. Текст статьи необходимо оформить в редакторе **Word**. Формат листа, используемый для написания статьи – А4. Размеры верхнего и нижнего полей – 2.6 см, правого и левого – 2.5 см. Расстояние до верхнего и нижнего колонтитулов 1.25 см. Шрифтом Times New Roman Cyr, размер – 12 пт, межстрочный интервал – множитель 1.1 Подписи к рисункам и таблицам набираются курсивом, в конце заголовков и ячеек таблицы точка не ставится. Формулы набираются в редакторе формул.

Структура статьи

Вид статьи (научная, обзорная или др.).

УДК

DOI:

Название раздела (математика, механика, компьютерные науки и информатика).

Название статьи на русском языке (шрифт Times New Roman – 16 пт, полужирный).

Ф.И.О. автора (-ов) полностью (Times New Roman – 12 пт, полужирный).

Место работы (с указанием подразделения), город и страна (шрифт Times New Roman – 11 пт), **e-mail**.

Аннотация на русском языке (шрифт Times New Roman – 11 пт).

Ключевые слова на русском языке: 5–7 слов или словосочетаний (шрифт Times New Roman – 11 пт, курсив).

Информация для цитирования (шрифт Times New Roman – 11 пт).

Благодарности (шрифт Times New Roman – 11 пт).

Даты поступления, одобрения и принятия рукописи (шрифт Times New Roman – 11 пт).

Название статьи на английском языке (шрифт Times New Roman – 16 пт, полужирный).

На английском языке Ф.И.О. автора (-ов) полностью (шрифт Times New Roman – 12 пт, полужирный).

Место работы (с указанием подразделения), город и страна на английском языке (шрифт Times New Roman – 11 пт), **e-mail**.

Аннотация на английском языке (шрифт Times New Roman – 11 пт).

Ключевые слова на английском языке: 5–7 слов или словосочетаний (шрифт Times New Roman – 11 пт, курсив).

Информация для цитирования на английском языке (шрифт Times New Roman – 11 пт).

Благодарности на английском языке (шрифт Times New Roman – 11 пт).

Даты поступления, одобрения и принятия рукописи на английском языке (шрифт Times New Roman – 11 пт).

Основной текст статьи набирается в ширину страницы, абзацный отступ основного текста – 1.0 см (задается автоматически, не пробелами). Другие отступы не допускаются. Выравнивание текста по ширине.

Список источников оформляется в едином формате, в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018, без использования тире. Если в списке литературы используется источник из электронного ресурса, необходимо указать дату обращения. Ссылка на литературный источник указывается в тексте статьи в квадратных скобках после упоминания цитаты. Список использованных литературных источников необходимо представить на русском и английском языках (**References**). **Список литературы на латинице**, называемый References, готовится отдельно от Списка литературы и размещается сразу за указанным списком. Ссылки на зарубежные источники необходимо повторять в Списке литературы и References. В References недопустимо использовать российские ГОСТы. Необходимо следовать требованиям международных стандартов. Инструкция по оформлению списка литературы в латинице – References, стандарт "Harvard" находится по ссылке http://www.psu.ru/files/docs/ob-universitete/smi/nauchnyj-hurnal/metodicheskie_materialy/standart_Harvard.doc.

ПОРЯДОК РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

Все рукописи проходят двойное слепое рецензирование двумя специалистами в научной области исследования. При возникновении спорной ситуации назначается третий рецензент. Окончательное решение о публикации рукописи принимает главный редактор журнала.

Датой поступления статьи считается день ее отправки через личный кабинет на сайте журнала или по электронной почте журнала (главного редактора). Рукописи рассматриваются в порядке их поступления в течение одного месяца в зависимости от сложности ситуации и объема работы. Редакция оставляет за собой право без согласования с автором проводить литературную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла. Одобрённые статьи публикуются бесплатно. Полнотекстовая версия каждой рукописи выставляется на сайте журнала и в системе РИНЦ (e-library).

Scientific periodical journal "Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science" is published since 1994 in the series of the journal "Bulletin of Perm University". Then it was registered as an independent publication in 2007.

An author is allowed to publish no more than one article (also as co-author) in any section for each issue of the journal.

Article's structure should be accordant with the rules below and should be sent through the **author's personal account on the journal's website**. Articles should be sent in two formats: a text document and a pdf-file without information about the author(s) (for review). Authors contact data (name, position and place of work with address, e-mail, phone number in a text document) and **an expert letter on the open publication possibility** should be sent with the manuscript. Author(s) must make and sign **an agreement**.

Abstract (in Russian and English) should contain main information of research: a problem including the goals and objectives of the study; research methods with novelty indication, if any; significant results and findings. The abstract size is approximately 250 words.

Text should contain sections: Introduction, Materials and Methods, Results, Discussion, Conclusion, Acknowledgments. The manuscript size is at least 6 typewritten pages.

An article text must be formatted in the editor Word. The sheet format is A4. The top and bottom margins are 2.6 cm, the right and left margins are 2.5 cm. The distances to the header and footer are 1.25 cm. Times New Roman Cyr font, size – 12 pt, single spacing. Legends for figures and tables are typed in italics style. Formulas are typed in the Equation editor.

The structure of the article

Article's type

UDC

TITLE in Russian (Times New Roman font – 16 pt, bold).

Name: author (s) name in full (Times New Roman font – 12 pt).

Place of work (with departments), city, country (Times New Roman font – 11 pt), **e-mail**

Abstract in Russian (Times New Roman font – 11 pt).

Keywords in Russian: 5–7 words or phrases (Times New Roman font – 11 pt, italic).

Information for citation in English (Times New Roman font – 11 pt, italic).

Acknowledgments in English (Times New Roman font – 11 pt, italic).

Submitted, approved, accepted dates of receipt in English (Times New Roman font – 11 pt, italic).

TITLE in English (Times New Roman font – 16 pt, bold).

In English author (s) name in full, place of work (with departments), city, country (Times New Roman font – 11 pt), **e-mail**.

Abstract in English (Times New Roman font – 11 pt).

Keywords in English: 5–7 words or phrases (Times New Roman font – 11 pt).

Information for citation in English (Times New Roman font – 11 pt).

Acknowledgments in English (Times New Roman font – 11 pt).

Submitted, approved, accepted dates of receipt in English (Times New Roman font – 11 pt).

The article text is typed the paragraph indent is 1.0 cm (set automatically, not spaces). No other indents are allowed. Justify the text in width (Times New Roman font – 16 pt)..

References are formed in a single format with using GOST R 7.0.100–2018 without a dash. If a source from an electronic resource is used, the author should indicate the request date. To indicate a source in text author uses square brackets after the quotation mention. References must be submitted **in Russian and English**.

The References list in Latin, called References, is prepared separately from the References List in Russian and placed below. Foreign sources references should be repeated in the References Lists in Russian and English. It is inadmissible to use Russian GOSTs in References. It is necessary to follow the requirements of international standards. Instructions on the References in Latin script design – References, Harvard standard can be found at http://www.psu.ru/files/docs/ob-universitete/smi/nauchnyj-zhurnal/metodicheskie_materialy/standart_Harvard.doc

REVIEW AND PUBLICATION OF ARTICLES

All manuscripts are double-blind peer-reviewed by two research scientists. If a disputable situation arises, a third reviewer is appointed. The final decision on the manuscript publication is made by the editor-in-chief of the journal.

The receipt date of the article is the day of its submission through the personal account on the journal's website or by e-mail of the journal (or editor-in-chief). Manuscripts are reviewed in the order they are received within one month, review period may be changed depending on a situation complexity and a works amount. The journal editors can to edit the article text without basic meaning change.

Approved articles are published free. The full-text version of each manuscript is posted on the journal's website and in the RSCI system (e-library).

Научное издание

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
Математика. Механика. Информатика

Выпуск 1 (68)

2025

Адрес учредителя и издателя
614068, Пермский край, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15, ПГНИУ
Адрес редакции
614068, Пермский край, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15, ПГНИУ
Физико-математический институт
e-mail: vestnik_mmi@psu.ru

Редактор Е.В. Шумилова
Корректор В.Е. Пирожкова
Компьютерная верстка: Г.И. Кушнина

Подписано в печать 26.03.2025. Выход в свет 31.03.2025
Формат 60 × 84/8. Усл. печ. л. 18,83. Тираж 500 экз. Заказ 40

Пермский государственный национальный исследовательский университет
Управление издательской деятельности

614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15. Тел. (342) 239-66-36

Отпечатано в типографии ПГНИУ. Тел. (342) 239-65-47

Подписной индекс журнала
«Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика»
в онлайн-каталоге «Урал-Пресс» – 015010
https://www.ural-press.ru/catalog/97266/8708250/?sphrase_id=396133

Распространяется бесплатно и по подписке