

Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий

XXV Всероссийская конференция
молодых учёных
по математическому моделированию
и информационным технологиям

Тезисы докладов

Алфавитный указатель участников

Новосибирск
21–25 октября 2024 г.

УДК 004, 519.6
ББК 22.19, 32.81
М34

Тезисы XXV Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия, 21–25 октября 2024 г. — Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2024. — 73 стр.

Конференция организуется с целью обсуждения актуальных результатов исследований молодых научных сотрудников, аспирантов и студентов старших курсов в области вычислительной и прикладной математики и информатики. Участие в конференции дает возможность молодым ученым получить представление о результатах исследований в области современного математического моделирования, вычислительных и информационных технологий, установить научные контакты, а также познакомиться с широким кругом задач, представленных в докладах участников.

В рамках работы конференции представлены следующие тематические направления: математическое моделирование; численные методы; высокопроизводительные и распределённые вычисления; информационные и геоинформационные системы; интеллектуальный анализ данных и задачи искусственного интеллекта; управление, обработка, защита и хранение информации; автоматизация и теория управления.

Организаторы конференции:

- Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
- Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
- Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
- Институт вычислительного моделирования СО РАН
- Институт динамики систем и теории управления СО РАН

Ответственные за выпуск: Гусев О. И., Скиба В. С., Синявский Ю. Н.

ISBN: 978-5-905569-27-2

© Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий, 2024

Программный комитет:

- академик Ю. И. Шокин (Новосибирск) — председатель
- к.т.н. С. А. Рылов (Новосибирск) — ученый секретарь
- академик И. В. Бычков (Иркутск)
- академик В. А. Сойфер (Самара)
- академик М. П. Федорук (Новосибирск)
- чл.-корр. РАН С. И. Смагин (Хабаровск)
- чл.-корр. РАН В. В. Шайдуров (Красноярск)
- профессор В. В. Москвичев (Красноярск)
- профессор А. Н. Фионов (Новосибирск)
- профессор Б. Я. Рябко (Новосибирск)
- д.т.н. В. Б. Барахнин (Новосибирск)
- д.ф.-м.н. О. Ф. Воропаева (Новосибирск)
- д.т.н., к.филол.н. О. Ю. Гавенко (Новосибирск)
- д.т.н. А. Ю. Горнов (Иркутск)
- д.ф.-м.н. С. Б. Медведев (Новосибирск)
- д.т.н. О. И. Потатуркин (Новосибирск)

Организационный комитет:

- к.т.н. С. А. Рылов (Новосибирск) — председатель
- к.ф.-м.н. О. И. Гусев (Новосибирск) — заместитель председателя
- м.н.с. И. В. Кузнецова (Новосибирск) — секретарь
- к.т.н. А. А. Жирнов (Новосибирск)
- к.т.н. Ю. Н. Синявский (Новосибирск)
- м.н.с.. А. Г. Горынин (Новосибирск)
- м.н.с. Р. А. Калашников (Новосибирск)
- м.н.с. М. В. Платонова (Новосибирск)
- м.н.с. В. С. Скиба (Новосибирск)
- м.н.с. Ч. А. Цгоев (Новосибирск)
- асп. В. Д. Котлер (Новосибирск)
- асп. Н. А. Шашок (Новосибирск)

Научные направления

1. Математическое моделирование

Направление посвящено разработке и исследованию математических моделей в задачах механики сплошной среды, физики, энергетики, медицины, экологии, природопользования и экономики. Особое внимание уделяется многомасштабным и комплексным «мультифизическим» моделям. Рассматриваются полученные с их помощью результаты.

2. Численные методы

Направление включает как теоретические, так и практические вопросы конструирования и исследования разнообразных численных методов. В частности, обсуждаются различные свойства методов, а также вопросы их применения при моделировании и проектировании.

3. Высокопроизводительные и распределённые вычисления

Направление посвящено практическим вопросам создания высокоэффективных алгоритмов, в том числе с использованием современных вычислительных средств и окружений. Особое внимание уделяется разработке параллельных алгоритмов решения задач на многопроцессорных компьютерах и с применением многоядерных и векторных ускорителей. Рассматриваются вопросы создания, отладки и тестирования алгоритмов распределённых вычислений и GRID-технологий.

4. Информационные и геоинформационные системы

Направление посвящено методам проектирования и практической реализации информационных и геоинформационных систем, разработки их новых типов. Обсуждаются вопросы, связанные с системами спутникового мониторинга, электронными библиотеками, распределёнными информационными системами. Затрагиваются вопросы обеспечения их надежного функционирования и безопасности.

5. Интеллектуальный анализ данных и задачи искусственного интеллекта

Направление посвящено методам выделения закономерностей в данных. Включает алгоритмы классификации, кластеризации, прогнозирования, распознавания образов, нейронные сети и др.

6. Управление, обработка, защита и хранение информации

Направление объединяет способы организации хранилищ информации и технологии обработки массивов данных, оптимизации структур данных, защиты данных, централизованного и распределённого их хранения. Особое внимание уделяется развитию методов работы с очень большими объемами данных (Big Data).

7. Автоматизация и теория управления

Направление включает вопросы, связанные с разработкой и усовершенствованием технических средств и методов измерения технологических параметров, программно-аппаратных систем, средств технического мониторинга и поддержки принятия решений. Обсуждаются связанные с этим задачи из области системного анализа, теории управления и принятия решений.

Содержание

Тезисы докладов	6
1. Пленарные доклады	6
2. Вычислительные технологии	7
3. Информационно-вычислительные технологии	32
4. Информационные технологии	43
Алфавитный указатель участников	66

1. Пленарные доклады

1.1. Гренев И.В. Методы *in silico* скрининга пористых материалов для задач газоразделения

В данной работе рассмотрены методы и подходы проведения *in silico* скрининга кристаллических пористых материалов для выделения легких компонент из газовых смесей. На примере широко-масштабного скрининга для более 10000 пористых металл-органических координационных полимеров (МОКП) с использованием методов Монте-Карло моделирования в большом каноническом ансамбле и молекулярной динамики продемонстрирован алгоритм поиска наиболее эффективных адсорбентов для задачи извлечения гелия из природного газа. Анализ взаимосвязей между химическим составом МОКП структур и их эффективностью в процессах газоразделения показал, что атомы металлов влияют на адсорбционные характеристики в первую очередь через формирование топологии пористой структуры, а не через вклад в межмолекулярное взаимодействие адсорбат-адсорбент. По этой причине алгоритм поиска эффективных МОКП для процесса адсорбционного извлечения гелия из природного газа должен, в первую очередь, строиться на подборе пористых материалов с оптимальными структурными параметрами. В работе предложен набор из 6 структурных параметров, характеризующих пористые материалы, и для каждого параметра определены оптимальные диапазоны значений. С помощью *in silico* скрининга удалось впервые продемонстрировать, что в случае мембранного разделения поиск МОКП одновременно селективных по отношению к азоту и метану более перспективен, чем поиск Не-селективных материалов для извлечения гелия из природного газа. В работе исследовано влияние условий проведения процессов газоразделения, в том числе состава трехкомпонентной газовой смеси, давления и температуры системы, на взаимосвязь структурных характеристик с адсорбционными и мембранными свойствами МОКП. Полученные результаты были успешно применены при разработке отечественного сорбента для задачи тонкой очистки Не. Разработанный алгоритм скрининга может быть использован для поиска эффективных пористых материалов для выделения легких компонент из газовых смесей, в том числе и для получения чистого водорода из водород содержащих смесей.

Исследование выполнено за счет гранта Российской научной фонды № 24-71-10096, <https://rscf.ru/project/24-71-10096/>

1.2. Лапин В.Н. Оценка применимости аналитических моделей с помощью вычислительного эксперимента на примере течения Пуазеля в шероховатых трещинах

Решение задачи о ламинарном течении Ньютонской жидкости в плоском канале постоянного сечения (течении Пуазейля) хорошо известно с XIX века и благодаря своей простоте широко используется при описании фильтрации в трещиноватопористых средах [1], моделировании гидроразрыва [2] и других задачах, связанных с течением жидкости в трещинах, разломах, стыках и т. д. Согласно этому решению перепад давления p выражается через объемный расход жидкости q , ее вязкость μ и ширину канала w как

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{12\mu q}{w^3}. \quad (1)$$

Однако амплитуда шероховатости берегов трещин в реальных горных породах сопоставима с их шириной, и предположения, в которых получен кубический закон (1), в общем случае не выполняются. С конца прошлого века делаются попытки скорректировать этот закон на основе лабораторных исследований [3] или численного моделирования [4] течений в реальных трещинах. Но такой подход позволяет провести ограниченное количество экспериментов, поэтому предлагаемые различными авторами модификации заметно отличаются, и окончательная теория еще не сформирована [5].

В настоящей работе на основе численного моделирования с использованием комплекса ANSYS проведена оценка области применимости и погрешности нескольких модификаций кубического закона (1), полученных путем аналитического решения уравнений движения жидкости в каналах со стенками, задаваемыми периодическими функциями [6]. Благодаря использованию периодических функций моделирование можно было проводить в одном элементе поверхности с использованием подробной сетки, которая обеспечивает достаточно малое значение численной погрешности и отсутствие численных артефактов решения. Рассмотренный класс каналов не позволяет сформулировать новую модификацию закона, учитывающую характеристики шероховатости в общем случае, но может быть использован для оценки применимости уже разработанных формулировок.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (FWNS-2022-0009).

Список литературы

- [1] MEDICI G., LING F., SHANG J. Review of discrete fracture network characterization for geothermal energy extraction // Front. Earth Sci. 2023. Vol. 11. Art. 1328397.
- [2] ЧЕРНЫЙ С. Г., ЛАПИН В. Н., ЕСИПОВ Д. В., КУРНАКОВ Д. С. Методы моделирования зарождения и

распространения трещин / Новосибирск: СО РАН, 2016. 312 с.

- [3] BARTON N., BANDIS S., BAKHTAR K. Strength deformation and conductivity coupling of rock joints // Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech. Abstracts. 1985. Vol. 22 (3). P. 121–140.
- [4] BRIGGS S., KARNEY B., SLEEP B. Numerical modeling of the effects of roughness on flow and eddy formation in fractures // Int. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2017. Vol. 9. P. 105–115.
- [5] NGUYEN X., DONG J.-J., YU C. Is the widely used relation between mechanical and hydraulic apertures reliable? Viewpoints from laboratory experiments // Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 2022. Vol. 159. Art. 105226.
- [6] ZIMMERMAN R., KUMAR S., BODVARSSON G. Lubrication theory analysis of the permeability of rough-walled fractures // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1991. Vol. 28 (4). P. 325–331.

2. Вычислительные технологии

2.1. *Алексашин А.С.* Предобуславливание метода граничных элементов при использовании FETI

В настоящее время для моделирования процессов электромагнетизма используются различные подходы. В частности подход с совместным использованием метода граничных (МГЭ) и конечных элементов (МКЭ) [1]. Использование стандартной постановки МГЭ приводит к появлению достаточно больших плотных матриц, и в таком случае общая матрица совместного метода включает в себя плотные блоки. Наличие таких матричных блоков приводит к увеличению затрат как по памяти, так и по времени, необходимому на моделирование. Существуют методы, которые уменьшают затраты памяти в МГЭ, один из таких методов — быстрый мультипольный метод. Предобуславливание граничноэлементных матриц в случае с несколькими подобластями слишком трудоемко при программной реализации и слабо освещено в литературе, в особенности при использовании быстрого мультипольного метода. Предобуславливатели для одной подобласти лучше освещены в литературе и менее трудозатратны в программной реализации, но они плохо адаптируются на случай с несколькими подобластями. Для того чтобы их применить можно использовать методы декомпозиции области. Одними из таких методов являются методы из семейства FETI [2]. В этих методах подобласти связываются с помощью множителей Лагранжа на границах, и для решения задачи возможно хранить и использовать не всю матрицу целиком, а ее части, для каждой из подобластей, и матрицу связей между ними. В частности, в данном методе на каждой из подобластей решается своя задача, что позволяет использовать предобуславливатели для матриц МГЭ с незначительными изменениями.

В работе использовалась модификация метода TFETI для нелинейных задач. Было проведено сравнение различных модификаций совместного метода ГЭ и КЭ на практической задаче электромагнетизма, а именно:

- с использованием TFETI и без него;
- с предобуславливанием ГЭ матриц несколькими методами [3];
- с реализацией МГЭ с использованием быстрого мультипольного метода.

Научный руководитель — д.т.н. Рояк М. Э.

Список литературы

- [1] ROYAK M. E., STUPAKOV I. M., KONDRATYEVA N. S. Coupled vector FEM and scalar BEM formulation for eddy current problems // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016). 2016. Vol. 1. N. 2. P. 330–335.

- [2] FARHAT C., ROUX F.-X. A method of finite element tearing and interconnecting and its parallel solution algorithm // Internat. J. Numer. Methods Engng. 1991. Vol. 32. P. 1205–1227.
- [3] ALEKSASHIN A. S., STUPAKOV I. M. Matrix Representation of the Fast Multipole Method of Scalar Boundary Elements // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2021. 2021. P. 551–554.

2.2. *Афанасьева А.А.* Применение итеративно регуляризованных методов для решения обратной задачи электроимпедансной томографии

Электроимпедансная томография (ЭИТ) — это метод, позволяющий «заглянуть» внутрь объекта, не используя при этом рентгеновское излучение или другие инвазивные процедуры. Она работает, основываясь на восстановлении значений коэффициента электропроводности объекта. Ключевым моментом в ЭИТ является использование электродов, которые размещаются на поверхности объекта. Через эти электроды пропускается слабый электрический ток, а затем измеряется напряжение между ними. Именно эта информация — набор данных о токе и напряжении — используется для реконструкции распределения электропроводности внутри объекта.

Сложность ЭИТ заключается в том, что эта задача является некорректной нелинейной обратной задачей. Это означает, что небольшие изменения в измеренных данных могут приводить к существенным ошибкам в реконструированном изображении. Это связано с тем, что токи распространяются по объекту не по прямым линиям, а по сложным траекториям, что затрудняет точную интерпретацию измеренных данных. Для решения этой проблемы используются различные математические методы регуляризации.

Существует множество подходов к решению обратной задачи ЭИТ, и они подразделяются на три основные группы: Итерационные методы, неитерационные методы и машинное обучение. Итерационные методы строят приближенное решение, постепенно уточняя его на каждой итерации. Они отличаются высокой точностью, но могут быть вычислительно затратными. Неитерационные методы дают быстрое приближенное решение, но их точность может быть ниже. Применение машинного обучения позволяет улучшить качество реконструкции изображения, уменьшить влияние шума и увеличить скорость обработки данных.

В данной работе рассмотрены два метода из класса итеративно регуляризованных метода Гаусса — Ньютона для реконструкции распределения коэффициента электрической проводимости по извест-

ным значениям силы тока и напряжения на электродах:

- Итеративно регуляризуемый метод Гаусса — Ньютона Бакушинского [1]. Этот метод является модификацией метода Гаусса — Ньютона. Он использует регуляризацию А.Н. Тихонова для улучшения устойчивости решения и снижения шума.
- Модификации метода Левенберга — Марквардта [2, 3]. Этот метод является наиболее популярным для решения нелинейных задач наименьших квадратов. Он использует комбинацию метода Гаусса — Ньютона и метода градиентного спуска.

Оба метода были применены для двумерной модели круга с двумя вставками, имеющими различные значения коэффициента электрической проводимости. В модели используется 16 электродов. Для повышения точности решения используется двухсеточная технология. Это значит, что прямая задача, которая описывает распространение электрического тока через объект, решается на «подробной» неструктурированной треугольной сетке с большим количеством ячеек. А обратная задача, в которой ищется распределение электропроводности по известным значениям напряжения и силы тока на электродах, решается на «грубой» сетке, имеющей в четыре раза меньше ячеек. Это позволяет за счет сокращения числа неизвестных в обратной задаче ускорить вычисления и уменьшить потребление ресурсов. Для каждого из рассмотренных методов построены графики сходимости итерационного процесса, вычислена среднеквадратичная ошибка, приведены полученные картины реконструкции распределения коэффициента электрической проводимости.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-02-2024-1437).

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Старченко А.В.

Список литературы

- [1] БАКУШИНСКИЙ А. Б. Итерационные регуляризующие алгоритмы для нелинейных задач // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т. 27. № 4. С. 617–621.
- [2] ВАСИН В. В., ПЕРЕСТОРОНИНА Г. Я. Метод Левенберга — Марквардта и его модификационные варианты для решения нелинейных уравнений с применением к обратной задаче гравиметрии // Тр. ИММ УрО РАН. 2011. Т. 17. № 2. С. 53–61.
- [3] LI J., YUAN Y. Numerical simulation and analysis of generalized difference method on triangular networks for electrical impedance tomography // App. Math. Modelling. 2009. Vol. 3. N. 5. P. 2175–2186.

2.3. Аюпов Д.А. Численное моделирование движения заряженных частиц в винтовой магнитной пробке

В настоящее время в ИЯФ СО РАН проводится широкомасштабное исследование одного из новых способов запыриания потока плазмы винтовой магнитной пробкой [1]. Для экспериментального исследования спирального удержания используется установка Спиральная магнитная открытая ловушка [2]. Идея этого метода удержания плазмы заключается в том, что на плазму, помещенную в магнитное поле с винтовой симметрией и вращающуюся вокруг оси в скрещенных электрическом и магнитном полях, действует сила, направленная вдоль оси пробки. С помощью этой силы можно тормозить либо ускорять поток плазмы. Эксперименты показали возможность подавления потока достаточно плотной и холодной плазмы, а их результаты находятся в хорошем согласии с предсказаниями магнитогидродинамической модели. В то же время, обсуждение эффективности винтового удержания плазмы с термоядерными параметрами требует развития полностью кинетических и гибридных моделей, а также проведение на их основе численного моделирования.

В данной работе мы представляем алгоритм расчета магнитного поля спиральной магнитной ловушки и численно исследуем бесстолкновительное движение заряженных частиц в полученном поле. Важной особенностью предложенного алгоритма является то, что в нем автоматически выполняются как конечно-разностный закон Гаусса для магнитного поля, что обеспечивается использованием сдвинутых сеток для компонент векторного потенциала, так и условие бездивергентности векторного потенциала, накладываемое кулоновской калибровкой. Последнее достигается за счёт специального алгоритма вычисления спирального электрического тока на расчётной сетке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 24-21-00137).

Научный руководитель — Dr.habil. Лисейкина Т.В.

Список литературы

- [1] BEKLEMISHEV A. D. Helicoidal system for axial plasma pumping in linear traps // Fusion Sci. Technol. 2013. Vol. 63. N. 1. P. 355–357.
- [2] SUDNIKOV A. V., BEKLEMISHEV A. D., POSTUPAEV V. V. ET AL. First Experimental Campaign on SMOLA Helical Mirror // Plasma and Fusion Research. 2019. Vol. 14. P. 2402023.

2.4. Бакулина А.В. Численное исследование взаимодействия бора с неподвижным полупогруженным в воду сооружением

Целью работы является изучение воздействия поверхностных волн на полупогруженное тело. Актуальность этого направления исследований связана с потребностью хранения сжиженного природного

газа на плавучих установках, размещаемых в прибрежных районах Камчатки, а волны цунами могут сильно повредить данные конструкции, поэтому требуется оценивать силовое воздействие таких волн на плавучие объекты [1]. Рассматривается случай, когда головная часть волны цунами при выходе на мелководье приобрела форму бора. В рамках бездисперсионной модели мелкой воды исследуется влияние бора различной высоты на полупогруженные неподвижные конструкции прямоугольной формы с разной протяженностью и разной осадкой. Дано подробное описание алгоритма, позволяющего проводить расчеты взаимодействия бора с такой конструкцией. Алгоритм заключается в решении уравнений мелкой воды только во внешней части (область вне тела), а результаты, полученные с разных сторон от тела, соединяются между собой условиями сопряжения. Для расчетов используется конечно-разностная схема предиктор-корректор. Выведено новое необходимое условие устойчивости такой схемы, применяемой для решения одномерных уравнений мелкой воды, с учетом того, что в схеме используются два разных схемных параметра, отвечающие за подавление осцилляций численного решения. Важным результатом являются полученные формулы для расчёта горизонтальной и вертикальной компонент вектора силы воздействия волны на конструкцию. Показано, что

- при накате бора на полупогруженное тело, отраженная волна теряет форму бора;
- высота бора, протяженность тела и его осадка имеют разную степень влияния на силовое воздействие волны на полупогруженное препятствие;
- максимум горизонтальной составляющей вектора гидродинамической силы зависит от заглубления тела почти линейно, а максимумы вертикальной составляющей от этой характеристики практически не зависят;
- максимум горизонтальной силы воздействия практически не зависит от протяженности конструкции;
- максимум вертикального заплеска бора на конструкцию слабо зависит от ее осадки и длины.

Список литературы

- [1] ГУСЕВ О.И., СКИБА В.С., ХАКИМЗЯНОВ Г.С. Силовое воздействие длинных поверхностных волн на полупогруженное в воду тело. I. Влияние формы набегающей волны // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 4. С. 33–62.

2.5. Баранчиков В.Р. Модификация формул Гаусса для расчета интеграла столкновений в 4-х волновом кинетическом уравнении

Исследование турбулентных потоков в жидкостях, газах и плазме остается одной из нерешен-

ных проблем современной физики. Для описания однородного изотропного слаботурбулентного взаимодействия волн в бозе-газе в работе [1] получено 4-х волновое кинетическое уравнение с интегралом столкновений в правой части:

$$\frac{dn_\omega}{dt} = \int_{\Delta} \mathcal{P}(\omega, \omega_2, \omega_3) [n_\delta n_2 n_3 + n_\omega (n_2 n_3 - n_\delta n_3 - n_\delta n_2)] d\omega_2 d\omega_3, \quad (1)$$

где $n_\omega = n(\omega, t)$ — спектр волнового действия, зависящий от частоты волны ω и от времени $t > 0$, $n_i = n(\omega_i, t)$, $i = 2, 3$, $n_\delta = n(\omega_\delta, t)$, $\omega_\delta = \omega_2 + \omega_3 - \omega$, $\Delta = \{(\omega_2, \omega_3) : \omega_2, \omega_3, \omega_\delta \geq 0\}$ — 2D область интегрирования,

$$\mathcal{P}(\omega, \omega_2, \omega_3) = \frac{4\pi^3}{\sqrt{\omega}} \min[\sqrt{\omega}, \sqrt{\omega_2}, \sqrt{\omega_3}, \sqrt{\omega_\delta}] \quad (2)$$

— ядро интеграла столкновений. Характерное поведение решения (1), (2) — степенная функция с точкой ветвления в нуле [1]: $n_\omega \sim \omega^{-7/6}$.

Для расчета интеграла столкновений ограничим частотный диапазон $\omega \in [0, \omega_{max}]$. Выполним декомпозицию области Δ так, чтобы в каждой подобласти функция минимума, стоящая в $\mathcal{P}$, принимала значение одного из своих аргументов. Получим 5 треугольных и 2 квадратных подобласти (см. рис 1. из статьи [2]). Перед расчетом отображим каждую из них в канонический квадрат $[-1, 1]^2$ с применением линейных отображений для прямоугольных подобластей и замен переменных из [3] для треугольных.

В силу теоремы Фубини вместо двойного мы получим повторный интеграл и сведем задачу к поиску 1D интеграла вида: $I^g = I^g[f] = \int_{-1}^1 g(x)f(x)dx$,

где $g(x)$ имеет точки ветвления или другие особенности на границах отрезка $[-1, 1]$, $f(x)$ — функция высокого порядка гладкости. Классические квадратурные формулы Гаусса (КФГ) в расчете этого интеграла будут малоэффективны, так как производные функции $g(x)$ терпят разрыв, поэтому применим отображение с параметром $\varepsilon > 0$, которое будет сгущать узлы КФГ около особых точек:

$$x = h_\pm(y) = \pm 1 + \varepsilon \sinh \frac{y \mp 1}{2} \sinh^{-1} \frac{2}{\varepsilon}.$$

Пусть $g(x) = (1 - x)^\alpha$, $\alpha > -1$ тогда, после применения замены $h_\pm(y)$, КФГ для расчета этого интеграла дает погрешность [2]:

$$|E_n[ghf]| \leq \frac{M\tilde{\varepsilon}}{2} \frac{j_1^{2(\alpha+1)}}{2^{\alpha+1}(\alpha+1)} n^{-2(1+\alpha)}, \quad (3)$$

где $\tilde{\varepsilon} \sim \varepsilon \ln[1/\varepsilon]$ при $\varepsilon \rightarrow 0$, $M = \|f\|$, n — количество узлов КФГ, j_1 — первый положительный ноль

Таблица. Значения $R_{n,\varepsilon}$.

n	$\varepsilon = 10^{-1}$	$\varepsilon = 10^{-5}$	$\varepsilon = 10^{-9}$	$\varepsilon = 10^{-15}$
64	-1,7656	-3,1109	-3,5767	-3,3692
128	-1,9678	-4,4759	-4,1739	-3,9677
256	-2,1706	-5,1824	-4,8035	-4,5850

функции Бесселя нулевого порядка. Далее мы можем приближенно вычислить интеграл $I^g[f]$:

$$\int_{-1}^1 g(h(y))f(h(y))h'(y)dy \approx \sum_{i=1}^n w_i g(h(y_i))f(h(y_i))h'(y_i),$$

где w_i — веса КФГ, y_i — узлы КФГ. В работе проведены расчеты интеграла по подобластям $\Delta_0 = \{(\omega_2, \omega_3) : \omega_\delta \geq 0, \omega_2, \omega_3 \leq \omega\}$ и $\Pi_1 = [\omega, \omega_{max}] \times [0, \omega]$. В таблице указаны величины $R_{n,\varepsilon} = \log_{10}(|I_{2n} - I_n|/I_{2n})$, где I_n — значение интеграла по подобласти Δ_0 на n узлах при $w = 1$.

Видно, что $|R_{n,\varepsilon}|$ растёт с ростом n , что говорит о быстрой сходимости при малых ε , см. оценку (3). Однако значения $R_{n,\varepsilon}$ ведут себя немонотонно по ε , в связи с этим выявлены оптимальные значения (ε_{opt}), при которых $R_{n,\varepsilon}$ являются наименьшими. Для Δ_0 при $\omega = 1$, $10 \varepsilon_{opt} \approx 10^{-5}$; при $\omega = 100$ $\varepsilon_{opt} \approx 10^{-6}$; при $\omega = 1000$ $\varepsilon_{opt} \approx 10^{-5}$.

Работа выполнена при поддержке Математического Центра в Академгородке, соглашение с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2022-281.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Семисалов Б. В.

Список литературы

- [1] ZHU Y., SEMISALOV B. V., KRSTULOVIC G., NAZARENKO S. V. Testing wave turbulence theory for the Gross-Pitaevskii system // Phys. Rev. E. 2022. Vol. 106. Art. 014205.
- [2] SEMISALOV B. V., MEDVEDEV S. B., NAZARENKO S. V., FEDORUK M. P. Numerical analysis of the kinetic equation describing isotropic 4-wave interactions in non-linear physical systems // Commun Nonlinear Sci Numer Simulat. 2024. Vol. 133. Art. 107957.
- [3] HOSSAIN M. A., ISLAM MD. S. Generalized Composite Numerical Integration Rule Over a Polygon Using Gaussian Quadrature // Dhaka Univ. J. Sci. 2014. Vol. 62. N. 1. P. 25–29.

2.6. Бугоец И.А., Семисалов Б.В., Шанеев В.П. Метод коллокации и наименьших квадратов (КНК) с аппроксимацией Паде для решения уравнения Бюргерса

Анализ прикладных проблем механики сплошных сред сводится к задачам математической физики, решение которых, как правило, не удается найти аналитически, поэтому важно создавать высоко-

точные вычислительные алгоритмы. Одно из уравнений, описывающих течения несжимаемой вязкой жидкости — уравнение Бюргерса (УБ). В этой работе исследована тестовая неоднородная начально-краевая задача для УБ:

$$\begin{cases} u_t + uu_x - \nu u_{xx} = f(t, x), \\ u(0, x) = \exp(x), \quad x \in [0, 2], \quad t \in [0, 1], \\ u(t, 0) = \exp(t), \quad u(t, 2) = \exp(t + 2), \end{cases} \quad (1)$$

где $f(t, x) = \exp(t + x)[1 - \nu + \exp(t + x)]$, ν — кинематическая вязкость, $u(t, x)$ — скорость течения жидкости, t — время, x — координата точки жидкости. Задача (1) имеет точное решение:

$$u(t, x) = \exp(t + x).$$

Для численного решения задачи (1) будем использовать метод КНК, который в отличие от других методов дает возможность находить решение не только в определенных точках, а искать его как наперед заданную функцию. В рамках метода КНК используем QR-разложения матриц, которые улучшают точность поиска этой функции тем, что не ухудшают обусловленность линеаризованной задачи.

Удобный и простой способ поиска решения — использовать полином как базисную функцию [1]. Однако во многих прикладных задачах точность метода может быть существенно повышена при использовании аппроксимантов Паде:

$$u(t, x) \approx \frac{\sum_{i=0}^N a_i(t)x^i}{1 + \sum_{i=1}^M b_i(t)x^i}, \quad (2)$$

которые дают лучшую точность, так как знаменатель базисной функции позволяет учитывать существование особых точек у аналитического продолжения решения в комплексную плоскость.

В данной работе предложен новый вариант численного решения задачи (1) методом КНК с базисной функцией (2), заданной на всем отрезке $x \in [0, 2]$, и с разными способами дискретизации по времени на основе

- 1) неявной разностной схемы 1-го порядка с весом,
- 2) схемы Кранка — Николсон (CN),
- 3) явной схемы Рунге — Кутты (RK) 4-го порядка,
- 4) неявной схемы RK с применением аппроксимации Гаусса — Лежандра (IRKGL) 10-го порядка.

Некоторые результаты численных экспериментов приведены в Таблице. Стоит учесть, что для полиномиальной аппроксимации использован многоячеичный вариант метода КНК, а приближения Паде строились лишь в одной ячейке. Из этого следует, что для достижения заданной точности в полиномиальном варианте тратится больше памяти, а

Таблица. Параметры численных методов, погрешности в норме L_2 (err) и обусловленности соответствующих СЛАУ (cond).

Метод	N	M	err	cond
IRKGL, Паде	4	5	1.01e−11	20e+13
RK, Паде	5	6	2.86e−11	32e+12
CN, полиномы	4	0	2.23e−07	40e+3
CN, Паде	4	5	2.11e−07	73e+8

для расчёта значения функции $u(t, x)$ в конкретной точке (t, x) — больше операций. И как результат, метод КНК с аппроксимацией Паде экономичнее и точнее.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-21-00499).

Список литературы

- [1] SHAPEEV V. P., VOROZHTSOV E.V. CAS Application to the Construction of the Collocations and Least Residuals Method for the Solution of the Burgers and Korteweg–de Vries–Burgers Equations // Proc. of 16th International Workshop, CASC 2014, Warsaw, Poland, September 8–12, 2014. LNSC Vol. 8660. P. 434–448.

2.7. Гарбузов Д.Н., Дьякова О.А., Ефремов М.А. Исследование кинематических и динамических характеристик потока ньютоновской жидкости в смесителях различных конфигураций

Технологическое оборудование, предназначенное для смешивания жидкостей и диспергирования твердых частиц или газов, находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Выделяются два основных типа смесительных аппаратов: устройства с механическим перемешивающим элементом и объемные смесители, процесс смешивания в которых осуществляется под воздействием гравитационных сил [1].

Методы вычислительной гидродинамики позволяют получать детализированные данные о различных параметрах, влияющих на процесс, с меньшими временными и финансовыми затратами по сравнению с экспериментальными исследованиями.

В настоящей работе выполнено численное исследование течений вязкой несжимаемой жидкости в мешалках различных конфигураций. Сформулирована математическая постановка задачи, основанная на уравнениях Навье — Стокса и неразрывности в двумерном приближении. Разработан численный алгоритм решения на базе метода контрольного объема и корректирующей процедуры SIMPLE [2]. Дискретизация дифференциальных уравнений выполнена с использованием неструктурированных триангулярных сеток. Проведены тесты для проверки аппроксимационной сходимости, оценки порядка точности численной схемы и верификации оригинальной программы расчета.

Были проведены параметрические исследования в диапазоне изменения числа Рейнольдса 0.1–100,

который позволяет рассматривать задачу о смешении в рамках плоской постановки. Показано, что характерной особенностью кинематических и динамических характеристик потока является наличие циркуляционных зон. Введены количественные характеристики качества смешения, которые позволяют сравнить различные конфигурации мешалок друг с другом, а также оценить процесс смешения с течением времени. Качественная оценка процесса демонстрирует наличие областей равномерного и неравномерного перемешивания. Количественно процесс смешения оценивался по значению интеграла от диссипативной функции и введенного параметра неоднородности распределения маркерных частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 24-29-00594).

Научный руководитель — д.ф.-м.н Борзенко Е. И.

Список литературы

- [1] NAGATA S. Mixing. Principles and applications / Japan: Kodasha LTD. 1975. 458 p.
- [2] АНДЕРСОН Д., ТАННЕХИЛЛ Дж., ПЛЕТЧЕР Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Москва: Мир, 1990. Т. 1,2.

2.8. Гончарова Д.В. Математическая модель иммунного и аутоиммунного ответа

В работе рассматривается математическая модель иммунного и аутоиммунного ответа, опосредованного Т-клетками [1–3]. Представленная модель описывает эффекты молекулярной мимикрии, генетических изменений, влияющих на ответ Т-клеток против собственных и чужих антигенов, что также применяется при терапии раковых заболеваний [4]. В данной постановке уделяется особое внимание аутоиммунному лимфопролиферативному синдрому (ALPS) как модельному заболеванию. Математическая модель описывается с использованием обыкновенных и интегро-дифференциальных уравнений, а также включает в себя 6 популяций клеток: «клетки-хозяева» ($i = 1$); чужеродные клетки ($i = 2$); клетки, не экспрессирующие антигены на своей поверхности ($i = 3$); клетки, которые экспонируют определенный антиген ($i = 4$); не подверженные воздействию ($i = 5$) и активные Т-клетки ($i = 6$).

Состояние популяции $i = 3$ в момент времени t определяется функцией

$$n_3 = n_3(t),$$

которая описывает количество клеток в момент времени t . Остальные популяции ($i \neq 3$) в момент времени t характеризуются функцией

$$f_i = f_i(t, u), \quad i \neq 3,$$

описывающей плотность численности популяций. Таким образом, математическая модель описывает-

ся следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1(t, u)}{\partial t} &= k^C f_1(t, u) - \mu^C f_1(t, u)(n_1(t) + n_2(t)) \\ &\quad - \xi_1 f_1(t, u) \int_U e^{-\theta^C(u-u^*)^2} f_6(t, u^*) du^*, \\ \frac{\partial f_2(t, u)}{\partial t} &= k^C f_2(t, u) - \mu^C f_2(t, u)(n_1(t) + n_2(t)) \\ &\quad - \xi_2 f_2(t, u) \int_U e^{-\theta^C(u-u^*)^2} f_6(t, u^*) du^*, \\ \frac{dn_3(t)}{dt} &= -n_3(t) \sum_{k=1}^2 \gamma_k(u^*) f_k(t, u^*) + \mu_4 n_4^2(t), \\ \frac{\partial f_4(t, u)}{\partial t} &= n_3(t) \sum_{k=1}^2 \gamma_k(u) f_k(t, u) - \mu_4 f_4(t) n_4(t), \\ \frac{\partial f_5(t, u)}{\partial t} &= k_5 f_5(t, u) - \mu_5 f_5(t, u) n_5(t) \\ &\quad - \gamma_5(u) f_5(t, u) \int_U e^{-\theta^C(u-u^*)^2} f_4(t, u^*) du^*, \\ \frac{\partial f_6(t, u)}{\partial t} &= f_4(t, u) \int_U e^{-\theta^C(u-u^*)^2} \gamma_5(u_* f_5(t, u_*)) du^* \\ &\quad + k_6 f_6(t, u) - \mu_6 f_6(t, u) n_6(t) \\ &\quad + f_6(t, u) \sum_{k=1}^2 \lambda_k \int_U e^{-\theta^C(u-u^*)^2} f_k(t, u^*) du^*. \end{aligned}$$

Проведено численное исследование задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Современные модели гидродинамики для задач природопользования, индустриальных систем и полярной механики» (2024-26) (гос. задание FZMW-2024-0003)

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Токарева М. А.

Список литературы

- [1] KOLEV M., NETOV N., NIKOLOVA I. ET AL. On a Mathematical Model of a General Autoimmune Disease / Axioms. 2023. Vol. 12. N. 1021.
- [2] DELITALA M., DIANZANI U., LORENZI T., MELENSI M. A mathematical model for immune and autoimmune response mediated by T-cells // Computers and Mathematics with Applications. 2013. Vol. 66. P. 1010–1023.
- [3] TRUSOV P. V., ZAITSEVA N. V., CHIGVINTSEV V. M., LANIN D. V. Mathematical model for describing antiviral immune response regulation allowing for functional disorders in a body // Health Risk Analysis. 2017. N. 4. P. 117–128.
- [4] LAI X., STIFFI A., DUGGAN M. ET AL. Modeling combination therapy for breast cancer with BET and immune checkpoint inhibitors // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. Vol. 115 N. 21. P. 5534–5539.

2.9. Казаков Г.И., Иванов К.О., Пененко А.В. Построение суррогатных нейронных моделей для решения задачи химической кинетики горения метана

Задача моделирования процессов горения является одним из перспективных направлений науки в области математического моделирования. Его развитие имеет большое значение в условиях стремительных технологических изменений, так как помогает оптимизировать работу двигателей и повысить их КПД. Однако классические подходы к решению этой задачи сильно страдают от «проклятия размерности» — более детализированные химические механизмы требуют решения жестких и комплексных систем ОДУ, что затруднительно при моделировании большого количества ячеек реактора.

Для оптимизации вычислительного процесса, в рамках нашего исследования мы разрабатываем и тестируем фреймворк для работы с различными системами химической кинетики с помощью нейронных сетей. В первом блоке методов мы рассматриваем различные архитектуры для интегрирования оригинальной системы: MLP, UNet и KAN. Для их более эффективного обучения рассматриваются различные подходы к предобработке данных и тренировке сетей: Power Transform, авторегрессия, progressive time scaling, BatchNorm, L_2 -регуляризация, кластеризация. Далее рассматривается второй блок подходов, направленных на понижение размерности исходной системы, среди которых наиболее многообещающими являются AutoEncoder архитектуры и алгоритм SINDy для выявления динамики полученной подсистемы. Второй блок методов позволяет разрабатывать гибридные решения, так как может быть скомбинирован как с первым блоком, так и с классическим подходами интегрирования систем ОДУ.

В качестве системы для теста рассматривается GriMech3.0 — горение метана. Сначала данный механизм моделируется на уровне одного реактора, затем мы объединяем реакторы и добавляем эффект диффузии между ними. С данной постановкой проверяется точность, скорость, затраты ресурсов и надежность разработанной библиотеки инструментов по сравнению с традиционными методами интегрирования жестких систем ОДУ.

2.10. Кануткин А.В., Радченко П.А., Батуев С.П., Радченко А.В. Моделирование поведения гетерогенных преград при динамическом нагружении с применением технологии Nvidia CUDA

В работе рассматривается поведение современных защитных конструкций при динамических нагрузках. Показана эффективность применения многослойных конструкций с высокотвердыми керамическими покрытиями. Керамика располагается на фронтальной поверхности защитной конструк-

ции, на подложке, которая обеспечивает защиту от фрагментов керамики и ударника. В качестве подложки используются пластичные металлические сплавы, полимерные материалы, композиты на основе углепластиков или органопластиков. В данной работе численно моделируется взаимодействие стального ударника с трехслойной преградой. Материал верхнего слоя преграды — В4С, последующие слои состоят из алюминиевого сплава Д16Т и композиционного органопластика. Исследуется широкий диапазон начальных скоростей взаимодействия и углов встречи. Моделирование проводится в полной трехмерной постановке методом конечных элементов с использованием авторского алгоритма и программного комплекса. При моделировании применяются технологии параллельных вычислений OpenMP и Nvidia CUDA, которые позволяют существенно повышать скорость расчета и качество численного эксперимента. В работе проведена апробация и валидация математических моделей поведения применяемых материалов. Изучено влияние последовательности расположения металлического и композитного слоя на защитные свойства преграды. Выявлена эффективность параллелизации программного кода и проведено сравнение скорости расчета на центральном процессоре и видеоускорителе. Определено влияние геометрических и кинематических параметров на явление рикошета. Исследовано влияние ориентации осей симметрии ортотропного композита на ударно-волновую картину и разрушение слоистой преграды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 24-21-00421, <https://rscf.ru/project/24-21-00421/>).

2.11. Каратаева Е.А. Численное моделирование распространения нагретой примеси из точечных источников с помощью лагранжевой дисперсионной стохастической модели

Для моделирования распространения загрязняющих выбросов в атмосферу из труб промышленных предприятий разрабатывается лагранжева дисперсионная стохастическая модель [1, 2], важным преимуществом которой является бессеточность, позволяющая получать более точные результаты в окрестности источника по сравнению с численной реализацией эйлеровых моделей переноса примеси. Модель использует атмосферные данные мезомасштабной модели прогноза погоды [3], учитывает турбулентные характеристики среды и начальный подъем нагретой примеси. Учет начального подъема примеси над источником в силу наличия начальной скорости и высокой температуры позволяет более точно моделировать её распространение.

На сегодняшний день существует несколько моделей и множество формул для расчета подъема. В ходе сравнения наилучшей оказалась модель Хар-

ли [1]. Традиционно используемая в различных источниках формула Бригса дает завышенные результаты; модель подъема облака [4] дает заниженные результаты; более близким к предельным значениям высоты подъема примеси всегда остается результат, получаемый по модели Харли.

Для относительно экстремальной ситуации выхода примеси с высокой скоростью, сильного ветра и большой разности температур картина несколько меняется, но модель Харли по-прежнему показывает себя достаточно хорошо, демонстрируя соответствующий физике процесса подъем, в то время как формула Бригса, например, дает явно заниженные результаты.

Выбранная в результате исследования модель подъема нагретой примеси использовалась для численного расчета с помощью лагранжевой дисперсионной стохастической модели распространения примеси от высотного точечного источника в конвективном пограничном слое. Получено хорошее согласование с известными данными.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Старченко А. В.

Список литературы

- [1] HURLEY P. The air pollution model (TAPM) version 2. Part 1, Technical description // CSIRO Atmospheric Research Technical Paper. 2002. Art. 55.
- [2] Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф. Т. М. Ньистадта, Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 350 с.
- [3] Старченко А. В., Кижнер Л. И., Данилкин Е. А. и др. Численное моделирование погоды и качества атмосферного воздуха в городах / Томск: Изд-во ТГУ, 2022. 140 с.
- [4] Авраменко М. И., Вронский А. В., Бишов С. Н. и др. Модели и программы для расчета подъема облака после взрыва в атмосфере. Отчет РФЯЦ-ВНИИТФ. ПС.97.6607/4, 1997.

2.12. Кащеева А.Е. Математическое моделирование критических состояний дискретно неоднородных соединений с границей в виде двухзвенной ломаной

Рассматриваются критические состояния дискретно-неоднородных соединений в условиях плоской деформации. Граница между участками разной прочности предполагается двухзвенной ломаной или содержит такой фрагмент. Исследуются особенности математических моделей таких состояний в виде полей характеристик (линий скольжения).

Своеобразие напряженного состояния такого соединения имеет два важных обстоятельства: в критический момент нагружения более прочные (БП) участки соединения, находящиеся рядом с менее прочной (МП) частью, могут переходить в состояние текучести, что приводит к неполной реализации контактного упрочнения МП участка; напряжения

в пластической зоне могут быть разрывными вследствие наложения полей характеристик [1], причем не только из-за геометрических особенностей образца, как в [1], но и вследствие дискретной неоднородности материала конструкции [2,3]. Критическое состояние дискретно-неоднородного соединения и, в конечном счете, его прочность существенно зависят от угла наклона границы между участками разной прочности. Этот угол влияет на положение и размеры пластических зон в БП части соединения, а также на положение, длину и направление линий разрыва напряжений в пластических зонах.

В работе впервые показано, что зона вовлечения материала БП участка в пластическое деформирование может не прилегать к свободной границе, и линии разрыва напряжений могут располагаться и в МП части соединения. Описаны конкретные ситуации, при которых реализуются критические состояния дискретно-неоднородных соединений с указанными особенностями.

Список литературы

- [1] Качанов Л. М. Основы теории пластичности / М.: Наука, 1974. 310 с.
- [2] Дильман В. Л. Напряженное состояние и прочность неоднородной пластической полосы с дефектом в более прочной части // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2010. №. 2. С. 89–102.
- [3] Дильман В. Л., Ерошкина Т. В. Математическое моделирование критических состояний мягких прослоек в неоднородных соединениях / Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. 276 с.

2.13. Ключанцев В.С. Гибридная МКЭ/МСЧ схема дискретизации для моделей с нелокальным накоплением повреждений в пластичных материалах

В задачах механики твердого тела применяются как сеточные методы, включая метод конечных элементов (МКЭ), так и бессеточные, такие как метод сглаженных частиц (МСЧ) [1,2]. При умеренных конечных деформациях, континуум дискретизируется с помощью МКЭ с большей точностью, чем с помощью МСЧ. Однако, при больших деформациях точность аппроксимации МКЭ снижается из-за существенных искажений сетки, поэтому для построения численных решений лучше подходит МСЧ. В частности, с помощью МСЧ более корректно моделируется образование новых свободных поверхностей.

В работе представлен гибридный подход к моделированию нелинейных деформаций твердых тел, который сочетает МКЭ и МСЧ. Основное внимание уделено плавному переходу между двумя подходами к описанию деформаций континуума (МКЭ и МСЧ) в ходе вычислений. При этом объем расчетной области динамически перераспределяется между элементами МКЭ и частицами МСЧ, что позволяет эффективно моделировать локализа-

цию деформаций и разделение конструкции на части при ее разрушении. Подход разработан таким образом, чтобы снизить вычислительные затраты за счет применения смешанного алгоритма для ассемблирования вектора внутренних сил. Такая гибридная схема объединяет преимущества обоих методов, одновременно минимизируя их недостатки.

В рамках гибридной схемы МКЭ/МСЧ имплементированы нелокальные модели накопления повреждений интегрального типа [3, 4]. Эти модели предотвращают появление неустойчивых решений, а также устраняют патологическую зависимость результатов моделирования от размера конечных элементов и мелкости дискретизации. Делокализация величин, связанных с повреждением, реализована через интегральное сглаживание [3], что позволяет достичь физически корректного описания процессов разрушения.

Представлена иерархия задач для численного тестирования гибридной схемы. Численные эксперименты включают задачу о простом сдвиге для модели упругости, а также задачи растяжения конструкции с V-образными вырезами из повреждаемого упругопластического материала. Рассмотренные примеры демонстрируют ключевые преимущества гибридного подхода, включая высокую точность и стабильность решений при работе с неравномерными сетками и сложными напряженно-деформированными состояниями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-19-00514).

Список литературы

- [1] MONAGHAN J. J. Smoothed particle hydrodynamics // Annual review of astronomy and astrophysics. 1992. Vol. 30. P. 543–574.
- [2] SHUTOV A. V., KLYUCHANTSEV V. S. On the application of SPH to solid mechanics // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1268. P. 012077.
- [3] BAŽANT Z. P. AND JIRÁSEK M. Nonlocal integral formulations of plasticity and damage: survey of progress // Journal of Engineering Mechanics. 2002. Vol. 128. P. 1119–1149.
- [4] SHUTOV A. V., KLYUCHANTSEV V. S. Large strain integral-based nonlocal simulation of ductile damage with application to mode-I fracture // International Journal of Plasticity. 2021. Vol. 144. P. 103061.

2.14. Кобзарь Д.Ю., Марчевский И.К. Быстрые алгоритмы решения граничных интегральных уравнений в вихревых методах при моделировании обтекания профилей

При моделировании плоских течений несжимаемой среды с использованием вихревых методов вычислительной гидродинамики возникает необходимость решения граничного интегрального уравнения (ГИУ) относительно интенсивности вихревого слоя (или двойного слоя) на профиле.

Классические реализации вихревых методов предполагают решение сингулярного или гиперсингулярного ГИУ, что с учетом невысокой точности существующих численных схем приводит к недостаточной точности моделирования течений.

В [1] показана возможность перехода к математической модели — ГИУ, вида

$$\int_K \frac{\mathbf{n}(\mathbf{r}) \cdot (\mathbf{r} - \boldsymbol{\xi})}{2\pi|\mathbf{r} - \boldsymbol{\xi}|^2} \gamma(\boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\xi} - \alpha(\mathbf{r}) \gamma(\mathbf{r}) = f(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \in K,$$

под интегралом в котором стоит ограниченная или абсолютно интегрируемая величина. Дискретным аналогом ГИУ является СЛАУ; разработаны эффективные схемы 1-го и 2-го порядка для кусочно-постоянного и кусочно-линейного представления решения на участках профиля [1].

На практике непосредственное использование такого подхода возможно лишь при небольшой размерности задачи: с учетом того, что матрица СЛАУ полностью заполнена и несимметрична, даже вычисление и хранение N^2 ее компонентов требуют значительных затрат времени и памяти. Решение прямым методом Гаусса требует $N^3/3$ операций, итерационными методами — $k \cdot N^2$ операций.

Решением проблемы является переход к использованию итерационных методов (BiCG, BiCGStab, GMRES), при этом для умножения матрицы на вектор внутри итерационной процедуры можно использовать приближенные быстрые алгоритмы квазилинейной сложности: данную операцию можно рассматривать как обобщение процедуры вычисления вихревого влияния, для которой подобные алгоритмы разработаны в [2].

В докладе представлены результаты исследования эффективности применения различных итерационных методов крыловского типа с предобуславливателями. Для численного решения ГИУ разработан алгоритм, требующий непосредственного вычисления и хранения только $O(N)$ компонент матрицы и имеющий квазилинейную вычислительную сложность (теоретическая оценка — $O(N \ln^2 N)$). Алгоритм реализован в виде программного модуля для пакета VM2D и позволяет также решать системы ГИУ, возникающие при моделировании обтекания нескольких профилей. Созданный алгоритм позволяет решать сопряженные задачи гидроупругости для систем профилей.

Список литературы

- [1] МАРЧЕВСКИЙ И. К., СОКОЛ К. С., ИЗМАЙЛОВА Ю. А. Т-схемы для математического моделирования генерации завихренности на гладких профилях в вихревых методах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2022. № 6. С. 33–59.
- [2] MARCHEVSKY I., RYATINA E., KOLGANOVA A. Fast Barnes–Hut-based algorithm in 2D vortex method of computational hydrodynamics // Computers & Fluids. 2023. V. 266. Art. 106018.

2.15. Когай А.Д. Компьютерное моделирование процессов гидратации цементных систем с учетом испарения жидкой фазы

Компьютерное моделирование гидратационных процессов цементных систем в присутствии инертного заполнителя позволяет анализировать изменение состава компонентов в ходе химических превращений и стадию реакции с возможностью оперативной корректировки технологического режима подготовки композиционных реакционных материалов на основе цемента. В основе разработанной модели лежит новый подход моделирования, включающий в себя макрокинетические химические превращения, процессы теплопереноса и фильтрации, обеспечивающие начальное структурообразование композита. Термомеханическое состояние и фазовый состав реагирующей гетерогенной среды рассматриваются одновременно на макро- и микроскопических уровнях с учетом макроскопической структуры неоднородности [1]. Базовая концепция моделирования гидратации исходного цементного компонента в присутствии песка расширена учетом фазовых превращений, сопровождающих испарение жидкости с поверхности композита. Внедрение новых алгоритмов расчета приближает моделируемый процесс к реальному сценарию твердения. Стоки тепловой энергии зависят как от параметров внешней среды, так и от температуры испаряемой воды на каждом шаге по времени, изменяющейся в связи с экзотермичностью гидратационных процессов. Разработанная модель позволяет изучить главные закономерности ранней гидратации цементного композита при различных условиях, а также спрогнозировать сценарий развития свойств при заданных значениях пористости, концентрационной неоднородности, параметров среды и т. д. Полученное соответствие между итогами вычислительного эксперимента и результатами натуральных испытаний подтверждает адекватность и корректность разработанной модели для дальнейшего внедрения на производства композиционных материалов на основе цемента с целью создания материалов с заданными свойствами.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Дмитриева М. А.

Список литературы

- [1] Лейцин В.Н., Дмитриева М.А. Моделирование связанных процессов в реагирующих средах: монография / Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2012. 240 с.

2.16. Колганова А.О., Марчевский И.К. Эффективные алгоритмы вихревых методов при решении сопряженных задач гидроупругости в плоской постановке

Современные модификации бессеточных вихревых методов применяются для решения многих ин-

женерных задач, связанных с моделированием течений несжимаемых сред и оценкой их воздействия на обтекаемые тела, в том числе подвижные или деформируемые.

В [1, 2] указано, что для решения актуальных задач требуется высокая разрешающая способность: для моделирования завихренности необходимо $N \sim 10^5 \dots 10^7$ вихревых частиц, а для моделирования обтекаемых контуров — $M \sim 10^3 \dots 10^5$ отрезков-панелей.

Прямые алгоритмы выполнения основных операций имеют квадратичную вычислительную сложность. В итоге уменьшение вдвое длины отрезков-панелей на контурах приводит к 4-кратному росту числа вихревых частиц, что дает 16-кратное время расчета их взаимного влияния. «Согласованное» двукратное уменьшение шага по времени приводит к тому, что сложность увеличивается в 32 раза.

В докладе представлены оригинальные модификации приближенного быстрого алгоритма [3], разработанные для выполнения основных операций:

- расчет скоростей движения вихревых частиц, обусловленных их взаимным влиянием;
- расчет правой части и решение граничного интегрального уравнения, описывающего генерацию завихренности на профилях;
- восстановление поля скоростей и поля давления;
- реструктуризация вихревого следа;
- контроль проникновения вихревых частиц внутрь профилей.

Для всех операций используется единый подход: построение k - d деревьев в форме линейных массивов, их однократная предобработка (обход вверх) и многократный обход вниз.

Для наиболее затратных процедур созданы реализации для CPU и GPU. Для расчета скоростей вихрей реализован оригинальный быстрый алгоритм, позволивший также резко снизить сложность решения ГИУ; для реструктуризации следа использован эвристический метод поиска k ближайших соседей; контроль проникновения частиц выполняется путем вычисления знаковой функции расстояния методом псевдонормалей.

Все разработанные алгоритмы обеспечивают квазилинейную вычислительную сложность (и многократную экономию памяти), что позволило производить моделирование в сопряженных задачах гидроупругости в течение десятков минут физического времени. Приведен пример расчета колебаний Такомского моста и моста Great Belt; полученные значения критической скорости ветра (скорости флаттера) хорошо согласуются с известными в литературе.

Список литературы

- [1] KUZMINA K., MARCHEVSKY I., SOLDATOVA I., IZMAILOVA Y. On the scope of Lagrangian vortex methods for two-dimensional flow simulations and the POD technique application for data storing and analyzing // Entropy. 2021. Vol. 23. Art. 118.
- [2] MARCHEVSKY I., SOKOL K., RYATINA E., IZMAILOVA Y. The VM2D open source code for two-dimensional incompressible flow simulation by using fully Lagrangian vortex particle methods // Axioms. 2023. Vol. 12. Art. 248.
- [3] MARCHEVSKY I., RYATINA E., KOLGANOVA A. Fast Barnes–Hut-based algorithm in 2D vortex method of computational hydrodynamics // Computers & Fluids. 2023. Vol. 266. Art. 106018.

2.17. Котов С.В., Арендаренко М.С., Джанбекова А.Р., Малютин М.С., Савватеева Т.А., Самойлов М.В., Утюпина В.Ю. Библиотека символьных вычислений для генерации дисперсионных соотношений для уравнений в частных производных и их дискретных аналогов

Математические модели многих процессов в механике сплошных сред, физике плазмы и астрофизике представляют собой уравнения в частных производных. Для исследования этих моделей и соответствующих численных алгоритмов развита техника построения дисперсионных соотношений (ДС). Классическое ДС — это нелинейное алгебраическое уравнение, связывающее параметры волны: волновое число k и волновую частоту ω . Существует техника, которая позволяет поставить в соответствие континуальной или дискретной модели дисперсионное соотношение (классическое или приближенное). Однако, явный алгоритм нахождения ДС не был формализован и работа с каждой моделью требовала большого количества ручного труда и повышенного внимания со стороны исследователя. При этом, несмотря на развитие систем символьной математики и востребованность решения задач, этот процесс не был автоматизирован.

Авторы данной работы формализовали алгоритм нахождения классических и приближенных дисперсионных соотношений для квазилинейных однородных систем одномерных уравнений и их дискретных конечно-разностных аналогов. Помимо этого, был реализован генератор ДС в виде библиотеки для символьных вычислений.

Библиотека была реализована на языке Python на основе библиотеки для символьных вычислений SymPy. Для верификации были использованы уравнение Хопфа, система уравнений DustyBurgers [1] и их дискретные аналоги. Расчеты подтвердили корректность получаемых генератором ДС.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (грант № 23-11-00142).

При поддержке Математического центра в Академгородке, соглашение с Министерством нау-

ки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-282.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Стояновская О. П.

Список литературы

- [1] STOYANOVSKAYA O. P., TUROVA G. D., YUDINA N. M. Dispersion and Group Analysis of Dusty Burgers Equations // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2024. T. 45. N. 1. С. 108–118.

2.18. Куткин Л.И., Семисалов Б.В., Шанеев В.П. Решение задачи Дирихле для уравнения Пуассона методом коллокаций с аппроксимацией Паде

Уравнение Пуассона (УП) описывает широкий спектр физических явлений: безвихревые движения жидкостей и газов, электрический и гравитационный потенциалы и другие. Поиск высокоточных решений УП при наличии особенностей искомой функции представляет актуальную проблему. Для решения УП предложены методы конечных разностей, конечных элементов, спектральные методы. В этой работе мы применили метод коллокаций и наименьших квадратов (КНК). В [1] этот метод развит на основе полиномиальных приближений.

Однако в случаях задач с особенностями точности приближения в базисе из полиномов оказывается недостаточно. В работе решена двумерная задача Дирихле для УП

$$\Delta U = f(x, y), (x, y) \in \Omega, \quad U|_{\partial\Omega} = g(x, y), \quad \Omega = \{(x, y) : 0 \leq x, y \leq 1\} \quad (1)$$

методом КНК с дробно-рациональной аппроксимацией Паде (АП). Новизна заключается в том, что по образцу [2] мы приближаем решение отношением двух полиномов от двух переменных

$$U(x, y) = P(x, y)/M(x, y), \quad (2)$$

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^S \sum_{j=0}^i c_{ij} x^{i-j} y^j, \\ M(x, y) = 1 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^i t_{ij} x^{i-j} y^j.$$

Отношение (2) подставляется в уравнение и в граничные условия задачи (1). В результате получаются соотношения

$$\Delta P = Mf + 2(U_x^k M_x + U_y^k M_y) + U^k \Delta M, \quad (3)$$

$$P - Mg = 0. \quad (4)$$

Отметим, что (3) получено с применением линеаризации: для поиска M и P из него требуется взять решение U^k с предыдущей итерации по нелинейности. Уравнения (3) и (4) далее записываются в узлах, распределенных равномерно внутри Ω и на $\partial\Omega$.

Таким образом, на очередной итерации требованием выполнения соотношений (3) и (4) в узлах сетки строится переопределённая СЛАУ на коэффициенты числителя и знаменателя, которая решается методом наименьших квадратов с помощью QR-декомпозиции её матрицы. Преимуществом АП по сравнению с полиномиальной является возможность существенного уменьшения погрешности.

Нами рассмотрена тестовая задача (1) при $f(x, y) = g(x, y) = \exp(x) + \exp(y)$ и с точным решением $U(x, y) = \exp(x) + \exp(y)$. В Таблицах 1 и 2 приведены данные о наиболее точных решениях, полученных с использованием полиномиальных базисов и АП.

Таблица 1. Результаты с применением полиномов.

Grid	Deg	R	Cond	СПС
12×12	10	6.26e−11	1.46e+08	2.12

Таблица 2. Результаты с аппроксимацией Паде.

Grid	Deg	R	Cond	СПС
11×11	7/8	8.1348e−13	5.0285e+16	1.4625

Здесь Grid — число узлов, Deg — степень аппроксимирующего полинома (в случае АП вначале пишется степень числителя, затем — знаменателя), R — относительная погрешность решения, Cond — число обусловленности СЛАУ, СПС (степень переопределённости СЛАУ) — отношение числа строк матрицы (число точек коллокации и граничных точек) к числу столбцов (число искоемых коэффициентов аппроксиманта).

Видно, что помимо увеличения точности при использовании АП существенно уменьшается размер сетки, а значит и время расчёта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-21-00499).

Список литературы

- [1] ШАПЕЕВ В. П., БЕЛЯЕВ В. А., ИДИМШЕВ С. В. Варианты метода коллокаций и наименьших квадратов повышенной точности для численного решения уравнения Пуассона // Выч. технологии. 2011. Т. 16. № 1. С. 85–93.
- [2] ШАПЕЕВ В. П. Решение задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений методом коллокации и наименьших квадратов с аппроксимацией Паде // Вестник ЮУрГУ. Серия «ММП». 2023. Т. 16. № 4. С. 71–83.

2.19. Лукьянов А.А., Шалин А.М. Численное исследование теплового слоя внутри капли жидкости при её взаимодействии с нагреваемой поверхностью

При наличии температурного градиента и теплового потока, сложно разделить влияние теплообмена и конвекции на распространение капли на стенке,

так как они взаимосвязаны. Зависимости для учёта влияния формы капли при разной смачиваемости на теплообмен рассмотрены в [1]. При растяжении капли на стенке, в донной части капли формируются динамический и тепловой слои с толщиной пристенного пограничного слоя δ и δ_T [2]. Кроме этого, из-за большого температурного градиента в окрестности контактной линии капли, возникает течение Марангони, которое способствует вихреобразованию в жидкости и усиливает теплообмен [2]. Численное моделирование капли проводится с помощью открытого программного кода Basilisk. Ключевое преимущество Basilisk заключается в том, что он предоставляет инфраструктуру для сетки окто-/квадродерева для пространственной дискретизации, что даёт важную возможность адаптировать сетку в определяемых пользователем регионах. Эта функция адаптивного измельчения сетки имеет решающее значение для эффективного моделирования межфазных многофазных потоков с испарением, которое будет рассмотрено в будущем. Для захвата границы интерфейса используется метод volume of fluid. Также с помощью кода решаются уравнения Навье — Стокса и уравнение диффузии. Расчетная область представляет собой куб с размерами $5 \times 5 \times 5$ мм. На нижней границе устанавливается условие непротекания, задается динамический контактный угол и значение постоянной температуры. В начальный момент времени сферическая капля радиусом 1.05 мм помещается в середине расчетной области на высоте 2.5 мм над нагреваемой стенкой. Теплофизические свойства среды соответствовали воде и воздуху. В ходе работы было проведено моделирование падающей капли на нагреваемую поверхность. Показано изменение градиента температуры внутри капли с течением времени, рассмотрены разные подходы для установления температуры на стенке. Исследовано влияние конвекции в потоке на теплообмен в капле, а также влияние сил Марангони. Исследовано изменение средней температуры капли при учете нагрева воздуха вокруг капли и при локальном нагреве одной капли без воздуха.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-71-10081).

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Возжаков И. С.

Список литературы

- [1] MISYURA S. Y. Dependence of wettability of microtextured wall on the heat and mass transfer: Simple estimates for convection and heat transfer // Intern. J. of Mechanical Sciences. 2020. N. 170.
- [2] SEMYONOVA A., KHMUTOV N., MISYURA S., PISKUNOV M. Dynamic and kinematic characteristics of unsteady motion of a water-in-oil emulsion droplet in collision with a solid heated wall under conditions of convective heat transfer // Intern. Communications in Heat and Mass Transfer. 2022. N. 137.

2.20. Макаров Е.Е. Моделирование двухслойных течений с испарением в наклонном канале в условиях теплоизоляции верхней стенки канала

Конвективные течения часто встречаются во многих природных и технических процессах. Интерес к построению точных решений, описывающих конвективные течения с границами раздела, возник ввиду возможности проведения анализа влияния различных физико-химических и геометрических параметров задачи на характер процессов. Модели конвективного теплопереноса в общем случае носят нелинейный характер, поэтому построение их точных решений представляет собой достаточно интересную задачу с математической точки зрения [1, 2].

Рассмотрена следующая задача. Пусть вязкая несжимаемая жидкость и парогазовая смесь заполняют бесконечный наклонный канал с фиксированными толщинами слоев h_1 и h_2 , соответственно. Пар полагается пассивной примесью и не влияет на свойства газа. Система координат выбрана так, что граница раздела, остающаяся недеформируемой, совпадает с осью абсцисс. Вектор силы тяжести $\mathbf{g}$ направлен под углом φ относительно подложки.

Построено новое точное решение типа Остроумова — Бириха задачи о конвекции в наклонном канале с твёрдыми непроницаемыми стенками с учётом тепло- и массопереноса на недеформируемой термокапиллярной границе раздела при условии теплоизоляции верхней стенки канала. В верхнем слое учтены эффекты термодиффузии и диффузионной теплопроводности. Расходы сред полагаются заданными и принимаются в качестве замыкающих соотношений. Данная постановка задачи отличается от используемых ранее в требовании выполнения условия теплоизоляции верхней стенки канала, что ведёт к изменению систем уравнений, определяющих константы интегрирования искомых функций продольной скорости, температуры и концентрации пара. На примере двухслойной системы «этанол — азот» исследовано влияние величины продольного градиента температуры на интенсивность скорости, распределение температуры и концентрации пара. Установлено, что с ростом значения продольного градиента температуры увеличивается значение массовой скорости испарения.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Современные модели гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (2024-26) (гос. задание FZMW-2024-0003)

Список литературы

- [1] Гончарова О. Н., Резанова Е. В., Люлин Ю. В., КАВОВ О. А. Изучение конвективных течений жидкости и спутного потока газа с учетом испарения //

Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 6. С. 720–732.

- [2] Гончарова О. Н., Резанова Е. В. Пример точного решения стационарной задачи о двухслойных течениях с испарением на границе раздела // ПМТФ. 2014. № 2. С. 68–79.

2.21. Максимова А.А., Рыжков И.И. Сравнительный анализ аналитических и численных моделей концентрационной поляризации в установке тангенциальной фильтрации

Для разделения, очистки и концентрирования растворов широко используются баромембранные процессы: микрофильтрация, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос. В данных процессах создается трансмембранная разность давлений, которая вызывает поток растворителя и растворенного вещества через мембрану. Растворенное вещество полностью или частично задерживается мембраной, в результате чего на ее поверхности возникает высококонцентрированный слой, оказывающий сопротивление массопереносу. Это явление называется концентрационной поляризацией [1].

Поляризационные явления сопровождают многие мембранные процессы разделения. Так как падение потока негативно сказывается на технико-экономических показателях мембраны, необходимо принимать меры для устранения эффектов, связанных с этим явлением. Для уменьшения проявлений концентрационной поляризации применяют перемешивание раствора, регулируют скорость потока вдоль мембраны либо влияют на коэффициент массопереноса путем изменения форм и размеров модуля, снижая длину или увеличивая его гидродинамический диаметр [2]. Для более глубокого понимания и предсказания эффектов концентрационной поляризации активно используется математическое моделирование. Ранее в работах были рассмотрены одномерные (пленочные) модели и двумерные модели концентрационной поляризации, которые показали хорошее согласие с экспериментальными данными [3].

Целью работы является сравнительный анализ численных и аналитических моделей, описывающих явление концентрационной поляризации в установке тангенциальной фильтрации с радиальным течением раствора. В работе были рассмотрены двумерная осесимметричная и трехмерная математические модели течения растворителя и растворенного вещества (водный раствор хлорида калия) в фильтрационной ячейке с мембраной в виде плоского диска заданного диаметра. Данные численные модели сравниваются с моделями, основанными на автомобильных решениях упрощенных уравнений движения и массопереноса, позволяющих прогнозировать концентрацию на поверхности мембраны для развивающегося концентрационного пограничного слоя.

В работе [4] на основе автомодельного решения упрощенных уравнений движения и массопереноса были получены корреляции для зависимостей концентрации на поверхности мембраны от скоростей входного потока и потока через мембрану, радиуса ячейки и гидродинамических размеров модуля.

Показано, что при фиксированной скорости сырьевого потока увеличение скорости через мембрану увеличивает концентрацию вблизи нее, а при фиксированной скорости потока через мембрану увеличение скорости сырьевого потока уменьшает среднюю концентрацию и влияние концентрационной поляризации. Также было показано хорошее согласие данных, полученных на основе численного расчёта в Ansys Fluent с корреляциями, полученными из автомодельного решения упрощенных уравнений движения и массопереноса. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования дизайна фильтрационной ячейки с радиальным течением раствора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-19-00269).

Список литературы

- [1] ZYDNEY A. L. Stagnant film model for concentration polarization in membrane systems // Journal of Membrane Science. 1997. Vol. 130. P. 275–281.
- [2] MIRANDA M., CAMPOS J. B. L. M. Concentration polarization in a membrane placed under an impinging jet confined by a conical wall — a numerical approach // Journal of Membrane Science. 2001. Vol. 130. P. 257–270.
- [3] SABLANI S. S., GOOSENA M. F. A., AL-BELUSHI R., WILF M. Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review // Desalination. 2001. Vol. 141. P. 269–289.
- [4] DE S., BHATTACHARYA P. K. Prediction of mass-transfer coefficient with suction in the applications of reverse osmosis and ultrafiltration // Journal of Membrane Science. 1997. Vol. 128. P. 119–131.

2.22. Малофеев Н.Г., Наумкин В.С. Моделирование влияния оребрения дозвукового тракта трубы Леонтьева на эффективность газодинамического энергоразделения

В [1] был предложен способ температурной стратификации газа и предложено устройство (труба Леонтьева) для его получения. Труба Леонтьева работает по следующему принципу: теплопроводная пластина обдувается с одной стороны дозвуковым потоком, с другой – сверхзвуковым. В результате такой организации потоков газа температура поверхности пластины в дозвуковом потоке будет выше температуры в сверхзвуковой части. Вследствие этого возникает тепловой поток, охлаждающий дозвуковую часть потока и нагревающий сверхзвуковую. На температуру стенки сильное влияние оказывает значение коэффициента восстановления температуры, зависящее от числа Прандтля газовой

смеси. Чем ниже значение числа Прандтля, тем выше эффект энергоразделения. Поэтому в качестве рабочего тела в трубе Леонтьева предлагается использовать гелий-ксеноновые смеси с низкими значениями числа Прандтля $Pr = 0.23$ (для воздуха $Pr = 0.7$).

Для увеличения холодильного КПД трубы Леонтьева предлагается использовать оребренную дозвуковую часть трубы. В данной работе представлены результаты моделирования влияния оребрения дозвукового тракта трубы Леонтьева на эффективность энергоразделения и сравнение с трубой без оребрения. Решалась система уравнений Навье—Стокса, дополненная $k-\omega$ SST моделью турбулентности. Свойства рабочего тела (смесь гелия и ксенона) рассчитывались в соответствии с работой [2] по параметрам на входе в трубу. Расчёт проводился в пакете Ansys Fluent 2020 R2. Задача решалась в 2D и 3D постановках. Были получены поля температур и скоростей. Проанализировано влияние оребрения дозвукового тракта на эффективность энергоразделения.

Список литературы

- [1] ЛЕОНТЬЕВ А. И. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева) (свидетельство № 2106581) / М.: РФ. Заявл 23.05.1996 (Роспатент), 10.03.1998.
- [2] TOURNIER J. M., GENK M. S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton cycle applications // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. N. 3. P. 469–492.

2.23. Найденова К.Е., Сибирякова Т.А. Моделирование распространения волн в полубесконечной ледовой пластине с учетом эффектов демпфирования

В последнее время актуальными являются исследования, изучающие взаимодействия между ледовым покровом и прибрежными сооружениями, такими как стенки (причалы), опоры (поддержки мостов и нефтяных платформ) и др. Рассмотрены задачи движения нагрузки в канале, у края ледового покрова, между двумя ледовыми покровами, по жидкой поверхности вдоль края ледового покрова [1] и другие. Эти модели применяются не только для описания ледового покрова, но и для других плавучих упругих конструкций, таких как причалы и волнорезы [2].

В данной работе рассматриваются колебания полубесконечного тонкого ледового покрова, которые могут быть вызваны: а) набегающей волной, б) осцилляциями внешней нагрузки, расположенной на свободной поверхности вблизи ледового покрова. Новизной является учет демпфирующих эффектов льда для описания затухания колебаний в рассматриваемой постановке.

Задача формулируется в рамках линейной теории гидроупругости и решается в двумерной постановке в декартовой системе координат Oxz . Рассматриваются периодические постановки задачи, в которых время играет роль параметра и итоговые уравнения записываются в стационарном виде без времени. Лед моделируется тонкой полубесконечной вязкоупругой пластиной постоянной толщины, лежащей на жидком основании глубины H . Вязкие свойства пластины моделируются через учет времени запаздывания в рамках модели Кельвина — Фойгта. Жидкость считается невязкой и несжимаемой, а течение жидкости потенциальным. В случае (а) лед занимает правую часть оси x ($x \geq 0$). Предполагается, что левый край пластины не закреплен. Слева от пластины находится полубесконечная свободная поверхность. Возмущение моделируется бегущей волной с заданными амплитудой, частотой и волновым числом, которая движется слева направо до ледовой пластины. В этом случае, при решении задачи, учитываются отраженная от пластины гравитационная волна и проходящая в пластины гидроупругая волна. Последняя затухает при отдалении от свободного края пластины. В случае (б) возмущения вызваны периодическими осцилляциями внешней нагрузки, находящейся на свободной поверхности. В этом случае, свободная поверхность слева ограничена непроницаемой стенкой. Для описания прогибов и деформаций в ледовом покрове используется метод вертикальных мод [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-71-01096, <https://rscf.ru/project/23-71-01096/>).

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Шишмарев К. А.

Список литературы

- [1] SHISHMAREV K., КНАБАКHPASHEVA T. Unsteady Deflection of Ice Cover in a Frozen Channel Under a Moving Load // Computational Technologies. 2019. Vol. 24. N. 2. P. 111–128.
- [2] AMOUZADRAD P., МОНАРАТРА S.C., GUEDES SOARES C. Hydroelastic Response to the Effect of Current Loads on Floating Flexible Offshore Platform // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11. N. 2: 437.
- [3] KOROVBKIN A., MALENICA S., КНАБАКHPASHEVA T. The Vertical Mode Method in the Problems of Flexural-Gravity Waves Diffracted by a Vertical Cylinder // Applied Ocean Research. 2019. Vol. 84. P. 111–121.

2.24. Наумкин В.С. Моделирование влияния геометрических параметров «smart-cut» на величину термодформаций кремниевое зеркала источника синхротронного излучения

Тепловой поток, падающий от источника синхротронного излучения на оптические элементы конструкции синхротронных станций, приводит

к неравномерному распределению температуры на поверхностях данных элементов. Это может привести к возникновению термодформаций. Поэтому возникает необходимость в эффективном отводе теплового потока для обеспечения равномерного распределения температуры, а также в поиске способов, позволяющих уменьшить абсолютную величину термодформаций.

В данной работе рассматривается влияние глубины выреза в «smart-cut» геометрии кремниевое зеркала на величину деформации зеркальной плоскости в сравнении с зеркалом без выреза. Тепловая задача рассматривалась в двух постановках: с учётом и без учёта медного радиатора. Полученное поле температур использовалось для оценки величины термодформации отражающей поверхности зеркала.

Тепловой поток подавался сверху зеркала. Плотность теплового потока задавалась в виде функции от координат. Материал зеркала — кремний. Коэффициент теплопроводности и термического расширения кремния задавался как функции от температуры, полученные после аппроксимации литературных данных. При моделировании без учёта радиатора, в месте соприкосновения зеркала с радиатором задавались условия вынужденной конвекции. На остальных границах задавались условия лучистого теплообмена с окружающей средой. Режим теплообмена считался стационарным. При моделировании с учётом медного радиатора через радиатор задавался постоянный расход охладителя. Поставленная задача решалась в Ansys Fluent и Mechanical версии 2020R2.

Моделирование с учётом радиатора показало, что при малых расходах охлаждающей жидкости, соответствующих коэффициенту теплоотдачи меньше $3000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, в температурных полях наблюдается несимметричность. В случае моделирования без учёта радиатора наблюдается симметричное поле температуры. При больших коэффициентах теплоотдачи в обоих случаях поле температур симметричное. Это говорит о том, что при малых значениях коэффициента теплоотдачи нужно учитывать влияние радиатора. Увеличение коэффициента теплоотдачи больше $6000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ не приводит к существенному изменению поля температуры. Анализ результатов моделирования термодформаций показал, что «smart-cut» позволяет уменьшить величину термодформаций на порядок, по сравнению с зеркалом без выреза.

2.25. Ни А.Э. Математическое моделирование процесса турбулентного конвективно-радиационного теплопереноса гибридным решеточным методом Больцмана высокого порядка точности

Несмотря на значительный прогресс в области численных методов и вычислительной техники,

естественная конвекция в закрытых полостях хорошо изучена только при умеренных числах Рэлея. При дальнейшем увеличении подъёмной силы формируется развитый турбулентный поток, который чаще всего и реализуется в реальных инженерных приложениях. В этом случае типичной практикой является использование уравнений Навье — Стокса с усреднением по Рейнольдсу (RANS). Однако RANS в основном разрабатывался для задач вынужденной конвекции, поэтому этот подход часто воспроизводит характеристики тепловой конвекции с большой погрешностью при высоких числах Рэлея даже при использовании пристенных функций [1]. С другой же стороны, к текущему моменту очень слабо развиты универсальные подходы для прямого численного моделирования развитых турбулентных термогравитационных течений с приемлемым временем расчета программ. Целью работы является разработка нового подхода, предназначенного для псевдо-прямого численного моделирования процесса совместного переноса теплоты турбулентной естественной конвекции и тепловым поверхностным излучением. Расчет поля течения предлагается производить на основе мезоскопических решеточных уравнений Больцмана без привлечения уравнений Навье — Стокса. При этом термодинамические характеристики рассчитываются путем конечно-разностного решения макроскопического уравнения энергии.

Рассматривалось термогравитационное течение в замкнутой прямоугольной области с боковым нагревом/охлаждением. Предполагалось, что теплообмен излучением осуществляется только между серыми диффузными стенками, ограничивающими воздушную полость. В ходе математического моделирования установлены значения параметров (число Рэлея, кондуктивно-радиационный параметр, степень черноты), при которых происходит ламинарно-турбулентный переход. Проанализированы локальные, средние и турбулентные характеристики конвективно-радиационного теплопереноса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 24-71-00009).

Список литературы

- [1] BARAKOS G., MITSOUKIS E. Natural convection flow in a square cavity revisited: Laminar and turbulent models with wall functions // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 1994. Vol. 49. P. 727–739.

2.26. Патрин Г.А. Использование модели кольцевого волоконного резонатора для изучения динамики солитонов в оптической линии связи

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) являются наиболее востребованным способом передачи данных за счёт множества преимуществ перед другими средствами передачи информации

на большие расстояния [1]. Однако в наши дни из-за стремительных темпов роста объёма мирового трафика линии связи требуют дальнейшего увеличения пропускной способности. Основным ограничением роста пропускной способности в ВОЛС является наличие нелинейных эффектов [2], влияние которых усиливается с ростом мощности сигнала. Для минимизации влияния этих эффектов можно использовать солитоны в качестве носителей информации. Классическим примером таких импульсов можно назвать фундаментальные солитоны [3], являющиеся стационарным решением нелинейного уравнения Шрёдингера за счёт баланса между дисперсионными и нелинейными эффектами. Однако при этом подходе происходит пренебрежение потерями и усилением в оптическом канале, из-за чего в реальных ВОЛС такие солитоны недостаточно эффективны.

Оптический канал в ВОЛС состоит из повторяющихся секций: участков пассивного волокна, на конце каждого из которых находится усилитель для компенсации оптических потерь. В данной работе, в отличие от классического подхода, предлагается учитывать усиление после каждой секции не точно, а распределённо в активном волокне. Тогда нетрудно заметить, что в кольцевых волоконных резонаторах излучение также многократно проходит через пассивную и активную среды. Эта аналогия позволит использовать методы анализа кольцевых лазеров для ВОЛС.

Одним из инструментов анализа кольцевых волоконных лазеров является его осреднённая модель, являющейся кубическим уравнением Гинзбурга — Ландау:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -i\frac{\beta_2 L_p}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma L_p |A|^2 A + \sigma A + \frac{g_s}{2\Omega_g^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где $A(t, z)$ — комплексная огибающая сигнала, t — время, $z \in [0; 1]$ — продольная координата, L_p — длина пассивного волокна, α_p — параметр ненасыщенных потерь в пассивном волокне, β_2 — коэффициент дисперсии групповых скоростей, γ — коэффициент нелинейности Керра, $g_s(z) = \frac{g_0 L_a}{1 + E(z)/E_{\text{sat}}}$ — коэффициент насыщенного усиления, α_a — параметр ненасыщенных потерь в активном волокне, L_a — длина активного волокна, g_0 — коэффициент усиления по малому сигналу, $E_{\text{sat}} = P_{\text{sat}} \cdot T_{\text{tr}}$ — энергия насыщения, P_{sat} — мощность насыщения,

$E(z) = \int_{-T_{\text{tr}}/2}^{+T_{\text{tr}}/2} |A(t, z)|^2 dt$ — энергия, Ω_g — ширина спектра усиления, $\sigma = \frac{g_s}{2} - \frac{\alpha_p L_p}{2} - \frac{\alpha_a L_a}{2}$,

$T_{\text{tr}} = \frac{L_a + L_p}{c_{\text{med}}}$ — время прохождения периодической секции, c_{med} — скорость света в среде. Известно, что солитонное решение осреднённой модели перио-

дически восстанавливает свою форму в резонаторе. Поэтому для уравнения (1) было найдено приближённое аналитическое стационарное решение в виде последовательности солитонов и использовано в качестве модулирующего сигнала в ВОЛС.

В работе исследуются возможности фазового кодирования информации в солитонной линии связи в зависимости от формы полученных модулирующих импульсов, а также рассматриваются перспективы добавления других форматов кодирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-11-00287).

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Чеховской И. С.

Список литературы

- [1] ДИАНОВ Е. М. От тера-эры к пета-эре // Вестник РАН. 2000. Т. 70. № 11. С. 1010–1015.
- [2] ESSIAMBRE R., KRAMER G., WINZER J. ET AL. Capacity Limits of Optical Fiber Networks // Journal of Lightwave Technology. 2010. Vol. 28. N. 4. P. 662–701.
- [3] MOLLENAUER L. F., GORDON J. P. Solitons in Optical Fibers / Location: Academic Press, 2006. 296 p.

2.27. Пекарская Т.А., Сибин А.Н. Изменение проницаемости мерзлого грунта при интенсивном протаивании

При проектировании и строительстве инфраструктуры в северных регионах важно учитывать риск затопления территорий тальми водами. Промерзание верхнего слоя грунта влияет на его способность впитывать влагу и определяет баланс между склоновым и грунтовым стоками. Поэтому моделирование состояния верхнего слоя грунта во время снеготаяния играет ключевую роль в создании методов расчета и прогнозирования весеннего половодья. Это особенно актуально для сибирских регионов с небольшим количеством гидрологических постов и отсутствием полных рядов наблюдений на них.

Промерзающий/протаивающий грунт рассматривается как однородная среда, состоящая из воды, воздуха, льда и грунта. Частицы грунта и лед, находящийся в порах, образуют твердый пористый скелет. Предполагается, что фазовый переход «вода — лед» может происходить по всей толщине грунта. Используемая в данной работе зависимость для интенсивности фазового перехода «вода-лед» опирается на идеи работ [1, 2].

Было проведено исследование модели промерзания и протаивания грунта с учетом фазовых переходов и капиллярных сил. Разработан конечно-разностный алгоритм для численного решения одномерной задачи, а также выполнена серия численных экспериментов фильтрации воды и воздуха в тающем грунте. Исследовано изменение концентрации льда в пористом скелете, а также пористость и водонасыщенность грунта. Эксперимен-

тально определены порядки сходимости по пространственным и временным переменным. Численные эксперименты продемонстрировали образование слоя с значительно меньшей пористостью и проницаемостью. Математическая модель позволяет оценить объемы поверхностного и грунтового стока в период весеннего снеготаяния с учетом изменяющейся проницаемости верхних слоев почвы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 24-71-00058).

Список литературы

- [1] Сибин А. Н., Папин А. А. Тепломассоперенос в тающем снеге // ПМТФ. 2021. Т. 62. № 1. С. 109–118.
- [2] BRONFENBRENER L. Non-equilibrium crystallization in porous media: Numerical solution // Cold Region Science and Technology. 2013. Vol. 85. N. 1. P. 137–149.

2.28. Рябушкин С.В. Численное моделирование механического поведения льда в широком диапазоне внешних воздействий

Задачи разрушения массивов льда в широком диапазоне изменения внешних нагрузок приобрели в последнее время особую актуальность. Это обусловлено прежде всего большой практической значимостью и растущей потребностью в совершенствовании существующих расчетных моделей для определения параметров контактного взаимодействия льда с элементами ледостойких конструкций и сооружений.

Прочностной анализ в подобных задачах наиболее эффективно проводить путем сочетания данных модельных и полевых экспериментов с вычислительными экспериментами, основанными на современных численных методах механики деформируемого твердого тела.

Однако на сегодняшний день общепринятых численных методов и моделей материала, учитывающих механическое поведение такого сложного материала, как лед, не существует. В этой связи, построение, практическая реализация и апробация подобного рода моделей сама по себе является первостепенной, нетривиальной задачей, от корректного решения которой зависит достоверность результатов численного моделирования.

Авторами предпринята попытка построения математической модели механического поведения (отклика) льда в широком диапазоне изменения внешних воздействий [1]. Поскольку процесс хрупкого разрушения практически невозможно описать в рамках традиционных («сеточных») методов, в основу модели положены бессеточные процедуры механики сплошных сред, а именно: т.н. метод частиц Галеркина (Smoothed Particle Galerkin, SPG). В качестве модели материала для льда используется феноменологическая модель механики повреждаемых сред — модель динамического разрушения Джон-

сона — Холмквиста (известная, как JH-2, Johnson — Holmquist Damage Model).

Указанная модель была апробирована авторами на базе стандартных механических испытаний ледовых образцов в широком диапазоне внешних воздействий (квазистатическое, динамическое нагружение); проведены численные эксперименты по прорезанию/фрезерованию ледовой среды, drop-тесты, impact-тесты, ударное нагружение [2]. На основании полученных результатов предложены соответствующие оценки параметров контактного взаимодействия со льдом для внедрения их в существующие расчетные схемы и модели ледовых нагрузок.

Научный руководитель — д.т.н. Родионов А. А.

Список литературы

- [1] Родионов А. А., Рябушкин С. В. Численное моделирование механического поведения льда при квазистатических и динамических нагрузках // Морские интеллектуальные технологии. 2023. Т. 1. № 4. С. 99–105.
- [2] Родионов А. А., Рябушкин С. В. Использование бессеточных процедур для численного моделирования механического поведения льда в широком диапазоне внешних воздействий // Морские интеллектуальные технологии. 2024. Т. 2. № 3. С. 83–94.

2.29. Сваровский А.И. Применение вихреразрешающей модели WRF для условий эксперимента BLLAST над неоднородной поверхностью

Моделирование движения воздуха в атмосферном пограничном слое (до высот несколько километров) лежит в основе научно-исследовательской и оперативной прогнозной деятельности в таких важных с точки зрения человеческой деятельности областях, как авиация, лесное хозяйство, качество атмосферного воздуха и возобновляемые источники энергии (ветровая энергетика). В последнее десятилетие достижения в области вычислительной математики, мощности суперкомпьютеров и новые возможности моделирования позволили проводить численные исследования нестационарной турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя с более высоким пространственным разрешением (горизонтальный шаг сетки менее 1 км). В данной работе рассматривается применение вихреразрешающего LES-моделирования модели численного прогнозирования погоды WRF версии 4.2 для уточнения численного прогноза скорости ветра для известного полевого эксперимента BLLAST [1], проведенного в 2011 году на территории юга Франции. Для получения начальных и граничных метеорологических характеристик и геодезических параметров на расчетной сетке, покрывающей область исследования, была использована база данных Национального центра прогнозирования окружающей среды NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses (ds083.2). Проводилось срав-

нение двух LES-моделей: 3D Smagorinsky [2] и SMS 3D TKE LES [3]. Выполнено моделирование поля ветра и температуры в существенно неоднородной по рельефу области. Результаты расчетов сравнивались с наблюдениями. В целом получено хорошее согласование. Уменьшение шага сетки и включение LES-моделирования позволяет несколько улучшить результаты согласования расчетов и наблюдений. Лучший результат по вихреразрешающему моделированию дает применение модели SMS 3D TKE LES, использующей в расчетах уравнение для кинетической энергии турбулентности.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Старченко А. В.

Список литературы

- [1] UDINA M. ET AL. WRF-LES Simulation of the Boundary Layer Turbulent Processes during the BLLAST Campaign // Atmosphere. 2020. Vol. 11. N. 11. P. 1149.
- [2] SIEWERT J., KROSZCZYNSKI K. Evaluation of High-Resolution Land Cover Geographical Data for the WRF Model Simulations // Remote Sensing. 2023, Vol. 15. N. 9. P. 2389.
- [3] ZHANG X., BAO J., CHEN B., GRELL E. A three-dimensional scale-adaptive turbulent kinetic energy scheme in the WRF-ARW model // Monthly Weather Review. 2018. Vol. 146. N. 7. P. 2023–2045.

2.30. Сибирякова Т.А., Найденова К.Е. Движение внешней нагрузки по ледовому покрову в замкнутом водоёме

Поведение бесконечного ледового покрова при движении по нему внешней нагрузки изучено достаточно полно [1, 2]. Решение нестационарной трехмерной гидроупругой задачи в линейной постановке является достаточно сложным и требует больших вычислительных затрат [3]. Наиболее изученным является случай, когда ледовый покров моделируется тонкой упругой пластиной. Задачи с условиями закрепления ледовой пластины на стенках канала изучены менее подробно, чем задачи с бесконечным ледовым покровом. Ограниченность ледовых пластин и конечная ширина канала приводят к появлению новых граничных условий, а также меняются характеристики гравитационных волн, иначе распределяются прогибы и напряжения в плавающей пластине [4].

В данной работе рассматривается нестационарная задача о колебаниях ледовой пластины в замкнутом водоёме, вызванных движением внешней нагрузки. Задача решается в двумерной постановке в рамках линейной теории гидроупругости. Для этой теории постановка задачи имеет классический вид: есть упругая часть задачи, описывающая поведение льда, и есть гидродинамическая часть задачи, описывающая динамику идеальной несжимаемой жидкости. Обе части задачи связаны друг с другом. Задача дополняется краевым условием на поток жид-

кости в силу ограниченности водоёма, это условие переписывается в виде интегрального условия для прогибов льда на границе лёд/жидкость. Задача решается введением нормальных мод колебаний упругой балки. Исследуется случай льда, при мороженного к стенкам водоёма, что моделируется условиями жёсткого заземления. В итоге решение для потенциала скорости течения жидкости выражается через решение для прогибов льда. Рассмотрен случай циклического движения внешней нагрузки от левого края к правому и обратно. Задача сводится к системе ОДУ второго порядка и решается численно методом Рунге — Кутты.

Получено, что на начальном этапе движения, когда нагрузка начинает двигаться от левого края в сторону правого, наблюдается смещение максимальной амплитуды прогибов вслед за движением нагрузки. Перед нагрузкой возникают колебания льда с наибольшим возвышением перед/над нагрузкой в зависимости от времени. Колебания перед нагрузкой имеют волновую форму. Форма прогибов для начального движения очень хорошо согласуется с формой прогибов при начальном движении нагрузки по неограниченному ледовому покрову. Дальнейшее распределение прогибов и удлинений сильно зависит от времени и положения нагрузки относительно границ водоёма.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Современные модели гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (2024-26) (гос. задание FZMW-2024-0003).

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Шишмарев К. А.

Список литературы

- [1] СТУРОВА И. В. Нестационарное поведение упругой балки, плавающей на поверхности бесконечно глубокой жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 1. С. 85–94.
- [2] QIU L., LIU H. Three-Dimensional Time-Domain Analysis of Very Large Floating Structures Subjected to Unsteady External Loading // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2017. Vol. 129. N. 1. P. 21–28.
- [3] ZHAO C., ZHANG J., HUANG W. Vibration reduction of floating elastic plates in water waves // Marine Structures. 2007. Vol. 20. N. 1-2. P. 71–99.
- [4] KOROBIKIN A., MALENICA S., KHABAKHPASHEVA T. Interaction of flexural-gravity waves in ice cover with vertical walls // Transact. of the Royal Soc. A: Math., Phys. and Eng. Sci. 2018. Vol. 376. N. 20170347.

2.31. Скиба В.С. Конечно-разностный алгоритм для расчета взаимодействия поверхностных волн с неподвижным частично погруженным в воду сооружением в рамках 3D-модели потенциальных течений

При проектировании крупных частично погруженных в воду прибрежных сооружений необходимо учитывать возможность воздействия на них длинных поверхностных волн типа цунами. Для численного моделирования применяется иерархический подход [1, 2] — проведение сравнительных расчетов в рамках иерархии математических моделей различных приближений. Одной из них является полностью нелинейная модель трехмерных потенциальных течений жидкости (3DFNPF-модель).

В работе представлен конечно-разностный алгоритм на подвижных сетках расчета взаимодействия длинных поверхностных волн с частично погруженным телом в рамках 3DFNPF-модели. Получено условие устойчивости и предложен способ задания начального итерационного приближения, позволяющий существенно сократить число итераций вычисления потенциала вектора скорости. Предложены аппроксимационные формулы второго порядка для условия Неймана на непроницаемых гранях тела, использующие значения потенциала только в граничных и внутренних приграничных узлах сетки. Показана самосопряженность разностного оператора для потенциала.

Приведены результаты расчетов влияния размеров тела, его заглубления, амплитуды набегающей волны на волновую картину в окрестностях тела. Дано сравнение с результатами расчетов других авторов а также с расчетами в рамках 2DFNPF-модели.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Хакимзянов Г. С.

Список литературы

- [1] ГУСЕВ О. И., СКИБА В. С., ХАКИМЗЯНОВ Г. С., ЧУБАРОВ Л. Б. Численный анализ характеристик взаимодействия уединенной волны с неподвижным полупогруженным телом прямоугольного сечения // ПМТФ. 2023. Т. 64. № 6. С. 119–132.
- [2] GUSEV O., KHAKIMZYANOV G., SKIBA V., CHUBAROV L. Numerical modeling of the long surface wave impact on a partially immersed structure in a coastal zone. I. Solitary waves over a flat slope // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35. N. 8. Art. 087124.

2.32. Скибина Н.П. Численное исследование структуры течения в вихревой камере с равномерным вдувом газа по боковой поверхности

Комплексный анализ и детальное описание структуры закрученного потока [1] позволяет разрабатывать методы для управления процессами смешения и разделения в поле массовых сил, а также прогнозировать динамику двухфазных реагирующих и нереагирующих потоков.

Несмотря на обширные исследования данного класса течений [2, 3], при сопоставлении экспериментальных данных и результатов математического

моделирования возникают количественные и качественные несоответствия. Поэтому необходимо проведение тестовых расчетов, по результатам которых будет произведен подбор оптимальной геометрии расчетной области и соответствующие граничные условия.

Целью данной работы является численное исследование сложной пространственной структуры закрученного потока в вихревой камере с равномерным вдувом газа по боковой поверхности [3]. В качестве рабочей среды рассматривается вязкий несжимаемый газ с теплофизическими параметрами воздуха. Газ поступает в затопленное пространство, ограниченное стенками камеры, через тангенциально подведенные к поверхности подающие трубки. Величина массового расхода вдуваемого газа $Q = 4.3$ г/с. Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру камеры, $Re = 2.2 \cdot 10^3$.

Математическое моделирование проводится на основании численного решения осредненных уравнений Навье—Стокса, для замыкания которых применяются уравнения полуэмпирических моделей турбулентности. Решение получено с использованием метода конечных объемов на неструктурированной расчетной сетке с общим числом ячеек $5 \cdot 10^6$.

Для циркуляции окружной компоненты скорости в расчетах и в экспериментах получено качественное и количественное соответствие распределений [3]. Установлено, что закрученное течение, которое формируется во внутреннем объеме вихревой камеры, является нестационарным и несимметричным. Перестройка течения сопровождается непрерывным изменением распределений осевой и окружной компонент скорости в каждом сечении камеры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФНФ (грант № 24-19-00358).

Список литературы

- [1] ГУПТА А., ЛИЛИ Д., САЙРЕД Н. Закрученные потоки Москва: Мир, 1987. 588 с.
- [2] Волчков Э.П., Смульский И.И. Аэродинамика вихревой камеры со вдувом по боковой поверхности. Экспериментальное исследование. // Ин-т теплофиз. СО АН СССР, 1979. Препр. № 38-79. 30 с.
- [3] СЕМЕНОВ С.В. Аэродинамика и теплообмен в торцевом пограничном слое вихревой камеры.: дисс. канд. техн. наук. Институт теплофизики, Новосибирск, 1987. 182 с.

2.33. Скорик Д.А. Использование функциональных интервалов для глобальной оптимизации функций

При решении практических задач часто возникают численные неопределённости, имеющие различную природу. Одни, например, происходят из неточности измерительных приборов или человеческого

фактора. Другие — из-за использования на ЭВМ арифметики с ограниченной точностью (или арифметики с плавающей точкой).

Эти неопределённости могут достаточно сильно отклонить результат вычислений от истинного. Также существуют неопределённости, которые мы не можем устранить. Примерами могут служить атомные массы химических элементов, для значений которых известны лишь доверительные интервалы, гарантированно содержащих их.

Одним из естественных подходов описания числовых неопределённостей, которые принимают значения в каком-либо промежутке, является указание интервала, который гарантированно содержит в себе все возможные значения. Интервалы просты в описании и использовании.

Одним из основных инструментов интервального анализа является классическая интервальная арифметика. Впервые этот инструмент анализа появился в середине 20-го столетия и был рассмотрен японским ученым Теруо Сунаги.

Зачастую бывает, что использование классической интервальной арифметики в вычислениях недостаточно, поскольку она дает достаточно грубые интервальные оценки при больших по объёму вычислениях. К тому же она имеет достаточно скудные алгебраические свойства. Это является мотивацией к разработке иных видов интервалов и интервальных арифметик, которые позволяют улучшить их свойства или приобрести новые.

Одним из примеров, где может быть необходимо использование различных свойств интервалов — это задача глобальной оптимизации. Она является одной из классических задач вычислительной математики, которая часто встречается в различных сферах жизни и науки. В докладе будут представлены результаты по построению нового вида интервалов — функциональных интервалов и их использованию в задачах глобальной оптимизации.

2.34. Сомова П.А., Гурина Е.И. Изучение процессов теплообмена в стеклопакетах с использованием ANSYS Fluent

В работе анализируется распространение тепла в составной конструкции теплоизоляционного окна, в наружной и внутренней створках которого установлены однокамерный и двухкамерный стеклопакеты. Поставленная в работе задача решается несколькими этапами. На первом этапе моделировался процесс распространения тепла внутри однокамерного (4M1-16-4M1) и двухкамерного (4M1-14-4M1-14-4M1) стеклопакетов с наполнением межстекольного пространства осушенным воздухом [1, 2]. На данном этапе математического моделирования в работе концентрировалось внимание только на одном из основных механизмов переноса тепла — теплопроводности, и теплопотери в однокамерном и двухкамерном стеклопакетах за счет

конвекции не учитывались. На втором этапе моделировался процесс распространения тепла во всей составной конструкции с формулой остекления 4M1-16-4M1-200-4M1-14-4M1-14-4M1.

Численное моделирование распространения тепла в девятислойной пластине проводилось с помощью метода конечных разностей на основе явной разностной схемы. Толщина каждого из слоёв конструкции стеклопакета была принята следующей: 1 слой (стекло марки M1) — 0.004 м; 2 слой (осушенный воздух) — 0.016 м; 3 слой (стекло марки M1) — 0.004 м; 4 слой (осушенный воздух) — 0.2 м; 5 слой (стекло марки M1) — 0.004 м; 6 слой (осушенный воздух) — 0.014 м; 7 слой (стекло марки M1) — 0.004 м; 8 слой (осушенный воздух) — 0.014 м; 9 слой (стекло марки M1) — 0.004 м.

В начальный момент времени в каждой точке расчетного домена принимается значение температуры одинаковое. На левой границе используется ГУ III рода с целью учета в математической постановке задачи конвективного теплообмена между стеклом и окружающей его средой со стороны комнаты. На правой границе также рассматривается ГУ III рода, где идет взаимодействие с температурой воздуха из окружающей среды. Две горизонтальные границы являются адиабатическими (ГУ II рода). В зоне контакта стекла и межстекольного пространства, заполненного осушенным воздухом действуют граничные условия IV рода.

Верификация полученных численных результатов на C++ на основе метода конечных разностей с использованием явной разностной схемы проводилась с данными, полученными в результате компьютерного моделирования процесса теплопередачи в конструкции теплоизоляционного окна в пакете гидродинамики ANSYS Fluent. Применение подобных конструкций теплозвукоизоляционных окон позволяет достичь высокого класса энергоэффективности зданий, теплового и акустического комфорта помещений [3, 4].

Список литературы

- [1] Натаров А. Н., Гурина Е. И., Сомова П. А. Математическое моделирование влияния теплофизических свойств на эффективность стеклопакетов. Ч.1 // Всероссийская молодежная научная конференция «Все грани математики и механики», 15–18 мая 2023 года: сборник статей. Томск, 2023. С. 65–76.
- [2] Сомова П. А., Гурина Е. И. Численное моделирование теплообмена в стеклопакетах // Всероссийская конференция по математике и механике. Посвящается 145-летию Томского государственного университета и 75-летию механико-математического факультета, 2–5 октября, 2023 г., г. Томск: сб. мат. конф. Томск: STT, 2023. С. 136–143.
- [3] Кузнецов Г. В., ШЕРЕМЕТ М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности. 2007.

- [4] ГОСТ 24700–99. Блок и оконные деревянные со стеклопакетами. ТУ / М.: Госстрой России; ГУП ЦПП, 2000. 52 с.

2.35. Степанко И.А., Иванов Н.Д. Идентификация математических моделей механизмов клеточной смерти: реализация экономичной вычислительной технологии

В работе представлены новые математические модели и результаты численного моделирования молекулярно-генетических механизмов апоптоза и некроза клеток мозга в патогенезе болезни Альцгеймера и ишемического инсульта. Вычислительная технология структурной и параметрической идентификации моделей реализована в виде комплекса программ, включающего блок решения (прямой) начальной задачи для нелинейной системы дифференциальных уравнений с запаздывающими аргументами с привлечением А-устойчивых методов семейства Адамса; блок решения обратной коэффициентной задачи генетическим алгоритмом с возможностью распараллеливания по заданному количеству потоков процессора в режиме единичного или многократного запуска алгоритма; блок анализа чувствительности модели экономичным локальным разностным методом. Блок выходной информации визуализирует результаты решения прямой и обратной задачи, создает отчеты о ходе оптимизации и статистике. Ядро блока входной информации составляют наборы экспериментальных временных рядов, которые преобразуются в сплайны и на промежуточных этапах процедуры идентификации (при неопределенной структуре дифференциальных уравнений) используются как эталонные распределения компонент вектора решения будущей математической модели. Центральное место отводится программной реализации функции выборочного решения задачи структурной и параметрической идентификации для произвольного числа взаимосвязанных уравнений модели и их сборки в систему. Ранее разработанный программный комплекс [1], ориентированный на решение задачи структурной и параметрической идентификации моделей динамики гибели клеток мозга при ишемическом инсульте у крыс линии Wistar, расширен за счет блока идентификации модели динамики p53-зависимого апоптоза, ассоциированного с ранними признаками болезни Альцгеймера у трансгенных мышей с синдромом Дауна, на основе подхода [2].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Воронцова О. Ф.

Список литературы

- [1] ВОРОПАЕВА О. Ф., ИВАНОВ Н. Д. Программный комплекс IStroke/ID для решения задачи структурной и параметрической идентификации моделей динамики гибели клеток мозга при ишемическом инсульте (свидетельство № 2022664223) / М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2022.
- [2] СЕНОТРУСОВА С. Д., ВОРОПАЕВА О. Ф., ШОКИН Ю. И. Применение минимальных математических моделей динамики сигнального пути белка p53–микроРНК к анализу лабораторных данных // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 6. С. 4–49.

2.36. Сухинина К. С. Численное моделирование деградации призабойной зоны пласта при эксплуатации скважины

В работе рассматривается задача численного моделирования деградации призабойной зоны пласта при эксплуатации скважины, что критически важно для обеспечения безопасности захоронения углеводородов, поскольку технологические воздействия могут привести к повреждению околоскважинной зоны.

В процессе эксплуатации и обслуживания скважина подвергается существенным нагрузкам, вызванным резкими перепадами давления и температуры, связанными с закачкой жидкого CO_2 . На значительных глубинах под действием больших гидростатических сжимающих напряжений и повышенных температур горные породы и цемент обретают свойство пластичности. Более того, экспериментальные исследования показывают, что затвердевший цемент и прилегающие горные породы проявляют пороупругий эффект. Поэтому для описания деформирования обсаженного и зацементированного ствола скважины применяется модель, учитывающая термopopoупруго-пластическое деформирование. Численные расчеты проводятся с учётом накопления повреждений и деградации прочностных свойств, изменения температуры, давления жидкости и контраста горных напряжений в пласте. Представленная работа является дальнейшим развитием подходов к моделированию скважины, изложенных в [1].

Для численного решения задачи применена явная схема метода конечных элементов, реализованная с помощью библиотеки deal.II. Явные схемы позволяют вычислять новое состояние системы на каждом шаге по времени на основе предыдущих значений, что эффективно для сложных нелинейных моделей. В данной работе источником нелинейности являются эффекты пороупластичности в повреждаемом материале. Для повышения скорости расчетов напряжения интегрируются с пониженным порядком [2]. Для подавления паразитического режима «песочных часов» применяется метод стабилизации Ганценмюллера [3].

Верификация построенного численного алгоритма проведена для различных сценариев нагружения в предположении плоской деформации. На первом этапе решена стационарная задача о деформировании трёхслойной трубы из термopopoупругих материалов. Построенное численное решение сравнено с точным аналитическим. Далее, получено численное решение о нестационарном деформировании однослойной трубы из термopopoупругого материала; также обнаружено хорошее соответствие результатов с имеющимся точным решением. На финальном этапе решена задача об упругопластическом деформировании толстостенной трубы, нагруженной внутренним давлением, что соответствует процессу автофреттажа. Установлено, что поля напряжений, рассчитанные по методу конечных элементов, соответствуют полям, описанным в литературе.

С помощью комплекса программ установлены закономерности деформирования и разрушения призабойной зоны для ряда типовых сценариев. Созданный вычислительный комплекс и полученные результаты исследований можно использовать при реализации проектов захоронения CO_2 . Детальное знание напряженно-деформированного состояния позволит рационально определить допустимые параметры закачки.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Шутков А. В.
Со-руководитель — Валов А. В.

Список литературы

- [1] VALOV A. V., GOLOVIN S. V., SHCHERBAKOV V. V. ET AL. Thermoporoelastic model for the cement sheath failure in a cased and cemented wellbore // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 210. N. 109916. P. 26–46.
- [2] WRIGGERS P. Nonlinear finite element methods / Springer Science & Business Media, 2008.
- [3] GANZENMÜLLER G. C. An hourglass control algorithm for Lagrangian smooth particle hydrodynamics // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2015. Vol. 286. P. 87–106.

2.37. Трифонова Г. О. О решении задачи фильтрации с предельным градиентом при наличии точечных источников

Исследована задача фильтрации с предельным градиентом [1] для пространств размерности $n = 2$ и $n = 3$ при наличии нескольких точечных источников интенсивности $q^{(i)}$, $i = 1, \dots, k$, сосредоточенных в узлах $x^{(i)}$, внутренних для области решения $\Omega \subset \mathbb{R}^n$. Установлено существование решения. Способ доказательства одновременно позволяет находить приближенное решение.

Закон фильтрации (связь между градиентом давления λ и потоком G) считаем неоднородным по пространству и изотропным:

$$G(x, \lambda) \equiv \frac{h(x, |\lambda|)}{|\lambda|} \lambda : \Omega \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n,$$

$$h(x, s) \equiv a(x)[s - \mu(x)]_+; \quad [s]_+ \equiv \begin{cases} 0, & s < 0, \\ s, & s \geq 0, \end{cases}$$

функции $\mu, a : \Omega \rightarrow R$ измеримы и ограничены:

$$0 \leq \mu(x) \leq \bar{\mu}, \quad 0 < a_{\min} \leq a(x) \leq a_{\max}.$$

Границу $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$, $\Gamma_1 \cap \Gamma_2 = \emptyset$, $\text{mes } \Gamma_1 \neq 0$ области Ω считаем Липшиц-непрерывной. Для $x \in \Gamma_1$ выполнено условие Дирихле $w(x) = w_{\gamma_1}(x)$, для $x \in \Gamma_2$ условие Неймана $(G(x, \nabla w), \nu(x)) + \sigma(x)w = w_{\gamma_2}(x)$. Вариационная задача имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (G(x, \nabla w), \nabla \eta) dx + \int_{\Omega} g_0(x)w\eta dx + \int_{\Gamma_2} \sigma(x)w\eta dx = \\ & = \sum_{i=1}^k q^{(i)}\eta(x - x^{(i)}) + \int_{\Gamma_2} w_{\gamma_2}(x)\eta dx, \quad \forall \eta \in C_0^\infty(\Omega \cup \Gamma_2). \end{aligned}$$

Функция $g_0(x)$ неотрицательна и ограничена.

Функция $a(x)$ принадлежит весовому пространству в точках сосредоточения источников, а именно, для $i = 1, \dots, k$ имеют место включения

$$\exists \alpha_i \in L_2(\Omega) : \alpha_i(x) \equiv |x - x^{(i)}|^{1-n}(a(x) - a^{(i)}).$$

Для решения рассмотренной задачи получено аддитивное представление $w = v + u + \Phi$ с явным выделением особенности порожденной источниками [2]:

$$\Phi(x) \equiv \sum_{i=1}^k \varphi_i(x) : \varphi_i(x) \equiv \frac{q^{(i)}}{a^{(i)}} \phi_n(x - x^{(i)}).$$

Здесь функция ϕ_n — фундаментальное решение оператора Лапласа: $\phi_2(x) = \frac{1}{2\pi} \ln(|x|)$ и $\phi_3(x) = -\frac{1}{4\pi|x|}$.

Функция $u \in W_2^{(1)}(\Omega)$ — единственное решение линейной задачи с дивергентной правой частью

$$\begin{aligned} & -\text{div}(a(x)\nabla u(x)) = -\text{div } F, \quad x \in \Omega, \\ & F = \nabla \left[\sum_{i=1}^k q_i \phi_n(x - x^{(i)}) \right] - a(x)\nabla \Phi(x). \end{aligned}$$

Функцию v находим из краевой задачи для нелинейного уравнения с вырождением по градиенту:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (G(x, \nabla(v(x) + \tilde{w}(x))) - a(x)\nabla \tilde{w}(x), \nabla \eta(x)) dx + \\ & + \int_{\Omega} g_0(x)(v(x) + \tilde{w}(x))\eta(x) dx + \int_{\Gamma_2} \sigma(x)v(x)\eta(x) dx = 0, \end{aligned}$$

для любого $\eta \in C_0^\infty(\Omega \cup \Gamma_2)$, здесь $\tilde{w} = u + \Phi$.

Вариационная задача для v исследована методом теории монотонных операторов [3]. Множество решений непусто и слабо замкнуто в гильбертовом пространстве $V \equiv \{v \in W_2^{(1)}(\Omega) : v(x) = 0, x \in \Gamma_1\}$.

Таким образом решение исходной задачи найдено, особенность связанная с точечными источниками выделена явно в виде функции $\Phi \in W_1^{(1)}(\Omega)$, а функции u, v из пространства $W_2^{(1)}(\Omega)$.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Задворнов О. А.

Список литературы

- [1] БАРЕНБЛАТТ Г. И., ЕНТОВ В. М., РЫЖИК В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах / М.: Недра, 1984. 211 с.
- [2] ЗАДВОРНОВ О. А., ТРИФОНОВА Г. О. Смешанная краевая задача для уравнения монотонного типа с младшим слагаемым при наличии точечных источников в правой части // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2024. Т. 166, № 2. С. 173–186.
- [3] ГАЕВСКИЙ Х., ГРЕГЕР К., ЗАХАРИАС К. Нелинейные операторные уравнения и операторные дифференциальные уравнения / М.: Мир, 1978. 336 с.

2.38. Трусов К.В. Фильтрация двухфазных жидкостей с диффузной межфазной границей: двухмасштабная модель

Моделирование течения жидкостей в пористых средах является объектом интенсивных исследований в целом ряде инженерных дисциплин, таких как нефтедобыча, управление водными ресурсами, гражданская инженерия и многих других. Важным инструментом моделирования является теория усреднений уравнений математической физики в неоднородных пористых средах. Среди ее многочисленных приложений теория фильтрации жидкостей в грунтах занимает одно из наиболее значимых мест. Проблемы фильтрации, решаемые с помощью методов теории усреднений, имеют специфические особенности, связанные с видом рассматриваемых уравнений, с одновременным присутствием в задачах многих масштабов, с сильной нелинейностью уравнений и т. д. Самым распространенным и действенным подходом к усреднению уравнений в неоднородных средах является метод двухмасштабных разложений. Применение этого метода обусловлено тем, что процессы в порах и зернах отличаются пространственно-временными масштабами. Теория двухмасштабной гомогенизации позволяет математически разделить эти масштабы с помощью макро- и микроуравнений.

Проведена двухмасштабная гомогенизация уравнений Навье—Стокса и Кана—Хиллиарда для двухкомпонентной жидкости в случае сильной и слабой смесимости [1]. Сила смесимости определяется корреляцией между параметром масштаба и поверхностным натяжением. Показано, что в общем случае тензор проницаемости является анизотропным. Полученная модель представляет собой обобщение закона Дарси с перекрёстными мобильностями, т. е. скорость фильтрации фазы зависит от градиентов давлений в обеих фазах. Построен пример, описывающий вытеснение неф-

ти смесью воды и углекислого газа в системе параллельных каналов.

Полученные методом двухмасштабной гомогенизации уравнения Навье—Стокса и Кана—Хиллиарда решались методом конечных элементов с помощью пакета программ FreeFem++ [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Современные модели гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (2024-26) (гос. задание FZMW-2024-0003).

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Шелухин В. В.

Список литературы

- [1] Шелухин В.В., Крутько В.В., Трусков К.В. Фильтрация сильно смешиваемых жидкостей на основе двухмасштабной гомогенизации уравнений Навье—Стокса и Кана—Хиллиарда // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64. № 3 (379). С. 161–173.
- [2] Amirat Y., Shelukhin V., Trusov K. Flows of two slightly miscible fluids in porous media: two-scale numerical modeling // Transport in Porous Media. 2024. Vol. 151. P. 1423–1452.

2.39. Цгоев Ч.А. Численный анализ механизма поляризации макрофагов как терапевтической мишени

Математическое моделирование инфаркта миокарда играет ключевую роль в изучении механизмов возникновения и прогрессирования этого заболевания, открывая новые возможности для разработки более эффективных терапевтических подходов.

В работе представлена разработанная иерархия математических моделей некротической гибели кардиомиоцитов при остром инфаркте миокарда [1, 2]. Основное внимание уделено реакционно-диффузионной модели, которая в диапазоне биологически значимых параметров показала как качественное, так и количественное согласие с имеющимися экспериментальными данными. Продемонстрирована устойчивая локализация численного решения в области практически неизменных размеров, а также формирование квазистационарной структуры, которая имеет реальный аналог в виде демаркационного воспаления.

Проведены численные эксперименты, направленные на исследование различных терапевтических подходов, основанных на регуляции баланса между про- и противовоспалительными макрофагами [2]. В рамках этих исследований оценен вклад активации макрофагов и их перепрограммирования в процессы повреждения тканей и воспалительного ответа. Важный аспект работы — исследование «терапевтического окна», позволяющего оценить эффективность различных терапевтических стратегий в зависимости от времени их начала.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Воропаева О. Ф.

Список литературы

- [1] Воропаева О.Ф., Цгоев Ч.А. Численное моделирование инфаркта миокарда. I. Анализ пространственно-временных аспектов развития местной воспалительной реакции // Математическая биология и биоинформатика. 2023. Т. 18. № 1. С. 49–71.
- [2] Воропаева О.Ф., Цгоев Ч.А. Численное моделирование инфаркта миокарда. II. Анализ механизма поляризации макрофагов как терапевтической мишени // Математическая биология и биоинформатика. 2023. Т. 18. № 2. С. 367–404.

2.40. Чусовитина А.И. Устойчивость математической модели замкнутой микроэкосистемы

Главной особенностью замкнутых экосистем является их независимость от обмена какими-либо веществами с окружающей средой. В настоящее время подобные экосистемы представляют особый интерес для исследования, так как они подразумевают наличие механизмов воспроизводства питательных веществ и утилизации отходов жизнедеятельности, следовательно, могут использоваться в качестве систем жизнеобеспечения человека на космических станциях и в условиях ограниченности ресурсов — в пустынях, полярных широтах.

Предварительное математическое моделирование замкнутой экосистемы необходимо, чтобы перед началом экспериментального моделирования спрогнозировать поведение системы и рассчитать соотношения концентраций веществ, необходимых для ее нормального функционирования.

В данной работе описывается модель замкнутой микроэкосистемы, включающая одноклеточную водоросль *Chlorella* и бактерию *Pseudomonas sp.* Круговорот вещества был рассмотрен для углерода и азота. Для построения модели было предположено, что скорости поглощения биогенных элементов, а также скорости роста биомассы популяций ограничиваются по принципу лимитирующего фактора Либиха [1]. Также было предположено, что питательные вещества поглощаются независимо друг от друга, причем поглощенные *Pseudomonas* биологические соединения мгновенно минерализуются.

Основой для построения данной модели служат данные, полученные в результате экспериментов, проводимых в Институте физики им. Л.В. Киренского под руководством Б. Г. Коврова. Некоторые из результатов описаны в работах [2–4].

На основе выдвинутых предположений была получена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая динамику экосистемы в зависимости от заданных параметров и начальных концентраций питательных веществ. Система исследована на устойчивость аналитически и чис-

ленно с помощью первого и второго методов Ляпунова [5].

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Золотов О. А.

Список литературы

- [1] ВОЛЬТЕРРА В. Математическая теория борьбы за существование [Текст] / Пер. с франц. О. Н. Бондаренко, под ред. Ю. М. Свирижева. Москва: Наука, 1976. С. 286.
- [2] КОВРОВ Б. Г. Искусственные микрэкосистемы с замкнутым круговоротом веществ как модель биосферы / Биофизика клеточных популяций и надорганизменных систем: сборник научных трудов. Новосибирск: «Наука» Сибирское Отделение, 1992. С. 62–70.
- [3] ФИШТЕЙН Г. Н. Экспериментальные замкнутые экосистемы на основе одноклеточных организмов: дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Тартуский государственный университет, Тарту, 1983. С. 194.
- [4] ГУБАНОВ В. Г. Биотический круговорот и взаимодействие трофических звеньев в искусственных и естественных биосистемах: дис. на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук. Институт биофизики сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, 2004. С. 399.
- [5] ЛЯПУНОВ А. М. Общая задача устойчивости движения / Государственное издательство технико-теоретической литературы. Москва-Ленинград, 1950. 474 с.

2.41. Шепелин А.В. Оценка потенциала обнаружения кислорода на экзопланетах с помощью моделирования их атмосферных условий

В астрономических науках, одной из наиболее актуальных задач является поиск внеземной жизни. Важнейший известный человечеству показатель возможного существования жизни на данный момент — кислород. Соответственно, поиск условий, пригодных для формирования и существования этого химического элемента, в особенности, в атмосферах экзопланет, может помочь в дальнейших исследованиях астробиологической тематики. Не менее важными аспектами астрономических исследований кислорода является его роль в отслеживании формирования галактик и определении структур звёзд.

Недавнее обнаружение УФ и ИК линий 130.4 нм и 777.4 нм атомарного кислорода в атмосферах экзопланет HD 209458 b, HD 189733 b, KELT-9 b открыло перспективы анализа распространённости этого элемента. Однако, всего три обнаружения не позволяют это сделать в полной мере. В связи с этим, актуальной задачей является оценка параметров атмосфер, в которых потенциально может быть обнаружен кислород, и единственным доступным методом при этом является компьютерное моделирование.

Впервые проведено моделирование экзопланетных атмосфер в приближении гидростатического равновесия с привлечением нового кода кинетики квантовых переходов, учитывающем процессы, необходимые для моделирования поглощения спектральных линий. Исследовалось более чем 100 объектов в диапазоне, охватывающем параметры от планет земной группы до ультрагорячих юпитеров. В результате получены зависимости относительно поглощения линий 130.4 нм и 777.4 нм в зависимости от температур, благодаря которым можно прогнозировать вероятность обнаружения кислорода в атмосферах.

Работа выполняется в рамках проекта Фонда теоретической физики и математики Базис, а также научной программы ЭЛАГ Национального центра физики и математики.

2.42. Юношева Е.В. Мезоскопическое моделирование многофазных многокомпонентных течений

Исследование течения, которое возникает при подаче в породу жидкости или газа, важно для повышения процессов нефтеотдачи. Один из способов изучения таких течений — проведение лабораторных экспериментов над образцом керна. Однако высокая стоимость и длительность таких экспериментов ограничивают их практичность, требуя модернизации. Поэтому создание цифрового аналога будет экономичным решением, с помощью которого можно будет быстрее получать результаты и проводить большее количество экспериментов над образцом керна. Кроме того, необходимо моделировать трёхфазное течение с частичным смешиванием (вода, смесь углеводородов в жидкой и газообразной фазах) ввиду распространённости такого состояния нефти. Данная работа является актуальной в силу того, что трёхфазное течение с частичным смешиванием ещё не реализовано.

Работа посвящена исследованию двухфазного течения в пористой среде. Течение моделировалось с помощью метода решеточного уравнения Больцмана. Использовались двумерная модель D2Q9 и трехмерная модель D3Q19. Для описания разделения фаз многокомпонентного флюида применялся метод псевдопотенциала с общим уравнением состояния Пенга — Робинсона [1]. Рассматриваемая система представляла собой смесь углеводородов. При моделировании учитывалось взаимодействие флюида с материалом пористого скелета и задавались разные значения коэффициента смачивания на стенках и на материале скелета. Для получения более корректных значений вязкости мы перешли в модель со многими временами релаксации и реализовали вязкость, зависящую от компонентного состава смеси.

Для моделирование трех фаз было принято решение перейти в модель со свободной энергией [2]

в силу ее фундаментальности. Из-за того, что данная модель недостаточно изучена, были смоделированы только простые случаи: двухфазная одно- и двухкомпонентная смесь.

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Медведев Д. А.

Список литературы

- [1] PENG C., AYALA L.F., AYALA O.M. A thermodynamically consistent pseudo-potential lattice Boltzmann model for multi-component, multiphase, partially miscible mixtures // Journal of Computational Physics. 2021. V. 429. N. 3. P. 110018.
- [2] Guo Z. Well-balanced lattice Boltzmann model for two-phase systems // Physics of Fluids. 2021. V. 33. N. 3. P. 031709.

3. Информационно-вычислительные технологии

3.1. Андросов А.С. IntvalPy — библиотека интервальных вычислений на языке Python

Настоящая работа посвящена созданию библиотеки программ на языке Python [1], реализующей интервальные вычисления и численные методы интервального анализа для решения ряда стандартных математических задач. Современные подходы позволяют находить решения для квадратных и переопределённых интервальных систем линейных уравнений, определять внешние и внутренние границы множеств решений, а также визуализировать эти множества.

Мотивацией для данной работы стало отсутствие среди множества существующих на сегодняшний день модулей для Python [2] высокоуровневых интервальных инструментов, необходимых для решения важных практических задач, таких как определение разрешимости интервальных систем уравнений, оценка и визуализация их решений и т. п. [1, 3–6]. Также важной мотивацией было то, что большинство существующих интервальных библиотек для Python не поддерживают работу с интервальными арифметиками, отличными от классической. Однако классическая интервальная арифметика не имеет обратных элементов для основных операций и обладает плохими порядковыми свойствами. Поэтому иногда требуется использование полной интервальной арифметики или арифметики Каухера.

В работе были изложены особенности разработанной библиотеки IntvalPy, главные идеи, положенные в ее основу, а также ее архитектура и реализация. Объяснены преимущества и достоинства библиотеки, в число которых входят востребованные сегодня кроссплатформенность, скорость вычислений и наиболее современные алгоритмы. Проведено качественное и количественное сравнение с существующими программными модулями.

Список литературы

- [1] Андросов А. С., Шарый С. П. IntvalPy — библиотека интервальных вычислений на языке Python // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2022. Т. 20. № 4. С. 5–23. DOI:10.25205/1818-7900-2022-20-4-5-23.
- [2] TASCHINI S. Interval arithmetic: Python implementation and applications // Proc. SciPy 2008. G. Varoquaux, T. Vaught, J. Millman (Eds). P. 16–22.
- [3] ШАРЫЙ С. П. Конечномерный интервальный анализ // Новосибирск: Издательство «XYZ», 2022. 654 с.
- [4] ХАНСЕН Э., УОЛСТЕР ДЖ. У. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа // М.: Институт компьютерных исследований, 2012. 259 с.

- [5] NEUMAIER A. Interval methods for systems of equations // Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 255 p.
- [6] СТЕЦЮК П. И. Субградиентные методы ralgb5 и ralgb4 для минимизации овражных выпуклых функций // Вычислительные технологии. Т. 22. № 2. 2017. С. 127–149.

3.2. Бобков М.Е., Гренев И.В. Разработка модели машинного обучения для предсказания катионной структуры цеолитов типа FAU

Цеолиты и цеолитоподобные материалы широко используются в качестве сорбентов и носителей катализаторов. Цеолиты с топологией FAU имеют высокую термическую стабильность, большой объем пор, низкую себестоимость, а их модуль (отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) и катионный состав возможно настраивать под конкретные процессы газоразделения. Так как размещение катионов в структуре цеолитов определяет их адсорбционные свойства, то разработка моделей, позволяющих предсказывать размещение катионов на основе химического состава цеолитов, является актуальной задачей. Существующие на данный момент методы молекулярного моделирования, позволяющие решать данную задачу, требуют задания моделей межмолекулярного взаимодействия между конкретными катионами и атомами адсорбента.

В данной работе была предложена модель машинного обучения, позволяющая предсказывать размещение любых катионов в структуре цеолитов FAU на основе их химического состава. На первом этапе моделирование размещения катионов проводилось с помощью метода Монте-Карло в NVT ансамбле при вариации моделей силовых полей и типов размещения алюминия в цеолите. В работе были рассмотрены две модели силовых полей для описания межмолекулярного взаимодействия для ряда катионов с атомами адсорбента и три различных типа распределения алюминия в структуре: кластеризованный, случайный и равномерный. Основываясь на экспериментальных литературных данных, была создана база данных, содержащая более 100 монокатионных и бикатионных структур с различным модулем цеолита. В базу данных вошли такие характеристики структур как: химический состав, заселенность катионных позиций, размеры элементарной ячейки, условия дегидратации. Был предложен количественный критерий MPS для оценки точности предсказания размещения катионов относительно экспериментальных данных.

В работе показано, что ни различные модели силовых полей, ни различные модели типов размещения Al в структуре цеолита не оказывают существенного влияния на заселенность катионных позиций. По этой причине для генерации обучающей выборки с помощью метода Монте-Карло для монокатионных, бикатионных и трикатионных форм цеолитов типа FAU, содержащих катионы Li, Na, K, Rb, Cs и Ca, использовалась модель равномерного распределения Al и силовое поле [1], параметризованное на результатах квантово-химических расчетов.

Для предсказания размещения катионов в зависимости от химического состава была создана модель машинного обучения, которая была обучена на заранее сгенерированных структурах, а также в последующем проходившая тестирование на примерах из базы данных. Для того чтобы модель машинного обучения различала катионы между собой и как следствие на выходе были получены более точные предсказания, необходимо было добавить дополнительные параметры, содержащие уникальные значения для каждого катиона. Поэтому для расширения предсказательных возможностей модели машинного обучения за пределы комбинаций 6 типов катионов, в качестве дескрипторов в модели ИИ использовались их физические параметры такие как: формальный заряд, катионный радиус и поляризуемость. Полученная модель была задействована для предсказания размещения катионов референсных структур, в том числе и для структур, у которых катионный состав не входил в обучающую выборку.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 24-71-10096).

Список литературы

- [1] BOULFEL S., FINDLEY J. M., FANG H. ET AL. A transferable force field for predicting adsorption and diffusion of small molecules in alkali metal exchanged zeolites with coupled cluster accuracy // The Journal of Physical Chemistry. 2021. Vol. 125. N. 48. P. 26832–26846.

3.3. Бороздин П.А., Козьмин А.Д. Определение резонансной частоты газовой ячейки оптоакустического датчика с помощью методов машинного обучения

Определение концентрации в окружающей среде различных газов с высокой точностью является важной задачей в промышленности, науке, а также в сферах обеспечения безопасности. Для измерения концентрации газов существует несколько типов газовых датчиков. Оптоакустические сенсоры по сравнению с остальными видами газовых сенсоров имеют ряд преимуществ, таких как малое время отклика, низкий пороговый уровень детектируемых концентраций газа вплоть до миллиардных долей, а также возможность проводить измерения в реальном времени [1].

Принцип работы оптоакустических газоанализаторов основан на эффекте поглощения газом инфракрасных лучей, вследствие чего газ нагревается и его давление увеличивается. При прерывании световых лучей на звуковой частоте в газе будут происходить быстрые изменения давления, которые

являются звуковыми колебаниями. При этом мощность звука будет тем выше, чем больше концентрация целевого газа. Обязательным условием в измерении концентрации газов является определение резонансной частоты газовой ячейки.

На данный момент широко известны несколько способов измерения резонансной частоты ячейки [1, 2], однако все они имеют недостаток, связанный с прерыванием измерения концентрации газа в ячейке. Так например, при определении концентрации газа в условиях постоянно изменяющейся температуры эти алгоритмы способны обеспечивать только краткосрочное точное измерение концентрации газа, после чего требуются повторные измерения резонансной частоты, в течение которых не будут происходить измерения концентрации газа. При нормальных условиях изменение температуры газа в ячейке на 1 градус сдвигает резонансную частоту ячейки примерно на 3 Гц, что может быть существенным для определения концентрации целевого газа.

В данной работе с помощью теоретических оценок было показано, что изменение температуры является ключевым фактором дрейфа резонансной частоты. Было предложено альтернативное решение проблемы определения резонансной частоты в условиях изменяющейся температуры ячейки, которое заключается в том, чтобы разработать модель определения резонансной частоты ячейки по данным о ее температуре. Такой подход позволит проводить измерения резонансной частоты в реальном времени без необходимости останавливать измерения концентрации.

Для решения данной задачи были разработаны несколько нейросетевых алгоритмов, в основе которых лежит использование нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), эффективно применяющейся для работы с временными рядами [3]. Кроме этого был использован алгоритм внимания (Self-Attention) [4]. В результате обучения моделей удалось добиться восстановления резонансной частоты ячейки в реальном времени по данным о ее температуре со средней абсолютной ошибкой менее 1 Гц при изменениях частоты более чем на 30 Гц в течение 1 часа.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Редюк А. А.

Список литературы

- [1] YIN X., GAO M., MIAO R. ET AL. Near-infrared laser photoacoustic gas sensor for simultaneous detection of CO and H₂S // Optics Express. 2021. Vol. 29. N. 21. P. 34258–34268.
- [2] SHERSTOV I., VASILIEV V. Highly sensitive laser photoacoustic SF₆ gas analyzer with 10 decades dynamic range of concentration measurement // Infrared Physics & Technology. 2021. Vol. 119. P. 103922.
- [3] CAO J., LI Z., LI J. Financial time series forecasting model based on CEEMDAN and LSTM // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2019. Vol. 519. P. 127–139.

- [4] RUSSWURM M., KÖRNER M. Self-attention for raw optical satellite time series classification // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. Vol. 169. P. 421–435.

3.4. Городилов Д.В. Разработка веб-платформы для оркестрации рабочих процессов в задачах гидродинамики

Для решения задач в области вычислительной гидродинамики важно иметь подходящую инфраструктуру для полной автоматизации гидродинамических расчетов. Такие расчеты состоят из множества шагов и требуют значительных вычислительных мощностей. Вручную подготавливать каждый этап может быть сложной и трудоемкой задачей, которая отнимает достаточно времени у исследователей [1, 2]. Поэтому важную роль играют автоматизация управления процессом вычислений и пост-процессинг результатов расчетов.

Для выполнения таких задач требуются системы оркестрации, которые управляют процессами на удаленных вычислительных ресурсах. Внешние сервисы подготавливают расчётные кейсы на основе начальных параметров, которые формируются на основе конфигурации. После формирования расчетного кейса оркестратор выполняет запуск и мониторинг расчета, выполняемого на удаленных вычислительных ресурсах. Использование внешних сервисов заключается в возможности интеграции сторонних генераторов расчетных кейсов [3]. Микросервис, который является внешним сервисом, задействуется для формирования расчетного кейса. Чтобы сформировать кейс, компонент платформы обращается к API микросервиса, передавая необходимые параметры и данные. Такой подход позволяет пользователям интегрировать свои собственные решения без необходимости внесения изменений в ядро платформы [4].

Данная работа посвящена разработке веб-ориентированной платформы, которая позволит широкому кругу исследователей автоматизировать проведение гидродинамических расчетов через интерактивную веб-среду, а также подключать дополнительные вычислительные ресурсы и сервисы. Для пользователя такая среда скрывает различные технические и программные детали.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Иванов К. С.

Список литературы

- [1] ГОРОДИЛОВ Д. В. Применение веб-ориентированной облачной платформы для проведения гидродинамических расчетов // Фундаментальные и прикладные исследования в физике, химии, математике и информатике: Материалы симпозиума в рамках XVI (XLVIII) Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Образование, наука, инновации: вклад молодых исследователей». Кемерово

во: Кемеровский государственный университет, 2021. С. 107–110.

- [2] БАРАНОВ И. Н. Автоматизация документооборота посредством внедрения технологий роботизации // Наука, технологии, общество — НТО-II-2022: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции. Красноярск: Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений», 2022. С. 38–45.
- [3] Автономные и серверные виджеты. [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/dev/wdgt/doc/dg/concepts/widget-types.html> (Дата обращения 29.08.2022).
- [4] АХМЕТЗЯНОВ И. И. Микросервисы в разработке программного обеспечения // Наука в движении: от отражения к созданию реальности: материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов и учащихся с международным участием. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «КОНВЕРТ», 2020. С. 164–167.

3.5. Гренкин Г.В. Оптимальное планирование инвестиций в программу «well-being» на предприятии

В рамках управления предприятием возникает задача интеллектуального анализа данных с целью оптимального распределения инвестиций между направлениями программы «well-being». Можно считать, что инвестиции, направляемые в мероприятия «well-being», влияют как на компетенции сотрудников, так и на уровень их выгорания, что в совокупности влияет на ключевые показатели эффективности сотрудников [1]. При этом оптимизационные модели, функционально описывающие все перечисленные каналы влияния, недостаточно разработаны.

Математическая модель включает:

- линейную зависимость компетенций сотрудников от инвестируемых средств;
- нелинейную зависимость удовлетворенности ожиданий сотрудников от инвестиций в программу «well-being»;
- кусочно-линейную зависимость показателей выгорания от удовлетворенности ожиданий сотрудников;
- кусочно-линейную зависимость ключевых показателей эффективности от компетенций с учетом выгорания.

Задача оптимизации состоит в максимизации достижения показателей эффективности сотрудников в следующий момент времени. Ограничениями служат количества средств, вкладываемых в каждое мероприятие.

Задача оптимального распределения средств между направлениями «well-being» аналогична непрерывной задаче о рюкзаке, поэтому для нахождения субоптимального решения применяется жадный алгоритм.

Если ставить задачу дискретным образом, когда средства инвестируются в конкретные мероприятия из списка, приходим к аналогу дискретной задачи о рюкзаке. При этом в задаче имеются линейные ограничения на физический рост компетенций. Эта задача сводится к задаче целочисленного линейного программирования. Для ее решения применяется солвер `scipy.optimize.milp`.

Таким образом, решена задача, в которой присутствуют разные типы ограничений и используются линейные и нелинейные эконометрические зависимости.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-28-01333, <https://rscf.ru/project/23-28-01333/>) во Владивостокском государственном университете.

Научный руководитель — д.э.н. Мазелис Л. С.

Список литературы

- [1] МАЗЕЛИС Л. С., ГРЕНКИН Г. В., ЛАВРЕНЮК К. И. Моделирование влияния компетенций сотрудника на его результативность с учетом выгорания // Journal of Applied Economic Research. 2024. Т. 23. № 1. С. 227–250. DOI:10.15826/vestnik.2024.23.1.010.

3.6. Добринцев И.М., Тетерина Е.А., Викулова Е.Р. Математическое моделирование управления микросервисной архитектурой с учетом случайных факторов

В данной работе исследуется задача управления архитектурой микросервисов с использованием стохастических дифференциальных уравнений (СДУ). Современные распределенные вычислительные системы обладают высокой сложностью и неопределенностью, что требует применения адекватных математических подходов для их анализа. Мы предлагаем использование СДУ для моделирования динамических процессов в таких системах, учитывая случайные воздействия и колебания нагрузки [1].

Предложенная модель описывается следующим образом:

$$dx(t) = f(x(t), u(t), t) dt + g(x(t), u(t), t) dW(t),$$

где $f(x, u, t)$ — детерминированная часть, а $g(x, u, t)$ — стохастическая часть; $W(t)$ — Винеровский процесс, представляющий белый шум [2].

Для описания микросервисной архитектуры функции f и g могут быть выбраны следующим образом:

$$f(x, u, t) = \begin{pmatrix} \lambda_1(t) - \mu_1(x_1, u_1) \\ \lambda_2(t) - \mu_2(x_2, u_2) \\ \vdots \\ \lambda_n(t) - \mu_n(x_n, u_n) \end{pmatrix},$$

где $\lambda_i(t)$ — интенсивность входящего потока запросов к i -му микросервису, $\mu_i(x_i, u_i)$ — интенсивность обслуживания запросов i -м микросервисом [3].

Функция цели J формулируется как:

$$J = \mathbb{E} \left[\int_0^T (c_1 \cdot E(W(x(t))) + c_2 \cdot R(u(t))) dt \right],$$

где $E(W(x))$ — ожидаемое время ожидания в очереди, $R(u)$ — затраты на ресурсы [1].

Ограничения задачи включают:

- ограничения на управление: $u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$;
- ограничения на состояние: $x_{\min} \leq x(t) \leq x_{\max}$.

Методы решения задачи включают:

1. методы численного решения СДУ:

- метод Эйлера — Маруямы, использующийся для аппроксимации траекторий СДУ [3];
- стохастическая версия метода Рунге — Кутты [4];

2. оптимальные стратегии управления:

- принцип максимума Понтрягина для стохастических систем [5];
- методы стохастического программирования [6].

Проведенные эксперименты с тестовой системой показали, что среднее время отклика уменьшилось на 27 %, а утилизация ресурсов повысилась на 18 %. Эти результаты подтверждают эффективность предлагаемого подхода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-21-00296).

Список литературы

- [1] FLEMING W. H., SONER H. M. Controlled Markov processes and viscosity solutions / Springer Science & Business Media, 2006. 446 p.
- [2] OKSENDAL B. Stochastic differential equations: an introduction with applications / Springer Science & Business Media, 2003. 360 p.
- [3] KLOEDEN P. E., PLATEN E. Numerical solution of stochastic differential equations / Springer Science & Business Media, 1992. 125 p.
- [4] BURRAGE K., BURRAGE P. M., TIAN T. Numerical methods for strong solutions of stochastic differential equations: an overview // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2004. Vol. 460. N. 2041. P. 373–402.
- [5] YONG J., ZHOU X. Y. Stochastic controls: Hamiltonian systems and HJB equations / Springer Science & Business Media, 1999. 439 p.
- [6] SHAPIRO A., DENTCHEVA D., RUSZCZYŃSKI A. Lectures on stochastic programming: modeling and theory / SIAM, 2009. 442 p.

3.7. Ермилов Е.П. Поиск временного интервала при сравнении континуального и атомистического подходов для кристалла никеля с гранецентрированной кубической решёткой в ПО LAMMPS

В данной работе рассматривается соответствие (по времени) методов расчёта напряжений близ центральной трещины континуальным и атомистическим подходами в механике деформируемого твёрдого тела для кристалла никеля. Континуальный подход реализуется через решение системы уравнений состояния при одноосном растяжении по функции Эри, при этом атомистический подход в ПО LAMMPS использует различные потенциалы (для данной работы используется потенциал «погруженного атома», предложенными Доу и Баскесом [1]).

Актуальность данной работы заключается в отсутствии широкого распространения смещения континуального и атомистического подхода в программных реализациях.

Для ограничения временного отрезка и подбора скорости деформации произведено моделирование в LAMMPS одноосного растяжения без трещины кристалла никеля с гранецентрированной кубической решёткой (ГЦК). Был выбран NPT ансамбль, температура равновесия 300 К. Кристалл представляет собой куб с линейным размером 1 нм. Загружен потенциал внедрённого атома.

После построения графиков «напряжение-деформация» была выбрана скорость деформации и ограничено время моделирования для будущей трещины до 10 пс.

Для решения задачи о сравнении континуальной механики деформируемого твёрдого тела с атомистическим подходом запишем уравнения состояния у края острой трещины (в силу одноосного растяжения, данная система инвариантна для двух краёв) для компонентов тензора напряжений и функции напряжений Эри χ :

$$\begin{cases} \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \chi}{\partial r^2}, \\ \sigma_r = \nabla^2 \chi - \sigma_\theta, \\ \tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial \theta} \right). \end{cases}$$

Решением данной системы уравнений являются компоненты тензора напряжений, одним из множителей которого являются универсальные угловые распределения [2]. Компоненты тензора были реализованы в данной работе в виде функции для языка программирования Python.

Далее была создана инструкция в ПО LAMMPS для моделирования пластины из никеля, содержащая 200000 атомов с линейными размерами (35.063, 35.063, 1.052) нм. К пластине применялась растягивающая нагрузка вдоль оси y . Далее в OVITO была произведена обработка выходного файла. Создаём кольцевую структуру для построения графика зависимости элемента тензора напряжений от полярного угла в окрестности вершины трещины для временных шагов 2.5, 5, 7.5, 10 пс.

После построения графиков наблюдается соответствие континуального и атомистического подхода

для никеля с ГЦК-структурой на временных шагах 2.5, 5 пс.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Степанова Л. В.

Список литературы

- [1] Daw S., Baskes M. Embedded-atom method: derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals // Physical Review B. 1984. Vol. 29. N. 12. P. 6443–6453.
- [2] Степанова Л. В. Экспериментальное и конечно-элементное определение коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса у вершины трещины в линейно-упругом изотропном материале. Ч. I // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 237–249.

3.8. Иванов А.Д., Гренев И.В. Определение распределения пор по размерам адсорбентов и катализаторов с помощью методов машинного обучения

Наиболее информативными экспериментальными методами исследования пористой структуры адсорбентов и катализаторов являются адсорбционные методы, основанные на анализе изотерм адсорбции газов. Распределение пор по размерам является важной текстурной характеристикой, которая определяет кинетику адсорбции и диффузию газов и жидкостей через пористую среду материалов. Современные методы анализа изотерм адсорбции и определения распределения пор по размерам основаны на решении обратной задачи по разложению экспериментальной изотермы на набор базисных (локальных) изотерм, рассчитанных с помощью теории функционала плотности флюида или метода Монте-Карло для большого канонического ансамбля. Каждая такая локальная изотерма характеризует изменение величины адсорбции газа от давления при фиксированной температуре в поре определенной формы и размера с заданным химическим составом стенок пор. Однако, подобная обратная задача относится к классу некорректных задач, для решения которых используют различные виды регуляризации. По этой причине конечный вид функции распределения пор по размерам сильно зависит от параметров и вида регуляризации. В данной работе предложен альтернативный метод на основе машинного обучения для анализа изотерм адсорбции и определения функции распределения пор по размерам, который не требует подбора оптимальных параметров регуляризации при анализе каждой новой экспериментальной изотермы.

Для разработки суррогатных моделей необходим большой набор данных для обучения. В данной работе были опробованы несколько подходов для формирования наборов обучающих данных: пар изотерма адсорбции — распределения пор по размерам. Первый подход заключался в параметризации рас-

пределения пор по размерам и генерации различных изотерм адсорбции путем решения прямой задачи. Во втором подходе использовались «реальные» распределения пор по размерам, полученные из экспериментальных изотерм адсорбции с использованием классического метода решения обратной задачи без регуляризации. В третьем подходе использованы «реальные» распределения пор по размерам, однако, для их получения из экспериментальных изотерм адсорбции использовалась регуляризация с подбором оптимальных параметров. Полученные суррогатные модели были опробованы для определения распределения пор по размерам на экспериментальных адсорбционных данных для ряда референсных материалов с известной формой и размером пор.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0034).

3.9. Котлер В.Д., Платонова М.В. ИВС для решения задач усвоения данных при моделировании окружающей среды

Оценка потоков парниковых газов с поверхности Земли является важной задачей в контексте глобальных климатических изменений. Ведется разработка информационно-вычислительной системы для анализа потоков на основе данных спутниковых наблюдений и математического моделирования [1]. В качестве входных данных используются измерения концентраций метана (AIRS) и результаты модели MOZART-4.

В системе реализованы этапы предобработки и организации больших объемов данных. Описаны методы структурирования данных и хранения результатов вычислений. Данная система позволяет автоматизировать процесс обработки данных и минимизировать участие пользователя при подготовке исходных данных, обеспечивая доступность расчетов для широкого круга специалистов.

Разработан удобный пользовательский интерфейс, обеспечивающий выбор различных параметров для настройки расчетов и анализа данных. Интерфейс позволяет выполнять вычисления, визуализировать результаты и эффективно работать с большими объемами данных, минимизируя необходимость ручного вмешательства. Это расширяет возможности использования системы для специалистов в различных областях, связанных с оценкой потоков парниковых газов.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Климова Е. Г.

Список литературы

- [1] PLATONOVA M., KLIMOVA E. An algorithm for estimating greenhouse gas fluxes using satellite data for a global transport and diffusion model // J. of Physics: Conf. Series. 2021. Vol. 1715. N. 1. P. 012021–012022.

3.10. Кузнецов К.С. Решение трехмерных сингулярно возмущенных систем уравнений в области со сложной геометрией при помощи метода PINN

В докладе рассматривается решение стационарной системы уравнений диффузии — конвекции — реакции в области $\Omega \in \mathbb{R}^3$, записанной в векторной форме [1]:

$$-\varepsilon \Delta \mathbf{u} + \mathbf{a}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \cdot \mathbf{u} + \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ — вектор неизвестных функций, $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ — вектор скоростей, $\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$ — вектор сил реакции, $\mathbf{f} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ — вектор внешних сил, $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}$ — вектор коэффициентов диффузии.

Уравнениям (1) соответствуют граничные условия первого рода:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^b(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega,$$

где $\mathbf{u}^b = \{u_1^b, u_2^b, \dots, u_n^b\}$ — известные функции, $\partial\Omega$ — граница области Ω .

В том случае, когда коэффициенты перед старшими производными ε в системе (1) являются достаточно малыми, в решении появляются зоны быстрых изменений функций, иногда называемые сингулярными возмущениями.

В качестве инструмента для численного решения задач были использованы метод конечных элементов, реализуемый программным обеспечением FreeFem++ [2], а также метод Physics Informed Neural Networks (PINN), реализуемый на библиотеке Tensorflow языка программирования Python. Метод PINN заключается в аппроксимации неизвестных функций нейронными сетями путем их обучения на минимизацию квадратичного функционала качества, включающегося в себя слагаемые для невязок уравнений, граничных и начальных (при их наличии) условий. Стоит отметить, что метод конечных элементов использовался для верификации метода PINN [3] в случае линейной системы уравнений (1). В случае же наличия нелинейностей в уравнениях использование метода конечных элементов для решения затруднительно.

Список литературы

- [1] ЛИСЕЙКИН В. Д. Разностные сетки. Теория и приложения / Новосибирск: СО РАН, 2014. 256 с.
- [2] NESHT F. New development in FreeFem++ // Journal of Numerical Mathematics. 2012. Vol. 20. N. 3–4. P. 251–266.
- [3] RAISSI M., PERDIKARIS P., KARNIADAKIS G. E. Physics-informed neural networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686–707.

3.11. Ликсонова Д.И. О математическом моделировании взаимно неоднозначных отображений

В настоящем исследовании рассматривается аппроксимация функции по наблюдениям с помехами в случае, когда исследуемый многомерный объект содержит взаимно неоднозначные характеристики. Данная постановка вопроса имеет существенное значение в задачах идентификации и управления системами класса Винера и Гаммерштейна, в которых нелинейные элементы могут быть представлены в виде последовательного соединения линейного динамического и нелинейного безынерционного блоков [1, 2]. Сложность задачи заключается в отсутствии достаточной априорной информации о параметрической структуре модели исследуемой системы [3]. Следует отметить, что в качестве нелинейной части появляются элементы, которые могут описываться такими кривыми как петля гистерезиса, люфт, эквивалентный эллипс, вихревые токи и другие. Определим рассматриваемые нелинейные элементы как взаимно неоднозначные отображения.

При решении задач идентификации объекта в условиях недостаточной априорной информации используются непараметрические оценки [4]. Но характерной особенностью взаимно неоднозначных отображений является то, что заданному значению аргумента соответствует два или более значений функции. В таком случае применение непараметрических оценок без учета дополнительных параметров не приведет к желаемому результату.

В статьях [5, 6] говорится об одном из подходов к восстановлению взаимно неоднозначных функций, в которых авторы указывают на введение нового класса непараметрических оценок. С учетом рассмотренных работ в настоящем исследовании предлагается внести некоторые изменения в известную оценку функции регрессии Надарая — Ватсона [7]. Такие изменения позволяют закрепить области оценивания, и помогают провести моделирование взаимно неоднозначных отображений (нелинейных безынерционных блоков). В работе приводятся некоторые фрагменты вычислительных экспериментов, которые показывают приемлемые результаты с точки зрения точности восстановления. Таким образом, подчеркнем, что на практике моделирование взаимно неоднозначных функций может применяться и при разработке роботов, а также и в различных робототехнических системах, функционирующих по заранее не определенной траектории.

Список литературы

- [1] КАМИНСКАС В. А., ЯНИЦКЕНЕ Д. Ю. Идентифицируемость нелинейных объектов класса Гаммерштейна // Автоматика и телемеханика. 1985. № 9. С. 69–77.
- [2] ПАЩЕНКО А. Ф. Моделирование нелинейных систем Винера — Гаммерштейна // Seventh International

Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2009). 2009. С. 507–509.

- [3] КАЦЮБА О. А. Теория идентификации стохастических динамических систем в условиях неопределенности / Самара: СамГУПС, 2008. 119 с.
- [4] МЕДВЕДЕВ А. В. Основы теории непараметрических систем / Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2018. 727 с.
- [5] ЧЕРНОВА С. С., ШИШКИНА А. В. О непараметрическом оценивании взаимно неоднозначных функций по наблюдениям // Молодой ученый. 2017. № 25 (159). С. 13–20.
- [6] KORNEEVA A. A., CHERNOVA S. S., SHISHKINA A. V. Non-parametric algorithms of reconstruction of mutually ambiguous functions from observations // Siberian Journal of Science and Technology. 2017. Vol. 18. N. 3. P. 510–519.
- [7] НАДАРАЯ Э. А. Замечания о непараметрических оценках плотности вероятности и кривой регрессии // Теория вероятностей и ее применение. 1970. Т. 15. № 1. С. 139–142.

3.12. Мальшиев В.А. Нейросетевые подходы к решению задач гемодинамики

В медицинской практике часто возникает необходимость построения гемодинамических симуляций для конкретного пациента. Например, пациенту предстоит перенести хирургическую операцию по установке стента в коронарную артерию, но перед её проведением необходимо спрогнозировать изменения гемодинамики сердца у этого человека. Классически это делается с помощью метода конечных элементов, который дает хорошие результаты, однако ему не хватает гибкости. Часто некоторая информация о граничных или начальных условиях может быть недоступна или некоторые особенности геометрии и свойства крови неизвестны, но доступна другая неструктурированная или неточная информация. И тогда мы переходим в область, в которой процветает машинное обучение. С целью создать новую гибкую систему, способную аппроксимировать решение уравнений математической физики при неточных, неклассических условиях, была предложена архитектура физически информированной нейронной сети (PINN) [1]. Среди других нейросетевых подходов — сверточные нейросети [2]. Множество других исследователей теперь работают над улучшением этих систем.

В настоящей работе исследован и опробован ряд идей [3], предложенных специалистами в области физически информированных нейросетей. Особое внимание уделено преобразованию координат с использованием проекций и тригонометрических функций [4]. Изучен потенциал этих идей в повышении эффективности этих систем. В некоторых случаях были получены результаты в условиях, соответствующих гемодинамике человека. Результаты включают прямое моделирование тока крови в артерии с известными граничными условиями в таких случаях, как стеноз, тромбоз, аневризма. Ис-

пользуя дополнительные данные измерений в артерии удалось: определить приблизительные значения распределения скорости на входе, динамической вязкости. Результаты показывают, что существует класс случаев с достаточно гладкой границей и гидродинамическими характеристиками, соответствующими состоянию артерий человека, для которых можно эффективно решать такие задачи как: моделирование тока крови, определение гидродинамических параметров тока, частичное восстановление краевых условий.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Апушкинская Д. Е.

Список литературы

- [1] RAISSI M., PERDIKARIS P., KARNIADAKIS G. E. Physics-informed neural networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686–707.
- [2] WANG S., NIKFAR M., AGAR J. C. ET AL. Stacked deep learning models for fast approximations of steady-state Navier — Stokes equations for low Re flow // Intell. Comput. 2024. Vol. 3. Art. 0093.
- [3] DU TOIT J. F., LAUBSCHER R. Evaluation of physics-informed neural network solution accuracy and efficiency for modeling aortic transvalvular blood flow // Math. Comput. Appl. 2023. Vol. 28. N. 2. Art. 62.
- [4] SALLAM O., FÜRTH M. On the use of Fourier features-physics informed neural networks (FF-PINN) for forward and inverse fluid mechanics problems // Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2023. Vol. 237. N. 4. P. 846–866. DOI:10.1177/14750902231166424.

3.13. Платонова М.В., Котлер В.Д. Оценка пространственно-временного распределения потоков метана по спутниковым данным и прогнозам по модели переноса и диффузии

Исследование потоков метана в атмосфере является ключевой задачей для анализа климатических изменений [1–4]. Для повышения точности оценки концентраций и эмиссии метана применяются методы усвоения данных, которые объединяют спутниковые наблюдения и математическое моделирование.

В данной работе представлена методика оценки пространственно-временного распределения потоков метана с использованием спутниковых данных и модели переноса — диффузии. Разработан алгоритм на основе детерминированного ансамблевого фильтра Калмана, который позволяет выявить регионы с высокими эмиссиями метана и оценить их сезонную динамику. Представлены результаты численных экспериментов с реальными данными.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Климova Е. Г.

Список литературы

- [1] PLATONOVA M., KLIMOVA E. An algorithm for estimating greenhouse gas fluxes using satellite data for a global transport and diffusion model // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1715. N. 1. Art. 012021.
- [2] MORDVIN E. Y., LAGUTIN A. A. Methane in the atmosphere of Western Siberia / Barnaul: Azbuka, 2016. 230 p.
- [3] FENG L., PALMER P. I., YANG Y. ET AL. Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO₂ using ground-based, aircraft, and space-borne data // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. Vol. 11. N. 6. P. 2789–2803.
- [4] FENG L., PALMER P. I., PARKER R. J. ET AL. Estimates of European uptake of CO₂ inferred from GOSAT XCO₂ retrievals: sensitivity to measurement bias inside and outside // Europe Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. Vol. 16. P. 1289–1302.

3.14. Погудин В.Ю., Пономарев А.Н., Резванова А.Е., Кудряшов Б.С. Анализ методов машинного обучения для прогнозирования микротвердости керамического материала на основе гидроксипатита

Целью работы является оптимизация создания керамики на основе гидроксипатита (ГА) с добавлением многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) с заданными механическими свойствами методами машинного обучения при помощи библиотек на языке Python. В процессе работы проводилось прогнозирование промежуточных значений микротвердости керамических материалов по подаваемой на них нагрузке различными методами машинного обучения и выявление наилучшего из них.

Датасет, на котором обучались модели, основан на данных измерения твердости экспериментальных образцов методом Виккерса при нагрузках 100, 200, 300 и 500 грамм-сил. Измерения производились на трех типах образцов: чистом ГА, ГА + 0.5 масс. % МУНТ (серия 1), ГА + 0.5 масс. % МУНТ (серия 2). На каждую нагрузку приходилось множество измерений. Полученные значения твердости имеют высокий разброс, что связано с неоднородностью и пористостью материала, а также погрешностями измерения.

При создании регрессионной модели были проанализированы несколько методов машинного обучения, а именно:

- линейная регрессия;
- полиномиальная регрессия;
- случайный лес решений;
- регрессор Ada Boost (адаптивного бустинга);
- регрессор XGBoost (экстремального градиентного бустинга);
- нейронная сеть.

Для реализации первых 4 моделей использовалась библиотека scikit-learn [1]. Для второго метода бу-

стинга применялась библиотека XGBoost [2]. Нейронная сеть была создана с помощью Keras [3].

Чтобы определить, насколько хорошо подобрана линия использовалась функция потерь, которая показывала разницу между предсказанным и реальными значениями. Одной из самых распространенных является средняя квадратичная ошибка:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2},$$

где n — количество значений; x_i — экспериментальное значение; $\bar{x}_i$ — предсказанное значение.

В результате анализа лучше всего показала себя модель регрессора на основе нейронной сети, которая применялась для интерполяции значений твердости экспериментальных образцов керамики на основе гидроксипатита.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема № FWRW-2022-0002.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Пономарев А. Н.

Список литературы

- [1] Scikit-learn. [Электронный ресурс]. URL: <https://scikit-learn.org/stable> (дата обращения 21.02.2024).
- [2] XGBoost. [Электронный ресурс]. URL: <https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=XGBoost> (дата обращения 21.02.2024).
- [3] Keras: deep learning for humans. [Электронный ресурс]. URL: <https://keras.io> (дата обращения 07.03.2024).

3.15. Ревун А.Л., Рудин С.А., Павский К.В. Оптимизация алгоритмов расчёта деформации при атомистическом моделировании гетэрозпитаксиального роста Ge на Si(100) методом Монте-Карло

Одной из приоритетных задач в области материаловедения является создание гетероструктур с квантовыми точками (КТ). Для решения этой задачи требуется получать упорядоченные массивы КТ. Одним из способов получения массивов КТ является метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Для исследования процессов зарождения массивов КТ на уровне не доступном экспериментатору используется имитационное моделирование методом Монте-Карло построенное на физической модели описанной в материале [1].

Для получения новых экспериментальных данных возникает потребность в проведении множества экспериментов имитационного моделирования с различными параметрами. Однако при моделировании осаждения 1 монослоя Ge на гладкую подложку Si размером $27 \times 27 \times 0.8$ нм при температуре 500 °С занимает 60 часов. Увеличение размеров моделируемой структуры, температуры, и прочих параметров нелинейно увеличивает время моделиро-

вания, что обуславливает потребность в нахождении оптимальных путей вычислений.

Основной этап моделирования роста состоит из шага Монте-Карло и «термического отжига». Шаг Монте-Карло представляет собой случайный выбор одного из элементарных событий: осаждения или диффузионного прыжка. Выбор случайного события обусловлен его вероятностью. После каждого элементарного события выполняется «термический отжиг» во время его выполнения пересчитываются координаты 1 % случайно выбранных атомов согласно распределению Больцмана. Такой подход позволяет учитывать изменение энергии деформации в пространстве с течением времени.

Анализ циклов расчёта деформации в шаге Монте-Карло показал, что использование средств барьерной синхронизации приводит к снижению эффективности распараллеливания. Также было показано, что не все фрагменты кода могут быть распараллелены в силу ограничений, накладываемых моделью. Определив такие фрагменты, мы сосредоточились на их рефакторинге и оптимизации. При оценке временных затрат шаг Монте-Карло занимает примерно 40 % времени по отношению к 60% «термического отжига» от основного времени этапа моделирования. В результате оптимизация алгоритмов позволила сократить время выполнения шага Монте-Карло приблизительно на 25 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FWGW-2022-0011).

Список литературы

- [1] Новиков П. Л., Ненашев А. В., Рудин С. А. и др. Зарождение и рост квантовых точек Ge на Si — моделирование с использованием высокоэффективных алгоритмов // Российские нанотехнологии. 2015. Т. 10. № 3–4. С. 26–34.

3.16. Россов Д. А. Разработка концепции системы автоматического обновления 3D моделей сложных технических устройств

Создание трехмерных моделей является наиболее эффективным и экономически целесообразным методом визуализации машин, механизмов и технологических процессов. Поскольку обновление трехмерных моделей, используемых в производстве технических изделий, осуществляется специалистами, разрабатывающими эти модели, только после того, как они получают доступ к новым технологиям, это приводит к недостаточной скорости технического развития, ограниченному внедрению новых компонентов и высокому риску того, что технологии не будут применены в неявных частях модели с целью ее оптимизации.

Для решения проблемных ситуаций с обновлением 3D моделей сложных технических устройств в работе предложена архитектура и алгоритмы

системы, которая обеспечивает автоматическое и актуальное обновление цифровых моделей этих устройств по мере необходимости изменения их физических или функциональных характеристик [1].

В работе рассматриваются особенности процесса проектирования моделей сложных технических устройств. Поднимается проблема того, что разработанные модели должны учитывать не только критерии надежности и экономичности, но и иметь сложную техническую составляющую, которая может обновляться с добавлением новых компонентов для улучшения характеристик конечного изделия.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Пестунов А. И.

Список литературы

- [1] VOORDIJK H., OLDE SCHOLTENHUIS L. Technological mediation and 3D visualizations in construction engineering practice // AI and Soc. 2024. P. 207–220.

3.17. Смородинов А. Д. Решение трехмерной задачи Коши на основе искусственной нейронной сети

Как известно из [1], искусственные нейронные сети (ИНС) являются универсальными аппроксиматорами. Основной проблемой применения технологий на основе ИНС является проблема их конструирования и подбора весовых коэффициентов. Покажем пример конструирования и подбора весовых коэффициентов искусственной нейронной сети для моделирования динамики примеси, движущейся в потенциальных течениях, задаваемых кулоновскими потенциалами, постановка задачи представлена в [2]. Для решения уравнения необходимо решить задачу Коши в трехмерном пространстве. ИНС будет конструироваться на основе метода Рунге — Кутты 4-го порядка точности, а весовые коэффициенты — устанавливаться без применения процесса обучения, а исходя из математического обоснования. В ходе работы для реализации метода Рунге — Кутты разработана и протестирована модель ИНС для умножения двух чисел. Проведен ряд вычислений по сравнению точности решения задачи Коши с использованием ИНС и без её использования, программный комплекс для решения задачи Коши методом Рунге — Кутты 4-го порядка точности, с которым проводится сравнение точности, представлен в [3]. Результаты тестирования показывают точность на уровне 10^{-6} , что доказывает возможность решения проблемы отсутствия доверия к ИНС путем смены подхода к конструированию ИНС и подбору её весовых коэффициентов

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реа-

лизуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Галкин В. А.

Список литературы

- [1] Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения // Доклады Академии наук СССР. 1957. Т. 114. № 5. С. 953–956.
- [2] Галкин В. А., Смородинов А. Д., Моргун Д. А. Решение уравнения Навье—Стокса для сталкивающихся потоков // Успехи кибернетики. 2023. Т. 4. № 2. С. 8–15.
- [3] Смородинов А. Д., Гавриленко Т. В., Дубовик А. О., Моргун Д. А. Реализация программного обеспечения для решения задачи Коши с различными конфигурациями полей начальных данных и визуализации результатов математического моделирования течения тяжелой примеси // Успехи кибернетики. 2024. Т. 5. № 2. С. 35–45.

3.18. Толстых М. А. Идентификация активности пользователей социальной сети в диффузионной модели

В работе предлагается модификация известной диффузионной логистической модели [1] распространения информации в социальных сетях, в предположении, что потоки информации достоверно подчиняются физическим законам диффузии. При этом параметры модели приобретают понятную смысловую и количественную оценку. А именно: пропускная способность социальной сети (h — количество пользователей в графе сети); популярность информации (p — скорость диффузии информации); активность пользователей (r — скорость изменения потока информации в сети со временем).

Дискретные процессы в сети аппроксимируются физическими процессами механики сплошных сред, уравнением диффузии:

$$\frac{\partial v}{\partial t} - p \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - rh\theta(v) = 0, \quad x, t \in \Omega = (x_a, x_b) \times (t_0, t_1),$$

где $v(x, t)$ — информация (количество репостов новости), x — расстояние от первоисточника новости, $rh\theta(v)$ — возможные внешние источники.

Посредством прямого экстремального подхода [2] решена тестовая задача идентификации $r(t)$ бесконечномерным градиентным методом на основе функционала

$$J(h) = \iint_{\Omega} (v - v_e)^2 dxdt \rightarrow \min.$$

Было найдено аналитическое выражение градиента $J(r)$. Проведены тестовые расчёты. Найденная функция на графике визуально полностью совпала с точным значением.

Предложенная модель и прямой экстремальный подход продемонстрировали высокоточную идентификацию изменения скорости распространения новостной информации в графе сети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Азово-Черноморского математического центра (Соглашение от 29.02.2024 № 075-02-2024-1446).

Научный руководитель — д.т.н. Аверин Г. В.

Список литературы

- [1] WANG H., WANG F., XU K. Modeling information diffusion in online social networks with partial differential equations / Springer Nature, 2020. 144 p.
- [2] Толстых В. К. Прямой экстремальный подход для оптимизации систем с распределёнными параметрами / Донецк: Юго-Восток, 1997. 178 с.

3.19. Шевелев Е. И., Данилко В. Р. Теория возмущений и многопараметрическая оптимизация с использованием сверточных нейронных сетей для компенсации нелинейных искажений в оптических системах связи

Нелинейные искажения сигнала являются одним из основных факторов, ограничивающих пропускную способность и дальность действия оптических систем связи [1]. В настоящее время существует несколько подходов к компенсации нелинейных искажений, но для их практической реализации алгоритмы должны быть одновременно точными, быстрыми и устойчивыми к различным помехам [2–4]. Один из проработанных подходов заключается в применении методов теории возмущений к нелинейному уравнению Шрёдингера, что позволяет определить соотношение между переданными и принятыми символами.

В большинстве исследований градиентные методы используются для нахождения коэффициентов возмущений путем минимизации среднеквадратичной ошибки между символами. Однако основным параметром, характеризующим качество передачи информации, является коэффициент битовых ошибок. Мы предлагаем модификацию традиционного подхода, основанного на теории возмущений для компенсации нелинейности волокна, в виде двухэтапной схемы вычисления коэффициентов возмущения. На первом этапе коэффициенты вычисляются с помощью сверточной нейронной сети путем минимизации среднеквадратичного отклонения. На втором этапе полученное решение используется в качестве начального приближения для минимизации коэффициента битовых ошибок с использованием метода роя частиц.

В численных экспериментах с использованием алгоритма компенсации нелинейности на основе предложенной схемы мы достигли выигрыша по параметру сигнал-шум 0.8 дБ для линии 16QAM 20×100 км со скоростью канала 267 Гбит/с и проде-

монстрировали улучшенную точность по сравнению с одноэтапной схемой. Мы оценили вычислительную сложность алгоритма и продемонстрировали связь между его сложностью и точностью.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Редюк А. А.

Список литературы

- [1] WINZER P. J., NEILSON D. T., CHRAPLYVY A. R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years // Optics Express. 2018. Vol. 26. N. 18. P. 24190–24239.
- [2] IP E. Nonlinear compensation using backpropagation for polarization-multiplexed transmission // Journal of Lightwave Technology. 2010. Vol. 28. N. 1 P. 939–951.
- [3] REDYUK A., AVERYANOV E., SIDELNIKOV O. ET AL. Compensation of nonlinear impairments using inverse perturbation theory with reduced complexity // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38. N. 6. P. 1250–1257.
- [4] KOZULIN I. A., REDYUK A. A. Interchannel nonlinearity compensation using a perturbative machine learning technique // Optics Communications. 2021. Vol. 493. Art. 127026.

4. Информационные технологии

4.1. Бобровская О.П. Агент транспортного потока, обученный с подкреплением

Активно разрабатываемые различными производителями системы беспилотного транспорта будут сильно отличаться друг от друга. При их внедрении в существующий транспортный поток возможны проблемы, которые можно заранее смоделировать в рамках вычислительных экспериментов.

Как известно, сейчас разработки в основном сфокусированы на обучении автоматических систем подражанию реальным водителям. Поэтому имеет смысл проверить последствия ситуации, при которой множество отдельно обученных агентов беспилотников будут двигаться по одной дороге.

Для этого было решено применить методы обучения с подкреплением к агентам транспортного потока. В качестве среды для обучения использовалась разработанная ранее модель транспортного потока, основанная на потенциале действия [1]. Обучение осуществлялось с помощью модели DDPQ, впервые предложенной в работе [2] и реализованной в библиотеке keras.rl2 для языка Python3.

У агента (нейронной сети) обучалось 5 параметров:

- $v \in \mathbb{R}$; $-1 \leq v \leq 1$ — скорость;
- $d_i \in \mathbb{R}$; $i = \overline{1, 4}$; $-1 \leq d_i \leq 1$ — направления перестроения: при всех $d_i < 0$ полоса не меняется, в противном случае выбирается $d_{\max}$.

В обучении с подкреплением важно задать функцию вознаграждения, чтобы агент поощрялся за совершение полезных действий и наказывался в противном случае. Цель, которой мы хотели достичь — агент, движущийся вперед на максимальной скорости, при необходимости перестраивающийся и избегающий столкновений. Поэтому для оценки совершенных действий каждый такт времени использовалась функция награждения, которая состоит из следующих составляющих (с указанием баллов в скобках): сохранение безопасной дистанции с впереди (0.4) и позади (0.05) идущими агентами на полосе, перестроение на другую полосу (0.4) только для увеличения дистанции до впереди идущего агента, сохранение положительной скорости (0.2).

Результатом является программное обеспечение, предоставляющее среду для обучения нейросетевого агента, имитирующего движение транспортного средства. Обучение и тестирование может осуществляться в гибридной среде, состоящей как из исходных автоматов, так и из агентов, прежде обученных в этой среде.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмиче-

ских методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Научный руководитель — к.т.н. Гавриленко Т. В.

Список литературы

- [1] БОБРОВСКАЯ О. П., ГАВРИЛЕНКО Т. В., ГАЛКИН В. А. Модель транспортного потока, основанная на взаимодействии частиц с потенциалом действия // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 40. № 3. С. 72–87.
- [2] VAN HASSELT H., GUEZ A., SILVER D. Deep reinforcement learning with double Q-learning // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2016. Vol. 30. N. 1. P. 2094–2100.

4.2. Гузев Е. В. Проект информационной системы прогнозирования лесных пожаров на урбанизированных территориях на основе детерминированных математических моделей и технологий искусственного интеллекта

Леса играют важную роль в поддержании экологического баланса, но подвержены риску возникновения пожаров. Частота и интенсивность лесных пожаров растет из-за изменения климата и антропогенного воздействия [1, 2]. Цель исследования — разработка новых методов оценки и прогнозирования лесной пожарной опасности, особенно в условиях урбанизации территории. Традиционные методы прогнозирования лесных пожаров, как правило, фокусируются на природных факторах, таких как метеорологические условия, топография и растительность [3]. Однако, в урбанизированных районах, человеческая деятельность играет ключевую роль в возникновении и распределении пожаров. Предлагается усовершенствование детерминированно-вероятностного подхода [4] путем использования технологий искусственного интеллекта [5]. Кроме того, предполагается интеграция данных дистанционного зондирования, ГИС-технологий и методов математического моделирования [6]. Перспективы использования разработанных методов и программных средств: а) повышение точности оценки и прогнозирования пожарной опасности; б) улучшение планирования и координации действий по предотвращению и ликвидации пожаров; в) снижение экономических и экологических потерь от лесных пожаров на урбанизированных территориях.

Список литературы

- [1] БАРАНОВСКИЙ Н. В. Прогнозирование лесной пожарной опасности в условиях грозовой активности / Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. 239 с.
- [2] БАРАНОВСКИЙ Н. В. Прогнозирование лесной пожарной опасности в условиях антропогенной нагрузки / Новосибирск: СО РАН, 2021. 302 с.
- [3] CHEN X., TIAN Y., ZHENG C., LIU X. AutoST-Net: a spatiotemporal feature-driven approach for

accurate forest fire spread prediction from remote sensing data // Forests. 2024. Vol. 15. Art. 705.

- [4] BARANOVSKIY N. V., VYATKINA V. A., CHERNYSHOV A. M. Deterministic-probabilistic prediction of forest fires from lightning activity taking into account aerosol emissions // Atmosphere. 2023. Vol. 14. Art. 29.
- [5] YANG J., JIANG H., WANG S., MA X. A multi-scale deep learning algorithm for enhanced forest fire danger prediction using remote sensing images // Forests. 2024. Vol. 15. Art. 1581.
- [6] YANKOVICH K. S., YANKOVICH E. P., BARANOVSKIY N. V. Classification of vegetation to estimate forest fire danger using Landsat 8 images: case study // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Art. 6296417. 14 p.

4.3. Дель И. В. Коррекция численных прогнозов температуры воздуха мезомасштабной модели численного прогноза погоды

Прогноз температуры играет ключевую роль в планировании и управлении ресурсами, так как температура воздуха напрямую влияет на сельское хозяйство, энергетику и транспорт. Точные прогнозы помогают минимизировать риски, связанные с экстремальными погодными условиями, и обеспечивают безопасность населения. Коррекция численных прогнозов температуры воздуха важна для повышения их точности, адаптации к изменяющимся условиям и улучшения принятия решений в различных сферах.

Целью работы является разработка и реализация методики коррекции численных прогнозов температуры воздуха, получаемых на основе мезомасштабной модели численного прогноза погоды TSUNM3, с помощью модели полносвязной нейронной сети и данных наблюдений на метеостанциях.

Формирование набора данных для коррекции численных прогнозов температуры воздуха производилось из ежесекундных прогнозов мезомасштабной модели численного прогноза погоды TSUNM3 для УЗМ БЭК на сутки вперед за период с 15.01.2020 по 24.10.2022. В набор данных вошли 11491 ежесекундных прогнозов TSUNM3.

Архитектура построенной искусственной нейронной сети для коррекции температуры воздуха состоит из последовательных пяти слоев: входного, трех скрытых и выходного полносвязных слоев. В рассматриваемой нейронной сети оптимальный поиск весовых коэффициентов осуществляется методом адаптивной инерции с коррекцией весовых коэффициентов путем добавления L_2 -регуляризации AdamW [1]. В качестве функции потерь использовалась функция Хьюбера — комбинация среднеквадратичной ошибки при малых погрешностях и средней абсолютной ошибки при больших [2]:

$$H_{\text{Loss}} = \begin{cases} \frac{1}{2}(X_{\text{pred}} - X_{\text{true}})^2 & \text{при } |X_{\text{pred}} - X_{\text{true}}| \leq \delta, \\ \delta|X_{\text{pred}} - X_{\text{true}}| - \frac{1}{2}\delta^2 & \text{при } |X_{\text{pred}} - X_{\text{true}}| > \delta, \end{cases}$$

где X_{pred} и X_{true} — предсказанное и реальное выходные значения, $\delta = 2^\circ\text{C}$.

В качестве метрики качества построения нейронной сети в данной работе была выбрана средняя абсолютная ошибка MAE. Также дополнительно рассматривались значения коэффициента детерминации R^2 и индекса согласия IOA между предсказанными значениями и наблюдениями температуры воздуха.

Общее значение MAE между наблюдениями и скорректированными прогнозами температуры воздуха составило 1.45°C , коэффициент детерминации $R^2 = 0.94$, индекс согласия IOA — 0.95. При сравнении полученных значений метрик со значениями метрик между наблюдениями и нескорректированным прогнозом температуры воздуха TSUNM3 (MAE = 2.53°C , $R^2 = 0.79$, IOA = 0.94), можно заметить преимущество над прогнозами модели TSUNM3. В общем случае MAE уменьшилось на 43 %, R^2 увеличилось на 19 %.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о целесообразности использования данного метода для повышения качества прогнозирования температуры воздуха.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Старченко А. В.

Список литературы

- [1] LOSHCNILOV I., HUTTER F. Fixing weight decay regularization in adam // arXiv preprint arXiv:1711.05101. 2017.
- [2] HUBER P. J. Robust estimation of a location parameter // Ann. Math. Stat. 1964. Vol. 35, N. 1. P. 73–101.

4.4. Епишина Е.И., Лёзина И.В. Применение нейронной сети ResNet-34 с выходным слоем RBF для решения задачи распознавания пауков

Целью данной работы является изучение использования радиально-базисного выходного слоя в задаче классификации изображений пауков.

Актуальность решаемой задачи определяется потребностью в системах, способных быстро и эффективно оценивать уровень опасности животных в повседневной жизни. Возможность быстро идентифицировать потенциально опасных пауков является большим вкладом в безопасность людей, так как позволит избежать возможных укусов и снизить уровень стресса при встрече с пауками.

Существует большое количество работ с различными нейронными сетями и подходами как для решения задачи классификации изображений, так и для ряда других задач. Рассмотрим несколько таких исследований.

В работе [1] изучается классификация областей изображения для обеспечения корректной сегментации, и используется трехслойная нейронная сеть с одним скрытым слоем, которая обучается с помощью метода экстремального обучения. Полученный классификатор обеспечивает приемлемое качество разбиения областей изображения на классы.

В работе [2] предлагается использование модульной РБФ-сети для повышения скорости классификации и уменьшения времени обучения. Предложенная сеть обладает лучшей производительностью, чем традиционные РБФ-сети.

Из работы [3] видим, что радиально-базисная сеть может применяться не только в задаче классификации, но и для преобразования изображения из более широкого диапазона цветов к ограниченной палитре заданного состава.

В данной работе используются датасет, который взят с сайта Kaggle [4], и предобученная нейронная сеть ResNet-34. Датасет включает в себя обучающую, валидационную и тестовую выборки и состоит из 2336 цветных изображений пауков размером 224×224 пикселя, разделенных на 15 классов, а также csv-файла, в котором каждому изображению соответствует название его разновидности.

Нейронная сеть загружается в систему при помощи библиотеки машинного обучения Torch. Для решения поставленной задачи выходной слой загруженной сети был заменён на пользовательский слой с радиально-базисной функцией активации. В радиально-базисном слое содержится 512 нейронов, а количество выходов из этого слоя соответствует числу классов в датасете. Входные данные нормализуются с использованием Евклидовой нормы (L_2 -нормы), что способствует повышению стабильности обучения и улучшению производительности модели.

Был проведен ряд экспериментов, в каждом из которых мы увеличивали количество эпох, так как точность сети была недостаточной, а ошибка обучения с каждой эпохой уменьшалась. К данному моменту сеть дала максимальный результат в 87 % точности при 1200 эпохах. При этом ошибка обучения продолжает снижаться, что свидетельствует о том, что эксперимент продолжается и есть возможность дальнейшего улучшения результатов.

Список литературы

- [1] Юдин Д. А., МАГЕРГУТ В. З. Применение метода экстремального обучения нейронной сети для классификации областей изображения // Научные ведомости. 2013. № 7(150). С. 95–103.
- [2] CHANG C.-Y., FU S.-Y. Image classification using a module RBF neural network // First International Conference on Innovative Computing, Information and Control. 2006. Vol. 2. P. 270–273.
- [3] ПЕТРОВ И. Д., ДУДАРОВ С. П. Преобразование цветовой палитры изображения с использованием нейронных сетей радиально-базисных функций // Успе-

хи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 11. С. 77–79.

- [4] Kaggle. YIKES! Spiders-15 species classification. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/gpiosenka/yikes-spiders-15-species> (дата обращения 10.09.2024).

4.5. Зейналлы Т.Э. Анализ масштабируемости распределённых систем с использованием алгоритмов итерационного выполнения задач и координацией через хранилище ключ-значение

В распределённых отказоустойчивых системах важна координация задач для предотвращения параллельного выполнения одних и тех же процессов. Для этого используются механизмы, такие как очереди и распределённые блокировки. В работе [1] предложены алгоритмы Recurrent Worker Service (RWS) для обеспечения отказоустойчивости, а в [2] описаны механизмы приоритизации узлов. Работа [3] сравнивает эти алгоритмы с аналогами на платформе .NET, однако оценка масштабируемости системы ранее не проводилась. Отсутствие такой оценки не позволяет определить пределы масштабируемости систем с аналогичной архитектурой, что усложняет понимание их потенциала и ограничений в условиях практического использования.

Цель данной работы заключается в экспериментальной оценке масштабируемости распределённых систем для итерационного выполнения задач на основе алгоритмов RWS [4] для двух режимов: `rws_v1` и `rws_v2`. Основные задачи включают развертывание инфраструктуры в облачной среде и проведение испытаний для анализа зависимости показателей от числа узлов. Методология исследования основана на экспериментальном подходе с измерением показателей и их статистическим анализом. Основное внимание уделено влиянию количества узлов на точность итераций и потребление ресурсов, а также выявлению узких мест масштабируемости.

Точность итераций для `rws_v1` показала зависимость от числа узлов приложения и особенно от числа узлов хранилища, в то время как `rws_v2` продемонстрировал стабильные показатели, независимо от числа узлов. Аппаратные показатели узлов приложений (сеть, процессор, ОЗУ) оставались в пределах нормы для обоих режимов RWS. В то время как для узлов хранилища наблюдался линейный рост сетевой активности, загрузки процессора и ОЗУ по мере увеличения числа узлов.

В работе рассмотрено поведение системы при 990 узлах приложения и 135 узлах хранилища. Столь большое число узлов хранилища избыточно для практического применения, однако оно помогает выявить узкие места при экстремальных условиях.

Результаты исследования полезны для проектирования и оптимизации распределённых систем

с итерационными процессами, где важны точность задач и эффективное использование ресурсов. Они могут применяться в координации вычислений в масштабируемых кластерах, а также в системах с хранилищами ключ-значение, где критичны консистентность данных и отказоустойчивость.

Список литературы

- [1] ZEYNALLY T., DEMIDOV D. Fault tolerance of distributed worker processes in corporate information systems and technologies // Communications in Computer and Information Science. 2022. Vol. 1703. P. 4–15.
- [2] ZEYNALLY T., DEMIDOV D., DIMITROV L. Prioritization of distributed worker processes based on etcd locks // Communications in Computer and Information Science. 2022. Vol. 1703. P. 16–28.
- [3] Зейналлы Т.Э. Сравнительный анализ решений на базе .NET для итерационного выполнения задач в распределённых отказоустойчивых системах // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. № 6. С. 120–127.
- [4] TeymurZeynally/RecurrentWorkerService. [Электронный ресурс]. URL: github.com/TeymurZeynally/RecurrentWorkerService (дата обращения: 08.09.2024).

4.6. Золотарев И.А. Поиск и ранжирование текстов при помощи нейросетевых моделей

В условиях стремительного роста объема информации задача поиска и ранжирования текстов становится все более актуальной. Пользователи ожидают быстрого и точного доступа к релевантной информации, который традиционные методы поиска, базирующиеся на ключевых словах и правилах, уже не в состоянии обеспечить. Эта проблема заставила людей задуматься о создании эффективных инструментов для анализа и обработки текстов. Одним из способов решения этой проблемы стало использование нейросетевых моделей для работы с текстом [1].

В данной работе проводился анализ и обоснование выбора нейросетевых моделей для работы с текстом. Выбраны 1D CNN, LSTM и GRU модели, так как они способны учитывать контекст, семантику и связи между словами, а также имеют высокую эффективность в обработке и понимании естественного языка.

Для программной реализации системы поиска и ранжирования текстов был выбран язык программирования Python. Он обладает большим количеством библиотек, специально разработанных для машинного обучения и анализа данных, имеет простой и понятный синтаксис и легко интегрируется с другими языками. Были использованы библиотеки TensorFlow, Keras, NumPy, Pandas и Matplotlib для реализации и анализа моделей.

При обучении рубрикатора и последующем тестировании был использован датасет AG's News Topic Classification Dataset [2]. Набор данных состоит из 4 классов новостей: «мировые новости», «спорт»,

«бизнес», «наука и техника». Каждый класс содержит 30000 обучающих и 1900 тестовых образцов. Общее количество обучающих выборок — 120000, тестовых — 7600. Каждая запись состоит из класса статьи, заголовка и самого текста статьи.

При обучении и тестировании моделей изменялись следующие параметры: количество слов в словаре, алгоритмы обучения, количество эпох обучения. Каждый параметр изменялся независимо и принимал несколько возможных значений. При каждом изменении сеть обучалась и тестировалась заново. Эмпирическим путем было выявлено оптимальное количество слов в словаре — 10000.

Выполнено тестирование 7 различных алгоритмов обучения на 2 независимых тестовых наборах. Первый взят из GitHub-репозитория [3]. Вторым создан самостоятельно из 250 отобранных новостных статей, соответствующих 4 заданным классам. Лучшие всего показали себя алгоритмы Nadam и RMSprop. Процент правильно классифицированных текстов, основанный на метрике ассурасы, при использовании RMSprop составил 89.46–89.61 % для первого набора данных и 61.60–64.80 % для второго. При использовании алгоритма Nadam — 89.26–89.39 и 59.60–64.84 % соответственно.

В ходе исследования алгоритм RMSprop продемонстрировал незначительное преимущество перед Nadam и был выбран для дальнейшего применения в системе.

Все три нейросетевые модели успешно справились с поставленной задачей, демонстрируя схожие результаты в пределах допустимой погрешности 5 % и также были интегрированы в систему.

Научный руководитель — к.т.н. Солдатова О. П.

Список литературы

- [1] Что такое нейронная сеть. [Электронный ресурс]. URL: <https://aws.amazon.com/ru/what-is/neural-network> (дата обращения: 28.04.2024).
- [2] AG news classification dataset. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/amananandrai/ag-news-classification-dataset> (дата обращения: 30.04.2024).
- [3] Набор данных новостных статей. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/mhjabreel/CharCnnKeras/tree> (дата обращения: 29.04.2024).

4.7. Лебедев Р.К., Ситнов В.Е. Метод шифрования исполняемого кода с использованием перемещений ELF

Классическим методом противодействия исследованию программного обеспечения с закрытым исходным кодом является шифрование или упаковка машинного кода. Данный подход позволяет нейтрализовать инструменты статического анализа, так как для получения оригинального машинного кода из защищенного таким образом файла потребуются дополнительные операции или даже использование динамического анализа.

Традиционно при реализации таких преобразований код трансформируется в комбинацию из распаковщика и упакованного кода, причем распаковщик, как правило, не зависит от скрытого кода. Этот код распаковки неизбежно привлекает внимание исследователей и антивирусного программного обеспечения, зачастую считающего программу вредоносной только на основании используемого упаковщика [1].

В данной работе представлен новый метод упаковки исполняемого кода в операционной системе Linux, позволяющий исключить из зашифрованной программы код распаковщика. Такой результат достигается за счёт перемещений формата ELF на процессорной архитектуре x86_64, а в роли распаковщика выступает сама операционная система в процессе загрузки исполняемого файла.

Перемещения (relocations) — дополнительная информация, присутствующая во многих форматах исполняемых файлов, описывающая необходимые исправления для загрузки по адресу, отличному от того, для которого программа изначально была скомпилирована [2]. Обычно перемещения применяются к данным, например, указателям, но при помощи механизма Text Relocations можно модифицировать и исполняемый код.

Идея предлагаемого метода состоит в выражении всего исполняемого кода программы при помощи перемещений, применяемых к секции машинного кода .text. Каждое из перемещений при обработке по одному машинному слову формирует машинный код программы, а до их обработки секция программы с кодом может содержать нули или произвольный код, предназначенный для запутывания исследователей. Были рассмотрены различные типы перемещений, а также механизм GNU_IFUNC, который получилось применить для исполнения произвольного кода в процессе обработки перемещений, что позволило реализовать различные алгоритмы шифрования.

Метод реализован с использованием библиотеки LIEF языка программирования Python, позволяющей редактировать перемещения в файлах формата ELF [3]. Он был протестирован против декомпиляторов Ghidra и IDA, инструмента символьного исполнения angr, а также антивирусного ПО, доступного на сайте VirusTotal. В результате тестирования подтверждена высокая эффективность метода против всех рассмотренных инструментов, более того, для декомпиляторов получилось добиться и ложной декомпиляции исполняемого кода.

Научный руководитель — д.т.н. Павский К. В.

Список литературы

- [1] UGARTE-PEDRERO X. ET AL. SoK: deep packer inspection: a longitudinal study of the complexity of run-time packers // Proc. 2015 IEEE Symp. on Security and Privacy. IEEE, 2015. P. 659–673.

- [2] Executable and linkable format 101. Part 3: relocations. [Электронный ресурс]. URL: <https://intezer.com/blog/malware-analysis/executable-and-linkable-format-101-part-3-relocations> (дата обращения 14.09.2024).
- [3] THOMAS R. LIEF — library to instrument executable formats. [Электронный ресурс]. URL: <https://lief.re> (дата обращения 14.09.2024).

4.8. Мазин Д., Латушко А.П. Разработка методов предварительной разметки для извлечения синонимов и гиперонимов в русскоязычных текстах

Современные задачи обработки естественного языка часто решаются с помощью больших языковых моделей, требующих больших объемов данных [1], размеченных в соответствии с требованиями задачи [2]. Предварительная автоматизированная разметка может снизить трудоемкость и повысить эффективность ручного аннотирования большого объема данных, предоставляя основу для дальнейшей ручной корректировки.

В данной работе были разработаны и протестированы методы автоматической разметки для извлечения синонимов и гиперонимов из текстов аннотаций статей «Википедии» на русском языке. Первый разработанный метод основан на формальных правилах. В результате его использования была достигнута метрика F1 для синонимов — 0.51, для гиперонимов — 0.39 на выборке из 1000 текстов.

Следующий этап исследования заключался в использовании больших языковых моделей (LLMs): Mistral из библиотеки GPT4All (F1 для синонимов — 0.4, для гиперонимов — 0.14), YandexGPT (F1 для синонимов — 0.37, для гиперонимов — 0.19) и GigaChat (F1 для синонимов — 0.68, для гиперонимов — 0.33). При объединении двух наиболее доступных методов с возможностью локального запуска (разметки формальных правил и модели Mistral) были получены следующие метрики: F1 для синонимов — 0.58, для гиперонимов — 0.38.

Таким образом, предварительная разметка, полученная с использованием разработанных методов, существенно снижает трудозатраты разметчика, сводя его задачу к корректировке результатов автоматизированной разметки. В зависимости от уровня формализации задачи могут применяться как формальные правила, так и языковые модели, результаты которых сопоставимы по качеству. Данное исследование демонстрирует перспективы автоматической разметки в NLP-задачах и намечает пути дальнейшего совершенствования методов.

Научный руководитель — к.т.н. Бручес Е. П.

Список литературы

- [1] BROWN T., MANN B. Language models are few-shot learners // Proc. Intern. Conf. «Conference and Workshop on Neural Information Processing Systems».

Vancouver: Curran Associates, Inc., 2020. Vol. 33. P. 1877–1901.

- [2] VILLALOBOS P., HO A. Will we run out of data? Limits of LLM scaling based on human-generated data // Machine Learning (cs.LG). arXiv. 2022. DOI:arXiv.2211.04325.

4.9. Максакоев Н.В. Система сравнения показателей потенциала ресурса для обоснования размещения возобновляемых источников при помощи NASA API

Для определения размещения наиболее выгодного типа возобновляемого энергоисточника на труднодоступных удаленных территориях вне зоны централизованного электроснабжения в восточных регионах РФ разрабатывается Web-сервис. Для получения данных о погодных условиях используется интерфейс NASA API, который позволяет выбрать данные в ограниченной области за определенный период времени [1, 2]. Существуют схожие сервисы, такие как ERA5 [3, 4] и МЦРД [5], но они имеют недостатки в виде ограниченной области выбора данных и небольшой перечень метеостанций, а также не имеют доступного API для получения данных. Используются параметры о средней скорости ветра на высоте 10 м и суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность. Полученные данные отображаются в виде точек с шагом 0.5 по широте и долготе на запрашиваемой области. Для выбора координат наиболее выгодных мест размещения среди точек выбираются те, которые содержат большее значение параметров по каждому виду энергоресурса. Оставшиеся точки преобразуются в области, содержащие 4 точки координат, для наглядного отображения на карте.

Чтобы не нагружать клиентскую часть сервиса, вся обработка данных реализована на стороне сервера, написанного на TypeScript и NestJS. Фреймворк NestJS позволяет быстро создать NodeJS сервер, который можно расширить в будущем [6]. После обработки данных на сервере, они отправляются на клиентскую часть с использованием архитектуры REST API [7]. Web-сервис добавляет на карту, отмечая желтым и фиолетовым цветом области с более высокими показателями солнечной радиации и скорости ветра соответственно. Сервис написан на TypeScript с использованием ReactJS и сопутствующих ему технологий [8]. Для визуализации карты используется библиотека Leaflet и её расширение React-Leaflet, упрощающее интеграцию карт в Web-сервис. Библиотека Leaflet позволяет создать и контролировать поведение интерактивной карты [9–11]. Созданы элементы управления для добавления параметров и их удобного отображения.

На текущем этапе создано взаимодействие с сервисом с использованием лишь базовых экологических показателей. Дальнейшее развитие нацелено на использование машинного обучения для опре-

деления наиболее выгодного типа возобновляемого энергоисточника с большим количеством экономических и экологических параметров.

Работа выполнена при поддержке гранта № 075-15-2020-787 в виде субсидии на Крупный научный проект Министерства науки и высшего образования России (проект «Основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды на Байкальской природной территории»).

Научный руководитель — к.т.н. Иванов Р. А.

Список литературы

- [1] NASA prediction of worldwide energy resources (POWER). [Электронный ресурс]. URL: <https://power.larc.nasa.gov> (дата обращения 01.06.2024).
- [2] ALMOROX J., HONTORIA C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain // Energy Conversion and Management. 2004. Vol. 45. Is. 9–10. P. 1529–1535.
- [3] ECMWF reanalysis v5 (ERA5). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (дата обращения 01.06.2024).
- [4] TAN M. L., ARMANUOS A. M., AHMADIANFAR I. ET AL. Evaluation of NASA POWER and ERA5-Land for estimating tropical precipitation and temperature extremes // J. of Hydrology. 2023. Vol. 624. Art. 129940.
- [5] Мировой центр радиационных данных (МЦРД). [Электронный ресурс]. URL: <http://wrdc.mgo.rssi.ru> (дата обращения 01.06.2024).
- [6] NestJS. [Электронный ресурс]. URL: <https://nestjs.com> (дата обращения 01.06.2024).
- [7] ТЕН Т. Л., ШИНЕКЕНЕВ А. Н., КОГАЙ Г. Д. Построение REST API на основе веб-фреймворка Laravel // Перспективы развития строительного комплекса. 2018. № 12. С. 369–372.
- [8] ReactJS. [Электронный ресурс]. URL: <https://react.dev> (дата обращения 01.06.2024).
- [9] Leafletjs. [Электронный ресурс]. URL: <https://leafletjs.com> (дата обращения 01.06.2024).
- [10] React Leaflet. [Электронный ресурс]. URL: <https://react-leaflet.js.org> (дата обращения 01.06.2024).
- [11] Кочитов М. Е. Использование интерактивных карт с помощью библиотеки LeafLet // Постулат. 2018. № 7(33). С. 6.

4.10. Мурашкина А.В. Повышение точности алгоритма распознавания старопечатных тибетских документов

Старопечатные документы на тибетском языке — ценное историко-культурное наследие, веками передаваемое по наследству людьми Тибета. Однако с течением времени и под воздействием различных факторов, в том числе антропогенных, бумажные носители подвержены физическому разрушению [1]. Оцифровка исторических документов является одним из наиболее надёжных способов их сохранения и систематизации [2].

В Тибетском фонде рукописей и ксилографов Института монголоведения, буддологии и тибетологии СО РАН хранится около 70000 единиц, требующих

оцифровки. В рамках сотрудничества ИВМиМГ СО РАН и ИМБТ СО РАН разработан программный комплекс по распознаванию и транслитерации текста со старопечатных тибетских документов.

Так как алгоритмы OCR работают с недостаточно высокой точностью, стандартным этапом является коррекция результирующего текста [3]. Настоящая работа посвящена разработке и практической реализации алгоритмов выявления ошибок, возникающих при функционировании программного комплекса, для повышения точности распознавания текста.

Научный руководитель — д.т.н. Барзанин В. Б.

Список литературы

- [1] LAMU Y. Protection status of domestic ancient Tibetan manuscripts and literatures // J. Ethnol. 2012. Vol. 3. N. 6. P. 54–58.
- [2] MA L., LONG C., DUAN L. ET AL. Segmentation and recognition for historical Tibetan document images // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 52641–52651.
- [3] MOLINA A., TERRADES O. R., LLADÓS J. Fetch-A-Set: a large-scale OCR-free benchmark for historical document retrieval [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2406.07315v2> (дата обращения: 01.10.2024).

4.11. Найдено А.В. Классификация молочных желез по классам температурных аномалий при диагностике злокачественных образований на основе текстовой информации

В основе заботы о собственном здоровье лежат регулярные медицинские обследования. При этом важно знать о предрасположенности организма к различным заболеваниям, поскольку на эти аспекты необходимо обратить внимание в первую очередь. Особенно, если речь идет о таком серьезном заболевании, как рак молочной железы. Данные, с которыми проводится работа в представленной статье, были получены от врачей словенской клиники, обследующих пациентов на предмет наличия рака молочных желез. Обследование выполнялось методами микроволновой радиотермометрии, после чего специалистами для каждой молочной железы была определена группа риска, указывающая уровень температурных аномалий. Подобная оценка основывается на реальной картине здоровья пациента, будем считать ее достоверной. Также данные содержали такую информацию, как анамнез, примечания врачей и описание результатов осмотра пациентов. Такие данные будем считать предварительными, содержащими предположения. Цель работы — понять, есть ли в контексте имеющихся данных согласованность между этими двумя типами информации: достоверной и предварительной.

Пусть есть n молочных желез, где $n = 5782$. Для каждой i -й молочной железы имеем набор текстовых характеристик на словенском языке d_{1i}, d_{2i} ,

d_{3i} , $i = \overline{1, n}$, где d_1 — анамнез, d_2 — примечания врача, d_3 — данные осмотра. Объединив фрагменты текста, получим $d = \{d_i = \{d_{1i}, d_{2i}, d_{3i}\}\}$, где d_i — текстовое описание i -й молочной железы. Для набора текстовых описаний d выполнялась предобработка: из всего текста оставлены только слова, удалены стоп-слова и выполнена лемматизация. После чего с помощью предобученной на различных текстовых данных модели [1] получили векторное представление [2] $V = \{v_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$, где m — заданный объем получаемого векторного представления.

Был построен классификатор $h : X \rightarrow Y$, где $X = V$, $Y = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ — множество классов температурных аномалий, полученных врачами-специалистами словенской клиники с помощью метода микроволновой радиотермометрии, где 0 — температурные аномалии отсутствуют или в пределах нормы, 5 — температурные аномалии характерны для рака молочной железы.

В качестве метода машинного обучения был использован случайный лес. Для оценивания качества классификации применялась метрика out-of-bag, которая на тестовой выборке показала результат в районе 0.5.

В итоге имеем, что полученная модель машинного обучения имеет высокую погрешность. Планируется уточнить модель, расширив признаковое пространство для повышения информативности. В задаче определения класса температурных аномалий текстовые данные можно рассматривать, как дополнительное обоснование полученных результатов.

Научный руководитель — д.т.н. Гермашев И. В.

Список литературы

- [1] Explosion Slovenian pipeline optimized for CPU: sl_core_news_lg. [Электронный ресурс]. URL: https://spacy.io/models/sl#sl_core_news_lg (дата обращения 13.09.2024).
- [2] BOJANOWSKI P., GRAVE E., JOULIN A., MIKOLOV T. Enriching word vectors with subword information // Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2017. Vol. 5. P. 135–146.

4.12. Нигматуллин А.В., Гончар А.Д. Проектирование и разработка геопортала для геопарков Республики Башкортостан

Геопарки под эгидой ЮНЕСКО играют важную роль в сохранении и популяризации природного и культурного наследия. В Республике Башкортостан находятся два таких геопарка: «Янган-Тау», признанный первым международным геопарком в России, и «Торатау», включённый в список претендентов на вхождение в глобальную сеть ЮНЕСКО. Однако в регионе отсутствует единый геопортал, который бы объединял различные данные о геопарках (геологические, биологические, гидрологические, историко-культурные и археологические).

Актуальность разработки заключается в необходимости создания информационной системы, кото-

рая будет использоваться как туристами и исследователями, так и представителями турфирм. Геопортал позволит эффективно управлять данными о геопарках, а также обеспечить удобный доступ к пространственной информации, что значительно упростит навигацию и планирование маршрутов.

Проектирование геопортала основано на использовании объектно-ориентированного подхода и нотации UML для создания диаграмм вариантов использования, где выделены основные акторы системы: пользователь и администратор. Пользователям доступен функционал просмотра карт, получения информации об объектах, авторизации и создания маршрутов, тогда как администраторы имеют возможность управления данными о геообъектах и пользователях, поддержания актуальности и безопасности системы.

Инфологическая модель базы данных включает такие сущности, как Геообъект, Геопарк, Маршрут, Фото и Точка маршрута, которые связаны между собой для обеспечения полного управления пространственными и атрибутивными данными о геопарках.

Архитектура системы построена с использованием современных технологий, включая СУБД PostgreSQL, веб-фреймворк FastAPI для серверной части и Angular для клиентской. Эти технологии обеспечивают масштабируемость системы, возможность интеграции с внешними сервисами, а также безопасность и производительность.

Реализация сервисов геопортала предполагает взаимодействие через HTTP-запросы (GET, POST, PUT, DELETE), которые позволяют пользователям и администраторам получать и обновлять данные. Пользователи могут регистрироваться, просматривать маршруты и объекты, а администраторы — управлять объектами геопарков, добавлять и редактировать геообъекты и их фотографии, а также поддерживать актуальные данные.

Разработка данного геопортала предоставляет уникальные возможности для управления данными о геопарках Республики Башкортостан. Система способствует развитию туризма и научных исследований, упрощая доступ к информации о природном и культурном наследии региона. В будущем проект может быть масштабирован и адаптирован для использования в других регионах, что обеспечит поддержку новых геопарков на территории России и постсоветского пространства.

Научный руководитель — к.т.н. Зверева Н. Н.

Список литературы

- [1] ГОНЧАР А. Д., НИГМАТУЛЛИН А. В., ЗВЕРЕВА Н. Н. Анализ и концептуальное проектирование геопортала «Янган-тау» // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении : сборник научных статей Всероссийской конференции. 2023. С. 98–102.

4.13. *Обершт С.Д.* К задаче оценки сложности текста методами машинного обучения: аналитический обзор, выводы, начальные эксперименты

Оценка сложности текста в задачах компьютерной лингвистики может трактоваться как классификация текста в зависимости от уровня его восприятия; традиционно текст градуируется по количеству лет академического обучения, необходимого для понимания и усвоения информации, а также по ряду специфических признаков. В работе дан аналитический обзор существующих на сегодняшний день подходов и моделей оценки сложности текста, разработанных или адаптированных для русского языка, а также описан ряд задач компьютерной лингвистики, в которых используется этот параметр. Применение методов машинного обучения для оценки сложности позволяет значительно повысить точность результатов по сравнению со статистическими методами, в том числе, с использованием формул читабельности (Флеша, Флеша — Кинкейда, тест SMOG и т. п.) [1]. Применение методов глубокого обучения показывает результаты, превосходящие данные традиционных классификаторов, что отражено в ряде актуальных работ [2, 3]. При этом сложность текста анализируется не только как объект с точки зрения применимости методов компьютерной лингвистики, но и выступает в качестве оценочной метрики в задачах обработки естественного языка: сравнение естественного и сгенерированного текстов, оценка качества результатов больших языковых моделей, анализ систем вопрос-ответ.

Проведенные авторами данной работы начальные эксперименты по сравнительному анализу самых используемых формул читабельности текста и их адаптированных к русскому языку версий, показали, что эти формулы не могут считаться потенциально применимыми к текстам различных жанров и стилей, а также к текстам, написанным на языках, отличных от тех, для которых модели первоначально разработаны. Использование индексов как группы параметров без предварительной адаптации к набору данных модели может дать критичную для объективного результата погрешность; при этом в задаче оценки сложности должны учитываться как качественные, так и количественные параметры: морфологические, синтаксические, лексические, и параметры, связанные с дискурсом [4].

Научный руководитель — д.т.н., к.филол.н. Гавенко О. Ю.

Список литературы

- [1] LYASHEVSKAYA O., PANTELEeva I., VINOGRADOVA O. Automated assessment of learner text complexity // Assessing Writing. 2021. Vol. 49. Art. 100529.
- [2] BLINOVA O., TARASOV N. A hybrid model of complexity estimation: Evidence from Russian legal texts // Front. Artif. Intell. 2022. Vol. 5. Art. 1008530.

- [3] LEE B.W., JANG Y.S., LEE J. Pushing on text readability assessment: a transformer meets handcrafted linguistic features // Proceedings of the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2021. P. 10669–10686.

- [4] FENG L., JANSCH M., HUENERFAUTH M., ELHADAD N. A comparison of features for automatic readability assessment // Coling 2010: posters. 2010. P. 276–284.

4.14. *Орлов Г.О.* Подход к визуализации геомагнитного поля Земли с применением глифов

Предложен подход к комплексной обработке и интерпретации геомагнитных векторных данных. На данный момент анализ геомагнитных полей Земли используется при корректировке навигационных систем, прогнозировании геофизической обстановки и поиске полезных ископаемых. В ходе исследования проведен анализ наиболее актуальных методов визуализации векторных полей. В разработанной концепции предложен подход к визуализации, который ускоряет время рендеринга (использует только один графический слой) и позволяет отобразить сразу несколько атрибутивных параметров, основанный на визуализации поля в каждой точке пространства посредством эллипсоидных глифов. Реализовано приложение, интерпретирующее геомагнитные данные с помощью комбинированного эллипсоидного глифа в формате GeoJSON.

Написана функция для отрисовки опорных эллипсов для глифа. Она возвращает координаты для полигона, представляющего эллипс при интерпретации GeoJSON-файла. Эти координаты просчитываются с учетом долготы и широты точки, в которой происходит геомагнитное возмущение, а также параметров вращения и вытянутости эллипса, зависящие от компонент вектора напряженности геомагнитного поля.

Создан класс глифа с методом его отрисовки. Класс содержит поля для компонент вектора напряженности поля, долготу, широту и радиус. Эти данные считываются из JSON-файла с геомагнитными данными и создается массив объектов глифов. Метод отрисовки работает по следующему алгоритму:

1. Определяются цвета эллипсов в зависимости от атрибутивных параметров (зелено-желто-красный градиент).
2. По каждому из трех компонент вектора отрисовываются опорные эллипсы. Параметры вытянутости ставятся в соответствие с компонентами вектора. Эллипсы располагаются на осях глифа и исходят из точки с координатами, соответствующими долготе и широте аномалии из датасета.
3. Метод возвращает массив полигонов для GeoJSON с элементами по количеству опорных эллипсов.

Научный руководитель — д.т.н. Воробьева Г. Р.

Список литературы

- [1] CHONGKE B. A survey on visualization of tensor field // The Visualization Society of Japan. 2019. Vol. 1. N. 22. P. 1–20.
- [2] BUTLER H. H. The GeoJSON specification. [Электронный ресурс]. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7946> (дата обращения 14.07.2024).

4.15. Осанов В.А., Карташевский И.В., Малашов С.В., Якунов Д.О. Реализация задачи декорреляции сетевого трафика

Наличие корреляции при передаче видеотрафика оказывает прямое и негативное влияние на качество обслуживания, что подтверждают результаты, представленные в работах [1, 2]. Процесс декорреляции обеспечивает значительное понижение коэффициента корреляции. Существующие классические способы декорреляции на основе разложения Карунена — Лозва и дискретно-косинусного преобразования обусловлены выполнением значительного количества вычислительных операций, что напрямую влияет на увеличение времени задержки в сети [3]. Данные факты подтверждают актуальность поставленной задачи — реализации быстрого и эффективного алгоритма декорреляции сетевого трафика, относительно использования вычислительных ресурсов.

В данной работе предложен алгоритм декорреляции с применением перемежителя. Существует множество различных вариантов перемежителей, в частности, одним из наиболее простых и эффективных является блочный диагональный [4].

Исходными данными для проведения исследования выступает смоделированная последовательность случайной величины с заданным коэффициентом корреляции ($\rho = 0.95$). Расчет коэффициентов автокорреляции смоделированной последовательности равен: $\rho_1 = 0.95$, $\rho_2 = 0.91$, $\rho_3 = 0.87$, $\rho_4 = 0.83$, $\rho_5 = 0.79$, $\rho_6 = 0.75$ и т. д.

Алгоритм работы характеризуется следующими этапами:

1. Исходная последовательность записывается в корреляционную матрицу X размером $M \times L$ построчно. Количество столбцов L определяется как 2^k . Параметр k задается пользователем самостоятельно. Количество строк $M = N/L$ определяется автоматически..
2. Считывание выходной последовательности X' осуществляется блочно по диагоналям, формируемым последовательно, начиная с каждого нулевого элемента новой строки. Размер каждого блока соответствует количеству элементов в одной строке, т. е. равен L . Если при формировании очередного блока, по достижению в ходе диагонального спуска элемента конечной строки исходной матрицы $x_{M-1,j}$, количество его элементов меньше, чем значение L ,

то диагональный спуск продолжается с элемента $x_{0,j+1}$.

Полученные коэффициенты автокорреляции выходной последовательности X' , при $k = 6$, ($\rho_1 = 0.048$, $\rho_2 = 0.049$, $\rho_3 = 0.039$, $\rho_4 = 0.023$, $\rho_5 = -0.034$, $\rho_6 = -0.015$ и т. д.), в сравнении с коэффициентами исходной последовательности, свидетельствуют о значительном понижении автокорреляции.

В программной реализации данного алгоритма требуется выполнить $2N - 1$ операций считывания и записи, а также минимальное количество вычислений, которые не оказывают значительного влияния на время выполнения процесса декорреляции.

Результаты программного моделирования процесса декорреляции диагонально-блочным перебором подтверждают его преимущества перед классическими методами, относительно затрачиваемых ресурсов и времени выполнения, что играет важную роль при минимизации задержки в сети.

Научный руководитель — д.т.н. Карташевский И. В.

Список литературы

- [1] TANG P., DONG Y., JIN J., MAO S. Fine-grained Classification of Internet video traffic from QoS perspective using fractal spectrum // IEEE Trans. on Multimedia. 2020. Vol. 22. N. 10. P. 2579–2596.
- [2] MARKOVICH N., BIERNACKI A., EITENBERGER P., KRIEGER U. Integrated measurement and analysis of peer-to-peer traffic // Proc. of 8th Intern. Conf. «Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2010)». Sweden, Lulea, 2010. P. 302–314.
- [3] KARTASHEVSKII I., OSANOV V. Theoretical algorithm for traffic decorrelation in fog computing // Proc. of IX-th Intern. Conf. «Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2023)». Samara: IEEE, 2023. Art. 10139269.
- [4] ДАНГ К. Н., НГУЕН В. Н., НГУЕН Х. Ф., СМЕРНОВ В. Н. Комбинированный перемежитель для турбокода // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2013. №. 1. С. 17–21.

4.16. Осипов Е.А. Устранение уязвимостей в библиотеках Java

В мире современной IT-разработки активно используются сторонние библиотеки как помощь в решении поставленных задач. Такие библиотеки позволяют применять оптимально реализованные подходы, не изобретая собственных решений для второстепенных задач. Вместе с интегрированными библиотеками в исходный код попадают уязвимые компоненты, которые повышают риск взлома системы или отдельных ее частей. Поиск и устранение этих уязвимостей является важной частью разработки коммерческих продуктов.

В ходе исследования выявлены следующие способы поиска уязвимостей в сторонних библиотеках:

1. CVE — наиболее обширная бесплатная база данных об уязвимостях, хранит информацию для конкретных версий ПО [1];

2. NVD — национальная база данных уязвимостей США, основана на CVE, содержит информацию про CVSS (открытый стандарт, разработанный для определения уровня опасности обнаруженной уязвимости по десятибалльной шкале) [2];
3. OSS Index — это бесплатный каталог компонентов с открытым исходным кодом и инструментов сканирования, основана на информации об уязвимостях из открытых источников [3];
4. VulnDB — платная база данных, которая содержит более полную информацию по уязвимостям, чем CVE;
5. Анализ исходного кода сторонних библиотек статическими анализаторами — SAST (Static Application Security Testing) — тестирование «белого ящика», позволяет разработчикам находить уязвимости безопасности в исходном коде приложения.

Стоит отметить, что вышеперечисленные способы позволяют найти уязвимость в отдельно взятых библиотеках. Для анализа всех зависимостей большого проекта можно использовать такие инструменты как OWASP Dependency-Check [4], Black Duck, JFrog Xray и другие.

Методы устранения уязвимостей достаточно известны, но при этом разрознены. Автором был разработан алгоритм, который полностью описывает возможные способы устранения уязвимостей, включающий в себя примеры авторского кода. В общем виде описать алгоритм устранения можно следующим образом:

1. Изменение версии — повышение или понижение версии используемой библиотеки;
2. Изменение исходного кода библиотеки с целью использования собственной версии, не содержащей уязвимостей;
3. Обоснование неэксплуатируемости уязвимости:
 - а) ошибки инструмента: артефакт определен некорректно, уязвимость отсутствует в данной версии библиотеки;
 - б) сценарии, при которых код стороннего продукта может быть уязвим, не применяются нашим кодом, а так же другими используемыми библиотеками.
4. Изменение библиотеки в процессе сборки — удаление классов/директорий/shaded зависимостей из стороннего компонента, а также замена частей библиотек собственными классами или замена транзитивных shaded зависимостей на версии, не содержащие уязвимостей.

Таким образом, в процессе исследования выявлено отсутствие полноценного описания доступных решений проблемы поиска и устранения уязви-

стей в сторонних библиотеках Java, что повышает актуальность дальнейших разработок.

Список литературы

- [1] SAYAR I., BARTEL A., BODDEN E., LE TRAON Y. An in-depth study of Java deserialization remote-code execution exploits and vulnerabilities // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2023. Vol. 32. N. 1. P. 1–45.
- [2] VIERTEL F., KORTUM F., WAGNER L., SCHNEIDER K. Are third-party libraries secure? A software library checker for Java // Risks and Security of Internet and Systems: 13th International Conference. Location: Springer International Publishing. 2019. P. 18–34.
- [3] DANN A., PLATE H., HERMANN B. ET AL. Identifying challenges for OSS vulnerability scanners — a study and test suite // IEEE Transactions on Software Engineering. 2021. Vol. 48. N. 9. P. 3613–3625.
- [4] PONTA S., PLATE H., SABETTA A. Detection, assessment and mitigation of vulnerabilities in open source dependencies // Empirical Software Engineering. 2020. Vol. 25. N. 5. P. 3175–3215.

4.17. *Пермяшкин Д.А.* Разрешение конфликтов процессов в процесс-ориентированной программе путем коррекции моделей процесса

Микроконтроллеры в виде программируемых логических контроллеров (ПЛК) являются основным вычислительным устройством, используемым при автоматизации производств, и за последние 40 лет активного обсуждения не было предложено приемлимой замены. Причиной для популярности данной темы является постоянно растущая сложность производственных процессов на фабриках и невозможность человека управлять данными процессами на лету самостоятельно. И раз тема популярная, то логично появление стандартов для автоматизации производств — ИЕС 61131 [1], который стандартизирует ПЛК и языки программирования для них.

Дальнейшим результатом обсуждения данной темы в 2015 году стала Индустрия 4.0 (или же Четвертая Промышленная Революция) [2], чьи идеи подняли требования к автоматизации производств на новый уровень. Стали появляются различные языки, нацеленные на выполнение идей Индустрии 4.0. Например, процесс-ориентированное программирование, разработанное Институтом автоматизации и электротехники СО РАН и апробированное на реальном производстве [3]. Основная идея процесс-ориентированной парадигмы заключается в представлении программы как большого числа мелких процессов, представляемых в виде модифицированного конечного автомата и выполняющихся по внешнему событию.

Но просто организовать параллельные вычисления недостаточно для автоматизации производства, требуется минимизировать ущерб в случае отказа (и просто минимизировать отказы). Дополнительно учтем низкую вычислительную мощность ПЛК,

идеи Индустрии 4.0 по уменьшению роли человека (вплоть до нуля) в управлении сложными киберфизическими системами, и получим очень сложную задачу по организации параллельных вычислений.

Данная задача не является новой и существуют уже алгоритмы решения конфликтов между параллельными процессами при доступе к разделяемым ресурсам [4]. Но данные алгоритмы решают конфликты путем детерминирования поведения при доступе, чего недостаточно [5]. Поэтому автором в данной работе предлагается провести коррекцию модели процесса в процесс-ориентированном программировании путем замены входного состояния в конечном автомате (представляющим процесс) на множество входных состояний. Эта коррекция не решит абсолютно все конфликты, целью данной коррекции является разрешение конфликтов, когда оба конфликтующих процесса и читают, и пишут в общую переменную (порядок исполнения процессов в общем случае тогда не определен [5]).

Данная коррекция разрешает конфликты ещё до их появления, потому что в процесс-ориентированном программировании процесс может поменять состояние другого процесса только если другой процесс находится в состоянии покоя или ошибки [3]. И используя пример с клапаном из [5], при попытке запустить процесс открытия клапана пока он закрывается — мы получим стандартную ошибку, как будто мы пытались открыть клапан дважды.

Основным минусом данной коррекции является удаление основного стимула для автора процесс-ориентированной программы декомпонировать промышленный процесс на как можно меньшие процессы, что может привести к потере основного преимущества парадигмы.

Научный руководитель — д.т.н. Зюбин В. Е.

Список литературы

- [1] TIEGELKAMP M., JOHN K. H. IEC 61131-3: programming industrial automation systems / Berlin, Germany: Springer, 2010.
- [2] PHILBECK T., DAVIS N. The fourth industrial revolution // Journal of International Affairs. 2018. Vol. 72. N. 1. P. 17–22.
- [3] ZYUBIN V. E., ROZOV A. S., ANUREEV I. S. ET AL. PoST: a process-oriented extension of the IEC 61131-3 structured text language // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 35238–35250.
- [4] ANDERSON J. H., KIM Y. J., HERMAN T. Shared-memory mutual exclusion: major research trends since 1986 // Distributed Computing. 2003. Vol. 16. N. 2. P. 75–110.
- [5] PERMIASHKIN D. A. Towards conflict resolution methods in process-oriented programs // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). IEEE, 2023. P. 1790–1793.

4.18. Петова К.А. Распознавание лесных пожаров с помощью сверточной нейронной сети VGG

Одной из главных проблем в современном мире до сих пор остаётся контроль сохранности лесных ресурсов. Для повышения скорости процесса мониторинга земной поверхности применяются интеллектуальные системы, в основе которых лежат модели глубокого машинного обучения, способные решать задачи распознавания и классификации изображений. Поэтому разработка и внедрение нейросетевых моделей, способных обнаруживать лесные пожары, а также проведение анализа эффективности применения тех или иных архитектур нейронных сетей является актуальной задачей.

В данной работе был осуществлен анализ эффективности применения модели VGG для задачи обнаружения лесных пожаров.

Была выбрана модель сверточной нейронной сети VGG11 и разработана модель, вдохновленная идеей архитектур сетей VGG, так как данный вид сверточных нейронных сетей показал хорошие результаты в задаче распознавания и классификации изображений [1].

Для реализации системы распознавания лесных пожаров был выбран язык программирования Python. Данный язык широко используется для реализации большого количества интеллектуальных систем за счет наличия в нем ряда библиотек, облегчающих проектирование нейросетевых моделей. В данной работе для создания и обучения нейронных сетей использовались такие библиотеки, как TensorFlow и Keras.

Для исследования было использовано 2 датасета, включающих в себя изображения лесных пожаров. Один из датасетов содержит различные изображения лесов, разделенные на два класса: с признаками пожара и без. Второй преимущественно состоит из тех изображений, которые были получены путем кадрирования видео, полученных с беспилотных летательных аппаратов. Они также делятся на два класса: отсутствие пожара и его наличие.

Были проведены исследования зависимости предсказательной способности сети от выбранного алгоритма обучения. Были рассмотрены алгоритмы Adam, Nadam и Adamax [2]. Для обучения модифицированной модели и модели с оригинальной архитектурой VGG11 в каждом эксперименте было выбрано количество эпох, равное 10, и определена функция обратного вызова (callback), позволяющая останавливать обучение, если в течение трех эпох значение функции ошибки на валидации начинает изменяться на малые значения. В качестве функции ошибки для обеих моделей была выбрана категориальная кросс-энтропия.

Для анализа результатов работы сети на тестовых данных были использованы матрица ошибок и

отчет о классификации, включающий в себя метрики ассурасу, precision, recall и F1-score [3]. Для анализа результатов обучения были выведены графики функции ошибки и точности с помощью библиотеки Matplotlib.

В ходе исследования обе модели показали хорошие результаты. На тестовой выборке из первого набора данных модифицированная модель VGG, обученная с использованием алгоритма Adamax, совершила наименьшее количество ошибок при классификации изображений обоих классов. На втором наборе данных модель также показала хорошие результаты, так как метрика F1-score для класса, содержащего снимки лесных пожаров, составила 0.97, а для класса с изображениями леса без пожара — 0.91. Модель VGG11, обученная с использованием алгоритма Adam на первом наборе данных совершила 7 ошибок при классификации изображений, относящихся к категории лесных пожаров, что также является отличным результатом. Обе модели были добавлены в разработанную систему.

Научный руководитель — к.т.н. Солдатова О. П.

Список литературы

- [1] VGG16 — нейросеть для выделения признаков изображений. [Электронный ресурс]. URL: <https://neurohive.io/ru/vidy-nejrosetej/vgg16-model> (дата обращения: 20.04.2024).
- [2] Оптимизаторы градиентных алгоритмов: RMSProp, AdaDelta, Adam, Nadam. [Электронный ресурс]. URL: <https://proporprogs.ru/ml/ml-optimizatory-gradientnyh-algoritmov-rmsprop-adadelta-adam-nadam> (дата обращения: 25.04.2024).
- [3] Метрики в задачах машинного обучения. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/ods/articles/328372> (дата обращения: 29.04.2024).

4.19. Пименова И.А., Матвеева И.А. Применение методов машинного обучения к рамановским спектрам сыворотки крови

Рамановская спектроскопия является перспективным методом достижения повышения прогностической значимости при исследовании комплекса изменений компонентного состава крови [1]. Это неинвазивный оптический метод, который использует взаимодействие света с молекулами для получения информации об их структуре и состоянии.

Целью данного исследования является изучение возможности применения метода разрешения многомерных кривых с использованием метода чередующихся наименьших квадратов (MCR-ALS) для анализа *in vitro* рамановских спектров образцов сыворотки крови. В этой работе анализируются *in vitro* рамановские спектры сыворотки крови 100 людей. Из них 50 имели сердечную недостаточность, а 50 — контрольная группа (добровольцы без сердечной недостаточности). Образцы сыворотки крови отбирали у пациентов утром натощак и помещали в стерильные пробирки с последующим

замораживанием при температуре -16°C . Непосредственно перед спектральным анализом образцы размораживали при комнатной температуре.

Запись рамановских спектров проводилась по технологии поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии (SERS), подробно описанной в [2]. Спектры возбуждались в ближнем инфракрасном диапазоне с помощью лазерного модуля с центральной длиной волны 785 нм. В данной работе для спектрального анализа использован метод разрешения многомерных кривых методом чередующихся наименьших квадратов (MCR-ALS), который уже показал свою эффективность при выделении биохимических компонентов кожи [3]. В результате MCR-анализа из исследуемых рамановских спектров сыворотки крови выделено восемь компонентов и рассмотрены основные пики получившихся спектров. Также, получена матрица концентраций.

К профилям полученных концентраций компонентов были применены различные методы машинного обучения. Они использовались для классификации контрольной группы и людей с сердечной недостаточностью.

Для проверки стабильности моделей классификации была проведена 5-кратная кросс-валидация. Прогнозируемые значения были представлены с помощью диаграмм типа «ящик с усами» для концентраций и ROC-кривых. Используемые методы машинного обучения, диаграммы типа «ящик с усами» и ROC-кривые реализованы на языке программирования Python.

В результате, площадь под ROC-кривой для случая использования логистической регрессии составила 0.92, метод опорных векторов показал площадь под ROC-кривой на уровне 0.92, случайный лес — 0.99, перцептрон 0.89. Таким образом, в исследовании подтверждена эффективность применения методов машинного обучения для анализа спектральных данных рамановского рассеяния образцов сыворотки крови и диагностики на основании этого сердечной недостаточности.

Список литературы

- [1] ATKINS C.G., BUCKLEY K., BLADES M.W., TURNER R. F. Raman spectroscopy of blood and blood components // *Applied Spectroscopy*. 2017. Vol. 71. N. 5. P. 767–793.
- [2] AL-SAMMARAE S.Z., BRATCHENKO L. A., ТУПИКОВА Е.Н. ET AL. Silver nanoparticles-based substrate for blood serum analysis under 785 nm laser excitation // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. 2022. Vol. 8. N. 1. P. 010301.
- [3] MATVEEVA I., BRATCHENKO I., KHRISTOFOROVA Y. ET AL. Multivariate curve resolution alternating least squares analysis of *in vivo* skin Raman spectra // *Sensors*. 2022. Vol. 22. N. 24. P. 9588.

4.20. Писаренко А.А., Щирый А.О. Проблемы обработки ионограмм радиозондирования ионосферы из общедоступных архивов

По данным радиозондирования ионосферы коротковолновыми сигналами (КВ) можно получить информацию о процессах в ионосферной плазме, о ее структуре и состоянии; эти данные также крайне важны для систем КВ связи и загоризонтной радиолокации [1]. Наиболее информативными видами радиозондирования ионосферы являются наклонное зондирование (НЗ) и вертикальное зондирование (ВЗ). Ионограмма НЗ представляет собой трехмерное изображение зависимости амплитуды принятого сигнала от рабочей частоты и времени группового запаздывания. Ионограмма ВЗ представляет собой трехмерное изображение зависимости амплитуды радиосигнала от частоты и высоты отражения. Третье измерение, т. е. амплитуда радиосигнала изображается цветом или интенсивностью.

К настоящему моменту накоплен большой объем экспериментальных данных для различных гео- и гелиофизических, пространственных и временных условий. Часть этих данных является общедоступными. В качестве примера можно привести такие ресурсы: Национальный центр геофизических данных США [2], Канадская арктическая ионосферная сеть [3], Служба космической погоды Бюро метеорологии Австралии [4]. Интерес к большим массивам данных радиозондирования ионосферы мотивирован, кроме прочего, возможностью построения статистических моделей методами машинного обучения. Наилучший вариант в смысле удобства и качества обработки, когда ионограммы представлены в хорошо документированных форматах (пусть и специализированных). Гораздо более тяжелой является ситуация когда данные представлены только в виде картинок ионограмм (а raw-файлы при этом недоступны); причем это касается не только старых архивных данных до 1990-х, но и часть современных данных в некоторых общедоступных архивах может быть представлена только картинками. На этих картинках ионограмм присутствуют надписи, затрудняющие автоматическую обработку, причем в большинстве случаев некоторая дополнительная информация изображена даже поверх самого информационного поля ионограммы (как правило это восстановленный профиль электронной концентрации). Еще хуже, что наиболее старая часть этих архивных данных, полученных в «доцифровую» эпоху, представлена отсканированными фото пленками с изображениями ионограмм.

Прежде чем приступить к традиционной для ионограмм обработке (выделению треков, определению критических частот ионосферных слоёв, восстановлению профилей электронной концентрации) необходимо, как минимум, распознать само поле ионограммы на картинках. Эта зада-

ча решается нами с использованием библиотеки OpenCV, позволяющей находить границы поля ионограммы с приемлемой точностью (используются функции поиска контуров, за поле ионограммы принимается прямоугольный контур наибольшей площади).

Задачами для дальнейших работ является исправление деформирующих искажений поля картинки ионограммы (по соответствующим деформациям границ), а также распознавание надписей на осях (для автоматического восстановления метаданных).

Список литературы

- [1] Щирый А. О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолоний: Автореф. дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. СПб., 2007. 19 с.
- [2] USA national geophysical data center (NGDC) data services. [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/ionosonde> (дата обращения 01.09.2024).
- [3] Canadian high Arctic ionospheric network (CHAIN) data download. [Электронный ресурс]. URL: http://chain.physics.unb.ca/chain/pages/data_download (дата обращения 01.09.2024).
- [4] Australian Government — Bureau of meteorology, space weather services. Ionospheric data archive. [Электронный ресурс]. URL: https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/wdc_ion_archive (дата обращения 01.09.2024).

4.21. Полевой А. Об одном подходе к верификации нейросетевых моделей шумоподавления

Программное обеспечение с моделями машинного обучения получает широкое распространение и внедряется во многие процессы с критическими свойствами, невыполнение которых приводит к серьезным проблемам. Традиционная проверка качества моделей на ограниченных наборах данных позволяет оценить процент правильных результатов, однако не может гарантировать выполнения заданного свойства. Задача верификации — привести строгое доказательство, что требуемые свойства выполняются.

Традиционные подходы к верификации являются вычислительно затратными, поэтому разработка перспективных методов верификации нейросетевых моделей — большой вызов для современной науки. В рамках работы рассматриваются подходы к анализу надежности нейросетевых моделей, которые учитывают архитектуру моделей. Предложен подход к верификации, реализованный на основе решения задачи удовлетворения ограничений средствами языка Пролог. Работа метода продемонстрирована на предложенной ранее автором модели шумоподавления [1], которая позволяет эффективно обрабатывать нестационарные сигналы. В рамках работы доказана выполнимость ряда свойств нейросе-

тевой модели обработки сигналов и проведено сравнение с работой известных систем: построен программный стенд, на котором были проверены свойства нейросети в сравнении с системой Marabou [2]. Сделаны выводы о применимости методов и даны оценки по времени и по памяти для рассматриваемых моделей.

Для сравнения рассмотрено доказательство свойств той же модели в системе Marabou:

1. Существующий подход Marabou и предложенный эффективно справились с предлагаемыми свойствами, без заикливания.
2. Поскольку реализация Marabou выполнена на C++, было показано стабильное время работы для рассмотренных свойств.
3. В предлагаемом подходе за счет использования Пролог и понижения точности удалось существенно сократить время проверки свойств по сравнению с реализацией Marabou. Также стоит отметить, что предложенная реализация использует существенно меньше памяти при проверке невыполнимого свойства.

Дальнейшее исследование связано с обобщением проверки свойств на новые типы сигналов и расширением класса нейросетевых моделей, с которыми работает верификатор, в частности моделей активного шумоподавления.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Корухова Ю. С.

Список литературы

- [1] Полевой А. В., Корухова Ю. С. Исследование алгоритмов активного шумоподавления для нестационарных сигналов // Тез. докл. науч. конф. «Тихоновские чтения». М.: МАКС Пресс, 2022. С. 51.
- [2] KATZ G., HUANG D., IBELING D. ET AL. The Marabou framework for verification and analysis of deep neural networks // Computer Aided Verification: 31st Intern. Conf., CAV 2019. NY, USA, July 15–18, 2019. Proc., Pt I 31. Springer, 2019. P. 443–452.

4.22. Попова В.А. Улучшение качества программного обеспечения на платформе «1С:Предприятие» с помощью статической проверки типов

В разработке программного обеспечения динамически типизированные языки играют важную роль благодаря отсутствию необходимости задавать типы переменным, что позволяет упростить написание программного кода. Однако, несмотря на востребованность таких языков программирования, отсутствие строгой типизации может приводить к ошибкам и снижению надежности кода. Это особенно актуально для языка программирования «1С:Предприятие», который широко используется в бизнес-приложениях. В отличие от других языков с динамической типизацией, таких как Haskell, OCaml, Standard ML, JavaScript и Python,

для «1С:Предприятия» до сих пор не существовало инструментов статической проверки типов.

Так, в данной работе приводится перечисление результатов разработки инструмента статической проверки типов для языка программирования «1С:Предприятие». Результаты работы включают:

1. Разработку формата «Дерево типов конфигурации» (ДТК) для описания объектов конфигурации и типов платформы [1].
2. Создание представления программного кода конфигурации в виде AST [2].
3. Реализацию правил для анализа соответствия типов конструкциям языка [3].

Актуальность работы заключается в необходимости обеспечения высокой надежности и качества программного обеспечения, разрабатываемого на платформе «1С:Предприятие». Внедрение инструмента статической проверки типов позволяет своевременно выявлять и исправлять ошибки, связанные с несоответствием типов данных, что значительно улучшает процесс разработки и поддержки программного обеспечения.

Научная новизна работы состоит в том, что на текущий момент для языка программирования «1С:Предприятие» не существует инструментов статической проверки типов, учитывающих специфику системы типизации этого языка и позволяющих автоматически вычислять типы переменных при написании программного кода. Разработанный механизм и инструменты статической проверки типов являются значительным вкладом в улучшение качества программ «1С:Предприятия». На текущий момент инструмент статической проверки типов разработан в виде плагина для среды разработки Eclipse и проходит процедуру апробации.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Иркутского государственного университета для молодых ученых № 091-24-302 «Тестирование программного комплекса для статической проверки типов и апробация результатов диссертационного исследования».

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Балюк А. С.

Список литературы

- [1] Балюк А. С., Попова В. А. Разработка программного комплекса для конвертации конфигурации платформы «1С:Предприятие» в UML-модель // Сложные системы модели, анализ и управление. 2021. № 4. С. 137–145.
- [2] BALYUK A. S., POPOVA V. A. Static type-checking for programs developed on the platform 1C:Enterprise // CEUR Workshop Proc. 2021. Vol. 2984. P. 101–111
- [3] Попова В. А. Разработка правил для выявления ошибок несоответствия типов выражений в языке программирования «1С:Предприятие» // Динамические системы и компьютерные науки: теория и приложения (DYSC 2023): матер. 5-й Междунар. конф. Иркутск, 18–23 сентября 2023 г. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2023. С. 169–172.

4.23. Рудов М.С. Разработка информационного обеспечения карбонового полигона

Выбросы парниковых газов в атмосферу в результате деятельности компаний по добыче полезных ископаемых и жизнедеятельности людей усиливают парниковый эффект, способствующий изменению климата. Углекислый газ, образующийся при сжигании ископаемого топлива, является одним из важнейших факторов изменения климата. Карбоновые полигоны разработаны для того, чтобы производить мониторинг парниковых газов для выяснения углеродного баланса лесов, полей, болот и рек. Углеродный баланс очень важен, при недостаточном поглощении углерода в регионе карбонового полигона можно проводить целый ряд действий для его восстановления, таких как: выращивание насаждений, восстановление атропогенно-нарушенных земель, восстановление водно-болотных угодий, восстановление лесов, регенеративное сельское хозяйство и животноводство [1].

В настоящее время наиболее точными являются измерения методом вихревых кварцеваний и измерения с помощью почвенных камер. Однако для измерения суммарного потока парниковых газов целого леса или масштабной территории необходимо пользоваться дистанционными средствами, например сканирующими мультиспектральными камерами на беспилотных летательных аппаратах [3].

Особенностью карбонового полигона является мультимодальность данных. Карбоновый полигон состоит из площадок наблюдений, каждая из которых включает мониторинговые площадки, на которых расположены камеры для мониторинга состояния почвы. Также проводится съёмка с БПЛА для составления ортофотопланов полигона и кампуса, модели рельефа, построения карты вегетационного индекса NDVI для территории кампуса.

Мультимодальные данные — это пространственные данные получаемые от различных источников в рамках карбонового полигона. Такие данные могут включать оцифрованные потоки, изображения, различную текстовую ретроспективную информацию. Для разноплановых данных требуется система, которая бы учитывала эту мультимодальность и преобразовывала данные в удобочитаемый формат для пользователя.

Карбоновый полигон представляет собой цифровой двойник третьего типа (комплексную модель всей системы, которая включает в себя все элементы и процессы, связанные с ее функционированием), поэтому его цель — сбор, хранение и обработка мультимодальных потоков пространственных данных, связанных процессами генерации и поглощений углерода во всех формах. Подход на основе цифрового двойника, позволяет замкнуть обратную связь между источниками информации, расчётными моделями и лицами, принимающими решения.

В качестве базы данных для хранения мультимодальной информации такого плана была выбрана PostgreSQL с расширениями, необходимыми для хранения в нашем варианте [2]: pgvector — для хранения и поиска векторов; PostGIS — для поддержки географических объектов и анализа пространственных данных; PostGIS raster — для работы с растровыми данными.

Для обработки мультимодальной информации будет разработан специальный нейро-советник, на основе больших языковых моделей. Он позволит не только упростить схему обработки информационных потоков, но и будет выполнять роль консультанта, который на основе справочника наилучших доступных технологий предсказывает необходимые технологические решения по секвестрации, хранению и обработке потоков информации. Ядром системы моделирования будет специализированная геоинформационная система (ГИС), которая позволит устанавливать и настраивать различные расчётные модели.

В результате разработано информационное обеспечение карбонового полигона на основе базы данных мультимодальной информации и системы нейро-советника для обработки информации с использованием больших языковых моделей. ГИС разработана для помощи лицам, принимающим решения с использованием наилучших доступных технологий.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>).

Список литературы

- [1] Карбоновые полигоны России: настоящее и будущее. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecoindustry.ru/i/news/59836/doklad.pdf> (дата обращения 06.09.2023).
- [2] Популярные расширения PostgreSQL. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/791870> (дата обращения 12.09.2024).
- [3] Карбоновые полигоны. [Электронный ресурс]. URL: <https://carbon-polygons.ru/about> (дата обращения 06.09.2023).

4.24. Рыбаченко И.А. Анализ эмоциональной окраски нарративных публикаций в социальных медиа

Социальные медиа играют важную роль в формировании общественного мнения. Например, в социальных медиа могут распространяться антивакцинационные сообщения [1]. Также через социальные медиа могут формироваться радикально настроенные сообщества. Анализ социальных медиа позволяет отслеживать тенденции развития общественного мнения. Частым видом публикаций являются нарративные тексты. Нарративы публикуемые в телеграм каналах часто эмоциональны и имеют театрализованный характер [2, 3]. Таким образом, эмо-

циональный анализ сообщений в телеграм-каналах имеет большое значение для понимания позиции автора по отношению к событиям излагаемым в нарративе.

В работе представлен анализ эмоциональной окраски публикаций из 10 популярных российских политических каналов. Список каналов был взят из каталога *tlgrm.ru* из раздела *Политика*. Для анализа были выгружены до 1100 публикаций из каждого выбранного канала. Каждая публикация была обработана языковой моделью, предсказывающей эмоциональную окраску текста в виде вектора из 10 эмоций — нейтрально, радость, грусть, гнев, интерес, удивление, отвращение, страх, вина и стыд. Значение для каждой эмоции может варьироваться в диапазоне от 0 до 1. Использовалась предобученная языковая модель [4]. Собранные данные были проанализированы через построение графиков при помощи библиотеки *seaborn* для Python.

В результате анализа было обнаружено различие в используемых эмоциях между несколькими каналами. Связь между эмоциональной окраской сообщения и величиной реакции аудитории оказалась незначительной. Анализ эмоциональной окраски сообщений выполнялся в рамках конвейера обработки нарратива. В дальнейшем планируется научиться различать по отношению к какому субъекту выражается эмоция.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГЗ Наука, в рамках проекта FSWW-2024-0023.

Научный руководитель — к.т.н. Савельев А. О.

Список литературы

- [1] DARIUS P., URQUHART M. Disinformed social movements: a large-scale mapping of conspiracy narratives as online harms during the COVID-19 pandemic // *Online Social Networks and Media*. 2021. Vol. 26. Art. 100174.
- [2] Попова О. В. Особенности коммуникации политизированных сообществ в русскоязычных телеграм-каналах // *Политическая экспертиза: ПОЛИТЭК*. 2023. Т. 19. № 2. С. 215–229.
- [3] БУДАЕВ Э. В. Зооморфные метафоры в оппозиционном дискурсе белорусских телеграм-каналов // *Политическая лингвистика*. 2022. № 2(92). С. 25–34.
- [4] Rubert tiny2 russian emotion detection. [Электронный ресурс]. URL: <https://huggingface.co/Djacon/rubert-tiny2-russian-emotion-detection> (дата обращения 12.11.2024).

4.25. Сайгин П. А. Оценка заболевания COVID-19 и пневмонии по данным радиотермометрии

В ходе выполнения работы было проведено исследование предметной области, выявлены значимые характеристики и создана концептуальная модель проявления заболеваний. В качестве информационной модели использовался набор данных о пациентах, как с COVID-19 и пневмонией, так и здоровых. На основе методов машинного обучения была

построена математическая модель классификатора, позволяющего разделять пациентов по группам: больные и здоровые. Проведены реализация и тестирование предложенных моделей, проведены вычислительные эксперименты, анализ результатов.

В настоящее время основные методы диагностики COVID-19 и пневмонии — ПЦР-тест, компьютерная томография и рентген, но данные методы имеют свои недостатки, например, ПЦР-тест имеет долгое время проверки анализа, так же компьютерная томография и рентген не рекомендуются к использованию для обследования одного и того же пациента чаще, чем один раз в полгода. Из-за этого возникает острая необходимость в альтернативных, безопасных для частого использования, методах диагностики коронавирусной инфекции и пневмонии, которые будут давать результат сразу или сообщать о том, что нужно провести дополнительное обследование. Данные для анализа были получены из медицинского центра Киргизской государственной медицинской академии. Пациенты с подозрением на COVID-19 проверялись радиотермометром ПЦР-тестом, а также компьютерной томографией.

В ходе выполнения работы были получены следующие основные результаты:

1. Проведён анализ набора данных. Составлена концептуальная модель проявления симптомов COVID-19 и пневмонии. Выявлены значимые характеристики.
2. Построен, реализован и протестирован алгоритм классификации на основе искусственной нейронной сети. Получен классификатор пациентов на «Болен», «Здоров».
3. Проведены вычислительные эксперименты и получена эффективность работы классификатора, равная 97 %.

Научный руководитель — д.т.н. Гермашев И. В.

4.26. Самойленко Р. В. Обнаружение мошеннических действий в финансовых наборах данных с применением методов глубокого обучения

Трансформация технологического ландшафта финансовой и торгово-экономической деятельности привела к появлению интернет-банкинга, многочисленных маркетплейсов и других элементов цифровой экосистемы. Как следствие, стали возможными принципиально новые виды мошенничества, эффективность противодействия которым традиционными средствами крайне низка. Основанные на правилах системы обнаружения аномалий (подозрительных транзакций) работают по заранее определенным алгоритмам и требуют частых обновлений при появлении новых видов атак. Такой подход крайне неэффективен, поскольку действует «с опозданием» и не позволяет обнаруживать атаки, признаки которых еще отсутствуют в системе.

Цель данной работы — оценка потенциала методов глубокого обучения для обнаружения аномалий в области электронных платежей и выявление моделей машинного обучения, способных самообучаться и эффективно работать даже при появлении ранее неизвестных атак.

Обнаружение аномалий в наборах данных осуществляется с помощью методов неконтролируемого обучения для выявления отклонений в финансовых транзакциях. Нейронные сети, с их способностью моделировать сложные закономерности и взаимосвязи в данных, предлагают надежную основу для выявления мошеннических транзакций. В исследовании рассматривается применение различных нейронных сетей, включая сверточные нейронные сети (CNN) и рекуррентные нейронные сети (RNN), которые специализируются на обработке последовательных данных и выявлении мошеннического поведения [1].

Основным результатом исследования является определение наиболее актуального метода машинного обучения для анализа электронных платежей. В работе использованы наборы данных финансовых транзакций с ресурса Kaggle и продемонстрировано сочетание различных нейронных сетей, что позволило использовать сильные стороны разных методов для улучшения обнаружения мошенничества. Отражена роль автоэнкодеров, которые могут использоваться для изучения обычных схем транзакций и выявления отклонений, в то время, как рекуррентные нейронные сети и сверточные нейронные сети могут моделировать последовательный характер транзакций с течением времени и осуществлять обработку последовательностей данных.

Таким образом, показано, что для выявления мошенничества в финансовых транзакциях наиболее результативным является объединение нескольких моделей нейросетей, таких как CNN, RNN и автоэнкодеров, с помощью которых можно создать ансамблевую модель, которая фиксирует различные аспекты транзакций, повышая общую точность обнаружения. Объединение разных нейронных сетей может обеспечить более полное представление данных, расширяя возможности обнаружения сложных схем мошенничества.

Список литературы

- [1] KHEMANI B., PATIL S., KOTACHA K., TANWAR S. A review of graph neural networks: concepts, architectures, techniques, challenges, datasets, applications, and future directions // Journal of Big Data. 2024. Vol. 11. N. 1. P. 18–21.

4.27. Сиротинин А.А., Володько О.С. Проектирование оптимальной беспроводной сенсорной сети на трехмерной модели здания

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) — это распределенная система миниатюрных электронных

устройств, таких как датчики дыма, открытия дверей, влажности, протечек, температуры и исполнительных устройств. БСС является перспективным инструментом для создания безопасных и комфортных рабочих мест, а так же способствует улучшению качества жизни людей, благодаря своевременному контролю за различными параметрами и реагированием на них без участия человека. Такая сеть собирает данные с множества датчиков, отправляет их на сервер, где происходит обработка полученных данных, после чего происходит оповещение пользователя и отправка команд исполнительным устройствам. Для того чтобы система работала требуется стабильная и надежная беспроводная сеть [1].

При выборе мест для установки точек доступа (хабов) беспроводной сенсорной сети необходимо учитывать геометрию, материалы отделки и конструктивные особенности здания, так как все эти параметры оказывают большое влияние на функционирование сетей, работающих в СВЧ-диапазоне. Самыми распространенными стандартами связи для технологии интернета вещей являются Bluetooth, Z-Wave, Thread, ZigBee и WiFi [2].

Цель данной работы — проектирование структуры оптимальной базовой сети для технологии интернета вещей на трехмерной модели здания посредством комбинации стандартов WiFi и ZigBee. Построение БСС рассматривается на примере здания научного института. Задача заключается в оптимальной расстановке хабов с учётом максимально возможного уровня мощности сигнала и минимальных затрат на хабы и коммуникации.

В настоящей работе задача решается с помощью дополненной модели Мотли — Кинана, которая учитывает затухание сигнала в стенах и межэтажных перекрытиях и классического генетического алгоритма [3], который включает в себя этапы турнирного отбора, скрещивания и мутацию. В качестве хромосомы выбран бинарный вектор, который описывает расстановку хабов во всём здании.

Список литературы

- [1] АРЕФЬЕВ А. В., АФАНАСЬЕВА О. В., ВЕШЕВ Н. А. и др. Проблемы построения больших локальных сетей интернета вещей // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2022. Т. 10. С. 261–267.
[2] WANG W., CAPITANEANU S. L., MARINCA D. ET AL. Comparative analysis of channel models for industrial IoT wireless communication // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 91627–91640.
[3] SINGH A., SHARMA S., SINGH J. Nature-inspired algorithms for wireless sensor networks: a comprehensive survey // Computer Science Review. 2011. Vol. 39. Art. 100342.

4.28. Смаль И.А., Морозов Д.А. Анализ значимости синтаксических признаков текста при оценке его удобочитаемости

Задача определения удобочитаемости текста, то есть того, насколько текст сложен для понимания

в процессе прочтения, имеет широкую область применения. Однако, несмотря на это, а также на активное развитие инструментов для анализа естественного языка в последние десятилетия, до сих пор, общепринятыми методами оценки удобочитаемости текста являются формулы, предложенные во второй половине 20-го века.

Современные исследования в данной области обычно включают в себя использование машинного обучения и анализ различных признаков текста, чаще всего лексических и синтаксических. Причем, в большинстве работ лексические признаки показывают себя лучше, чем синтаксические. Одной из возможных причин этого является недостаточное количество исследований того, на какие именно синтаксические признаки стоит обращать внимание при оценке удобочитаемости. Именно этот пробел мы и решили восполнить в данной работе.

Нами были проведены эксперименты по оценке удобочитаемости групп предложений на основе их синтаксических признаков с применением методов градиентного бустинга и случайного леса. Эксперименты проводились на двух корпусах – корпусе учебников [1] и корпусе художественной литературы [2]. В процессе экспериментов размеры групп варьировались для получения более достоверных результатов. В обоих корпусах присутствовала разметка, сопоставляющая тексту класс школы, ученики которого без проблем могли понимать этот текст.

Всего выделялось 248 синтаксических признаков для каждой группы предложений. С помощью четырех методов определения значимости признаков в моделях (*Mutual information*, *drop-column importance*, *permutation importance*, *Mean decrease in impurity*) были найдены самые значимые признаки. Для корпуса учебников таких признаков оказалось 12, а для художественной литературы 17, при этом всего 5 из них были общими. Модели, обученные исключительно на лучших признаках, показали себя лишь незначительно хуже (а на корпусе художественной литературы даже лучше), чем модели, использовавшие все 248 признаков.

Научный руководитель — д.т.н. Барзгин В. В.

Список литературы

- [1] SOLOVYEV V., IVANOV V., SOLNYSHKINA M. Assessment of reading difficulty levels in Russian academic texts: approaches and metrics // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. Vol. 34. N. 2. P. 1–10.
- [2] МОРОЗОВ Д. А., ГЛАЗКОВА А. В., ИОМДИН Б. Л. Сложность текста и лингвистические признаки: как они соотносятся в русском и английском языках // Russian Journal of Linguistics. Т. 26. № 2. С. 426–448.

4.29. Фарваев Э. Ф. Адаптивная пространственная интерполяция геомагнитных данных

Геомагнитные данные используются в различных научных и практических областях, но если

условия в определенном регионе не располагают к размещению магнитометрических измерительных устройств, то получение необходимой информации затруднено.

Анализ результатов наблюдений и регистрации параметров геомагнитного поля показал, что значения этих параметров меняются неравномерно [1]. В связи с этим был сделан вывод о пользе учета пространственно-временного распределения данных во время анализа.

Эффективность различных методов интерполяции варьируется в зависимости от условий, поэтому был разработан исследовательский прототип веб-приложения, реализующий следующий алгоритм интерполяции:

1. Проведение серии вычислительных экспериментов для определения эффективности разных методов в разных областях и при различных внешних факторах (в нашем случае это Кр-индекс — индекс геомагнитной активности в определенный период).
2. Подготовка пула методов для последующей интерполяции значений в произвольных пространственных точках.
3. Выполнение поступающего запроса на интерполяцию наиболее подходящим методом.

Результаты первого этапа показали, что для высоких широт наилучшие результаты интерполяции показывает кригинг: универсальный с трендом для высокого Кр-индекса и простой для низкого [2]. Для средних и низких широт лучшие результаты показал метод интерполяции на основе триангуляции Делоне [3].

Апробация решения производилась на наборах геомагнитных данных проекта SuperMAG [4]. Предложенный алгоритм позволил сократить среднеквадратическую ошибку восстановления пространственных данных по сравнению с существующими подходами следующим образом: в среднеширотных областях — на 4.71 нТл, в высокоширотных областях — на 4.95 нТл, в низкоширотных областях — на 16.7 нТл.

Научный руководитель — д.т.н. Воробьева Г. Р.

Список литературы

- [1] VOROBV A. V., SOLOVIEV A. A., PILIPENKO V. A. ET AL. Interactive computer model for aurora forecast and analysis // Solar-Terrestrial Physics. 2022. Vol. 8. N. 2. P. 84–90.
- [2] ZHANG H., TIAN Y., ZHAO P. Dispersion curve interpolation based on kriging method // Applied Sciences. 2023. N. 13. Art. 2557.
- [3] ALEXA M. Conforming weighted Delaunay triangulations // ACM Transactions on Graphics. 2020. N. 39. P. 1–16.
- [4] GJERLOEV J. W. The SuperMAG data processing technique // J. Geophys. Res. 2012. N. 117. Art. A09213.

4.30. Ханьков И.Г. Линейный мультипороговый метод Оцу

Среди задач компьютерного зрения выделяется задача сегментации изображений из оттенков серого. Одна из групп методов ее решения — это методы кластерного анализа. Среди них простейшим методом является метод Оцу [1]. Он за один проход по всему множеству разделяет пиксели на два класса. Однако у его обобщения — мультипорогового метода Оцу [2] — вычислительная сложность возрастает экспоненциально. Увеличение числа порогов приводит к увеличению количества вложенных циклов расчета. Актуальным представляется решение проблемы экспоненциального роста вычислительной сложности при кластеризации методом Оцу на всевозможное количество порогов.

В настоящей работе предлагается решение данной проблемы за счет использования инвариантов: суммарной яркости изображения и общего числа пикселей, которые остаются постоянными относительно операции кластеризации: 1) суммарные яркости любых разбиений равны; 2) суммарная яркость каждого отдельного разбиения представляет суперпозицию яркостей всех кластеров в разбиении; 3) общее число пикселей постоянно; 4) общее число пикселей любого разбиения представляет собой суперпозицию пикселей всех кластеров в разбиении.

В предлагаемой модификации метода Оцу упорядоченные кластеры пикселей объединены в множества. За проход по набору множеств мощность одного из них уменьшается, но увеличивается количество таких множеств в наборе. Множества характеризуются своими значениями суммарной яркости и количества пикселей. За проход по набору множеств рассматриваются все кластеры пикселей. За определением очередного порога и разделением одного из множеств в наборе следует операция коррекции, переопределяющая принадлежность всех известных по исходному изображению конечных кластеров (яркостей исходного изображения) к найденным средним яркостям к данному шагу последовательностей разбиений. После коррекции определяются новые средние и новые кластеры, по которым генерируется кусочно-постоянное разбиение, записываемое на устройство хранения данных.

На входе программы, реализующей линейный мультипороговый метод Оцу, сформируется изображение из оттенков серого. На выходе программы — серия разбиений на кластеры пикселей от 1 до $N_{\text{кл}}$ всего числа кластеров в исходном изображении. Область допустимых значений $N_{\text{кл}} \in [1, 256]$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № FSRF-2023-0003).

Научный руководитель — к.т.н. Харинов М. В.

Список литературы

- [1] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber.: Journal. 1979. Vol. 9. P. 62–66.
- [2] LIAO P.-S., CHEN T.-S., CHUNG P.-C. A fast algorithm for multilevel thresholding // J. Inf. Sci. Eng. 2001. Vol. 17. P. 713–727.

4.31. Хомчук Е.П., Амелчаков М.Б., Громушкин Д.М., Жежера С.Ю., Коновалова А.Ю., Хохлов С.С., Шулъженко И.А., Юсакowa Е.А. Система хранения, анализа и обработки уникальной научной информации Экспериментального комплекса НЕВОД

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных направлений в области физики космических лучей являются мультикомпонентные исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ). В то же время применение к анализу экспериментальных данных мультикомпонентных исследований комплементарного подхода, при котором недостаточная с точки зрения независимого анализа информация об одной или нескольких компонентах ливня может быть дополнена данными по другим компонентам, позволит точнее определять параметры ШАЛ и, соответственно, характеристик инициировавшей его частицы. Такие исследования и такой подход могут быть реализованы в Экспериментальном комплексе (ЭК) НЕВОД [1], объединяющем шесть установок (черенковский водный калориметр НЕВОД, координатно-трековый детектор ДЕКОР, установка СКТ и ливневые детекторы НЕВОД-ШАЛ, ПРИЗМА и УРАН), которые позволяют исследовать одни и те же события сразу по трем компонентам: электронно-фотонной, мюонной и адронной.

В результате работы установок ЭК формируется объемный поток данных, содержащих топологическую, триггерную, координатную, амплитудную и временную информацию о зарегистрированных событиях. При этом для решения различных расчетных задач в целях верификации получаемых экспериментальных результатов и разработки новых методов необходим внушительный банк моделированных ШАЛ и откликов установок, получаемых с помощью CORSIKA и Geant4. Поэтому для хранения и эффективного анализа экспериментальных и моделированных событий установок с целью развития комплементарного подхода к анализу данных в ЭК НЕВОД создается высокопроизводительная аппаратно-программная система NEVOD-НРС.

Данная система предназначена для решения следующих задач: моделирование ШАЛ, процессов прохождения КЛ в гелиосфере и околоземном пространстве, откликов детекторов и установок; обработка и анализ экспериментальных и моделируемых данных; обучение нейронных сетей для реконструкции событий и развития новых методов и подходов

к анализу данных; надежное хранение информации; организация и унификация хранения данных детекторов и установок ЭК НЕВОД. В докладе представлены задачи и особенности создаваемой системы, ее состав и архитектура, а также схема хранения информации. Приводится описание структуры баз экспериментальных и моделированных данных, как отдельных установок, так и всего комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-72-10010).

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Шульженко И. А.

Список литературы

- [1] АМЕЛЬЧАКОВ М. Б., АСТАПОВ И. И., БАРБАШИНА Н. С. и др. Экспериментальный комплекс НЕВОД / М.: НИЯУ МИФИ, 2022. 260 с.

4.32. Чеглов Е.Р. Анализ университетского курса по программированию через призму ChatGPT

В последнее время студенты стали всё чаще использовать искусственный интеллект для решения поставленных преподавателями задач по изучаемым дисциплинам. Программирование не является исключением. Для автоматизированной проверки студенческих решений в вузах используется плагин CodeRunner для LMS [1]. Использование ИИ студентами в изучении программированию имеет как преимущества, так и недостатки [2]. Для опытного преподавателя не является проблемой выяснить, написан ли программный код самостоятельно или заимствован. Но как обучить автоматизированную систему распознавать такие заимствования и своевременно на них реагировать.

Актуальность исследования возможностей ChatGPT в рамках автоматизированного курса по программированию на Python связана с необходимостью улучшения образовательного процесса и повышения эффективности проверки знаний студентов. Важно выяснить, способен ли ИИ, такой как ChatGPT (версия 3.5), полноценно справляться с задачами курса, предоставляя корректные решения заданий, используя исходную формулировку условия без внесения дополнительной информации. Это исследование также затрагивает проблему распознавания случаев использования ChatGPT студентами при выполнении заданий и разрабатывает методы для идентификации таких ситуаций в условиях автоматизированной проверки.

В рамках исследования был проанализирован электронный курс по программированию, размещённый в LMS университета. Для исследования были задействованы 100 задач базового уровня сложности, распределённых по восьми тематическим блокам. Эксперимент состоял в моделировании поведения студента, который копирует условия задачи из LMS и передаёт их ChatGPT. Полученное

решение без изменений отправляется на проверку в тестирующую систему. Если решение не проходит тесты, студент повторяет процесс, отправляя ChatGPT уточняющие запросы, пока задача не будет решена успешно. Результаты эксперимента показали, что ChatGPT способен справляться с задачами курса.

Одной из ключевых задач исследования было выявление отличий в подходе к решению задач между ChatGPT и студентами. Модель строго следует стандартам PEP8, включая аккуратное форматирование и наличие комментариев, что не характерно для большинства студентов. Кроме того, ChatGPT склонен использовать продвинутые функции Python, которые не всегда изучаются на начальных этапах курса, что может вызывать подозрения при проверке студенческих решений. Различия в подходе к именованию переменных также могут стать маркером использования ИИ: ChatGPT присваивает имена переменным на основе их содержания, тогда как студенты чаще используют абстрактные имена.

Исследование также выявило недостатки курса, связанные с тем, что некоторые задачи по циклам `for` и `while` можно оптимальнее решать, используя альтернативные конструкции. Эти выводы могут помочь улучшить качество курса, добавив больше задач, способствующих развитию гибкости мышления студентов.

Список литературы

- [1] КАРМАНОВА Е. В. Автоматизированный контроль при обучении программированию на python с использованием плагина CODERUNNER LMS MOODLE // Тр. XIV Междунар. Н-П. Конф. «Наука. Информатизация. Технологии. Образование». Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2021. С. 102–108.
- [2] YILMAZ R., KARAOGLAN YILMAZ F. G. Augmented intelligence in programming learning: Examining student views on the use of ChatGPT for programming learning // Computers in Human Behavior: Artificial Humans. 2023. Vol. 1. N. 2. Art. 100005.

4.33. Черевко Н.Н. Адаптирование нейронных сетей для тестирования UX/UI сайтов и мобильных приложений

Цель работы заключается в исследовании и разработке методов адаптации нейронных сетей для тестирования UX/UI сайтов и мобильных приложений. В настоящее время существует большое количество сайтов и мобильных приложений, способных решать совершенно разные задачи. Каждый из этих продуктов необходимо тестировать перед тем, как предоставлять его пользователю. Причем важным является не только тестирование функциональности программного продукта, но и его дизайна и удобства пользования [1]. Для тестирования функ-

циональности существуют автоматизированные и ставшие привычными инструменты, которые позволяют значительно повысить эффективность работы специалиста по тестированию, но для проверки качества UX (пользовательского опыта) и UI (пользовательского интерфейса) подобный инструментарий имеет ряд ограничений [2].

Среди используемых инструментов [3] можно выделить нейросетевые платформы, которые могут проводить базовый анализ UX/UI и создавать интерфейсы из скетчей или текстовых описаний, как например, Uizard. Нейросеть EyeQuant предназначена для анализа пользовательского внимания. Google Lighthouse использует интеллектуальные технологии для оценки различных UX/UI аспектов. Applitools — платформа для визуального тестирования интерфейсов. Hotjar — инструмент для анализа поведения пользователей на веб-сайтах с использованием тепловых карт, записей сессий и опросов. Color Oracle — специализированный инструмент для проверки доступности цветовых схем и контрастности. Ключевыми ограничениями всех этих инструментов, влияющими на эффективность тестирования являются следующие две особенности: каждая из нейросетей проводит тестирование только по определенным пунктам и нейросеть плохо учитывает контекст, в котором используется программный продукт.

Чтобы преодолеть указанные ограничения, предлагается использовать несколько подходов, которые позволяют минимизировать слабые стороны существующего инструментария и усилить их практическую ценность. Системы нейросетевого анализа предлагается интегрировать с инструментами аналитики для сбора и обработки большого количества данных, таких как клики, переходы, пути переходов, лайки, комментарии, возраст, пол, повторные действия и история. Качественная обработка и интерпретация этих данных позволяет точнее оценивать поведение пользователей и находить недостатки дизайна интерфейса на этапе тестирования. Предлагается учитывать культурные и социальные особенности целевой аудитории, такие как язык, культура, социальный статус, религия, этические нормы. Предлагается производить настройку порогов для выявления несовпадений в инструментах визуального тестирования (пиксельные несовпадения, несовпадение размеров и позиций элементов, несоответствия в стилях и разрешении, адаптивность, искажение изображения и текста, нарушение структуры страниц). Нейронным сетям могут быть переданы различные функции: распознавание паттернов и аномалий, классификация элементов интерфейса, анализ адаптивности, анализ тепловых карт, предсказание ошибок визуального отображения, сравнительный анализ различных версий, анализ цветовых и стилистических решений, обнаруже-

ние проблем невидимых для пользователей, генерация рекомендаций.

Предложенные подходы при их интеграции в единой автоматизированной системе позволят эффективно выявлять проблемные страницы, моменты задержки загрузки, низкий процент конверсии на ключевых этапах, неправильное поведение элементов, низкую оптимизацию изображений.

Список литературы

- [1] АНДЕРСОН С. Образовательный UX: Как создать незабываемый пользовательский опыт / М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017.
- [2] КРУГ С. Не заставляйте меня думать! Веб-юзабилити и здравый смысл / М.: Манн, Иванов и Фербер, 2019. 216 с.
- [3] НИЛЬСЕН Д., ЛОРАНЖЕР Х. Веб-дизайн: анализ и юзабилити / М.: Вильямс, 2007. 432 с.

4.34. Шайхисламов И.М. Создание индивидуальных образовательных траекторий: использование машинного обучения для анализа данных анкет и тестов обучающихся

В данной исследовательской работе рассматривается создание индивидуальных образовательных траекторий с использованием методов машинного обучения для анализа данных анкет и тестов обучающихся. Этот проект имеет важное практическое применение в сфере образования, так как он предоставляет возможность адаптировать учебный процесс под уникальные потребности каждого обучающегося. Основной целью работы является разработка модели машинного обучения, которая позволит автоматически формировать индивидуальные образовательные маршруты на основе анализа собранных данных. В ходе исследования решаются задачи сбора и анализа данных, разработки алгоритмов машинного обучения и оценки эффективности созданных образовательных маршрутов.

В исследовании использовались данные анкет и тестов 50 обучающихся, охватывающие различные аспекты их учебной деятельности и предпочтений. Для сбора данных применялись онлайн-анкеты, которые оценивали начальные знания, стили обучения и мотивацию, а также тесты для проверки усвоения материала. Для анализа данных были использованы алгоритмы машинного обучения, такие как кластеризация (K-means) и классификация (Random Forest), что позволило выявить группы обучающихся с похожими характеристиками и сравнить их с четырьмя основными типами, составленными методистами на основе профессиональных образовательных стандартов. Данные были предварительно обработаны с использованием методов нормализации и кодирования, что улучшило качество анализа и предсказаний.

Для оценки эффективности модели использовались метрики, такие как точность (accuracy), пол-

нота (recall) и F1-мера. Точность модели составила 85 %, полнота — 82 %, а F1-мера — 83 %. Эти показатели свидетельствуют о высоком качестве предсказаний модели. В результате эксперимента обучающиеся, следовавшие индивидуальным образовательным маршрутам, продемонстрировали повышение успеваемости на 20 % по сравнению с контрольной группой. Кроме того, 90 % участников эксперимента выразили готовность рекомендовать подход, используемый на онлайн-платформе, что увеличило индекс потребительской лояльности (NPS) более чем на 40 %. Процент оттока (Churn rate) — снизился до 0.

В дальнейшем планируется улучшение качества модели за счет увеличения объема данных и применения более сложных алгоритмов, а также введение дополнительных критериев эффективности обучения, таких как вовлеченность, мотивация и личностные достижения. Создание индивидуальных образовательных траекторий с использованием машинного обучения представляет собой перспективный подход к адаптации образовательного процесса, позволяя учитывать уникальные потребности каждого обучающегося и повышая общую эффективность обучения.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Пестунов А. И.

4.35. Шашок Н.А., Кожмякина Э.Д. Разработка архитектуры системы векторного поиска с привязкой эмбедингов к исходным документам для вопрос-ответной системы

Современные информационные системы должны обрабатывать и анализировать данные высокой сложности и многомерности, а также различные их форматы, включающие графические, звуковые и текстовые данные. Традиционные хранилища данных и алгоритмы поиска не предназначены для единого корпуса разнородных данных: без дополнительных разработок по внесению метаданных, описаний и ключевых слов, осуществление поиска данных разного формата, имеющих схожую смысловую нагрузку, представляется трудоемкой задачей. Одним из вариантов решения этой задачи является использование векторных баз данных, оптимизированных для эффективного и точного поиска в векторном пространстве и для хранения эмбедингов — представлений объектов в виде числовых массивов, являющихся, в том числе, «смысловыми» проекциями объектов. Однако использование эмбедингов без привязки к исходным данным и документам большого размера, что, как правило, не реализуется в большей части векторных хранилищ, не является полноценным решением задачи.

При разработке системы поиска данных для вопрос-ответной системы представляется необходимым использование гибридной модели

хранения, так как векторные базы данных не предназначены для хранения данных большого объема в форматах, отличных от векторного. Такое хранение данных отвечает специфике создаваемых эмбедингов как представлений отдельных слов или небольших частей данных в виде векторов, но не подходит для решения поставленной задачи. Также в задаче построения системы вопрос-ответ необходимо предоставлять пользователю возможность удостовериться в истинности ответа, либо получить дополнительные документы по интересующей тематике.

Таким образом, необходимо использовать векторное хранилище в связке с хранилищем другого типа, которое позволит обрабатывать большие объемы данных произвольного размера. Под такую постановку задачи подходят реляционные базы данных, хранилища, способные работать с форматом parquet, файловые хранилища, а также иные хранилища, либо их набор.

Для реализации описанного решения представляется целесообразным определить некоторый программный модуль-адаптер в качестве прослойки между векторной базой данных и иным хранилищем. Такой программный модуль должен реализовывать взаимосвязь между векторными данными и данными в соответствующем программном модуле хранилища по запросу на вывод исходных данных, связанных с некоторым вектором или их набором. Также представляется необходимым разработать некоторый более общий программный модуль, позволяющий агрегировать связи между векторным хранилищем и иными хранилищами, для каждого из которых предоставлен аналогичный описанному выше программный модуль-адаптер с идентичным программным интерфейсом, и возвращать исходные данные, к которым привязаны эмбединги, вне зависимости от хранилища, в котором эти данные находятся. Такая архитектура предполагает привязку к набору векторов в векторном хранилище некоторых метаданных, которые могли бы однозначно определить, из какого хранилища происходят исходные данные.

Описанный подход позволяет хранить исходные мультимодальные данные, использовать их в задачах обработки естественного языка, а также решать множество архитектурных проблем, связанных с расширяемостью, поскольку модуль поиска, векторная БД, адаптеры к хранилищам данных других форматов и сами эти хранилища данных могут поставляться и расширяться независимо друг от друга, что потенциально повышает гибкость системы.

Научный руководитель — д.т.н., к.филол.н. Гавенко О. Ю.

Алфавитный указатель

Алексашин Александр Сергеевич

Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск), Россия

aleksashin.a.s@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 7

Амельчаков Михаил Борисович

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), Россия

Программа/тезисы: стр. 62

Андросов Артем Станиславович

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия

artem.androsov@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 32

Арендаренко Максим Сергеевич

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия

Программа/тезисы: стр. 17

Афанасьева Анна Александровна

Томский государственный университет (Томск), Россия

afanaseva_anjutka@inbox.ru

Программа/тезисы: стр. 8

Аюпов Дмитрий Александрович

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск), Россия

ayupov.dm@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 9

Бакулина Анжелика Витальевна

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия

a.bakulina1@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 9

Баранчиков Василий Романович

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН (Новосибирск), Россия

baranchikovvasya2004@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 9

Батуев Станислав Павлович

Программа/тезисы: стр. 13

Бобков Матвей Евгеньевич

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (Новосибирск), Россия

m.bobkov1@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 33

Бобровская Ольга Павловна

Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (Сургут), Россия

o-bobrovskaya@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 43

Бороздин Павел Александрович

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

p.borozdin@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 33

Бугоец Иван Андреевич

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН (Новосибирск), Россия

bugoez@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 10

Викулова Е. Р.

Иркутский государственный университет, Центр новых информационных технологий (Иркутск), Россия

Программа/тезисы: стр. 35

Володько Ольга Станиславовна

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия

Программа/тезисы: стр. 60

Гарбузов Дмитрий Николаевич

Томский государственный университет (Томск), Россия

dmitrij.garbuzov.98@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 11

Гончар Анастасия Денисовна

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (Уфа), Россия

agonch4r@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 50

Гончарова Дарья Витальевна

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия

darya.goncharova25@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 12

Городилов Даниил Владимирович

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия

dealenx@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 34

Гренев Иван Васильевич

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

greneviv@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 6, 33, 37

Гренкин Глеб Владимирович

Владивостокский государственный университет (Владивосток), Россия

grenkingv@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 35

Громушкин Дмитрий Михайлович

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), Россия

Программа/тезисы: стр. 62

Гузеев Евгений Викторович

АО «Иксди Софт» (Томск), Россия

evg39@tpu.ru

Программа/тезисы: стр. 44

Гурина Елена Ивановна

Томский государственный университет (Томск), Россия

Программа/тезисы: стр. 26

Данилко Виталий Романович

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

Программа/тезисы: стр. 42

Дель Ирина Васильевна

Томский государственный университет (Томск), Россия

irina.del@mail.tsu.ru

Программа/тезисы: стр. 44

Джанбекова А. Р.

Программа/тезисы: стр. 17

Добринец Иван Михайлович

Иркутский государственный университет, Центр новых информационных технологий (Иркутск), Россия

dobr@isu.ru

Программа/тезисы: стр. 35

Дьякова Ольга Алексеевна

Томский государственный университет (Томск), Россия

Программа/тезисы: стр. 11

Епишина Екатерина Ивановна

Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королёва (Самара), Россия

katerinka_epishina@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 45

Ермилов Егор Павлович

Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королёва (Самара), Россия

astraZero_0309@outlook.com

Программа/тезисы: стр. 36

Ефремов Максим Андреевич

Томский государственный университет (Томск), Россия

Программа/тезисы: стр. 11

Жежера Светлана Юрьевна

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), Россия

Программа/тезисы: стр. 62

Зейналлы Теймур Эйюб оглы

Московский политехнический университет (Москва), Россия

z.teymur.e@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 46

Золотарев Иван Александрович

Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королёва (Самара), Россия

zolotarevivan888@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 46

Иванов Антон Дмитриевич

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (Новосибирск), Россия

anton-qz@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 37

Иванов Кирилл Олегович

Альфа-банк, Отдел риск-менеджмента (Новосибирск), Россия

k.ivanov1@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 13

Иванов Н. Д.

Программа/тезисы: стр. 27

Казаков Глеб Игоревич

Альфа банк, Департамент Продвинутой аналитики (Новосибирск), Россия

g.kazakov@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 13

Кануткин Александр Витальевич

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск), Россия

alexandrkanut@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 13

Каратаева Екатерина Алексеевна

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск), Россия

nebosolnze@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 13

Карташевский Игорь Вячеславович

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Самара), Россия
ivk@psuti.ru

Программа/тезисы: стр. 52

Кашеева Александра Евгеньевна

Южноуральский государственный университет (Челябинск), Россия
casheeva.alexandra@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 14

Ключанцев Владислав Сергеевич

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия
vsklyuchantsev@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 14

Кобзарь Дарья Юрьевна

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва), Россия
cobzardash@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 15

Когай Алина Дмитриевна

Балтийский федеральный университет им. И. Канта (Калининград), Россия
ad.kogai@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 16

Кожемякина Э. Д.

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия
kojemyakina.elina2017@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 65

Козьмин Артем Дмитриевич

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

Программа/тезисы: стр. 33

Колганова Александра Олеговна

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва), Россия
kolganchik@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 16

Коновалова Алена Юрьевна

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), Россия

Программа/тезисы: стр. 62

Котлер Василий Дмитриевич

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия
vaskotler@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 37, 39

Котов Сергей Владимирович

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия
s.kotov@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 17

Кудряшов Борис Сергеевич

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск), Россия

Программа/тезисы: стр. 40

Кузнецов Кирилл Сергеевич

Дальневосточный федеральный университет (Владивосток), Россия
kuznetsovks17@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 38

Куткин Лев Ильич

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия
kutkin1991@inbox.ru

Программа/тезисы: стр. 17

Лапин Василий Николаевич

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск), Россия
v.lapin@nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 6

Латушко Анна Павловна

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия
a.latushko@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 48

Лебедев Роман Константинович

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия
n0n3m4@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 47

Ликсонова Дарья Игоревна

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия
LiksonovaDI@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 38

Лукьянов Андрей Александрович

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск), Россия
a.lukyanov1@alumni.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 18

Лёзина Ирина Викторовна

Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королева (Самара), Россия

Программа/тезисы: стр. 45

Мазине Джулия

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

d.mazine@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 48

Макаров Евгений Евгеньевич

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия

evgeniimakarov1995@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 19

Максаков Никита Владимирович

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск), Россия

nikita.max@isem.irk.ru

Программа/тезисы: стр. 48

Максимова Анна Алексеевна

Сибирский федеральный университет, Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия

sokolova.ann2001@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 19

Малахов Сергей Валерьевич

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Самара), Россия

s.malakhov@psuti.ru

Программа/тезисы: стр. 52

Малофеев Никита Геннадьевич

Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск), Россия

malofeev.nikitka@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 20

Мальшев Виктор Александрович

Российский университет дружбы народов (Москва), Россия

1132223485@pfur.ru

Программа/тезисы: стр. 39

Малютин М. С.

Программа/тезисы: стр. 17

Марчевский Илья Константинович

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва), Россия

iliamarchevsky@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 15, 16

Матвеева Ирина Александровна

Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королева (Самара), Россия

Программа/тезисы: стр. 55

Морозов Дмитрий Алексеевич

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

morozowdm@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 60

Мурашкина Анна Владимировна

СУНЦ НГУ (Новосибирск), Россия

murashkina.nn@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 49

Найденко Андрей Викторович

Волгоградский государственный университет (Волгоград), Россия

naidenkoandrey1997@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 49

Найденова Кристина Евгеньевна

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия

kristina-akulova00@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 20, 24

Наумкин Виктор Сергеевич

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск), Россия

vsnaumkin@itp.nsc.ru

Программа/тезисы: стр. 20, 21

Ни Александр Эдуардович

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия

nee_alexander@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 21

Нигматуллин Артур Валерьевич

Уфимский университет науки и технологий (Уфа), Россия

nigmatullin.a2016@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 50

Обершт София Дмитриевна

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

s.oberst@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 51

Орлов Глеб Олегович

Уфимский университет науки и технологий (Уфа), Россия

orlovgleb99@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 51

Осанов Владимир Андреевич

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Самара), Россия

osanov97v@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 52

Осипов Евгений Александрович

Russian Research Institute (Новосибирск), Россия
osipovs130@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 52

Павский Кирилл Валерьевич

*Институт физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН, Сибирский госу-
дарственный университет телекоммуникаций и
информатики (Новосибирск), Россия*

Программа/тезисы: стр. 40

Патрин Георгий Андреевич

*Новосибирский государственный университет
(Новосибирск), Россия*
g.patrin@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 22

Пекарская Татьяна Андреевна

*Алтайский государственный университет (Бар-
наул), Россия*
pekarskayat@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 23

Пененко Алексей Владимирович

*Институт вычислительной математики и ма-
тематической геофизики СО РАН (Новосибирск),
Россия*
a.penenko@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 13

Пермяшкин Дмитрий Андреевич

*Институт автоматики и электрометрии
СО РАН (Новосибирск), Россия*
d.permiashkin@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 53

Петова Ксения Александровна

*Самарский национальный исследовательский уни-
верситет им. ак. С.П. Королева (Самара), Россия*
quovadis_s@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 54

Пименова Ирина Александровна

*Самарский национальный исследовательский уни-
верситет им. ак. С.П. Королева (Самара), Россия*
pimenova.0312@list.ru

Программа/тезисы: стр. 55

Писаренко Алина Александровна

*Московский индустриальный колледж (Москва),
Россия*
pisarenko.alina.04@bk.ru

Программа/тезисы: стр. 56

Платонова Марина Владимировна

*Федеральный исследовательский центр информа-
ционных и вычислительных технологий (Новоси-
бирск), Россия*

gumoznaya@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 37, 39

Погудин Владимир Юрьевич

*Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники (Томск), Россия*
rogudin.vova@bk.ru

Программа/тезисы: стр. 40

Полевой Антон Вячеславович

*Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова (Москва), Россия*
polevoianton@bk.ru

Программа/тезисы: стр. 56

Пономарев Александр Николаевич

*Институт физики прочности и материаловеведе-
ния СО РАН (Томск), Россия*

Программа/тезисы: стр. 40

Попова Виктория Алексеевна

*Иркутский государственный университет, Ин-
ститут математики и информационных техно-
логий (Иркутск), Россия*
victorypopova1@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 57

Радченко А. В.

Программа/тезисы: стр. 13

Радченко Павел Андреевич

*Институт физики прочности и материаловеведе-
ния СО РАН (Томск), Россия*
radchenko@live.ru

Программа/тезисы: стр. 13

Ревун Артем Леонидович

*Институт физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН, Сибирский госу-
дарственный университет телекоммуникаций и
информатики (Новосибирск), Россия*

rm@artemrevun.ru

Программа/тезисы: стр. 40

Резванова Анастасия Евгеньевна

*Институт физики прочности и материаловеведе-
ния СО РАН (Томск), Россия*

Программа/тезисы: стр. 40

Россов Дмитрий Алексеевич

*Новосибирский государственный университет
экономики и управления (Новосибирск), Россия*
rossovdmr@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 41

Рудин Сергей Алексеевич

*Институт физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск),
Россия*
Программа/тезисы: стр. 40

Рудов Михаил Сергеевич

*Федеральный исследовательский центр информа-
ционных и вычислительных технологий (Новоси-
бирск), Россия*
sanctumdeus@yandex.ru
Программа/тезисы: стр. 58

Рыбаченко Иван Александрович

*Национальный исследовательский Томский поли-
технический университет (Томск), Россия*
iar12@tpu.ru
Программа/тезисы: стр. 58

Рыжков Илья Игоревич

*Институт вычислительного моделирования
СО РАН (Красноярск), Россия*
away2004@inbox.ru
Программа/тезисы: стр. 19

Рябушкин Сергей Владимирович

*Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет (Санкт-Петербург),
Россия*
serg.ryabuschkina@yandex.ru
Программа/тезисы: стр. 23

Савватеева Т. А.

Программа/тезисы: стр. 17

Сайгин Павел Алексеевич

*Волгоградский государственный университет
(Волгоград), Россия*
p.saigyn@volsu.ru
Программа/тезисы: стр. 59

Самойленко Роман Вадимович

*Новосибирский государственный университет
экономики и управления (Новосибирск), Россия*
ro999@yandex.ru
Программа/тезисы: стр. 59

Самойлов М. В.

Программа/тезисы: стр. 17

Сваровский Артем Игоревич

*Томский государственный университет (Томск),
Россия*
svarart@yandex.ru
Программа/тезисы: стр. 24

Семисалов Борис Владимирович

*Институт математики им. С.Л. Соболева СО
РАН (Новосибирск), Россия*
Программа/тезисы: стр. 10, 17

Сибин А. Н.

Программа/тезисы: стр. 23

Сибирякова Татьяна Андреевна

*Алтайский государственный университет (Бар-
наул), Россия*
sibiriakova.tatiana@mail.ru
Программа/тезисы: стр. 20, 24

Сиротинин Анатолий Андреевич

*Институт вычислительного моделирования
СО РАН (Красноярск), Россия*
slitch@icm.krasn.ru
Программа/тезисы: стр. 60

Ситнов Владимир Евгеньевич

*Новосибирский государственный университет
(Новосибирск), Россия*
Программа/тезисы: стр. 47

Скиба Василий Савельевич

*Федеральный исследовательский центр информа-
ционных и вычислительных технологий (Новоси-
бирск), Россия*
vassiliyskiba@gmail.com
Программа/тезисы: стр. 25

Скибина Надежда Петровна

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
СО РАН (Новосибирск), Россия*
uss.skibina@gmail.com
Программа/тезисы: стр. 25

Скорик Дмитрий Александрович

*Федеральный исследовательский центр информа-
ционных и вычислительных технологий (Новоси-
бирск), Россия*
dimakro2010@yandex.ru
Программа/тезисы: стр. 26

Смаль Иван Андреевич

*Новосибирский государственный университет
(Новосибирск), Россия*
vanasmal@mail.ru
Программа/тезисы: стр. 60

Смородинов Александр Денисович

*Сургутский государственный университет (Сур-
гут), Россия*
Sachenka_1998@mail.ru
Программа/тезисы: стр. 41

Сомова Полина Анатольевна

Томский государственный университет (Томск), Россия

polina.somova01@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 26

Степанко Иван Алексеевич

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия

i.stepanko@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 27

Сухинина Ксения Сергеевна

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

k.sukhinina@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 28

Тетерина Е. А.

Иркутский государственный университет, Центр новых информационных технологий (Иркутск), Россия

Программа/тезисы: стр. 35

Толстых Маргарита Анатольевна

Донецкий государственный университет (Донецк), Россия

physicisto@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 42

Трифонов Галина Олеговна

Казанский (приволжский) федеральный университет (Казань), Россия

galina_trifonov@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 28

Трусов Константин Владимирович

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия

k.trusov@alumni.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 29

Утюпина В. Ю.

Программа/тезисы: стр. 17

Фарваев Эмиль Фанильевич

Уфимский государственный авиационный технический университет (Уфа), Россия

farvaev.emil@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 61

Ханыков Игорь Георгиевич

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург), Россия

igk@iiias.spb.su

Программа/тезисы: стр. 62

Хомчук Евгений Павлович

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), Россия

ERKhomchuk@mephi.ru

Программа/тезисы: стр. 62

Хохлов Семен Сергеевич

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), Россия

Программа/тезисы: стр. 62

Цгоев Чермен Аланович

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия

smotca1595@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 30

Чеглов Егор Романович

Новосибирский государственный университет экономики и управления (Новосибирск), Россия

e.for.work@yandex.ru

Программа/тезисы: стр. 63

Черевко Наталья Николаевна

Новосибирский государственный университет экономики и управления (Новосибирск), Россия

natalischerevko90@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 63

Чусовитина Александра Игоревна

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия

chusovitina2001@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 30

Шаин Александр Михайлович

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск), Россия

sashashain2000@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 18

Шайхисламов Ильдар Михайлович

Новосибирский государственный университет экономики и управления (Новосибирск), Россия

sandamma@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 64

Шапеев Василий Павлович

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск), Россия

Программа/тезисы: стр. 10, 17

Шашок Наталья Александровна

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия

n.shashok@alumni.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 65

Шевелев Евгений Игоревич

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

e.shevelev@g.nsu.ru

Программа/тезисы: стр. 42

Шепелин Артем Витальевич

Институт лазерной физики СО РАН (Новосибирск), Россия

4.shepelin@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 31

Шульженко Иван Андреевич

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), Россия

Программа/тезисы: стр. 62

Щирый Андрей Олегович

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва), Россия

saovu@mail.ru

Программа/тезисы: стр. 56

Южакова Елена Александровна

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), Россия

Программа/тезисы: стр. 62

Юношева Елена Вячеславовна

Научно-образовательный центр «Газпромнефть - НГУ» (Новосибирск), Россия

lena21012001y@gmail.com

Программа/тезисы: стр. 31

Якупов Денис Олегович

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Самара), Россия

d.yakupov@psuti.ru

Программа/тезисы: стр. 52

О снятии ответственности

Вся информация об участниках конференции представлена в соответствии с данными системы «Конференция». Данные об участниках конференции в системе «Конференция» вводятся пользователем, подающим заявку на участие, самостоятельно. Ответственности за достоверность этих данных организаторы конференции и администраторы системы «Конференция» не несут.

Ответственные за выпуск

Гусев О.И., Скиба В.С., Сиявский Ю.Н.

Компьютерная верстка в системе $\text{\LaTeX}$

Гусев О.И., Скиба В.С., Сиявский Ю.Н.,

Горынин А.Г., Жирнов А.А.,

Котлер В.Д., Кузнецова И.В.,

Платонова М.В., Цгоев Ч.А., Шашок Н.А.