

Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий

XXIV Всероссийская конференция
молодых учёных
по математическому моделированию
и информационным технологиям

Тезисы докладов

Алфавитный указатель участников

Красноярск
23–27 октября 2023 г.

УДК 004, 519.6
ББК 22.19, 32.81
М34

Тезисы XXIV Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Красноярск, Россия, 23–27 октября 2023 г. — Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. — 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.

Конференция проведена при поддержке Красноярского математического центра, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2023-912).

Организаторы конференции:

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

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

Программный комитет:

- академик Ю. И. Шокин (Новосибирск) — председатель
- чл.-корр. РАН В. В. Шайдуров (Красноярск) — зам. председателя
- академик И. В. Бычков (Иркутск) — зам. председателя
- к.т.н. С. А. Рылов (Новосибирск) — ученый секретарь
- академик А. Л. Стемпковский (Зеленоград)
- академик М. П. Федорук (Новосибирск)
- чл.-корр. РАН В. М. Садовский (Красноярск)
- чл.-корр. РАН С. И. Смагин (Хабаровск)
- профессор В. В. Москвичев (Красноярск)
- профессор В. П. Потапов (Кемерово)
- профессор Б. Я. Рябко (Новосибирск)
- профессор М. В. Ульянов (Москва)
- профессор А. Н. Фионов (Новосибирск)
- д.т.н. В. Б. Барахнин (Новосибирск)
- д.ф.-м.н. О. Ф. Воропаева (Новосибирск)
- д.т.н. А. Ю. Горнов (Иркутск)
- д.т.н., к.филол.н. О. Ю. Кожемякина (Новосибирск)
- д.ф.-м.н. С. Б. Медведев (Новосибирск)
- к.ф.-м.н. О. Э. Якубайлик (Красноярск)

Организационный комитет:

- к.т.н. С. А. Рылов (Новосибирск) — председатель
- к.ф.-м.н. О. И. Гусев (Новосибирск) — заместитель председателя
- м.н.с. В. С. Скиба (Новосибирск) — секретарь
- к.ф.-м.н. С. В. Козлова (Красноярск) — председатель локального орг. ком.
- к.ф.-м.н. Е. П. Магденко (Красноярск) — зам. председателя локального орг. ком.
- к.ф.-м.н. О. С. Володько (Красноярск)
- к.ф.-м.н. А. В. Вяткин (Красноярск)
- к.т.н. А. А. Жирнов (Новосибирск)
- к.ф.-м.н. В. С. Петракова (Красноярск)
- к.т.н. Ю. Н. Синявский (Новосибирск)
- к.ф.-м.н. И. В. Смолехо (Красноярск)
- м.н.с. И. В. Кузнецова (Новосибирск)

- м.н.с. П. В. Платонова (Новосибирск)
- инж.-иссл. А. А. Шехова (Красноярск)
- инж. Н. В. Кулясов (Красноярск)
- асп. Д. В. Городилов (Кемерово)
- асп. А. Г. Горьнин (Новосибирск)
- асп. В. Д. Котлер (Новосибирск)
- асп. Ч. А. Цгоев (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	7
1. Пленарные доклады	7
2. Вычислительные технологии	9
3. Информационно-вычислительные технологии	44
4. Информационные технологии	49
Алфавитный указатель участников	65

1. Пленарные доклады

1.1. Володько О.С. Математическое моделирование динамики озера

Прогноз качества воды и биологического разнообразия представляет собой важнейшую задачу, которая не может быть решена без исследования динамики озера. Несмотря на наличие различных способов исследования: теоретические, натурные, численный эксперимент, — ни один из них не может привести к абсолютно достоверным результатам, и требуется их применение в совокупности.

В докладе представлено комплексное исследование динамики озера на примере озера Ши́ра, расположенного в республике Хакасия, Восточная Сибирь. Для определения динамики основных гидрофизических характеристик соленого стратифицированного озера Ши́ра (температуры и солености воды, скорости течения) в летний период использовалась математическая модель трехмерного течения неоднородной жидкости в замкнутом водоеме в приближении Буссинеска и в предположении о гидростатичности давления [1]. Для упрощенных вариантов этой модели получены аналитические решения для стационарного медленного течения.

Численное моделирование гидрофизических процессов, происходящих в озере Ши́ра, выполнено с использованием численной модели, реализованной открытым кодом Regional Ocean Modeling System (ROMS) [2] и адаптированной к условиям в озере Ши́ра. Верификация численной модели ROMS осуществлена на полученных частных аналитических решениях. Валидация математической модели выполнена путем качественного и количественного сравнения полученных результатов численных расчетов с данными натурных измерений в летний период, в частности, по характеру изменения температуры и спектральных характеристик скорости.

На основании проведенных численных расчетов определена горизонтальная структура внутренних волн в озере Ши́ра. Для интерпретации полученных в расчетах результатов был проведен переход от сигма-координат к декартовым, что позволило идентифицировать наиболее длинные волны как одноузловые сейши. С применением линейной модели трехмерного течения двухслойной жидкости [3] проведена оценка длины вращающейся сейши.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2023-912).

Список литературы

- [1] Марчук Г.И., Саркисян А.С. Математическое моделирование циркуляции океана / М.: Наука, 1988. 304 с.
- [2] ROMS [Электронный ресурс]. URL: <https://www.myroms.org> (дата обращения 31.08.2023).

- [3] HUTTER K., WANG Y., CHUBARENKO I. P. Physics of Lakes: Volume 1: Foundation of the Mathematical and Physical Background / Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2010. 434 p.

1.2. Москвичев Е.В. Численное моделирование и эксперименты в задачах анализа деформирования композитных конструкций

В докладе выполнен обзор исследований, посвященных анализу деформирования композитных конструкций, таких как:

- металло-композитный бак высокого давления;
- рефлекторы космических антенн;
- токопровод с литой изоляцией.

Для каждого из объектов представлены численные конечно-элементные модели и соответствующие особенности анализа напряженно-деформированного состояния. Данные особенности заключались в учете:

- ортотропии механических свойств;
- нелинейности деформирования;
- эффекта памяти формы;
- теплового деформирования.

Показаны эксперименты по определению механических свойств композиционных материалов на образцах:

- однонаправленных армирующих лент;
- слоистых композитных оболочек;
- шпангоута с памятью формы;
- литой изоляции токопровода.

Эксперименты проводились в диапазоне эксплуатационных температур и включали в себя следующие виды испытаний:

- растяжение и сжатие;
- трехточечный изгиб;
- сдвиг в плоскости листа;
- фиксация и восстановление временной формы.

На основе проведенных испытаний была выполнена валидация некоторых численных моделей, результаты которой были представлены в виде расчетных и экспериментальных диаграмм нагружения.

Приведенные в докладе фундаментально-прикладные исследования позволили решить ряд инженерных задач по обеспечению прочности и геометрической стабильности элементов космической техники и энергетики.

В заключение в докладе продемонстрированы возможности Инженерно-испытательного центра ФИЦ ИВТ по проведению механических испытаний и созданию прототипов методом 3D-печати.

1.3. Шайдуров В.В., Петракова В.С. Повышение точности методов регуляризации решения сингулярных систем алгебраических уравнений

Доклад посвящен алгоритмам регуляризации систем линейных алгебраических уравнений с сингулярной матрицей. Традиционные методы регуляризации используются с идентичной матрицей и малым параметром. Такие методы позволяют получить приближенное решение исходной системы с учетом ошибки в измерении параметра и правой части уравнений.

Ранее была разработана техника экстраполяции двух приближенных решений к нормальному решению задачи с симметричной матрицей с использованием числового веса. Эта техника практически полностью исключает влияние ядра матрицы из решения.

На данный момент создан алгоритм с тремя параметрами регуляризации, который исключает влияние ядра матрицы в экстраполированном решении, уменьшает регулярные ошибки, возникающие из-за сдвига спектра при регуляризации, и позволяет найти не только нормальное решение, но и решение, наиболее близкое к заданному. Это свойство активно используется при решении экономических задач для удовлетворения небольшого числа ограничений (в данном случае линейных уравнений) с незначительными отклонениями от требуемого вектора состояния.

1.4. Якубайлик О.Э. Информационно-вычислительное и программно-технологическое обеспечение задач мониторинга окружающей среды

Мониторингом окружающей среды называют регулярные, выполняемые по заданной программе наблюдения природной среды и природных ресурсов, растительного и животного мира, позволяющие регистрировать и оценивать их состояние, происходящие под влиянием антропогенной нагрузки процессы.

В рамках экологического мониторинга обеспечивается постоянная оценка условий среды обитания человека и биологических объектов (растений, животных, микроорганизмов и т. д.), оценка состояния и функциональной ценности экосистем, а также определение корректирующих воздействий в тех случаях, когда целевые показатели экологических условий не достигаются.

Качество оценки состояния окружающей природной среды в значительной степени определяется его техническим, информационно-аналитическим обеспечением. Современные средства автоматизированной регистрации различных характеристик природной среды (приборы инструментального контроля, датчики интернета вещей, спутниковые снимки,

и т. п.), технологии сбора, передачи, обработки и визуализации разнородных данных радикально повышают эффективность мониторинга.

Реализация современной информационно-коммуникационной инфраструктуры позволяет в кратчайшие сроки и в наглядной форме получать детальные сведения об объектах управления, объективно оценивать ситуацию в оперативном режиме и формировать различные варианты принятия управленческих решений.

В докладе будет представлен обзор проведенных исследований и разработок, методов решения практических задач в рассматриваемой области.

2. Вычислительные технологии

2.1. Абгарян Г.В. О задаче дифракции на диэлектрическом частично-экранированном цилиндре кругового сечения

Настоящее исследование является продолжением работы [1], в которой исследовалась задача дифракции ТЕ-поляризованной электромагнитной волны $E = [0, 0, E_3(r, \theta)]$ на диэлектрическом частично-экранированном цилиндре $B_0^{r_0}$ кругового сечения с радиусом r_0 .

Первая краевая задача дифракции для уравнения Гельмгольца с помощью метода интегрально-сумматорных тождеств (ИСТ) эквивалентно сведена к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений II-го рода (БСЛАУ-2) $(I + A)x = y$ с компактным оператором A в энергетическом пространстве.

Для приближенного решения БСЛАУ-2 использовался метод усечения. Используя результаты [2], доказана P -сходимость приближенных решений аппроксимирующих уравнений к точному решению БСЛАУ-2.

С помощью итерационного метода Ньютона вычислены приближенные значения резонансных частот открытого резонатора, соответствующего сечению диэлектрического цилиндра.

В качестве частного случая рассмотрена задача дифракции на диэлектрическом цилиндре. Для этой задачи получено явное решение БСЛАУ по формулам Крамера. Исследованы резонансные режимы диэлектрического цилиндра в виде сингулярностей определителя системы Крамера. Для приближенного вычисления резонансных режимов использовался метод Рунге–Кутты. Построены неявные конформные отображения спектральных множеств диэлектрического цилиндра.

В заключение отметим, что актуальность и новизна данного исследования заключаются в исследовании режимов мегарезонансного рассеяния и построении спектральных множеств диэлектрического цилиндра.

Список литературы

- [1] ABGARYAN G. V., SHESTOPALOV Y. V. TE-Polarized Electromagnetic Wave Diffraction by a Circular Slotted Cylinder // Mathematics. 2023. Vol. 11. N. 1. P. 1–15.
- [2] VAINIKKO G. M., Regular Convergence of Operators and Approximate Solution of Equations // J. Soviet Math. 1981. Vol. 15. N. 6. P. 675–705.

2.2. Аносова Е.П. Динамика давления в трещине ГРП, расположенной перпендикулярно скважине, в режиме постоянного расхода

Рассматривается задача об отборе флюида из пласта в скважину при наличии трещины ГРП, расположенной перпендикулярно стволу скважины,

при поддержании постоянного расхода жидкости на скважине.

В исходном состоянии флюид в трещине и окружающей ее пористой среде находится в равновесии. Далее, скважина запущена в эксплуатацию с постоянным дебитом. Течение жидкости в трещине радиально симметричное.

Распределение давления в трещине описывается интегро-дифференциальным уравнением (см. [1]). С помощью преобразования Лапласа найдены аналитические решения через функции Бесселя, описывающие эволюцию давления в трещине.

С использованием метода последовательной смены стационарных состояний (ПССС) построены приближенные аналитические решения, описывающие динамику распределения давления в трещине и на забое скважины, при задании постоянного значения расхода флюида. Получено хорошее согласование численных результатов по точным и приближенным решениям.

Полученные в работе точные и приближенные решения, описывающие эволюцию давления в трещине ГРП при задании постоянного значения расхода флюида на скважине, позволяют определять параметры пласта и трещины по значениям, получаемым на скважине, а при известных параметрах пласта и трещины позволяют выбрать наиболее оптимальный режим работы скважины.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Нагаева З. М.

Список литературы

- [1] АНОСОВА Е. П., НАГАЕВА З. М., ШАГАПОВ В. Ш. Фильтрация флюида к скважине через радиальную трещину ГРП при постоянном расходе // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2023. № 2. С. 90–101.

2.3. Арендаренко М.С. Дисперсионный анализ аппроксимации уравнения Бюргерса методом «гидродинамика сглаженных частиц»

Математические и численные модели динамики вязкой среды используются в инженерных (химические технологии) и научных (астрофизика) задачах. В процессе поиска устойчивого метода высокого порядка аппроксимации на базе SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics, гидродинамика сглаженных частиц) [1], возникает необходимость в решении проблемы устойчивой аппроксимации вязкости. Известно, что непосредственное распространение подходов для нахождения первой производной в SPH на вторые производные, приводит к неустойчивым схемам. В результате чего вязкость, физический смысл которой состоит в стабилизации течения, в численной модели является источником его дестабилизации.

В работе рассмотрено решение модельной задачи — одномерного уравнения Бюргерса. Уравнение численно решается методом SPH с примене-

нием различных схем аппроксимации второй производной функции [2]. Для определения необходимых условий устойчивости и порядка аппроксимации схем используется дисперсионный анализ. Его суть заключается в том, что мы подставляем в исходное уравнение решение в виде волнового пакета и находим дисперсионное соотношение. Далее, мы подставляем в разностную схему аналогичное решение, но с малыми возмущениями, получаем новое дисперсионное соотношение и проводим анализ его сходимости к соотношению, полученному из исходного уравнения. Новизна подхода состоит в применении данного подхода к анализу схем аппроксимации параболических уравнений. Анализ гиперболических уравнений был проведён в [3].

Численный метод реализован на языке C++. Для каждой из схем проведены сравнения численных результатов с аналитическими решениями. В результате было показано, что теоретические порядки аппроксимации схем, предсказанные дисперсионным анализом, подтверждаются численными расчётами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-11-00142).

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

Список литературы

- [1] MONAGHAN J. J. Smoothed particle hydrodynamics // Annual Rev. Astron. Astrophys. 1992. N. 30 P. 543–574.
- [2] FАТЕНІ R., MANZARI M. T. Error estimation in smoothed particle hydrodynamics and a new scheme for second derivatives // Computers and Mathematics with Applications. 2011. N. 61 P. 482–498.
- [3] СТОЯНОВСКАЯ О. П., LISITSА V. V., ANOSHIN S. A. ET AL. Dispersion analysis of SPH as a way to understand its order of approximation // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2023. N. 438. P. 115495.

2.4. Богданюк Д.О. Модельное представление разделяющихся элементов

Существуют различные системы, в которых используется разделение из одного элемента во множество. Служит разделение для различных целей, которые улучшают характеристики, упрощают запуск единого элемента, но усложняют конструкцию самой системы.

При реализации обеспечения требуемой корректной работы системы возникают сложные газодинамические задачи. Главная проблема в спроектированном требуемом выбрасывании различных элементов в сложный газодинамический поток и дальнейшее распределение, а так же возможное управление.

Ещё большую сложность добавляет возможность применения аэродинамических систем на выбрасываемых элементах [1]. В том числе возможная установка двигательной установки на разлетающихся элементах. Конструкция носителя элементов может

представлять различную форму, в том числе, так же разный вариант двигательной установки. Способ выброса элементов и крышек добавляют вычислительных задач. Например, крышка в определённых условиях может повредить корпус носителя. В том числе, как и выбрасываемые элементы против потока, или поперёк потока. Донное извлечение представляет благоприятную ситуацию для носителя, но может иметь более сложное аэродинамическое обтекание.

Имеются проблемы, связанные с конструкторскими особенностями элементов. Для увеличения дальности полёта системы используют, например, на носителе прямоточный реактивный двигатель. Носовая часть носителя конструируется так, чтобы возникали требуемые косые скачки, для максимальной эффективной работы системы. В том числе, последствия сгорания топлива образуют полости внутри носителя, в которые затекает газ, вносятся некоторые газодинамические явления [2].

В момент извлечения элементов возникает сложное трёхмерное обтекание элементов. Начальное обтекание и движение в момент выброса элементов является кругом газодинамических задач, которые необходимо правильно поставить, и решение которых выполнит требуемую оптимальную задачу по грамотному использованию и улучшению системы. Дополнительной задачей служит дальнейшая стабилизация элементов в потоке или возможное управление.

Круг задач решается совокупно, с газодинамической точки зрения. Используются программные средства для решения требуемых задач. Для описания движения в потоке используются современные вычислительные технологии, включающие в себя шести-степенные решатели и сопутствующее перестроение сеток.

Модель баллистического проектирования системы разделяющихся элементов будем считать следующим образом. Для построения математической модели систему носителя будем представлять симметричным телом вращения динамически и статически стабилизированным, при этом стабилизированное вращением или оперением. Требуется учёт комбинированной системы энергосиловых установок, включающий встроенный маршевый ракетный-прямоточный двигатель (РПД) и двигатель на твердом (РДТТ) или пастообразном топливе (РДПТ). Соответственно на различных этапах функционирования изделия уравнения движения можно рассматривать как РПД или как РДТТ, но отличие только в способе расчёта реактивной силы. Расчёт реактивной силы для РДТТ носит частный характер расчёта для РПД. Поэтому математическая модель движения тела переменной массы по баллистической траектории строится для РПД.

Реактивная сила не зависит от угла нутации [3],

что будем предполагать в дополнение к допущениям основной задачи внешней баллистики. Далее представлено уравнение движения центра масс снаряда с РПД как уравнение движения центра масс системы переменного состава с твердой оболочкой, пренебрегая Кориолисовыми силами инерции, вариационными силами и силами, обусловленными относительным движением центра масс снаряда. Полагая стартовую систему отсчёта, связанную с землей, инерциальной. Уравнение движения центра масс снаряда с РПД [4, 5] согласно всему перечисленному примет следующий вид:

$$mW_c = R + F,$$

где

$$R = [(G_B + G_T)u_s - G_B V + (P_S - P_H)F_S]V^0,$$

$$F = -mgy^0 - \frac{1}{2}C_x(M)\rho S V \cdot V,$$

R — сила тяги РПД; G_B — расход воздуха на входе в диффузор; G_T — расход продуктов сгорания заряда твёрдого топлива, поступающих в КСД РПД; u_s — скорость газа в выходном сечении сопла относительно корпуса изделия; V — скорость центра масс изделия; P_S — давление в выходном сечении сопла; P_H — атмосферное давление на текущей высоте; F_S — площадь выходного сечения сопла; V^0 — орт, сонаправленный с вектором скорости центра изделия V ; F — главный вектор внешних сил, включающий силу тяжести и силу лобового сопротивления изделия; g — ускорение силы тяжести; y^0 — орт вертикальной оси стартовой системы координат; C_x — коэффициент лобового сопротивления изделия, как функция числа Маха M ; ρ — плотность воздуха на текущей высоте; S — площадь миделя изделия;

$$G_B = \rho V F_d,$$

F_d — площадь входного сечения диффузора. В частном случае работы только РДТТ забор воздуха через диффузор отсутствует и $G_B = 0$.

Текущая масса снаряда с РПД определится из уравнения изменения массы снаряда, записанного при условии, что процесс течения рабочего тела в полости РПД носит квазистационарный характер:

$$\dot{m} = -G_T.$$

Реализации траекторных расчетов снарядов со встроенными РПД и/или РДТТ были выполнены профессором Б. Э. Кэртом в пакете прикладных программ «МАТМЕХ» [1, 2].

Основной задачей настоящей работы является исследование аэробаллистики, непосредственно связанной с вышеописанными процессами, вылетом разделяющихся элементов и их дальнейшим взаимодействием. Основной целью является обеспечение

заданных характеристик изделия, а также возможность прогнозирования в случае специального или случайного отклонения момента выхода элементов, непосредственного взаимодействия струи и потока с разделяющимися элементами. Построена модель типичного изделия с использованием современных графических и вычислительных технологий, включающих шести-степенные решатели и сопутствующее перестроение сеток, произведён расчёт вылета одного элемента из изделия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 21-19-00657, <https://rscf.ru/project/21-19-00657/>).

Список литературы

- [1] Кэрт Б. Э., Козлов В. И., Макаровец Н. А. Математическое моделирование и экспериментальная отработка систем разделения реактивных снарядов: Учебное пособие для вузов / Под ред. Н. А. Макаровца. М.: Юрайт, 2023. Ч. 1. 240 с.
- [2] Кэрт Б. Э., Козлов В. И., Макаровец Н. А. Разделение неуправляемых снарядов систем залпового огня / Под ред. Н. А. Макаровца. М.: Машиностроение. 2008. 438 с.
- [3] Дмитриевский А. А., Лысенко Л. И. Внешняя баллистика: Учебник для студентов вузов / М.: Машиностроение, 2005. 608 с.
- [4] Сорокин В. А. Ракетно-прямоточные двигатели на твёрдых и пастообразных топливах / Под ред. Ю. М. Милехина, В. А. Сорокина. М.: Физматлит. 2010. 320 с.
- [5] Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика: Учеб. руководство для вузов / М.: Наука. 1991. Ч. 1. 600 с.

2.5. Божиев Т. П., Цымарман Я. Д. Моделирование медицинских изделий с эффектом памяти формы в условиях, приближенных к эксплуатации

Отечественные производители медицинских изделий интенсивно наращивают изготовление своей продукции в современных реалиях импортозамещения. Это касается, в частности, изготовления имплантатов. Медицинская статистика утверждает, что большая часть населения в возрасте от 20 до 64 лет имеет проблемы, связанные с дегенерацией межпозвоночных дисков (МПД). В свете этого наиболее востребованными и высокотехнологичными для лечения озвученной болезни позвоночника считаются спинальные имплантаты с эффектом памяти формы (ЭФП). Однако производство подобных ответственных изделий базируется на трудоемких экспериментальных научно-исследовательских работах, которые необходимо проводить в непрерывающемся режиме для каждого индивидуального случая использования имплантата. Облегчить стадию проектирования и создания каждого нестандартного имплантата, избегая многочисленных стадий экспериментальных исследований, позволяет математическое моделирование.

В работе с использованием методов численного моделирования на основе конечно-элементного анализа отработан алгоритм расчета функциональных свойств спинальных имплантатов в момент их установки при оперативном вмешательстве. Алгоритм позволяет на этапе планирования операции и выбора имплантата при взаимодействии с производителем предсказать его необходимые геометрические размеры и свойства. Для этого создана прогностическая физико-математическая модель, которая при термомеханических воздействиях достаточно точно описывает особенности деформационного поведения материалов с ЭПФ [1]. В качестве тестовых геометрических модельных образцов были выбраны реальные конструкции зарубежных спинальных имплантатов МПД [2]. В качестве материала с ЭПФ для изготовления имплантатов подобран отечественный сплав на основе никелида титана. Выбор данного материала обусловлен способностью «запоминать» заданную ему форму в состоянии аустенита при повышенных температурах. При этом после перехода в состояние мартенсита при охлаждении материал отличается пластической деформацией достаточной, чтобы облегчить установку имплантата в тело человека. Для определения основных параметров сплава были проведены оригинальные эксперименты, результатами которых являются графики, показывающие накапливаемую и обратимую деформацию, возникающие напряжения, а также характерные температуры превращений. Чтобы смоделировать работу спинных имплантатов необходимо приложить к модели последовательность адекватных граничных условий – близких к реальным условиям при установке во время оперативного вмешательства, что соответствует точке перехода в фазу мартенсита при комнатной температуре 297 К и восстановления формы при нагреве до 326 К.

Полученная модель позволяет изучить историю деформационного поведения имплантата на разных этапах расчета, на основе которой можно сделать прогноз функциональности изделия.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Козулин А. А.

Список литературы

- [1] MARCHENKO E. S., KOZULIN A. A., YASENCHUK YU. F. ET AL. Numerical and experimental study of porous NiTi anisotropy under compression // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 22. N. 1. P. 3502–3510.
- [2] PETRINI L., MIGLIAVACCA F., MASSAROTTI P. ET AL. Computational studies of shape memory alloy behavior in biomedical applications // Journal of Biomedical Engineering. 2005. Vol. 127. N. 1. P. 716–725.

2.6. Брындин Л.С. Варианты метода коллокации и наименьших квадратов на адаптивных сетках

В докладе сообщается о новых вариантах метода

коллокации и наименьших квадратов (МКНК) численного решения эллиптических краевых задач.

Реализовано два подхода к построению приближенного решения. В первом случае неизвестными изначально являются значения решения и его производных в вершинах ячеек, что позволяет достичь их автоматической склейки на границах между соседними ячейками. Здесь система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) состоит только из уравнений коллокации и краевых условий. Во втором подходе неизвестными сразу выступают коэффициенты полиномиального разложения решения в каждой ячейке. Для обеспечения его непрерывности в данном случае дополнительно выписываются условия согласования. В обоих вариантах МКНК адаптивные сетки из треугольных и четырехугольных ячеек строились с помощью пакета Gmsh, а переопределенные СЛАУ решались с помощью прямого и итерационного методов в комбинации с распараллеливанием на GPU и CPU [1, 2].

Продемонстрированы преимущества развиваемых подходов по сравнению с предыдущими реализациями МКНК и изогометрическим методом коллокации. Проведены расчеты изгиба круглых пластин с отверстием в рамках теорий Кирхгофа – Лява и Рейсснера – Миндлина [3]. Показано увеличение

- 1) градиента перерезывающих сил как с уменьшением толщины пластины, так и с увеличением ее эксцентриситета;
- 2) отличий значений прогибов и напряжений, рассчитанных в двух теориях, при наличии отверстия по сравнению со случаем его отсутствия.

Работа частично выполнена в рамках реализации Программы Центра НТИ НГУ «Моделирование и разработка новых функциональных материалов с заданными свойствами» и государственного задания ИТПМ СО РАН.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Шапеев В. П.

Список литературы

- [1] DAVIS T. A. Algorithm 915, SuiteSparseQR: Multifrontal multi-threaded rank-revealing sparse QR factorization // ACM Trans. Math. Softw. 2011. Vol. 38. N. 1. P. 8:1–8:22.
- [2] БЕЛЯЕВ В. А., БРЫНДИН Л. С., ГОЛУШКО С. К. и др. Н-, р- и hp-варианты метода коллокации и наименьших квадратов для решения краевых задач для бигармонического уравнения в нерегулярных областях и их приложения // ЖВМиМФ. 2022. Т. 62. № 4. С. 531–552.
- [3] REDDY J. N. Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis, 2nd edn / CRC Press, 2004. 858 p.

2.7. Ван Л. Локальный рост решений дифференциальных уравнений и ε -спектр дифференциального оператора

Экспериментально показано, что неустойчивость решений начальных и начально-краевых задач мо-

жет развиваться, даже если весь спектр соответствующего линейного дифференциального оператора находится в области устойчивости. Именно такая ситуация имеет место при докритических ламинарно-турбулентных переходах течений вязкой несжимаемой жидкости [1]. В некоторых работах предполагается, что этот феномен связан с расположением спектральных пятен соответствующих операторов.

Псевдоспектр (ε -спектр) матрицы A представляет собой такое множество комплексных чисел λ , для которых при некотором $\varepsilon > 0$ выполнено неравенство

$$\sigma_{\min}(A - \lambda I) \leq \varepsilon,$$

где σ_{\min} — минимальное сингулярное число, I — единичная матрица.

Эта работа посвящена изучению устойчивости решений, если псевдоспектр линеаризованного дифференциального оператора частично находится в области неустойчивости. Экспериментально установлено, что максимум нормы решения обратно пропорционален минимальному значению параметра ε всех пятен ε -спектра, которые находятся в правой полуплоскости и объединяют в себе более одного собственного значения.

Кроме этого были разработаны два алгоритма выбора начальных условий для получения решений, имеющих максимальный рост на начальном временном отрезке. Один из алгоритмов использует матрицу из собственных векторов, а другой основан на методе дихотомии [2].

С помощью данных алгоритмов было построено локально растущее решение задачи Коши для одной модели флаттера [3]. Был рассмотрен случай, когда весь спектр матрицы системы расположен в левой полуплоскости. В результате применения алгоритмов построения начальных данных найдено решение, которое растет почти на два порядка.

Аналогичные построения применялись для спектра оператора Орра — Зоммерфельда для плоскопараллельного течения Пуазейля. С помощью упомянутых выше алгоритмов при значении числа Рейнольдса $Re = 5000$ получены решения линеаризованной системы Навье — Стокса, растущие более чем в 50 раз. Для дискретизации задачи были использованы коллокационные матричные производные размера 100×100 [4].

В работе показано, что даже если все собственные значения оператора лежат в области устойчивости, решения соответствующих задач для дифференциальных уравнений могут тем не менее расти в начальный момент времени. Причем этот рост может быть весьма значительным и приводить на практике к разрушению ламинарных течений или инженерных конструкций.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института математики им. С.Л. Соболева

СО РАН (проект № FWNF-2022-0008).

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Бибердорф Э. А.

Список литературы

- [1] TREFETHEN L. N., TREFETHEN A. E., SATISH C. R., TOBIN A. Hydrodynamic Stability Without Eigenvalues // Science, New Series. Vol. 261. N. 5121. P. 578–584.
- [2] Годунов С. К. Современные аспекты линейной алгебры / Новосибирск: Научная книга, 1997.
- [3] Буньков В. Г., Годунов С. К., Курзин В. Б., Садкейн М. Применение нового математического аппарата «одномерные спектральные портреты матриц» к решению проблемы аэроупругих колебаний решеток лопастей // Ученые записки ЦАГИ. 2009. Т. XL. №. 6. С. 3–13.
- [4] TREFETHEN L. N. Spectral Methods in MATLAB / Philadelphia: SIAM, 2000.

2.8. Вадосанидзе О.Д. Обобщение одноосных законов материалов при помощи модифицированной концепции представительных направлений: случай неупругого деформирования

Одноосные законы материалов наиболее просто устроены и часто могут быть получены из анализа экспериментальных данных или глубокого понимания физических процессов, протекающих в материалах. Однако, такие законы невозможно применить для полномасштабного конечно-элементного анализа конструкций.

Концепция представительных направлений — это метод построения определяющих соотношений, который позволяет получить тензорный закон материала, используя заданную одноосную модель [1, 2]. Данный подход основан на представлении материала в каждой частице как конечного набора волокон — представительных направлений. При значительном росте количества волокон концепция приводит к серьезным вычислительным затратам.

В настоящей работе построена вычислительно эффективная модификация концепции, которую мы называем кластерный подход. Продемонстрирована применимость нового подхода для моделирования реальных материалов. Построены модели, воспроизводящие неупругое поведение при немонотонном одноосном нагружении для волокнистого полимера, изготовленного методом электроспиннинга, а также для нержавеющей стали. Построенные модели откалиброваны по данным из работ [3, 4]. Важным результатом является тот факт, что предложенные тензорные определяющие соотношения построены с использованием только одноосных законов, однако они воспроизводят физически нелинейное механическое поведение рассматриваемых материалов. Так, в модели нержавеющей стали воспроизведён эффект изотропного разупрочнения в сочетании с эффектом Баушингера, а в модели волокон

нистого полимера — нетривиальные формы петель гистерезиса.

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

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

Список литературы

- [1] FREUND M., SHUTOV A. V., IHLEMANN J. Simulation of distortional hardening by generalizing a uniaxial model of finite strain viscoplasticity // International Journal of Plasticity. 2012. Vol. 36. P. 113–129.
- [2] SHUTOV A., RODIONOV A., PONOMAREV D., NEKRASOVA Y. Computationally Efficient Concept of Representative Directions for Anisotropic Fibrous Materials // Polymers. 2022. Vol. 14. N. 16. P. 3314.
- [3] WONG D., ANDRIYANA A., ANG B. C., VERRON E. Surface morphology and mechanical response of randomly oriented electrospun nanofibrous membrane // Polymer Testing. 2016. Vol. 53. P. 108–115.
- [4] ALEGRE J. M., BRAVO P., PRECIADO M. Design of an autofrettaged high-pressure vessel, considering the Bauschinger effect // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2006. Vol. 220. N. 1. P. 7–16.

2.9. Варшавчик Л.А., Старовойтов Е.А., Бочарников В.А., Галицын Д.Д. Модель расчета электрических полей в газовом ВЧ-разряде, обеспечивающая непрерывность тока

Емкостной высокочастотный разряд низкого давления имеет множество приложений в современных технологиях: травление и осаждение пленок в микроэлектронике, стерилизация и шлифовка поверхностей, модификация материалов, чистка диагностических зеркал в термоядерных установках. Численное моделирование позволяет определить оптимальную конфигурацию и параметры разряда, тем самым сокращая время и затраты на проведение экспериментов.

Стандартный подход для такого рода задач состоит в моделировании движения частиц методом Монте-Карло, при этом тестовые частицы считаются независимыми, а их влияние друг на друга учитывается через расчет создаваемых ими локальных электрических полей, дающих вклад в уравнения движения.

Расчет локальных электрических полей основан на уравнении Пуассона, пространственный заряд определяет распределение электрического потенциала. При этом обычно граничные условия ставятся в форме Дирихле: заземленный электрод имеет нулевой потенциал, а на втором электроде потенциал равен разрядному напряжению. Такая постановка делает задачу удобной для расчета (уравнение Пуассона превращается в симметричную матрицу уравнений), однако не гарантирует непрерывности тока на электродах, что является нефизичным и при больших частотах (на которых существенный вклад

начинает вносить ток смещения, определяемый скоростью изменения поля) приводит к значительному отклонению результатов от экспериментальных.

Для решения данной проблемы модель была модернизирована: к уравнению Пуассона и фиксированным потенциалам на электродах добавлены два дополнительных граничных условия. При этом разрядный ток является параметром задачи (задается по гармоническому закону), а напряжение рассчитывается при решении системы. Такая постановка задачи обеспечивает равенство нулю суммы зарядов на электродах и объемного заряда в плазме в любой момент времени, что эквивалентно условию непрерывности тока на электродах.

Для реализации этого подхода нашей группой разработан код КИТе. Помимо модернизированной модели для расчета полей, был учтен еще ряд требований, обусловленных практическим применением кода. В первую очередь, это работа со сложными геометриями, а следовательно использование нерегулярных (треугольных) расчетных сеток и полностью трехмерное моделирование. Дополнительные граничные условия для уравнения Пуассона делают матрицу уравнений несимметричной и плохо обусловленной, а ее решение на нерегулярной сетке приводит к техническим трудностям.

В настоящий момент техническая реализация описанного подхода завершена. На простой геометрии (плоскопараллельные пластины) получены результаты моделирования ВЧ-разряда и разряда постоянного тока как при использовании модели Дирихле, так и с обеспечением непрерывности тока. Идет исследование сходимости решения и подбор параметров разряда в более сложных геометриях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

2.10. Вирц Р.А. Математическая модель захоронения углекислого газа в пороупругой среде

В работе исследована двумерная осесимметричная математическая модель фильтрации газа в среде с переменной пористостью. Определяющими для данной модели являются уравнения сохранения масс для газовой и твердой фаз, закон Дарси, реологическое соотношение для пористой среды и уравнение баланса сил. Особенность рассматриваемой модели заключается в учете пороупругих свойств твердой фазы. Близкие по структуре системы уравнений рассматривались в работах [1–5].

Предположение о малости скорости твердой фазы позволяет свести исходную систему определяющих уравнений к двум уравнениям для нахождения эффективного давления и пористости [1]. Фильтрация газа происходит в области, граница которой состоит из проницаемой области для газа, соответствующей нагнетательной скважине, непроницаемых гра-

ниц и свободной поверхности Проведено численное исследование полученной начально-краевой задачи. Особый интерес представляют критерии разрушения пористой среды под действием закачанного газа и, как следствие, возникновение трещин, что может способствовать быстрому выходу газа на поверхность. Исследовано несколько вариантов параметров нагнетания углекислого газа в пласт с малой начальной пористостью. В ходе численных расчетов определены оптимальные варианты нагнетания газа для его хранения в геологической среде в долгосрочной перспективе.

Актуальность исследования поставленной задачи связана с решением проблемы долгосрочного захоронения углекислого газа в геологических формациях в целях предупреждения неблагоприятного воздействия на окружающую среду и климат.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-71-10045, <https://rscf.ru/project/23-71-10045/>).

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Папин А. А.

Список литературы

- [1] CONNOLLY J., PODLADCHIKOV Y. Compaction-driven fluid flow in viscoelastic rock // *Geodinamica Acta*. 1998. Vol. 11. N. 2–3. P. 55–84.
- [2] VIRTS R. A., PAPAN A. A., TOKAREVA M. A. Non-isothermal filtration of a viscous compressible fluid in a viscoelastic porous medium // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1666. N. 1. Art. 012041.
- [3] PAPAN A. A., TOKAREVA M. A., VIRTS R. A. Filtration of liquid in a non-isothermal viscous porous medium // *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys.* 2020. Vol. 13. N. 6. P. 763–773.
- [4] VIRTS R. A., PAPAN A. A. Modelling the storage of carbon dioxide in viscoelastic porous medium // *Computational Technologies*. 2022. Vol. 27. N. 6. P. 4–18.
- [5] WEN B., SHI Z., JESSEN K. ET AL. Convective carbon dioxide dissolution in a closed porous medium at high-pressure real-gas conditions // *Advances in Water Resources*. 2021. Vol. 154. Art. 103950.

2.11. Воробьева Д.А., Клименко А.И. Метод анализа динамических режимов в моделях биологических систем на основе алгоритма динамической трансформации временной шкалы

Современная математическая биология повсеместно использует математические модели биологических систем, в частности системы обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, а также модели динамических систем, описанных в других формализмах, таких как агентные модели. Параметрами являются численные значения величин, отражающих определённые свойства моделируемой системы и влияющие на решения модели. При этом в зависимости от значений параметров в системе могут реализовываться различные динамические режимы — нестационар-

ные, колебательные, хаотические и стационарные, устанавливающиеся в результате переходных процессов различного типа.

Предсказание изменения типа динамики решения в зависимости от изменения параметров модели является важной научной задачей. Тем не менее не для всех формализмов данная задача имеет аналитическое решение. Рутинно используемый метод проведения серии вычислительных экспериментов, т. е. решения серии прямых задач, при различных наборах параметров с последующим экспертным анализом графиков решений является трудоёмким при большом числе параметров и снижении шага параметрической сетки. В связи с этим является актуальным развитие методов, позволяющих получить и проанализировать информацию о множестве вычислительных экспериментов в агрегированном виде.

Данная работа посвящена разработке метода визуализации и классификации различных динамических режимов модели с использованием композиции алгоритма динамического сжатия временной шкалы (DTW-алгоритма [1]) и метода главных координат (РСоА [2]). Такой способ позволяет получить качественную визуализацию результатов множества решений математической модели и провести соответствие между значениями параметров модели и типом динамических режимов её решений. Данный метод был апробирован на модели Лотки—Вольтерры и искусственных наборах различных динамик. Отличительной особенностью предлагаемого метода является возможность «выявления» схожих по структуре решений модели, сдвинутых по фазе.

Научный руководитель — к.б.н. Клименко А. И.

Список литературы

- [1] GIORGINO T. Computing and visualizing dynamic time warping alignments in R: The dtw package // *J. Stat. Softw.* 2009. Vol. 31. N. 7. P. 1–24.
- [2] GOWER J. C. Principal Coordinates Analysis // *Encycl. Biostat.* 2005.

2.12. Вяткин А.В., Кучунова Е.В. Полулагранжевый метод численного решения уравнения неразрывности на различных пространственно-временных сетках

В работе рассматривается численное решение начально-краевой задачи для двумерного уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\rho) = 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega \subset \mathbb{R}^2, \quad t \in [0, T].$$

Здесь $\rho(t, \mathbf{x})$ — искомая функция; $\mathbf{U} = (u(t, \mathbf{x}), v(t, \mathbf{x}))$ — вектор скорости.

В работе представлен консервативный вычислительный алгоритм, относящийся к семейству полулагранжевых методов. Представляемый алгоритм

основан на интегральном законе сохранения, сформулированном в виде тождества интегралов с областями интегрирования на соседних слоях по времени [1]. Аппроксимация численного решения на каждом временном слое раскладывается на три составляющих: аппроксимация интеграла на верхнем слое по времени, на котором решение еще не известно; построение характеристик (траекторий) с верхнего временного слоя на нижний слой; приближенное вычисление интеграла на нижнем слое по времени [2, 3].

Основная сложность полулагранжевого подхода состоит в больших вычислительных затратах при вычислении интеграла на нижнем слое по времени. Время проведения расчетов можно значительно сократить с помощью параллельных вычислений. Другой подход состоит в уменьшении вычислительной сложности за счет использования различных временных шагов.

В работе представлен консервативный вычислительный алгоритм, относящийся к семейству полулагранжевых методов, позволяющий осуществлять вычисления на неравномерной пространственно-временной сетке. Неравномерность сетки заключается в том, что вычислительная область разделяется на подобласти, на которых используются не равные шаги по времени. Например, в одной подобласти используется фиксированный шаг по времени, а в другой подобласти используется временной шаг в два раза больший.

Основная сложность разработанного метода состоит в согласовании решений на границах подобластей с различными временными шагами так, чтобы выполнялась аппроксимация исходного уравнения, и выполнялся закон сохранения.

В результате в работе был реализован вычислительный алгоритм с первым порядком сходимости на всей неравномерной пространственно-временной сетке. Для реализованного алгоритма выполняется закон сохранения, что подтверждается вычислительными экспериментами.

Список литературы

- [1] SHAIUROV V. V., VYATKIN A. V., KUCHUNOVA E. V. Semi-Lagrangian difference approximation with different stability requirements // *Rus. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 2018. Vol. 32. Iss. 2. P. 123–135.
- [2] VYATKIN A. V., KUCHUNOVA E. V., YAKUBOVICH M. V., EFIMOV E. A. Combination of semi-Lagrangian approach and finite element method for Navier-Stokes equations // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2293. P. 420057.
- [3] Вяткин А. В., Кучунова Е. В. Параллельная реализация полулагранжевого метода для уравнения неразрывности // *Образовательные ресурсы и технологии*. 2016. №. 2 (14). С. 423–429.

2.13. Гарбузов Д.Н. Исследование течения вязкой жидкости в мешалках различных конфигураций

Аппараты, реализующие операции смешивания жидкостей, а также диспергирование твердых частиц или газа, широко используются в различных индустриях. Важнейшую роль смесители играют в технологии производства твердотопливных зарядов ракетных двигателей из высоконаполненных полимерных композиций на этапе перемешивания исходных компонентов состава [1].

Сложность экспериментального исследования течения делает численное моделирование надежной альтернативой. В частности, вычислительная гидродинамика дает подробную информацию о различных параметрах, влияющих на процесс, с меньшими временными и финансовыми затратами.

В настоящей работе исследованы течения вязкой жидкости в мешалках различной конфигурации. Оценка качества перемешивания проведена на основе различных методик. Отметим, что отдельное внимание уделяется разработке алгоритма и программы расчета описанных течений на основе метода контрольного объема [2]. При этом используется неструктурированная расчетная сетка, что позволяет без препятствий распространять разработанную методику на области произвольной геометрии. Проведены проверка аппроксимационной сходимости, верификация оригинальной программы и параметрические расчеты, основанные на тестовых задачах, таких как течение вязкой жидкости в плоском канале, каверне и коаксиальном зазоре.

В результате исследований было продемонстрировано наличие аппроксимационной сходимости реализованного метода расчета для процесса отверждения в кольцевом зазоре, течения вязкой жидкости в плоском канале, а также при различных конфигурациях мешалки (одно-, двух-, и трехлопастные). Получены распределения вектора скорости, давления и функции тока в пределах изменения Re от 0.1 до 100. Проведен анализ кинематики потока вязкой жидкости. Для оценки качества смешивания были выбраны методики, основанные на исследовании эволюции реперной линии, траекторий маркерных частиц, количества постоянно перемещающихся частиц.

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

Список литературы

- [1] Глушков И. А. Моделирование формования изделий из свободно-литевых композиций / М.: Архитектура-С, 2007. 362 с.
- [2] Андерсон Д., Таннехилл Д., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / М.: Мир, 1990. Т. 1, 2.

2.14. Глуздов Д.С. Моделирование течения в микроканале прямоугольного сечения с контрастной смачиваемостью

Проектирование микроканалов является важной задачей при создании микроустройств, например лабораторий на чипе, для использования в областях биологии, химии и медицины. Одной из главных проблем, при проектировании микроканалов, является минимизация перепада давления.

Уменьшить перепад давления возможно при помощи создания структурированных гидрофобных поверхностей. Обзор на них проведён в работе [1]. Не смотря на большое количество работ в данной области, всё ещё остаются вопросы, связанные с оптимальными параметрами микроканала и длиной проскальзывания, этим вопросам и посвящена текущая работа.

Проведенные численные исследования были верифицированы с помощью проверок сходимости и сверок с аналитическими расчётами, а также валидированы на экспериментальных данных, приведённых в статье [2].

Численные расчёты были проведены в Ansys Fluent с использованием инструментов параметризации задачи. Были написаны UDF скрипты для численной реализации граничного условия Навье в зависимости от длины проскальзывания. Дискретизация граничного условия Навье в неявном виде приведена в следующей формуле:

$$u_f = \frac{b/n}{1 + b/n} u_c,$$

где u_f — скорость на границе; u_c — скорость в соседней ячейке; b — длина проскальзывания; n — расстояние нормали от центра ячейки к границе. В самой работе в формуле также учтено влияние неортогональной сетки.

Расчёты в структурированном микроканале были проверены с использованием данных из статьи [3]. Численно исследовано влияние пузырьков на границе на характеристики течения, исследовано влияние длины проскальзывания на результаты решения задачи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант № 20-19-00722, <https://rscf.ru/project/20-19-00722/>).

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Гатапова Е. Я.

Список литературы

- [1] GLUZDOV D., GATAPOVA E. Microchannel surface structures for drag reduction // Journal of Engineering Thermophysics. 2023. Vol. 32. N. 2. P. 214–241.
- [2] GLUZDOV D., GATAPOVA E. Friction reduction by inlet temperature variation in microchannel flow // Physics of Fluids. 2021. Vol. 33. N. 6.
- [3] KARATAY E., HAASE A., VISSER C. ET AL. Control of slippage with tunable bubble mattresses // Proceedings

of the National Academy of Sciences. 2013. Vol. 110. N. 21. P. 8422–8426.

2.15. Голубев Р.А. Полулагранжевы методы решения уравнения адвекции

Современное математическое моделирование прикладных задач механики жидкости и газа основано на численном решении краевых задач для систем нестационарных уравнений с частными производными. Эти уравнения часто содержат операторы переноса субстанции (конвекции, адвекции) в дивергентной форме. Такие операторы используются в уравнениях распространения примесей при известном поле скоростей жидкости.

В работе предлагаются двухслойные разностные схемы решения уравнения адвекции, в основе которых лежит метод характеристик. При построении разностных схем рассматриваются два полулагранжевых подхода: эйлерово-лагранжев и лагранжево-эйлеров [1, 2]. Первый из них основан на фиксированной пространственно-временной сетке с привлечением участков характеристик между временными слоями. А второй, лагранжево-эйлеров подход, реализуется на неравномерной пространственной разностной сетке, получаемой пересечением характеристических кривых, выпущенных из равномерно расположенных узлов в начальный момент времени, со слоями равномерной сетки по времени.

В результате работы были получены численные методы решения одномерного и двумерного уравнения адвекции, выполнены вычислительные эксперименты, а также проведено теоретическое обоснование устойчивости и сходимости представленных схем.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2023-912).

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

Список литературы

- [1] DOUGLAS J., RUSSELL T. F. Numerical Methods for Convection-Dominated Diffusion Problems Based on Combining the Method of Characteristics with Finite Element or Finite Difference Procedures // SIAM Journal on Numerical Analysis. 1982. Vol. 19. N. 5. P. 871–885.
- [2] PIRONNEAU O. On the transport-diffusion algorithm and its applications to the Navier — Stokes equations // Numerische Mathematik. 1982. Vol. 38. N. 3. P. 309–332.

2.16. Горбунова К.Д. Компактная схема типа Мак-Кормака для гидродинамической задачи истечения атмосфер экзопланет

Интенсивное гидродинамическое истечение атмосфер экзопланет под действием жесткого ультрафиолетового излучения от звезды происходит на ран-

них этапах их эволюции. Моделирование этого процесса в сочетании с наблюдениями может дать дополнительную информацию о физических условиях на этих экзопланетах. Для численного решения таких задач ранее применялась классическая схема Мак-Кормака второго порядка точности [1]. В данном исследовании применяется компактная схема типа Мак-Кормака четвертого порядка с односторонними неявными шаблонами [2], благодаря которой удалось увеличить диапазон параметров задачи и сократить вычислительные затраты. Первые результаты применения этой схемы были представлены в работе [3], которые также показали преимущество перед классической схемой.

Для моделирования применяются гидродинамические уравнения сохранения массы, импульса и энергии и учитываются важные физические факторы: фотоионизация, рекомбинация, гравитационный потенциал и радиационное охлаждение. Численные расчеты проводились на неравномерной сетке, сгущающейся по мере приближения к поверхности планеты с максимально допустимым числом Куранта, равным 1. В качестве объектов моделирования выбраны два теплых непуна — TOI-421b,c с разными характеристиками.

В качестве результатов представлены стационарные распределения температуры, плотности и давления для обеих экзопланет, детально исследован расход газа, а также определена четкая граница перехода от гидростатического режима к гидродинамическому. Полученные результаты нужны для дальнейшего моделирования эволюции атмосфер планет.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение № 075-02-2023-912).

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Еркаев Н. В.

Список литературы

- [1] ERKAEV N., LAMMER H., ODERT P. ET AL. XUV exposed non-hydrostatic hydrogen-rich upper atmospheres of terrestrial planets. Part I: Atmospheric expansion and thermal escape // *Astrobiology Journal*. 2013. Vol. 13. N. 11. P. 1–59.
- [2] NIXON R., TURKEL E. Compact Implicit MacCormack-Type Schemes with High Accuracy // *Journal of Computational Physics*. 2000. Vol. 158. N. 1. P. 51–70.
- [3] GORBUNOVA K., ERKAEV N. Compact MacCormack-type schemes applied for atmospheric escape problem // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2022. Vol. 15. N. 4. P. 500–509.

2.17. Горынин А.Г. Математическое моделирование стесненного кручения композитных тонкостенных стержней методом асимптотического расщепления

Тонкостенные композитные стержни используются в различных отраслях промышленности, в частности в авиастроении, где они выступают типовыми элементами конструкций, таких как лопасти, лонжероны и стрингеры. Известно, что эффект стесненного кручения значительно влияет на напряженно-деформированное состояние в тонкостенных стержнях [1]. Одной из основных трудностей построения теории расчета композитных тонкостенных стержней является выбор гипотез, позволяющих корректно описать возникающее напряженно-деформированное состояние в конструкции.

В работе получена математическая модель, позволяющая рассчитывать тонкостенные композитные стержни открытого профиля с учетом стесненного кручения. Разрешающая система уравнений получена методом асимптотического расщепления [2], где решение для компонент тензора напряжений и вектора перемещений ищется в асимптотическом смысле, как конечные суммы дифференциальных операторов по продольной переменной, что позволяет учесть в решении все компоненты в асимптотическом смысле и отказаться от введения гипотез.

Проведена оценка точности разработанной математической модели относительно решения исходной трехмерной постановки задачи. Исходная задача решалась методом конечных элементов с использованием гексаэдральных элементов. Разрешающая система уравнений решалась численно с помощью метода коллокаций с использованием процедуры `bvpsolve` [3] библиотеки `Scipy` на языке `Python`. Для однородных стержней проведено сравнение полученных результатов с теорией тонкостенных стержней Власова [1]. Показано, что разработанная модель свободна от ограничений, накладываемых гипотезами Власова, и позволяет учитывать эффект стесненного кручения для более широкого класса конструкций, таких как композитные тонкостенные стержни и стержни уголкового типа.

Работа выполнена в рамках реализации Программы Центра НТИ НГУ «Моделирование и разработка новых функциональных материалов с заданными свойствами».

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Голушко С. К.

Список литературы

- [1] ВЛАСОВ В. З. Тонкостенные упругие стержни / М.: Физматгиз, 1959. 568 с.
- [2] ГОРЫНИН Г. Л., НЕМИРОВСКИЙ Ю. В. Пространственные задачи изгиба и кручения слоистых конструкций. Метод асимптотического расщепления / Новосибирск: Наука, 2004. 409 с.

- [3] KIERZENKA J., SHAMPINE L. F. A BVP Solver Based on Residual Control and the Matlab PSE // ACM Trans. Math. Softw. 2001. Vol. 27. N. 3. P. 229–316.

2.18. Гренкин Г.В. Глобальное решение нелинейных систем алгебраических уравнений с покоординатной монотонностью

Задачи, приводящие к системам уравнений вида

$$F_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

с покоординатно монотонными функциями F_j встречаются во многих областях. Поставим задачу нахождения всех корней такой системы в случае $n = 3$. При $n = 2$ существует решение этой задачи, дающее монотонную последовательность приближений, и этот алгоритм позволяет найти все корни.

Зафиксируем начальное приближение (x_0, y_0, z_0) и проведем через эту точку плоскости, параллельные координатным плоскостям, и рассмотрим линии нулевого уровня $\{F_j = 0\}$ в сечениях xy , yz и zx . В каждом таком сечении найдем одну из координат как одну из точек попарного пересечения i -й и j -й линий нулевого уровня, причем если таких точек несколько, возьмем k -ю из них. Таким образом, алгоритм распределяется на несколько нитей, каждая из которых задается девяткой индексов $(i_{xy}, j_{xy}, k_{xy}, i_{yz}, j_{yz}, k_{yz}, i_{zx}, j_{zx}, k_{zx})$. Для каждой выбранной девятки алгоритм обновляет координаты x (при заданных y, z), y (при новом x и заданном z) и z (при новых x, y), выбрав k -ю по порядку точку пересечения линий $\{F_i = 0\}$ и $\{F_j = 0\}$. Ожидается, что в некоторых нитях алгоритм сойдется к корню системы. В нелинейном случае алгоритм будет ветвиться, но все ветвления будут сгруппированы по номеру точки пересечения линий нулевого уровня. Таким образом, алгоритм генерирует не дерево, а несколько (проиндексированных) последовательностей приближений.

По сравнению с методом ветвей и границ, предложенный метод проигрывает в том, что не дает информации об отсутствии корней в выделенной области. Однако предложенный алгоритм строит итерационные последовательности, некоторые из которых сходятся к соответствующему корню за небольшое число итераций.

2.19. Гущин В.Е. Разработка одномерной математической модели мощного многорезонаторного клистрона

Для быстрого создания предварительного дизайна клистронов (резонансных приборов О-типа с модуляцией по скорости), имеющих значение для фундаментальной науки (например, проекта ускорителя Супер С-тау фабрики), целесообразно использовать полуаналитические модели, позволяющие получить на компьютере решение за несколько секунд. Однако, большинства из них нет в открытом доступе [1].

Поэтому в ИЯФ СО РАН ведётся разработка полуаналитической программы на основе одномерной дисковой математической модели клистрона [2].

Несмотря на существование публикации множества статей и книг, посвящённых расчёту и моделированию клистрона, детальные описания моделей и алгоритмов отсутствуют. Тем более ценными становятся программа и детали её разработки и тестирования, которые представлены в данной работе.

Пучок в клистроне считается осесимметричным и разбивается на диски. Модель состоит из уравнений расчёта напряжений на входном резонаторе [3] и уравнения движения дисков в электромагнитном поле резонаторов и поле самих дисков. Для интегрирования движения дисков используется одношаговая консервативная схема 2-го порядка точности. Напряжения и фазы пассивных резонаторов взяты из программы AJDISK [2].

Модель, реализованная на языке программирования C++, далеко не полна, но уже позволяет рассчитывать продольную динамику группирования пучка в мощном многорезонаторном пролётном клистроне.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Иванов В. Я.

Список литературы

- [1] LINGWOOD C. Klystron Simulations. Review/comparison existing tools. [Электронный ресурс]. URL: <https://indico.cern.ch> (дата обращения 29.08.2022).
- [2] JENSEN A., FAZIO M., NEILSON J., SCHEITRUN G. Developnig Sheet Beam Klystron Simulation Capability in AJDISK // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61. N. 6. P. 1666–1671.
- [3] VAUGHAN J.R.M. The input gap voltage of a klystron // IEEE Transactions on Electron Devices. 1985. Vol. 32. N. 11. P. 2510–2511.

2.20. Жигарев В.А., Минаков А.В. Моделирование процессов сопряженного теплообмена скважины с учетом фазовых переходов

В процессе бурения скважин в зоне многолетнемерзлых пород (ММП) происходит огромное количество проблем, связанных с изменением агрегатного состояния грунта, такие как прихваты бурового инструмента, смятие обсадных колон, замерзание буровой жидкости, некачественное цементирование, вследствие плохого контакта между цементом и мёрзлым грунтом. Данные проблемы возникают из-за взаимодействия температурного режима жидкости и породы.

Считается, что сильно льдистые породы способны уменьшаться в объёме, впоследствии чего в них создаются пустоты [1]. Часть этих пустот может заполняться в тёплый период года оттаявшими породами с верхней части горизонта, создавая каверны, приустьевые воронки или карстовые пустоты, требующие немедленной герметизации во избежание нарушений устойчивости скважины. Основны-

ми причинами таких осложнений является нарушение температурного режима работы скважины в процессе сооружения и эксплуатации из-за применений технических и технологических средств без учёта теплофизических процессов между жидкостью и породой в скважине. Исследование теплофизического режима в различных условиях работы скважины не теряет своей актуальности и в данное время. Теплофизические параметры должны быть фундаментом при начальном проектировании скважин.

Проведены систематические расчётные исследования влияния свойств буровых растворов (на водной основе) на скорость процесса растепления ММП при бурении скважины. При этом использовались теплофизические параметры ММП (плотность, льдистость, коэффициент теплопроводности и удельная теплоёмкость). При моделировании задавались геометрические параметры скважины близкие к типичным конструкциям, применяемым при бурении. Для моделирования использованы типичные параметры бурения.

Получены профили скорости буровых растворов по радиусу, зависимость перепада давления и распределения температуры скважины по радиусу, а также зависимости объёма растеплённой породы вокруг скважины от времени бурения и тепловой поток, поступивший в скважину. На основании полученных данных сделаны выводы о применимости полученных растворов для снижения негативного воздействия на ММП.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020-0012).

Список литературы

- [1] ШЕВЕЛЕВА Д. В. Динамика сложного теплового взаимодействия нефтяных и газовых скважин с многолетнемерзлыми породами: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Тюменский государственный университет, Тюмень, 2008. 19 с.

2.21. Жигарев В.А., Минаков А.В., Лысакова Е.И. Моделирование транспорта шлама растворами с добавкой наночастиц

Одним из направлений совершенствования добычи углеводородов является совершенствование технологий бурения скважин. Неэффективный транспорт частиц выбуренной породы (шлама) в скважине является одной из основных причин низкой эффективности процесса бурения. Одним из способов повышения эффективности очистки скважины от выбуренной породы является использование буровых растворов с улучшенными реологическими свойствами. Для улучшения свойств буровых растворов в последнее время стали активно применяться добавки различных наночастиц [1, 2].

Несмотря на достаточно большое количество известных исследований модификации свойств буровых

растворов с помощью добавок различных наноматериалов, большинство из них посвящены растворам на водной основе. Между тем для бурения в сложных горно-геологических условиях лучше подходят растворы на углеводородной основе. В связи с этим в настоящей работе впервые проведено систематическое расчётное исследование влияния добавок углеродных нанотрубок на характеристики транспорта частиц шлама в горизонтальном и вертикальном участках скважины буровыми растворами на углеводородной основе.

Проведено расчётное исследование влияния добавок углеродных нанотрубок в растворы на углеводородной основе на эффективность выноса шлама из горизонтальной и наклонной скважины. Для моделирования выноса шлама из скважины использовалась ранее разработанная авторами модель, основанная на эйлеровом подходе гранулированной среды. Буровой раствор рассматривается как неньютоновская жидкость, для описания реологии которой использовалась модель Гершеля — Балкли. Расчётная область представляет собой кольцевой канал, образованный двумя гладкими прямыми трубами круглого сечения. Внутренняя труба вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью. Для расчета течений в скважине при прокачивании модифицированного бурового раствора выбраны типичные параметры процесса бурения наклонно-направленных скважин. Были рассмотрены многостенные и одностенные углеродные нанотрубки. Базовый буровой раствор на углеводородной основе представляет собой обратную эмульсию. В работе исследовано наиболее типичное для буровых растворов соотношение углеводородной фазы и воды, равное 65/35. Концентрация добавок наноматериалов в буровых растворах варьировалась от 0.01 до 2 масс.

Впервые выполнено систематическое исследование влияния концентрации наночастиц, а также значения угла наклона скважины к горизонту на эффективность транспорта шлама буровыми углеводородными эмульсиями, модифицированными наноматериалами. Получены зависимости эффективности выноса шлама, средней скорости проскальзывания частиц шлама и потерь давления от концентрации и вида материала наночастиц, используемых в качестве добавок. Показано, что эффективность выноса шлама во всех рассмотренных случаях растёт с увеличением концентрации добавок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-79-30022).

Список литературы

- [1] ANASAN M. H., ALANI ALVI M. F., AHMED N. ET AL. An investigation of the effects of synthesized zinc oxide nanoparticles on the properties of water-based drilling fluid // Petroleum Research. 2022. Vol. 7. N. 1. P. 131–137.

[2] EDALATFAR M., YAZDANI F., SALENI M. B. Synthesis and identification of ZnTiO₃ nanoparticles as a rheology modifier additive in water-based drilling mud // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 201. Art. 108415.

2.22. Ибрагимов Ф.Ш., Джемлилов Э. Использование математического моделирования при прогнозировании свойств линейных приводов с эффектом памяти формы

В технических приложениях на эффекте памяти формы (ЭПФ) основана работа различных линейных приводов, в которых в качестве исполнительного механизма служит пружина из сплава на основе никелида титана [1]. При термомеханических воздействиях никелид титана претерпевает фазовый переход [2]. Этот эффект может быть вызван механическими и тепловыми нагрузками за счет изменения кристаллической структуры при переходе материала из аустенитной фазы в мартенситную и обратно. При этом обнаруживаются удивительные механические свойства материала. В первую очередь это эффект сверхэластичности (СЭ), когда материал способен деформироваться нелинейно до десятков процентов относительного удлинения с полным восстановлением формы после разгрузки. Механическое поведение сплава при СЭ характеризуется кривой гистерезиса. Второе интересное свойство сплава — это проявление ЭПФ, заключающееся в полном восстановлении первоначальной формы после деформации при температурном воздействии. На стадии проектирования линейных приводов в устройствах, работающих на принципе ЭПФ необходимо иметь больше информации о будущих функциональных свойствах создаваемого устройства. В этом случае имеется два подхода: проводить серию экспериментальных работ с прототипами устройства; проведение компьютерного имитационного моделирования. Моделирование дает безграничные возможности исследований при варьировании управляющих факторов модели, при этом вычислительный эксперимент экономически менее затратен по сравнению с натурным. В работе опробована физико-математическая модель в континуальном подходе [3], которая в точности способна описать ЭПФ и СЭ при термомеханическом воздействии исполнительных механизмах линейного привода — пружины.

На основе проведенных расчетов установлено, что в зависимости от конструктивных параметров пружины происходит перемещение вдоль главной оси с определенным усилием за счет изменения ее температуры и фазовых переходов в материале. Физико-механическая модель позволяет оценить напряженно-деформированное состояние привода при эксплуатационных температурах и нагрузках, подобрать размеры и управляющие значения управляющих свойств материала пружины еще

на стадии проектирования исходя из предъявляемых технических требований.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Козулин А. А.

Список литературы

- [1] МАРЧЕНКО Е. С., ЯСЕНЧУК Ю. Ф., ГЮНТЕР С. В. и др. Клиническое применение металлотрикотажа из никелида титана на основе количественной оценки реологического подобия мягким биологическим тканям // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. 2022. Т. 25. № 2 (81). С. 68–81.
- [2] JANI J. M., LEARY M., SUBIC A. ET AL. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Materials & Design. 2014. Vol. 56. N. 1. P. 1078–1113.
- [3] AURICCHO F. A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model // International Journal of Plasticity. 2001. Vol. 17. N. 1. P. 971–990.

2.23. Кадырова О.А. Применение плоской трехмерной модели ГРП для описания распространения трещины в образце малого размера

В работе проведено сравнение результатов моделирования распространения трещины гидроразрыва с экспериментальными данными, полученными при закачке вязкой жидкости в образец малого размера.

Целью сравнения является оценка возможности модели описывать развитие трещины с используемыми при проведении эксперимента параметрами. Отличие результатов моделирования и эксперимента покажет, что часть процессов описывается в модели с недостаточной точностью. Обеспечение совпадения результатов путем варьирования параметров даст направление корректировки модели. В дальнейшем с помощью модели, хорошо описывающей лабораторные эксперименты, можно будет обобщить результаты последних, на реальные трещины в пластах.

Для моделирования использовалась плоская трехмерная модель гидроразрыва пласта [1], доступная в виде программного продукта с открытым кодом [2]. Экспериментальные данные взяты из работы [3], в которой описано вызванное закачкой вязкой жидкости распространение трещины в гранитном образце цилиндрической формы. Полученная в эксперименте зависимость объема трещины от времени использовалась при задании условий в модели, а зависимости радиуса и давления в скважине — для оценки качества результатов численного моделирования.

При проведении моделирования выявлены проблемы, связанные с особенностями экспериментальных данных: зависимости объема, радиуса и давления от времени запумлены, что делает невозможным получение их точных значений в конкретные моменты времени.

Так, скорость закачки жидкости в трещину не может быть получена путем дифференцирования объема трещины, который определяется в эксперименте с искажениями. В работе предложено несколько способов аппроксимации объема гладкими функциями из различных классов с помощью метода наименьших квадратов. Это позволяет задавать производную от аппроксимированного объема в модели в качестве скорости закачки. Также предложен способ аппроксимации радиуса трещины, который определяется в эксперименте по положению акустических событий и наряду с давлением используется для оценки погрешности численной модели.

Использование точных параметров в качестве входных для модели приводит к существенному повышению скорости распространения трещины и снижению давления. Повышение при моделировании коэффициента вязкости жидкости, влияющего на радиус и давление, позволяет получить их зависимости, более близкие к экспериментальным. То есть изменение входных параметров может компенсировать неучет некоторого присутствующего в эксперименте эффекта, который не описывается в модели. Например, это может свидетельствовать о наличии дополнительного гидравлического сопротивления в трещине, которое не учитывается при использовании решения задачи о течении Пуазейля для описания движения жидкости в трещине.

Список литературы

- [1] PEIRCE A., DETOURNAY E. An implicit level set method for modeling hydraulically driven fractures // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2008. Vol. 197. P. 2858–2885.
- [2] ZIA H., LECAMPION B. PyFrac: A planar 3D hydraulic fracture simulator // *Computer Physics Communications*. 2020. Vol. 255. P. 107368.
- [3] SHEVTSOVA A., STANCHITS S., FILEV F. ET AL. Assessment of Saturation Effect on Hydraulic Fracturing in Sandstone and Thermally Treated Granite // *Minerals*. 2023. Vol. 13. P. 777.

2.24. Капитонов А.А. Математическое моделирование нанофильтрации водных растворов с помощью управляемых электрическим полем мембран

На сегодняшний день процессы мембранного разделения смесей широко используются во многих отраслях промышленности. В частности, мембраны применяются для опреснения и очистки воды, что является крайне актуальной задачей.

В мембранах с электропроводящей поверхностью транспорт ионов можно регулировать путём изменения поверхностного потенциала. Такая мембрана проявляет селективность, механизм которой основан на перекрытии нанопоры двойным электрическим слоем (ДЭС), что препятствует прохождению ионов раствора через мембрану. Толщина ДЭС определяется длиной Дебая.

Для описания переноса ионов в проводящих мембранах используются уравнения Навье—Стокса, Нерста—Планка и Пуассона. Если длина Дебая сравнима с радиусом нанопор, то используется модель однородного потенциала, при которой распределения потенциала, концентрации ионов и давления внутри нанопоры зависят только от одной координаты (продольного расстояния) [1].

При моделировании постоянным полагается потенциал, приложенный к стенке поры. Объёмная плотность заряда внутри поры соответствует решению уравнения Пуассона и представляет собой сумму плотностей электронного и химического типов заряда. Величина первого зависит от соответствующего коэффициента (ёмкость слоя Штерна).

Из работ по удалению солей и анионных красителей нанофильтрационными мембранами ПАНИ-ПСС/УНТ [2] и МХене/УНТ [3] были взяты экспериментальные данные. Для их описания была построена математическая модель нанофильтрации водных растворов солей на основе модели однородного потенциала. Также было проведено параметрическое исследование модели.

Для описания «эффективного» заряда мембраны в уравнения математической модели были введён новый коэффициент. Показано, что этот заряд намного меньше измеренного/подогнанного заряда, что может быть объяснено химическими процессами на электрически заряженной поверхности.

В итоге было установлено хорошее согласие расчётных данных на основе модели с результатами эксперимента, что подтверждает предсказательную силу модели и позволяет использовать её для практических целей. Результаты работы были опубликованы в журнале «Membranes» [4].

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

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Рыжков И. И.

Список литературы

- [1] РЫЖКОВ И. И., ВЯТКИН А. С., МИХЛИНА Е. В. Моделирование проводящих нанопористых мембран с переключаемой ионной селективностью // *Мембраны и мембранные технологии*. 2020. Т. 10. № 1. С. 13–23.
- [2] ZHANG H., QUAN X., FAN X. ET AL. Improving ion rejection of conductive nanofiltration membrane through electrically enhanced surface charge density // *Environmental Science and Technology*. 2019. Vol. 53. P. 868–877.
- [3] YI G., DU L., WEI G. ET AL. Selective molecular separation with conductive MXene/CNT nanofiltration membranes under electrochemical assistance // *Journal of Membrane Science*. 2022. Vol. 658. P. 120719.
- [4] КАПИТОНОВ А. А., РЫЖКОВ И. И. Modelling the performance of electrically conductive nanofiltration membranes // *Membranes*. 2023. Vol. 13. P. 596.

2.25. Кириллов П.И., Шанеев В.П. Решение двумерных интегральных уравнений методом коллокаций и наименьших квадратов с полиномиальной аппроксимацией

Предложен новый численный алгоритм решения методом коллокаций и наименьших квадратов двумерного неоднородного интегрального уравнения Фредгольма второго рода в произвольном прямоугольнике $\Omega = [a_1, b_1] \times [a_2, b_2]$:

$$u = r + f, \quad (1)$$

где:

$$u = u(x_1, x_2),$$
$$r = \int_{a_2}^{b_2} \int_{a_1}^{b_1} K(x_1, x_2, s_1, s_2) u(s_1, s_2) ds_1 ds_2,$$
$$f = f(x_1, x_2),$$

$u(x_1, x_2)$, $K(x_1, x_2, s_1, s_2)$, $f(x_1, x_2)$ — искомое решение, ядро и свободный член, соответственно, при этом $x_1 \in [a_1, b_1]$, $x_2 \in [a_2, b_2]$. Приближённое численное решение уравнения (1) ищется в виде сплайна из кусков полиномиальных аппроксимантов степени p в прямоугольных ячейках, на которые разбивается область Ω . Для ячеек разбиения области принимается сквозная нумерация. В ячейке с индексом i аппроксимант имеет вид:

$$u_{hi}(x_1, x_2) = \sum_{p_1+p_2 \leq p} c_{ij} x_1^{p_1} x_2^{p_2}.$$

После подстановки аппроксиманта с неопределёнными коэффициентами в (1) относительно коэффициентов c_{ij} получается приближённое соотношение. Коллокациями этого соотношения в точках области Ω , число которых больше числа неизвестных коэффициентов c_{ij} , выписывается переопределённая система линейных уравнений. Повторный интеграл в правых частях уравнений коллокаций, содержащий неизвестную функцию, переносится со знаком минус в левую часть и затем приближённо подсчитывается по всей области Ω в рассматриваемой точке коллокации с помощью прямого произведения одномерных квадратурных формул Гаусса. Полученная система уравнений относительно искомых коэффициентов c_{ij} решается прямым методом.

В численных экспериментах получены высокоточные решения уравнений (1). Исследовано влияние степени переопределённости СЛАУ (отношение числа c_{ij} к числу точек коллокаций) на точность численного решения. На тестах установлено, что она значительно превосходит точности, достигнутые в работах [1] и [2].

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

Список литературы

- [1] TARI A., SHANMORAD S. A computational method for solving two-dimensional linear Fredholm integral equations of second kind // The ANZIAM Journal. 2008. Vol. 49. N. 4. P 543–549.
- [2] MA Y., HUANG J., LI H. A Novel Numerical Method of Two Dimensional Fredholm Integral Equations of the Second Kind // Mathematical Problems in Engineering. 2015. Vol. 2015. Art. 625013.

2.26. Ключанцев В.С. Нелокальное моделирование процессов накопления повреждений в режиме смешанного нагружения I/II

Исследование посвящено применению нелокального подхода интегрального типа к моделированию процессов накопления повреждений в металлических материалах. Предполагается, что материал повреждается в режиме пластических деформаций под действием смешанного нагружения при комбинации растягивающих и сдвиговых напряжений. Так как в пластичных металлах в окрестности вершины трещины могут наблюдаться конечные деформации, разрабатываемая модель геометрически нелинейна. Введение нелокальности интегрального типа в правило накопления повреждений обогащает структуру модели путем добавления новых параметров материала и регуляризует численные расчеты [1]. Известно, что расчеты по локальным моделям обладают существенным недостатком, а именно, результаты моделирования патологически зависят от параметров дискретизации. В частности, при измельчении сетки отсутствует сходимость решения к физически осмысленному, а ориентация сетки задает направление распространения трещин. В то же время результаты моделирования по нелокальным моделям лишены указанных недостатков и позволяют получить сходящееся решение при измельчении дискретизации [1–3].

Для достижения точного описания процессов накопления повреждений и разрушения при смешанном режиме нагружения I/II типов предложены новые ядра делокализации. Разработанные ядра явно учитывают неоднородность полей напряжений и деформаций в зоне разрушения. Кроме того, исследуются процедуры нормализации ядер на основе баланса величин в приемнике и источнике. При этом процедура нормализации на основе приемника является математически строгой, обеспечивающей инвариантность постоянных полей; процедура на основе источника является физически обоснованной, обеспечивающей постоянство интеграла от делокализуемой величины.

Результатом исследования является инструмент моделирования, подходящий для сквозного расчета процессов накопления повреждений и разрушения. С использованием модели материала, откалиброванной по реальным экспериментальным данным

для сплава EN AW5754 H111 [4], продемонстрирована практическая применимость нового подхода. В частности, показана работоспособность модели для конечно-элементного анализа разрушения компактных образцов в смешанном режиме «растяжение-сдвиг». В отличие от обычных ядер деформации, представленные семейства ядер предлагают дополнительный параметр калибровки, который позволяет более точно описать поведение конструкции при смешанном режиме нагружения. В частности, предложенный подход позволяет корректно описать форму диаграммы K_{IC} – K_{IIc} .

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

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

Список литературы

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] SHUTOV A. V., KLYUCHANTSEV V. S. Integral-based averaging with spatial symmetries for non-local damage modelling // ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2023. Vol. 103 (1). P. e202100434.
- [4] SILVA C. M. A., SILVA M. B., ALVES L. M. ET AL. A new test for determining the mechanical and fracture behavior of materials in sheet-bulk metal forming // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2017. Vol. 231 (8). P. 693–703.

2.27. Когай А. Д. Моделирование процессов гидратации цементных систем

Исследование механизмов гидратации цементных систем является определяющим для развития методов управления процессами структурообразования цементного камня при создании современных бетонов с заданными свойствами. Моделирование физических процессов, сопровождающих химические реакции в процессе гидратации, позволяет исследовать факторы, влияющие на скорость и глубину превращений и отражающие развитие системы.

Предложена модель связанных процессов в реагирующих средах [1] для описания структурных изменений цементного камня в присутствии мелкого заполнителя в процессе гидратации. Актуальность работы заключается в разработке инструмента исследования процесса гидратации цемента на ранних сроках, позволяющего анализировать изменения состава и структуры в ходе химических превращений, прогнозировать кинетику набора прочности. Предложенная модель может быть использована при подборе составов новых мелкозернистых бетонов и для прогнозирования свойств уже разработанных композитов на основе цемента.

В предложенной модели материал рассматривается как гетерогенная среда, основу которой составляют реагирующие компоненты и инертные вещества с учетом различных концентраций составляющих, включая поры, по всему рассматриваемому объему. В основе разработанной модели лежит новый подход моделирования гидратации цементной системы, включающий в себя ряд физико-химических процессов, обеспечивающих начальное структурообразование композита. Для описания тепловых процессов применяются двухтемпературные уравнения теплового баланса. На фоне прогрева объема смеси, вызванного экзотермичностью реакции гидратации, решаются задачи макрокинетики и фильтрации. Для моделирования макрокинетики химической реакции цемента с водой экспериментально определяется энергия активации. Для этого используется метод изотермической калориметрии цементных систем при температурах 20, 30 и 40 °С. Вынужденная фильтрация жидкой фазы моделируется с учетом капиллярного давления, вызванного особенностями формирования поровой структуры цементного камня.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов демонстрируют адекватность предложенной модели и хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований по определению прочности цементного камня или бетона.

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

Список литературы

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

2.28. Кожемяченко А. А., Фаворская А. В., Филиппенко П. С. Сеточно-характеристический метод на химерных сетках для численного моделирования трехмерной задачи ультразвукового неразрушающего контроля рельсового полотна

В условиях длительной эксплуатации железнодорожного полотна в материале рельсов образуются разные контактно-усталостные повреждения, в том числе микротрещины, дефекты, которые могут быть визуально не видны на рабочей поверхности рельса. Поэтому актуально использовать методы неразрушающего контроля [1], позволяющие следить за состоянием различных объектов мониторинга в условиях их длительного срока эксплуатации. Из них ультразвуковые методы [2], основанные на линейной зависимости между временем прохождения волны и напряжением эластичного материала, просты в использовании и демонстрируют высокую эффективность при рассмотрении металлических объектов в виду их сильной проникающей способности и высокой чувствительности [3].

В исследовании представлено численное моделирование прямой задачи ультразвукового неразрушающего контроля рельсового полотна сеточно-характеристическим методом в трехмерной постановке. Сложность задач этого класса обусловлена высокими частотами волн, что накладывает ограничение на размер шага расчетной сетки, а также сложной геометрией самого профиля рельса. В работе рассмотрена возможность использования химерных (наложенных) сеток, позволяющих точно воспроизвести форму рельса. Для создания химерной сетки использован специальный алгоритм, который разбивает криволинейную внутреннюю и внешнюю границы профиля рельса на сегменты. Форма сегментов задается аналитически в соответствии с рассматриваемым профилем и технической документацией. При этом между декартовой сеткой, выступающей в роли фоновой расчетной сетки, и химерной сеткой установлен алгоритм взаимной интерполяции.

На примере рассматриваемой задачи был проведен анализ сеточной сходимости численного алгоритма сеточно-характеристического метода с использованием химерных сеток. При этом рельс относится к типу объектов с повторяющимся криволинейным сечением вдоль выделенного пространственного направления. С учетом этого наблюдения была получена модификация сеточно-характеристического метода на криволинейных сетках, позволяющая снизить количество вычислительных операций за счет использования упрощенных математических выражений [4]. В результате получены трехмерные волновые картины визуализирующие распространение волнового сигнала в задаче ультразвукового неразрушающего контроля, которые могут использоваться для дальнейшего анализа на предмет присутствия или отсутствия дефектов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-71-10028, <https://rscf.ru/project/20-71-10028/>).

Список литературы

- [1] ROSSINI N.S., DASSISTI M., BENYOUNIS K.Y. ET AL. Methods of measuring residual stresses in components // Materials and Design. 2012. Vol. 35. P. 572–588.
- [2] LI Z., HE J., TENG J. ET AL. Internal Stress Monitoring of In-Service Structural Steel Members with Ultrasonic Method // Materials. 2016. Vol. 9 (4). P. 223.
- [3] ALANAKOON S., SUN Y.Q., SPIRYAGIN M. ET AL. Rail flaw detection technologies for safer, reliable transportation: a review // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2018. Vol. 140 (2). P. 020801.
- [4] KOZHEMYACHENKO A., FAVORSKAYA A., PESNYA E. ET AL. Modification of the Grid-Characteristic Method on Chimera Meshes for 3D Problems of Railway Non-Destructive Testing // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023. Vol. 44 (1). P. 376–386.

2.29. Колотилов В.А., Остапенко В.В. Метод квазиинвариантов при построении схемы SABARET

Приводится детальное описание метода квазиинвариантов при построении различных модификаций схемы SABARET [1], аппроксимирующей гиперболическую систему законов сохранения, не допускающую записи в форме инвариантов. В качестве примера рассмотрена система уравнений газовой динамики неизэнтропических течений, для которой квазиинварианты получаются как из классической характеристической формы записи этой системы, так и из других характеристических форм. В результате построены различные семейства квазиинвариантов, каждому из которых соответствует своя модификация схемы SABARET.

Проведен сравнительный анализ точности этих модификаций при расчете задач Римана о распаде разрыва (в частности задач Сода [2] и Лакса [3]). На основе этого анализа выделен оптимальный вид квазиинвариантов, позволяющий схеме SABARET с высокой точностью локализовать разрывы разной природы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-11-00060).

Список литературы

- [1] Колотилов В. А., Остапенко В. В. Метод квазиинвариантов при построении схемы SABARET и его применение для численного расчета задач газовой динамики // Выч. техн. 2023. Т. 28. № 2. С. 58–71.
- [2] Sod G. A. A survey of several finite difference methods for systems of nonlinear hyperbolic conservation laws // J. Comput. Phys. 1978. Vol. 27. N. 1. P. 1–31.
- [3] Lax P. D. Weak solutions of nonlinear hyperbolic equations and their numerical computation // Comm. Pure Appl. Math. 1954. Vol. 7. N. 1. P. 159–193.

2.30. Копылов Д.Е., Аргучинцев А.В. О численном решении начально-краевой задачи, возникающей при моделировании процесса разделения смесей в ректификационной колонне

В работе рассматривается модель ректификационной колонны [1–3]. Модель описывается системой двух линейных гиперболических уравнений первого порядка

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} + \begin{pmatrix} -c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial s} = \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{b},$$

где \mathbf{B} , \mathbf{b} , \mathbf{x} зависят от $s \in [s_0, s_1]$ и $t \in [t_0, t_1]$. Искомой является вектор-функция \mathbf{x} . Начальные условия:

$$\mathbf{x}(s, t_0) = \mathbf{x}^0(s).$$

Особенность данной задачи заключается в следующих нестандартных краевых условиях, определяемых из обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_1(s_1, t)}{dt} = G_{11}(t)x_1(s_1, t) + G_{12}(t)x_2(s_1, t) + g_1(t),$$

$$\frac{dx_2(s_0, t)}{dt} = G_{12}(t)x_1(s_0, t) + G_{22}(t)x_2(s_0, t) + g_2(t).$$

Предложен вариант численного метода характеристик, который в данном случае позволяет свести задачу к решению трех систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Для решения обыкновенных дифференциальных уравнений был использован метод Эйлера с пересчетом, обеспечивающий второй порядок аппроксимации. Осуществлена программная реализация на языке программирования Python 3.10. Дополнительно использовалась библиотека *numpy*. Метод отлажен на ряде тестовых примеров. Получено хорошее совпадение численных и аналитических решений.

Следующим шагом исследования предполагается решение задачи оптимального управления процессом ректификации, в которой управляющими воздействиями являются коэффициенты в краевых условиях. Предложенный численный метод программно реализован также и для сопряженной задачи, которую необходимо интегрировать при реализации методов оптимального управления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-21-00296, <https://rscf.ru/project/23-21-00296/>).

Список литературы

- [1] Аргучинцев А. В., Поплевко В. П. Оптимальное управление процессом ректификации в колонне // Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика. 2011. Т. 4. № 3. С. 32–41.
- [2] Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В. Оптимальное управление технологическим процессом в ректификационных установках // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 1. С. 95–105.
- [3] Демиденко Н. Д., Потапов В. И., Шокин Ю. И. Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами / Новосибирск: Наука, 2006. 551 с.

2.31. Кочарина А.Р. Распространение MUSCL-схемы на случай неравномерной сетки

Для численного решения уравнений Навье—Стокса сжимаемой и несжимаемой жидкости методами конечных объёмов активно используется MUSCL-схема [1], которая благодаря своей простоте остаётся популярной в настоящее время [2].

Идея MUSCL-схемы состоит в специальном способе вычисления численного потока через грань ячейки. Так, при решении скалярного нелинейного уравнения переноса

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial f(u(x, t))}{\partial x} = 0$$

численный поток через грань $i + 1/2$ определяется по формуле

$$f_{i+1/2} = f(\hat{u}_{i+1/2}),$$

где $\hat{u}_{i+1/2}$ определяется путём специальной интерполяции (*реконструкции*) на грань $i + 1/2$ ячейки сетки:

$$\hat{u}_{i+1/2} = u_{i+1/2}^L \equiv \bar{u}_i + \frac{1}{4} \left[(1-k)(\bar{u}_i - \bar{u}_{i-1}) + (1+k)(\bar{u}_{i+1} - \bar{u}_i) \right] \quad (\text{реконструкция слева}), \quad (1)$$

где \bar{u}_i — средние по ячейке. Случай $k = 1/3$ даёт формально третий порядок аппроксимации в методе конечных объёмов.

В недавней статье [2] Нишикава проводит подробный анализ порядка точности аппроксимации MUSCL-схемы. Однако анализ в [2] и в аналогичных работах ограничен случаем равномерной сетки.

Цель настоящей работы состоит в распространении MUSCL-схемы 3-го порядка на случай неравномерной структурированной сетки:

$$\hat{u}_{i+1/2} = u_{i+1/2}^L \equiv c_{10}\bar{u}_{i-1} + c_{11}\bar{u}_i + c_{12}\bar{u}_{i+1}, \quad (2)$$

где коэффициенты c_{ij} зависят от шагов сетки, их вывод дан в [3].

В работе исследован порядок аппроксимации для исходной MUSCL-схемы (1) и модифицированной MUSCL-схемы (2) в случае неравномерной сетки. Показано, что порядок аппроксимации схемы зависит от характера неравномерной сетки: либо сетка имеет постоянный закон сгущения, либо сетка произвольная (искажённая). В работе показано следующее.

Для 1D-случая:

1. Исходная MUSCL-схема (1) имеет лишь 2-й порядок аппроксимации на неравномерных сетках с постоянным законом сгущения и 0-й порядок аппроксимации для неравномерных сеток произвольного типа. Таким образом, на произвольной искажённой сетке MUSCL-схема с постоянными коэффициентами интерполяции вообще не аппроксимирует исходное уравнение.
2. MUSCL-схема с учётом неравномерности (2) имеет 3-й порядок аппроксимации на неравномерных сетках с постоянным законом сгущения и 2-й порядок на произвольных неравномерных сетках.

Эти результаты показаны теоретически и в ходе вычислительного эксперимента.

Для 3D-случая: Полученная MUSCL-схема с учётом неравномерности (2) внедрена в численный алгоритм искусственной сжимаемости для решения уравнений Эйлера и Навье—Стокса несжимаемой жидкости. Схема протестирована на задачах обтекания цилиндра невязкой несжимаемой жидкостью, а также на задаче о течении жидкости в проточном тракте гидротурбины. Показано, что MUSCL-схема с учётом неравномерности имеет ту же скорость сходимости и даёт более гладкое решение в областях с неплавным сгущением сетки.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Чирков Д. В.

Список литературы

- [1] VAN LEER B. Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second-order sequel to Godunov's method // J. Comput. Phys. 1979. Vol. 32. N. 1. P. 101–136.
- [2] VAN LEER B., NISHIKAWA H. Towards the ultimate understanding of MUSCL: pitfalls in achieving third-order accuracy // J. Comput. Phys. 2021. Vol. 446. P. 110640.
- [3] SHU C.-W. High order ENO and WENO schemes for computational fluid dynamics // Lecture Notes in Computational Science and Engineering. 1999. Vol. 9. P. 439–582.

2.32. Крушев Д.Р., Ветрова А.В. Моделирование растяжения проволоки из NiTi при учете особенностей нелинейного деформационного поведения

Проволока из никелида титана, используется для изготовления специализированного медицинского трикотажа [1], в качестве нитей красоты и как сырье при аддитивном производстве. Во всех перечисленных случаях проволока претерпевает действие механических нагрузок, при этом необходимо адекватно оценивать границы применимости, строить прогнозы прочности, как отдельных проволок, так и изделий из них. В исследовании особенности реологического описания механического поведения тонких проволок легли в основу физико-математических моделей при проведении моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния, под действием постоянных и знакопеременных нагрузок.

Для оценки реологического поведения и получения констант определяющих уравнений использовали экспериментальные данные по растяжению проволоки из никелида титана с составом Ti-50 ат.% Ni толщиной 40 мкм, которая была получена с использованием термомеханической обработки из монолитных слитков с промежуточными отжигами в несколько этапов [1]. После нагружения до разрушения на деформационных кривых выделены три характерные зоны: первая — упругое поведение аустенита B2 до деформации в пределах 1%, реологически описываемое линейно-упругой средой Гука с модулем упругости первого рода E_a ; вторая — превращение аустенита в мартенсит в виде плато, параллельного оси деформации, продолжительностью около 4%, описываемое жесткой средой Мизеса с параметром течения σ , равным пределу упругости; третья — упругое деформирование мартенситной фазы вплоть до разрушения при относительном удлинении до 11%, по аналогии с упругостью аустенитной фазы, описывается линейно-упругой средой Гука с модулем упругости первого рода E_m для мартенсита. Разрушение при растяжении наступает по квазихрупкому сценарию без признаков пластического течения. Создана физико-

математическая модель, основанная на реологическом описании экспериментальных данных, для которой выбрана математическая постановка [2], учитывающая особенности сверхэластичного поведения материала при нагрузке и разгрузке. Определяющее уравнение в выбранной модели включает 7 материальных констант, значения которых получены из экспериментальных данных. С использованием метода конечных элементов в трехмерной постановке создана расчетная сеточная модель на основе геометрической модели проволоки в виде цилиндрического образца диаметром 40 мкм и длиной 400 мкм. В качестве граничных условий использовали жесткое закрепление одного торца и перемещение другого торца до 11% относительной деформации в направлении вдоль главной оси проволоки. Полученные результаты численного моделирования, качественно и количественно подобны экспериментальным данным на всех участках деформирования при нагрузке и разгрузке.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Козулин А. А.

Список литературы

- [1] МАРЧЕНКО Е. С., ЯСЕНЧУК Ю. Ф., ГЮНТЕР С. В. и др. Клиническое применение металлтрикотажа из никелида титана на основе количественной оценки реологического подобия мягким биологическим тканям // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. 2022. Т. 25. № 2 (81). С. 68–81.
- [2] AURICCHIO F. A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model // International Journal of Plasticity. 2001. Vol. 17. N. 1. P. 971–990.

2.33. Кузнецов К.С. Численное решение нестационарной одномерной системы уравнений Навье—Стокса при помощи нейронных сетей с дискретизацией по времени при помощи неявных методов Рунге—Кутты высокого порядка

В работе [1] показан метод решения дифференциальных уравнений в частных производных при помощи нейронных сетей. Также авторами описана возможность применения неявных методов Рунге—Кутты для дискретизации по времени нестационарной задачи.

Решение дифференциального уравнения при помощи нейронной сети заключается в минимизации выбранного функционала качества, отвечающего решению поставленной задачи. Данный подход получил широкое распространение в последние годы под названием Physics Informed Neural Networks (PINN).

В текущей работе была решена система уравнений Навье—Стокса, описывающая движение вязкого теплопроводного газа в ограниченной области,

которая вкупе с граничными условиями имеет вид:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right] = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial}{\partial x} (R\rho\theta), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u\rho) = 0, \quad (2)$$

$$c_v \rho \left[\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - R\rho\theta \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (3)$$

$$u|_{t=0} = u_0(x), \quad \rho|_{t=0} = \rho_0(x), \quad \theta|_{t=0} = \theta_0(x), \quad (4)$$

$$u|_{x=0} = u_1(t), \quad \rho|_{x=0} = \rho_1(t), \quad \theta|_{x=0} = \theta_1(t), \quad (5)$$

$$u|_{x=L} = u_2, \quad \theta|_{x=L} = \theta_2, \quad x \in [0, L], \quad t \in [0, T], \quad (6)$$

где u , ρ , θ — неизвестные функции скорости, плотности и температуры соответственно; R — универсальная газовая постоянная; μ — вязкость газа; c_v — удельная теплоемкость газа; k — коэффициент теплопроводности газа; u_0 , ρ_0 , θ_0 , u_1 , ρ_1 , θ_1 , u_2 , θ_2 — заданные функции.

Неявный метод Рунге—Кутты можно записать в следующем виде:

$$y_{n+1} = y_n + h \sum_{j=1}^s b_j k_j, \quad (7)$$

$$k_i = f \left(x, t_n + c_i h, y_n + h \sum_{j=1}^s a_{ij} k_j \right),$$

где s — порядок метода.

В текущей работе используются методы Гаусса—Лежандра. В качестве коэффициентов c_i в (2) выбираются корни смещенного полинома Лежандра $P_s(2x-1)$. Коэффициенты b_j в (7) и a_{ij} в (2) можно вычислить по следующим формулам [2]:

$$b_j = \int_0^1 l_j(x) dx, \quad a_{ij} = \int_0^{c_i} l_j(x) dx,$$

$$\text{где } l_j(x) = \prod_{j \neq i} \frac{x - x_i}{x_j - x_i}, \quad j = 1, \dots, s.$$

Методы, определенные данным образом, являются А-устойчивыми. Погрешность метода составляет h^{2s} .

Перед решением задачи (1)–(6) необходимо провести её обезразмеривание. Для решения нейронными сетями, используя дискретизацию по времени при помощи метода Гаусса—Лежандра, предлагается решать задачу в два шага, разбив временной интервал $t \in [0, 1]$ пополам. В качестве y_n в (7) первого этапа будут использоваться начальные условия u_0 , ρ_0 , θ_0 для каждой неизвестной функции, в то время как его решение u_{n+1} , ρ_{n+1} , θ_{n+1} будет являться начальным условием второго шага. При использовании метода Гаусса—Лежандра 100-го порядка погрешность каждого из этапов будет равна $0.5^{2 \cdot 100} = 6.2 \cdot 10^{-61}$, что меньше машинного нуля.

Работа выполнена в рамках госзадания ИИМ ДВО РАН (№ 075-01290-23-00) и при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-02-2023-946).

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] BUTCHER J. C. Practical Runge—Kutta methods for scientific computation // The ANZIAM Journal. 2009. Vol. 50. N. 3. P. 333–342.

2.34. Ласковец Е.В. Математическое моделирование течений в тонком слое жидкости с учетом испарения в условиях больших чисел Рейнольдса

Изучение тонких слоев жидкостей является достаточно актуальной задачей ввиду их широкого распространения как в природных, так и в технологических процессах. В данной работе рассматривается односторонняя математическая модель, описывающая процесс стекания вязкой несжимаемой жидкости по наклонной подложке в условиях ненулевого потока пара на термокапиллярной границе раздела. В качестве определяющих уравнений принимается система уравнений Навье—Стокса и уравнение переноса тепла, а также обобщенные кинематическое, динамические и энергетическое условия на границе раздела сред [1]. Величина локального потока массы пара определяется с помощью уравнения Герца—Кнудсена [2]. Твердая непроницаемая подложка подвержена неоднородному нагреву. Представленная задача рассматривается в рамках длинноволнового приближения. Для определения толщины жидкого слоя получено эволюционное уравнение. Проведен параметрический анализ задачи, позволяющий выявить эффекты, вносящие наибольший вклад в развитие структуры течения. Моделирование проведено для случая больших чисел Рейнольдса [3].

Предложен алгоритм численного решения задачи о периодическом стекании жидкого слоя. Изучено влияние характера нагрева наклонной подложки, угла наклона и гравитационных эффектов на характер течения. Выявлен эффект снижения толщины слоя в случае возрастания угла наклона твердой подложки. Уменьшение параметра, определяющего уровень гравитации приводит к снижению скорости испарения жидкости. Интенсивность испарительных процессов возрастает для случая неоднородного нагрева подложки.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Современные методы гидродинамики для задач природопользования, промышленных си-

стем и полярной механики» (номер темы: FZMW-2020-0008).

Список литературы

- [1] КУЗНЕЦОВ В. В. Тепломассообмен на поверхности раздела жидкость — пар // Известия РАН. МЖГ. 2011. № 5. С. 97–107.
- [2] MILADINOVA S., SLAVTSCHEV S., LEVON G. ET AL. Long-wave instabilities of non-uniformly heated falling films // J. Fluid Mech. 2002. Vol. 453. P. 153–175.
- [3] ГОНЧАРОВА О. Н., РЕЗАНОВА Е. В. Математическая модель течений тонкого слоя жидкости с учетом испарения на термокапиллярной границе раздела // Известия АлтГУ. 2014. Т. 81. № 2. С. 21–25.

2.35. Латипов А. Р. Многосеточные методы конечных элементов для решения задач оптимизации разработки газовых месторождений

В работе представлены результаты исследования по оптимизации разработки газового месторождения с учетом геологических факторов и фильтрационно-емкостных параметров. В первой части работы предложен метод оптимального проектирования сетки скважин на основе шестиугольной аппроксимации призабойной зоны отбора газа, которая может быть адаптивно измельчена в зависимости от геометрии и фильтрационно-емкостных параметров пласта. Для решения этой задачи методами целочисленного программирования использован пакет GROVID. Предлагаемый в работе подход отличается новизной и позволяет учитывать опыт экспертов по разработке месторождений. Во второй части предложен метод оптимального выбора дебитов Q_i , обеспечивающих плановую добычу газа $Q_0 = \sum_{i=1}^N Q_i$ при условии непроницаемости внешнего контура $\partial\Omega$ и заданном начальном ($t = 0$) распределении давления в резервуаре месторождения $\bar{\Omega}$. В интервале управления $(0, T)$ распределение давления $P(x, t)$ в момент $t \in (0, T)$ на $\bar{\Omega}$, т.е. для всех $x \in \bar{\Omega}$, определяется нелинейным уравнением параболического типа

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(P) \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \right).$$

В качестве критерия оптимизации целесообразно выбрать минимальные отклонения забойных давлений от среднего значения по $\bar{\Omega}$ (технологические требования). Для решения задачи предложены методы поиска экстремума с иерархическим распараллеливанием вычислений, основанные на принципах оптимальности. Интеграция задач проектирования размещения скважин и управления режимами отбора газа на них позволяет проводить комплексный анализ и оптимизацию разработки месторождения. Использование шестиугольных конечных на самой грубой сетке элементов (вместо традиционных прямоугольных, например [1]) при решении этих задач

обеспечивает равномерное покрытие резервуара месторождений и требуемую эффективность вычислительных методов.

Научный руководитель — к.т.н. Ахметзянов А. В.

Список литературы

- [1] LATIPOV A., ERMOLAEV A. Decomposition of the model of optimal well placement at gas fields // Preprints of the 22nd IFAC World Congress. Yokohama, Japan, July 9–14, 2023. P. 2959–2964.

2.36. Макаров Е. Е. Исследование устойчивости двухслойного течения в горизонтальном канале на основе точного решения

Пусть вязкая несжимаемая жидкость и смесь газа и пара заполняют бесконечный горизонтальный канал с твёрдыми непроницаемыми стенками толщиной l и h , соответственно. Система координат выбрана так, что вертикальная ось Oy противоположно направлена вектору массовых сил $\mathbf{g} = (0, -g)$, а граница раздела, остающаяся недеформируемой, совпадает с осью Ox . Моделирование проводится в рамках модели испарительной конвекции на основе приближения Буссинеска [1].

Определяющая система уравнений допускает решение специального вида, являющееся обобщением решения Остроумова — Бириха на случай термоконцентрационной конвекции, имеющее групповую природу и описывающее двухслойные течения жидкости и газопаровой смеси в бесконечном горизонтальном канале [2, 3].

Решение построено в рамках постановки задачи, учитывающей вклад эффектов Соре и Дюфура в газопаровом слое и ограничивающих его поверхностях (на верхней стенке канала и межфазной поверхности) и предполагающей линейный нагрев верхней и нижней стенки и выполнение условий нулевого потока пара через верхнюю границу канала, замкнутости потока в жидком слое и заданного расхода парогазовой смеси Q в верхнем слое. Решение, построенное при условии замкнутости потока жидкости, обеспечивает наилучшее согласие с условиями экспериментов.

В рамках линейной теории устойчивости выведены уравнения малых возмущений для возмущений произвольного вида и возмущений типа нормальных волн; проведён анализ устойчивости длинноволновых возмущений, получены длинноволновые асимптотики собственных функций. Установлено, что наиболее опасными будут гидродинамические возмущения, для которых получены длинноволновые асимптотики, представляющие собой трансцендентные функции, зависящие от параметров, характеризующих физические свойства рабочих сред.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-11-00243, <https://rscf.ru/project/22-11-00243/>).

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Гончарова О. Н.

Список литературы

- [1] БЕКЕЖАНОВА В. Б., ГОНЧАРОВА О. Н. Задачи испарительной конвекции (обзор) // Прикладная математика и механика. 2018. Т. 82. № 2 (60). С. 219–260.
- [2] ОСТРОУМОВ Г. А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи / М.-Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1952. 286 с.
- [3] БИРИХ Р. В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости // ПМТФ. 2018. № 3. С. 69–72.

2.37. Максимова А.А., Рыжков И.И. Моделирование концентрационной поляризации в установке тангенциальной фильтрации с радиальным течением раствора

Для разделения, очистки и концентрирования растворов широко используются баромембранные процессы: микрофильтрация, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос [1]. 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 [2].

Поляризационные явления наблюдаются сопровождают многие мембранные процессы разделения. Так как падение потока негативно сказывается на технико-экономических показателях мембраны, необходимо принимать меры для устранения причин, 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 [3]. 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 [4].

Целью данной работы является разработка математической модели, описывающей явление концентрационной поляризации в установке тангенциальной фильтрации с радиальным течением раствора.

Построена двумерная математическая модель течения растворителя и растворенного вещества в фильтрационной ячейке с мембраной в виде плоского диска заданного диаметра. Сырьевой поток подается в центр мембраны перпендикулярно к ее поверхности и удаляется через щелевой зазор, приле-

гающий к краю мембраны, которая характеризуется жидкостной проницаемостью и задержанием растворенного компонента (например, соли). Для расчетов используется пакет гидродинамических расчетов Ansys Fluent R21. Рассчитаны зависимости концентрации растворенного компонента вблизи поверхности мембраны от его концентрации в сырьевом потоке, скорости сырьевого потока и скорости потока через мембрану. Показано, что увеличение скорости сырьевого потока уменьшает влияние концентрационной поляризации. Выполнено сравнение результатов между конфигурациями с радиальным и продольным течением раствора относительно мембраны.

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

Список литературы

- [1] MULDER M. Basic principles of membrane technology / Kluwer Academic Publishers, 1999. 512 p.
- [2] ZYDNEY A. L. Stagnant film model for concentration polarization in membrane systems // Journal of Membrane Science. 1997. N. 130. P. 275–281.
- [3] MIRANDA M., CAMPOS 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. N. 182. P. 257–270.
- [4] SABLANI S. S., GOOSENA M. F. A., AL-BELUSHI R., WILF M. Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review // Desalination. 2001. N. 141. P. 269–289.

2.38. Мамазова Д.А. Численное исследование степенной жидкости в трубе со скачком сечения с учетом вязкой диссипации и зависимости эффективной вязкости от температуры

Изучение течения степенной жидкости имеет применение во многих областях, включая нефтегазовую, ракетно-космическую, химическую, пищевую промышленности и металлургию.

В работе численно исследуется неизотермическое, ламинарное, стационарное течение несжимаемой степенной жидкости в цилиндрической трубе с резким изменением поперечного сечения. Задача формулируется в осесимметричной постановке с использованием цилиндрической системы координат. Течение описывается уравнениями в переменных функция тока — вихрь — температура, приведенными к безразмерному виду (уравнение переноса вихря, уравнение Пуассона для функции тока, уравнение энергии). Реологическое поведение жидкой среды описывается модифицированным законом Оствальда — де Ваала, при этом формула для эффективной вязкости зависит от температуры по экспоненциальному закону.

На входной границе заданы профили скорости и температуры, соответствующие одномерному неизотермическому течению рассматриваемой

жидкости [1]. На неподвижной твердой стенке используются условия прилипания и задана нулевая безразмерная температура. На выходе реализуются мягкие граничные условия. Стоит отметить, что вход и выход находятся на достаточном удалении от скачка сечения, чтобы исключить влияние последнего на характер течения во входном и выходном участках трубы. На оси симметрии применяются условия симметрии. Степень расширения трубы определяется отношением радиусов широкой к узкой частям трубы.

Для количественного анализа течения вводятся безразмерные геометрические характеристики структуры потока: длина циркуляционной зоны, длины зон двумерного течения до и после скачка сечения.

Сформулированная задача решается методом установления на основе конечно-разностной схемы переменных направлений [2, 3]. Метод прогонки используется для вычисления значений искомых функций.

Проведен анализ изменения зон двумерного течения в зависимости от числа Пекле, числа Рейнольдса и показателя нелинейности жидкости. Установлено, что увеличение показателя нелинейности приводит к уменьшению длины зоны двумерного течения перед скачком сечения и увеличению длины циркуляционной зоны и длины зоны двумерного течения за скачком сечения, причем более выраженный рост наблюдается при больших значениях числа Пекле. Влияние вязкой диссипации на кинематику течения оценивалось путем сравнения неизотермического течения степенной жидкости с изотермическим течением. Для двух рассматриваемых случаев поведение зон двумерного течения при варьировании показателя нелинейности жидкости оказалось прямо противоположным. Вязкая диссипация способствует более интенсивному прогреву жидкости в узкой части трубы, а увеличение числа Pe обеспечивает рост и смещение прогретой области к выходной границе.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2020-0036).

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Шрагер Г. Р.

Список литературы

- [1] BORZENKO E. I., RYL'TSEVA K. E., SHRAGER G. R. Non-isothermal steady flow of non-Newtonian fluid in an axisymmetric channel // XXI Winter School on Continuous Media Mechanics. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 581. P. 1–9.
- [2] Годунов С. К., Рявенький В. С. Введение в теорию разностных схем / М.: Физматгиз, 1962. 340 с.
- [3] САМАРСКИЙ А. А. Введение в теорию разностных схем / М.: Наука, 1971. 553 с.

2.39. Манцурова С.В., Шварц Н.Л. Движение капле́ль золота по поверхностям Si(011) и Si(311): Монте-Карло моделирование

Капли золота широко используются в качестве катализаторов роста кремниевых нанопроволок по механизму пар—жидкость—кристалл [1]. Экспериментально было обнаружено движение золотых капле́ль при осаждении золота на поверхность кремния с ориентациями (011) и (311) [2]. Капли на таких поверхностях движутся в двух противоположных направлениях [-110] и [1-10].

Целью данной работы является исследование формирования капле́ль Au на поверхностях Si (011) и (311) и анализ критерия выбора определенного направления движения капле́ль на атомарном уровне с помощью Монте-Карло моделирования. Рассмотрено осаждение золота на поверхности кремния с ориентациями (011) и (311) при температуре 800 К и скорости осаждения золота $6.5 \cdot 10^{-3}$ МС/с. Показано, что причиной направленного движения является стремление к достижению равновесной концентрации кремния при осаждении золота и асимметрия ямки травления под каплей. Ямки травления ограничиваются наиболее стабильными фасетками {111}. На поверхности Si(011) ямка травления зеркально симметрична относительно двух плоскостей и имеет удлиненную форму. На поверхности Si(311) пирамидальная ямка травления симметрична относительно одной плоскости. Симметрия ямок травления приводит к равной вероятности движения капле́ль в двух противоположных направлениях. Причинами выбора одного из направлений могут быть либо дефекты, нарушающие зеркальную симметрию, либо изменение смачиваемости одного из краев ямки за счет уменьшения поверхностного натяжения капле́ль в процессе растворения подложки. Разная форма ямок травления под каплями на поверхностях Si(311) и Si(011) приводит к разной скорости движения капле́ль. Показано, что на поверхности с ориентацией (311) скорость движения капле́ль ниже, чем на (011).

Список литературы

- [1] WAGNER R. ET AL. Vapor—liquid—solid mechanism of single crystal growth // Appl. Phys. Lett. 1964. Vol. 4. N. 5. P. 89–90.
- [2] CURIOTTO S. ET AL. Surface-dependent scenarios for dissolution-driven motion of growing droplets // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. N. 1. P. 902.

2.40. Мищенко Е.В., Гуань С. О нахождении решений системы Покровского—Виноградова для нестационарных течений жидкости пуазейлевского типа

Исследуются нестационарные решения системы уравнений, описывающих ЭГД течения несжимаемой полимерной жидкости. За основу берется реологическая модель, которая является модификацией модели Покровского—Виноградова [1]. Принятое

физическое представление о сплошной полимерной среде позволяет описать её основные реологические свойства. Модель Покровского — Виноградова в отличие от других известных моделей позволяет получить ненулевые значения второй разности нормальных напряжений. Реологические свойства, предсказываемые моделью качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными для растворов и расплавов полимеров. Упомянутые достоинства модели Покровского — Виноградова делают исследование по указанной тематике интересными и перспективными.

Рассматриваем специальный случай: нестационарное течение полимерной жидкости пуазейлевского типа. В предположении на компоненты скорости, тензора деформации, давления, потенциала и заряда (обозначения взяты из работы [2])

$$\begin{cases} u = u(t, y), & v \equiv 0, \\ a_{ij} = a_{ij}(t, y), & i, j = 1, 2, \\ P = \mathcal{P}(t, y) - A(t)x, \\ \Phi = \Phi(t, y), & q = q(t, y). \end{cases}$$

для течения полимерной жидкости в плоском канале, система распадается на две задачи. Одной из полученных задач является определение компонент скорости $u(t, y)$ и тензора $\alpha_{ij}(t, y)$:

$$\begin{cases} u_t - (\alpha_{12})_y = A(t), \\ (\alpha_{12})_t - \alpha_2 \cdot u_y + \widetilde{K}_I \cdot \alpha_{12} = 0, \\ (\alpha_{11})_t - 2\alpha_{12} \cdot u_y + \widetilde{K}_I \cdot \alpha_{11} - B = 0, \\ (\alpha_{22})_t + \widetilde{K}_I \cdot \alpha_{22} - B = 0, \\ B = \beta \cdot \text{Re} \cdot \Delta. \end{cases} \quad (1)$$

Другой из полученных задач является начально-краевая задача для нахождения решений потенциала $\Phi(t, y)$ и заряда $q(t, y)$:

$$\begin{cases} q_t - b \cdot \Phi_y \cdot q_y + b \cdot q^2 = 0, \\ \Phi_{yy} = -q, \\ \Phi|_{y=0} = 0, \quad \Phi|_{y=1} = 1, \quad t > 0, \\ q = a \cdot \Phi_y (a > 0) \quad \text{при } y = 1, t > 0, \\ \Phi|_{t=0} = \Phi_0(y), \quad 0 < y < 1, \\ q|_{t=0} = q_0(y), \quad 0 < y < 1. \end{cases} \quad (2)$$

При некоторых упрощающих предположениях получено аналитическое представление для компоненты скорости u из задачи (1). Модифицированным методом бегущего счета получены численные результаты для задачи (2) при различных значениях параметров, входящих в задачу.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Мищенко Е. В.

Список литературы

[1] Алтухов Ю. А., Гусев А. С., Пышнограй Г. В. Введение в мезоскопическую теорию текучести полимерных систем / Барнаул: Изд-во АлтГПА, 2012.

[2] Блохин А. М., Рудометова А. С. Стационарные решения уравнений, описывающих неизотермическую электроконвекцию слабопроводящей несжимаемой полимерной жидкости // Сиб. журн. индустр. мат. 2015. Т. 18. № 1 (61). С. 3–13.

2.41. Мухина С.С. Моделирование фильтрации нефти водным раствором активных реагентов

В работе рассматривается нестационарная модель одномерной двухфазной фильтрации нефти и воды с примесью малоconцентрированных активных реагентов. Данная задача возникает при добыче нефти в трудноизвлекаемых месторождениях, когда необходимы физико-химические управляющие воздействия способные изменять гидродинамику добычи. Для этого водный раствор с поверхностно-активными примесями закачивают в нагнетательную скважину. Далее флюид движется по плоской пористой среде, меняет фильтрационно-емкостные свойства нефти и выталкивает нефть к добывающей скважине. Данный метод является хорошим приближением для случая, когда скважины расположены горизонтально и параллельно друг другу [1].

Задача описывается гиперболической системой нелинейных уравнений в частных производных первого порядка, в которой первое уравнение системы — уравнение Баклея—Левретта, а второе — уравнение баланса массы для активных реагентов [2].

Дифференциально-геометрическими методами [3] математическая модель приводится к симплектическому уравнению Монжа—Ампера, которое с помощью замены переменных в определённых случаях сводится к линейному волновому уравнению. Это даёт возможность построения точного аналитического решения, которое ранее получено не было. Решена задача Коши, произведена визуализация найденных решений в программе символьных вычислений Maple.

Решение актуально для проверки численных и приближённых аналитических методов, а также при подборе оптимальных исходных параметров для повышения добычи нефти.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-21-00390).

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Кушнер А. Г.

Список литературы

[1] Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Под ред. Е. А. Петрова. М.: Недра, 1984. 208 с.
[2] Ентов В. М., Зазовский А. Ф. О вытеснении нефти раствором двух примесей (активной и пассивной) // Механика жидкости и газа. 1982. № 6. С. 74–83.

[3] KUSHNER A. G., LYCHAGIN V. V., RUBTSOV V. N. Contact geometry and nonlinear differential equations (Encyclopedia of Mathematics and Its Applications) / Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. 516 p.

2.42. Найденова К.Е., Сибирякова Т.А. Исследование характеристик тонкого жидкого слоя вблизи образования вертикальных струй в результате удара упругим телом

Рассматривается нестационарная двумерная задача о косом ударе упругой пластиной по тонкому слою жидкости. Данное исследование мотивировано экспериментами по осаждению капель в кольцевом газожидкостном потоке [1]. Задача решается в декартовой системе координат Oxy . Жидкий слой имеет глубину h и не ограничен вдоль оси x . Начальное положение края пластины находится в точке $(0; h)$, затем пластина начинает двигаться в положительном направлении оси x , проникая в слой жидкости на заданную в виде числового массива глубину. Также исходными параметрами задачи являются начальные скорости удара, горизонтальная скорость вытекающей из-под пластины жидкости и координаты точки соприкосновения пластины и жидкости.

Динамика жидкости в следе описывается системой уравнений Навье — Стокса. При решении задачи используются асимптотические методы, неизвестные функции раскладываются в ряд по малому параметру. Ранее уже была решена задача о динамике жидкого слоя без учета гравитации [2] и получены аналитические формулы для горизонтальной и вертикальной скоростей жидкости, высоты свободной поверхности и гидродинамического давления с учетом гравитации [3]. При анализе полученных решений было выявлено, что при определенном наборе начальных данных в тонком слое жидкости могут образовываться вертикальные струи, т. е. участки, на которых толщина жидкого слоя начинает неограниченно расти. Для решения данной проблемы вблизи области возникновения струи вводятся новые локальные переменные. Введение локальных переменных позволяет получить решение, в котором главное приближение и первая поправка имеют одинаковый порядок, а также определить области значения параметров задачи, при которых гравитация имеет весомый вклад в поведение тонкого слоя. Выявлено влияние эффекта гравитации на возникновение струи: в начале следа эффект гравитации уменьшается, а в окрестности области сингулярности гравитационные эффекты могут оказывать большое влияние.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Современные методы гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (номер темы: FZMW-2020-0008).

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

Список литературы

- [1] SHERDANTSEV A. V., HANN D. V., HEWAKANDAMBY B. N., AZZOPARDI B. J. Study of the impacts of droplets deposited from the gas core onto a gas-sheared liquid film // International Journal of Multiphase Flow. 2017. Vol. 88. P. 69–86.
- [2] SHISHMAREV K. A., КНАВАКНРАШЕВА Т. И., КОРОВКИН А. А. Theoretical analysis of time-dependent jetting on the surface of a thin moving liquid layer // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34. N. 3. Art. 032103.
- [3] НАЙДЕНОВА К. Е. Вычисление характеристик струйного течения тонкого жидкого слоя за косым ударом упругим телом с учетом гравитации // XXIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2022. С. 27–28.

2.43. Насырова Д.А. Собственные колебания столба жидкости в горизонтальной скважине с множественным ГРП

В настоящее время при добыче нефти широко применяется технология гидроразрыва пласта (ГРП). В пласте создаются трещины, которые закрепляются пропантантами для предотвращения их смыкания. Трещины, которые возникают в результате применения технологии ГРП, увеличивают площадь, с которой можно извлечь нефть из добывающей скважины или расширяют поверхность закачки жидкости, если это нагнетающая скважина. Применение горизонтальных скважин с множественными трещинами ГРП позволяет повысить эффективность разработки низкопроницаемых пластов [1–3].

В работе изучены собственные колебания жидкости в горизонтальной нефтяной скважине и определяются частотные характеристики этих колебаний в зависимости от параметров трещины ГРП и пласта. Рассмотрены множественные ГРП (множество радиальных трещин, перпендикулярных оси скважины).

Пусть обсаженная горизонтальная скважина длиной l сообщается с пластом посредством N радиальных трещин ГРП, расположенных равномерно вдоль скважины. Тогда число трещин ГРП, приходящееся на единицу длины скважины равно $n = N/l$. Запишем уравнения движения для малых возмущений в скважине:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{2}{a} \rho_0 n d_f u_f(w), \\ \rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{2\sigma}{a}, \end{cases}$$

где

$$\sigma = \mu \int_{-\infty}^t \frac{\partial w / \partial \tau}{\sqrt{\nu(t - \tau)}} d\tau$$

— касательное напряжение в жидкости на поверхности стенки скважины.

Решение этой системы будем искать в виде стоячих волн. В результате при $z = l$ получим:

$$\sin(Kl) = 0,$$

где

$$K^2 = \frac{\omega^2}{C^2} \left(1 + \frac{2}{y}\right) \left(1 + \frac{2nd_f k_f x C^2}{avi\omega} \frac{K_1(xa)}{K_0n(xa)}\right).$$

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 21-11-00207).

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Башмаков Р. А.

Список литературы

- [1] БАШМАКОВ Р. А., НАСЫРОВА Д. А., ШАГАПОВ В. Ш. Собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом, при наличии трещины ГРП // Прикладная математика и механика. 2022. Т. 86. Вып. 1. С.88–104.
- [2] БАШМАКОВ Р. А., НАСЫРОВА Д. А., ШАГАПОВ В. Ш., ХАКИМОВА З. Р. Колебания столба жидкости в открытой скважине и сообщающейся с пластом, подверженным ГРП // Вестник Башкирского университета. 2022. Т. 7. Вып. 4. С. 872–880.
- [3] ШАГАПОВ В. Ш., БАШМАКОВ Р. А., РАФИКОВА Г. Р., МАМАЕВА З. З. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 4. С. 5–14.

2.44. Пекарская Т.А., Сибин А.Н. Моделирование влияния снежного покрова на промерзание и протаивание грунта

Величина снежного покрова (снегозапас) влияет на промерзание поверхностного слоя почв и, следовательно, на его впитывающую способность и определяет соотношение между склоновым и грунтовым стоками. Поэтому моделирование состояния снежного покрова в период снеготаяния имеет важное значение при разработке методов расчетов и прогнозов гидрографов весеннего половодья.

В докладе тающий снег рассматривается как сплошная среда, состоящая из воды, воздуха и льда, составляющего твердый пористый скелет. Фильтрация воды и воздуха в пористом ледовом скелете описывается уравнениями сохранения массы для каждой из фаз с учетом фазовых переходов, уравнениями двухфазной фильтрации и уравнением теплового баланса для трехфазной среды (подробная постановка задачи сделана в работе [1]).

Особенностями рассматриваемой задачи являются: изменяющаяся пористость снега в результате фазового перехода и возможное вырождение на решении уравнения для водонасыщенности [2]. Кроме того, пористость и водонасыщенность должны удовлетворять физическим принципам максимума.

Под слоем снега расположен полностью насыщенный водой грунт. Рассматривается одномерная математическая модель для описания процесса замораживания/протаивания влагонасыщенной породы с учетом влияния остаточной влажности на кинетику фазового перехода [3]. В рамках полученной модели построен конечно-разностный алгоритм и выполнена серия численных экспериментов для одномерной задачи промерзания грунта. Численные эксперименты позволили получить распределения температуры и влажности. Используя экспериментальные данные из литературных источников [4], проведена верификация математической модели.

Работа второго автора выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Современные методы гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (номер темы: FZMW-2020-0008).

Список литературы

- [1] СИБИН А. Н., ПАПИН А. А. Теплоперенос в тающем снеге // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Т. 62. № 1. С. 109–118.
- [2] НЕРСЕОВА З. А. Изменение льдистости грунтов в зависимости от температуры // ДАН СССР. 1950. Т. 75. № 6. С. 845–846.
- [3] ПРОХОРОВ А. Е., ЖЕЛНИН М. С., КОСТИНА А. А., ПЛЕХОВ О. А. Исследование особенностей неравновесного фазового перехода во флюидонасыщенном грунте // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. № 4 (42). С. 31–37.
- [4] BRONFENBRENER L. Non-equilibrium crystallization in porous media: Numerical solution // Cold Region Science and Technology. 2013. Vol. 85. P. 137–149.

2.45. Песня Е.А. Расчет динамических процессов в композитах с учетом внутренней структуры сеточно-характеристическим методом

В работе рассматривается задача моделирования ультразвуковых колебаний в композитном материале с явным выделением границ неоднородностей. Для решения этой задачи используется сеточно-характеристический метод [1] и наложенные сетки [2] для представления структуры композита. Предложенный подход позволяет повысить точность моделирования упругих волновых полей и определения упругих постоянных по сравнению с упрощенными моделями [3].

Актуальность данной работы обусловлена важностью областей определения прочностных характеристик материала и контроля его качества (дефектоскопии) [4] в связи с увеличением использования композитных материалов. Научная новизна работы заключается в разработке генераторов расчетных наложенных сеток и адаптации сеточно-характеристического метода для учета сложной структуры среды, а также в получении двумерных

и трехмерных волновых полей с помощью описанных методов.

Результаты работы представляют собой набор инструментов для анализа волновых полей и моделирования композитных материалов с высокой точностью и учетом их структуры, что может быть полезно для разработки новых материалов, оптимизации существующих композитов и разработки новых методов исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-11-00035, <https://rscf.ru/project/23-11-00035/>).

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

Список литературы

- [1] ПЕТРОВ И. Б. Сеточно-характеристические методы. 55 лет разработки и решения сложных динамических задач // Computational Mathematics and Information Technologies. 2023. Т. 6. № 1. С. 6–21.
- [2] PESNYA E., FAVORSKAYA A., KNOKHLOV N. Grid-characteristic method on Chimera meshes using a single background grid with varying elastic properties // Procedia Computer Science. 2022. Vol. 207. P. 1398–1407.
- [3] MAIO L., FROMME P. On ultrasound propagation in composite laminates: advances in numerical simulation // Progress in Aerospace Sciences. 2022. Vol. 129. Art. 100791.
- [4] МУРАШОВ В. В., ГЕНЕРАЛОВ А. С. Контроль изделий из ПКМ и многослойных клееных конструкций ультразвуковыми методами отражения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 1 (46). С. 69–74.

2.46. Прокопчук В.Е. Сравнительный анализ численных методов решения уравнения переноса в дивергентной форме

Уравнение переноса в дивергентной форме, является одним из фундаментальных уравнений в физике. Это уравнение входит в систему уравнений Навье — Стокса, которая описывает движение жидкости и газа. Однако построить аналитическое решение данной системы возможно только в нескольких простых случаях. Поэтому разработка и применение эффективных численных методов является актуальной современной задачей.

Для построения численного решения уравнения переноса мы выделим три численных метода.

Метод конечных разностей является одним из самых популярных методов. Его суть заключается в аппроксимации каждой частной производной с помощью конечных разностей. Преимущества метода конечных разностей включают высокую универсальность, простоту программной реализации и возможность применения к широкому классу дифференциальных уравнений. Однако, имеются и недостатки, связанные с ограничением шага по времени.

Эйлера-лагранжевый метод основан на переходе от дифференциального уравнения к интегрально-

му уравнению. Аппроксимация этим методом раскладывается на три основных этапа: аппроксимация интеграла на верхнем слое по времени, построение траекторий с верхнего слоя на нижний слой и приближенное вычисление интеграла на нижнем слое по времени. Главным достоинством данного подхода является возможность использовать значительной большой шаг по времени, чем шаг доступный методу конечных разностей.

Лагранжево-эйлеровый метод также основан на переходе к интегральному уравнению. Отличие заключается в использовании подвижной пространственной сетки. Так, положения узлов сетки определяются траекториями, выпущенными из границ окрестностей каждого узла на предыдущем слое по времени. Одним из главных достоинств этого метода является зависимость значения искомой функции в каждом узле подвижной сетки только от одного значения численного решения, найденного на предыдущем слое по времени.

В работе представлены результаты численных экспериментов, сравнение эффективности, достоинства и недостатки изложенных методов.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Вяткин А. В.

2.47. Сибирякова Т.А., Найденова К.Е. Решение задачи о колебаниях подводного тела в замороженном канале

Исследована трехмерная задача о гидроупругих волнах, создаваемых подводным телом, в замороженном канале прямоугольного сечения конечной глубины и конечной ширины. Подводное тело моделируется трехмерным диполем, которое последовательно осциллирует вдоль главных осей. Прогиб ледового покрова описывается в рамках линейной теории упругости [1]. Задача в изначальной постановке сформулирована с учетом нелинейных кинематического и динамического условий. Лед моделируется тонкой пороупругой пластиной с изменяющейся толщиной поперек канала и постоянной толщиной вдоль канала, а края ее приморожены к стенкам. Толщина ледового покрова изменяется линейно симметрично относительно центральной линии канала. Жидкость под пластиной невязкая и несжимаемая. Течение жидкости, вызванное прогибом пластины, является потенциальным. Введением малых параметров проведен асимптотический анализ уравнений в безразмерной форме и определены случаи, когда линейная теория остается корректной. Определены прогибы и распределение деформаций в ледовом покрове. Задача решается с использованием преобразования Фурье вдоль канала и введения нормальных мод колебаний упругой балки с переменной толщиной. Исследована зависимость прогибов и удлинений от параметра изменения толщины ледового покрова, а также изучено влияние положения и размера тела в сочетании с переменной толщиной льда на прогибы льда и макси-

мальные деформации. Получено, что деформации в ледовом покрове сильно зависят от положения диполя в канале, а также от параметра изменения толщины льда и параметра пористости.

Проведено сравнение с результатами для ледового покрова постоянной толщиной [2]. Периодические гидроупругие волны, распространяющиеся вдоль канала с линейно изменяющейся толщиной, исследованы в [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-71-01096).

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

Список литературы

- [1] SQUIRE V., HOSKING R., KERR A., LANGHORNE P. Moving loads on ice / Kluwer Academic Publishers, 1996. 230 p.
- [2] SHISHMAREV K. A., КНАВАКНРАШЕВА Т. И., КОРОВКИН А. А. Ice response to an underwater body moving in a frozen channel // Applied Ocean Research. 2019. Vol. 91. N. 101877.
- [3] SHISHMAREV K. A., ZAVYALOVA K. N., ВАТУАЕВ Е. А., КНАВАКНРАШЕВА Т. И. Hydroelastic Waves in a Frozen Channel with Non-Uniform Thickness of Ice // Water. 2022. Vol. 14. N. 281.

2.48. Сизаско В. Взаимодействие ударной волны с газовым композитом

Изучение ударно-волновых процессов внесло значительный вклад в научно-технический прогресс [1, 2], эти процессы нашли широкое практическое применение при сверхзвуковом движении летательных аппаратов, в двигательных установках и даже в современной медицине. Фронт *ударной волны* (УВ) или *скачка уплотнения* (СУ) при больших числах Рейнольдса представляет собой тонкое образование. Набегающий поток, пронизывающий его, претерпевает скачкообразное изменение газодинамических параметров, что не исключает их непрерывность внутри самого фронта. Малая толщина такого образования дает возможность идеализировать фронт УВ или СУ математической поверхностью (выделение или схематизация УВ, СУ), представив фронт в виде *поверхности разрыва* [2, 3]. При этом газодинамические параметры, и даже их производные, по обе стороны такого разрыва связываются теми или иными соотношениями разного порядка: точными, либо асимптотически в случае использования модели вязкого теплопроводного газа [3, 4]. Такие соотношения используются в *дискретно-аналитическом подходе* (ДАП), с помощью которого, в частности, удалось получить точные решения для задачи проникновения СУ в сдвиговый слой вязкого теплопроводного газа при больших числах Рейнольдса. Среди полученных автором ДАП решений наиболее интересными оказались такие, когда действие вязких сил и механизма теплопроводности сочетается определённым

образом с действием краевого эффекта [3, 4] и вносимыми в невозмущённый поток возмущениями.

В настоящем исследовании делается попытка получения подобных решений, снижающих первоначальную интенсивность УВ, в стратифицированной гетерогенной газовой смеси двух и более газов со строгими первоначальными границами раздела между ними (перегородками – разрушаемыми мембранами газового композита) с учётом фактора турбулентности. Ударная волна, проходящая через такую *контактную поверхность* (разрыв; давление и нормальная компонента скорости непрерывны), распадается на несколько разрывов, которые с течением времени будут отходить друг от друга. Вместе с тем, это не просто хорошо известная *задача о распаде произвольного разрыва*, поскольку во множественных взаимодействиях активно задействован механизм турбулентности.

В докладе рассматривается нестационарное взаимодействие одиночной *ударной волны* с изначально стратифицированной смесью газов. Контролируются перепады давления, рост энтропии и др. параметры процесса. Задача решалась в плоской постановке, на твёрдых поверхностях ставились условия скольжения, чтобы исключить на данном этапе исследований пограничные слои.

Численный эксперимент проводился с использованием пакета AnsysFluent и программного комплекса MatLab. В качестве рабочих газов были выбраны легкий гелий и тяжелый Freon-12 (CCl₂F₂), вне рабочей зоны — воздух. Расчеты выполнялись как в невязкой постановке (для сравнения), так и с использованием модели турбулентности Transition SST $k-\omega$, которая хорошо себя зарекомендовала в расчетах ударных течений.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Адрианов А. Л.

Список литературы

- [1] ГРИФФИТС У. Современная гидродинамика. Успехи и проблемы / Под ред. Дж. Бэтчелора и Г. Моффата. М.: Мир, 1984. 501 с.
- [2] ЧЕРНЫЙ Г. Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью / М.: Гос. изд-во физ.-матем. лит., 1959. 220 с.
- [3] АДРИАНОВ А. Л. Математическое моделирование ударных течений идеального и вязкого теплопроводного газа на основе дискретно-аналитического подхода / Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2006. 216 с.
- [4] ADRIANOV A. L. Influence of the boundary effect, viscosity factor and heat conductivity mechanism on the shock front evolution // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1230. N. 1. P 9.

2.49. Сжиба В.С. Численное исследование взаимодействия длинных поверхностных волн с полупогруженным телом, расположенным вблизи вертикальной стенки

Актуальность исследований связана с возможным воздействием волн типа цунами на прибрежные сооружения в форме неподвижных полупогруженных в воду конструкций. Если такое тело находится вблизи причальной стенки, то может возникнуть резонанс волн [1] — многократное увеличение заплеска волн на стенки сооружения и силовых нагрузок на него по сравнению со случаем расположения сооружения вдали от берега. Для коротких волн, набегающих на сооружение, явление резонанса достаточно хорошо изучено как аналитическими и численными методами, так и в лабораторных экспериментах [2–4]. Цель настоящей работы состояла в численном исследовании влияния вертикальной стенки, установленной за полупогруженным телом, на характеристики взаимодействия с ним волны типа цунами, головная часть которой представлена длинной одиночной волной. Численные эксперименты проводились в рамках двумерной модели потенциальных течений жидкости при различных значениях определяющих параметров: амплитуды и длины одиночной волны, заглубления и длины полупогруженного тела прямоугольной формы, а также ширины зазора между тыльной гранью тела и вертикальной стенкой. Показано, что:

- при некоторых сочетаниях значений определяющих параметров резонансное явление возникает и для длинных набегающих волн;
- заплески на тыльную грань тела всегда превосходят заплески на лицевую грань, в то время как для тела, находящегося вдали от стенки справедливо обратное;
- максимум горизонтальной силы, действующей на вертикальную стенку, в наибольшей степени зависит от амплитуды набегающей волны и практически не зависит от длины тела и его заглубления;
- существует критическое значение ширины зазора, при котором высота уровня жидкости в зазоре максимальна;
- заплески на тыльную грань уменьшаются с увеличением зазора между телом и стенкой, как и в случае наката коротких периодических волн;
- максимум вертикальной силы монотонно уменьшается с увеличением зазора.

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

Список литературы

[1] ZHENG S., ZHANG Y. Wave diffraction from a truncated cylinder in front of a vertical wall // *Ocean Engineering*. 2015 Vol. 104. P. 329–343.

[2] TAN L., LU L., LIU Y. ET AL. Dissipative effects of resonant waves in confined space formed by floating box in front of vertical wall // *Proc. Intern. Conf. «Eleventh Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium»*. Shanghai, China. 2014. P. 250–255.

[3] FENG X., BAI W., CHEN X.B. ET AL. Numerical investigation of viscous effects on the gap resonance between side-by-side barges // *Ocean Engineering*. 2017. Vol. 145. P. 44–58.

[4] LI X., XU L., YANG J. Study of fluid resonance between two side-by-side floating barges // *J. of Hydrodynamics*. Ser. B. 2016. Vol. 28. P. 767–777.

2.50. Сорокина А.А., Булавская А.А., Бушмина Е.А., Григорьева А.А., Милойчикова И.А., Сабуров В.О., Стучебров С.Г. Методы численного моделирования для разработки медицинских болусов, изготавливаемых с помощью трехмерной печати

Моделирование физических процессов является одной из основных задач, решаемых при помощи математического моделирования. К примеру, моделирование процесса взаимодействия излучения с веществом не имеет аналитического решения, так как основные законы имеют статистический характер. Вследствие этого, для решения данной задачи необходимо использовать метод Монте-Карло, который позволяет с высокой точностью прогнозировать случайные события. Данный метод считается эталоном для моделирования процессов переноса ионизирующего излучения, особенно электронов высоких энергий, в веществе [1].

С помощью метода Монте-Карло могут быть проведены численные эксперименты по разработке и верификации новых подходов к проведению лучевой терапии с использованием устройств формирующих поля облучения. Особенно это становится актуальным при создании медицинских болусов индивидуально для каждого пациента. Болус – это специальное устройство, которое размещается непосредственно на коже и может иметь различную форму и толщину в зависимости от требуемого эффекта с учетом индивидуальных особенностей пациента. Цель использования болуса состоит в том, чтобы обеспечить равномерное распределение дозы излучения в области интереса [2].

В данной работе было предложено изготавливать болус методом трехмерной печати, так как такой подход позволяет создавать объекты, сокращая время и затраты на их создание. В качестве материала было предложено использовать модифицированный металлической примесью пластик, позволяющий создавать изделия меньшего объема. Для оценки применимости предложенного подхода была проведена серия численных и экспериментальных исследований по анализу глубинных распределений медицинского пучка электронов в тестовых образцах болусов, изготовленных методом трехмерной печати

из пластиков с примесью меди разной концентрации.

В качестве источника излучения был выбран медицинский линейный ускоритель электронов Novac 11 [3]. Численное моделирование проводилось с использованием инструментария Geant4 [4] методом Монте-Карло. В соответствии с экспериментальной геометрией облучения пластиковых образцов были созданы численные модели источника облучения и материалов болусов. Были получены расчетные и экспериментальные глубинные распределения дозы электронного пучка с энергий 6 МэВ в образцах болусов напечатанных из модифицированных пластиков. Показано, что разработанные модели хорошо описывают экспериментальные данные. Таким образом, полученные результаты численного моделирования лягут в основу разработки и создания индивидуальных болусов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-79-10014-П).

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Стучевцов С. Г.

Список литературы

- [1] BOLCH W. The Monte Carlo Method in Nuclear Medicine // Journal of Nuclear Medicine. 2010. P. 337–339.
- [2] ДЕНЬГИНА Н. В., РОДИОНОВ В. В Основы лучевой терапии злокачественных новообразований / Ульяновск: УлГУ, 2013. 87 с.
- [3] Novac11. [Электронный ресурс]. URL: <https://labmedservice.com/product/novac-11> (дата обращения 01.09.2023).
- [4] Geant4. [Электронный ресурс]. URL: <https://geant4.web.cern.ch> (дата обращения 01.09.2023).

2.51. Стрелкова С.Е. О построении явно задаваемых адаптивных сеток для исследования деталей численных решений уравнений Навье — Стокса

Для численного моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости чаще всего применяются равномерные сетки (см., например, работы [1, 2]), хотя в типичных задачах зоны спокойного течения соседствуют с пограничными слоями, в которых градиенты решения существенны. Поэтому представляется целесообразным применять адаптивные сетки, сгенерированные, например, впервые предложенным Бахваловым [3] методом явного задания узлов на основе координатных преобразований, но из-за недостатка априорной информации это потребует многочисленных пробных расчетов для тщательной настройки параметров преобразования.

В данной работе на примере популярной задачи о течении вязкой несжимаемой жидкости в каверне с движущейся крышкой ставится вопрос о характере поведения слоев в решении. Для этого проводились расчеты на подробной равномерной сетке

по разностной схеме второго порядка без аппроксимационной вязкости с целью получить надежные профили решений для набора чисел Рейнольдса. По ним с помощью известных координатных преобразований подбиралась сетка, удовлетворяющая естественным критериям: достаточность доли числа узлов в слое, равномерность модуля приращения решения на шаге, пропорциональное уменьшение его нормы при удвоении числа шагов сетки и др.

В ходе исследования была замечена инвариантность параметров координатных преобразований относительно изменения числа Рейнольдса, поэтому возникла мысль усовершенствовать формулы генерации сеток, сделав постоянными их параметры зависимыми от вязкости. Результаты численных исследований, полученные на адаптивных сетках, сравнивались с данными других авторов, в частности [1, 2]. Удовлетворительное совпадение деталей течения позволило сделать вывод об эффективности применения построенных адаптивных сеток для численного решения уравнений Навье — Стокса.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Паасонен В. И.

Список литературы

- [1] ИСАЕВ В. И., ШАПЕЕВ В. П. Варианты метода коллокаций и наименьших квадратов повышенной точности для численного решения уравнений Навье — Стокса // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2010. Т. 50. № 10. С. 1758–1770.
- [2] BRUNEAU CH.-H., SAAD M. The 2D lid-driven cavity problem revisited // Computers & Fluids. 2006. Vol. 35. N. 3. P. 326–348.
- [3] БАХВАЛОВ Н. И. К оптимизации методов решения краевых задач при наличии пограничного слоя // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1969. Т. 9. № 4. С. 841–859.

2.52. Сухинина К.С. Численное решение задач упругого деформирования с нелокальными операторами

В данной работе была поставлена задача численно решить дифференциальные уравнения, описывающие изгибные колебания стержня с закреплёнными концами. Каждое из них представляет собой начально-краевую дифференциальную задачу, которую сложно решать аналитически. В докторской диссертации Веденеева В.В. «Математическое моделирование нелокальных процессов в упругих средах с различной микроструктурой» показано, что использование модели нелокальной упругости позволяет более точно рассчитывать деформации. Предсказывать переход от линейной к нелинейной зависимости амплитуды и частоты колебаний. Кроме того, автору удалось внедрить построенные решения в реальное производство. [1]

Были рассмотрены две задачи упругого деформирования: вспомогательная и основная. В качестве вспомогательной были взяты уравнения Бернштейна из [2], а основная задача поставлена в статье [3].

Все уравнения содержат нелокальный член. В статье [2] аналитически исследуются функциональное уравнение и соответствующая начально-краевая задача, которые являются простейшей формой основной задачи этой работы. Основное уравнение данной работы исследуется в статье [3].

Для обеих задач построены разностные схемы, аппроксимированы дифференциальные операторы первого, второго, четвертого порядков и интеграл, программа написана на языке Python. Численное решение получено при использовании метода обычной скалярной прогонки в первом случае, и модифицированного метода прогонки для пятидиагональных матриц во втором. Результаты представлены в виде графиков и проанализированы.

Построенные разностные схемы можно будет модифицировать и использовать при численном решении задачи, которая описывает движение пластины с закреплёнными концами. То есть, расширить задачу на двумерное пространство.

Решения задач можно применять при проектировании мостов, зданий, самолётов, автомобилей и других инженерных конструкций, содержащих стержневые элементы. Меняя входные данные можно описывать стержни с различными параметрами, а затем изучать их поведение при деформациях.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Аннин Б. Д.

Список литературы

- [1] Веденеев В. В. Панельный флаттер при низких сверхзвуковых скоростях: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, 2012. 31 с.
- [2] БЕРНШТЕЙН С. Н. Об одном классе функциональных уравнений с частными производными // Известия Российской академии наук. Серия математическая. 1940. Т. 4. № 1. С. 17–26.
- [3] Аннин Б. Д., Хлуднев А. М. Существование и единственность решения задач о нелинейных колебаниях стержня и пластинки // Механика деформируемых тел и конструкций (к 60-летию акад. Работнова Ю.Н.) / М.: Машиностроение. 1975. С. 39–43.

2.53. Титова А.В. Особенности численного исследования динамики пневмогидравлических амортизаторов

Наиболее передовыми подходами к моделированию процессов в пневмогидравлических системах являются подходы, основанные на решении уравнений Навье—Стокса численными методами. При моделировании течения рабочей жидкости в ПГА в современных программных пакетах подвижностью поршня часто пренебрегают для уменьшения вычислительных затрат [1]. Однако, чтобы в полной мере проанализировать нестационарное нагружение рабочего органа ПГА, необходимо рассматривать сопряжённую задачу его движения при взаимодействии с потоком среды во внутренней полости устройства.

Полноценное моделирование работы ПГА требует построения расчетных схем с использованием подвижной сетки. Наиболее приспособленным для работы с подобными сложными расчетными схемами является алгоритм расчета поля течения SIMPLE (и его дальнейшие модификации) [2].

Расчет режима течения проводился при следующих параметрах: ход поршня ПГА 0.04 м; диаметр поршня 0.075 м; диаметр дроссельного отверстия 0.003 м; начальная скорость поршня 0.01 м/с; рабочая жидкость — минеральное масло МГЕ-10А.

В результате расчета были получены картины нестационарного течения в виде распределения продольной составляющей скорости на оси ПГА, а также в виде полей распределения скоростей и давлений по всей расчетной области.

Результатами установлено, что вблизи дроссельного отверстия струйное течение эволюционирует, порождая вихревые структуры в проточной части ПГА. Обнаруженные струйные эффекты и вихревые течения могут возникать и в реальном устройстве, приводя к изменениям распределения давления по рабочей поверхности корпуса а также к возникновению дисбаланса радиальной составляющей гидродинамических сил.

Проделанная работа позволяет сделать вывод, что разработанный вычислительный код для моделирования течений рабочей жидкости в органах ПГА, может быть использован в качестве альтернативы коммерческим пакетам программ вычислительной гидрогазодинамики (CFD) для расчета режимов течения в пневмогидравлических агрегатах.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Карпов А. И.

Список литературы

- [1] ЛЕЕ К. N. Numerical modeling for the hydraulic performance prediction of automotive monotube dampers // Vehicle System Dynamics. 1997. Vol. 10. N. 28. P. 25–39.
- [2] ПАТАНКАР С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

2.54. Тукмакова Н.А., Тукмаков А.Л., Харьков В.В., Ахунов А.А. Модель формирования защитной плёнки в окрестности целевого канала при конвективно-плёночном охлаждении пластины

Коэффициент полезного действия газотурбинных двигателей зависит от температуры газа на входе в турбину, и чем выше температура газа, тем выше эффективность работы газотурбинного двигателя. С увеличением температуры газа на входе в турбину повышается необходимость защиты элементов турбины от высокотемпературных потоков. В современных конструкциях турбин высокого давления широко применяется способ плёночного охлаждения рабочих поверхностей, при котором охлаждающий воздух, поступающий через отверстия в стен-

ке лопатки на внешнюю поверхность, обтекает её на некотором участке, пока не будет размыт основным потоком газа. При этом вдув охладителя, производимый через отверстия, создаёт теплозащитный слой на внешней поверхности лопатки, который защищает её от перегрева потоком горячего газа.

В работе рассматривается модель конвективно-плёночного охлаждения плоской пластины, моделирующей лопатку турбины. Актуальность работы связана с разработкой расчётных моделей конвективно-плёночного охлаждения поверхности и возможностью сравнения численных и физических экспериментов.

Динамика газа описывалась с помощью осреднённой по Рейнольдсу системы уравнений движения вязкого сжимаемого теплопроводного газа [1]. Система уравнений решалась явным методом Мак-Кормака с расщеплением пространственного оператора по направлениям и со схемой нелинейной коррекции, сглаживающей нефизические высокочастотные осцилляции решения. Модель турбулентности Спаларта — Аллмараса [2] применялась совместно со скоростной пристеночной функцией. Для моделирования теплового пограничного слоя и определения температуры поверхности пластины применялись скоростная и тепловая пристеночные функции [3, 4], позволяющие разместить первый пристеночный узел газодинамической сетки в логарифмической зоне скоростного пограничного слоя при безразмерном параметре $y^+ > 11.7$ (y^+ — расстояние между пристеночным узлом и стенкой). Блочноструктурированная конечно-разностная сетка строилась путём объединения сеточных блоков области течения газа. Внутри каждого блока для построения сетки применялся метод Томпсона. Сетки смежных блоков, в том числе твердотельные, предназначенные для решения задачи теплопроводности, строились конформные, с совпадающими на границах блоков узлами.

Таким образом, была построена модель конвективно-плёночного охлаждения плоской пластины, позволяющая произвести расчёты тепловых и скоростных полей газа, а также других термо- и газодинамических функций потока при формировании конвективно-плёночной защиты плоской пластины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-19-00207).

Список литературы

- [1] ТУКМАКОВ А. Л., ХАРЬКОВ В. В., АХУНОВ А. А. и др. Модель формирования защитной пленки в окрестности щелевого канала при конвективно-плёночном охлаждении пластины // Математическое моделирование. 2023. Т. 35. № 7. С. 3–18.
 - [2] СОЛОМАТИН Р. С., СЕМЕНОВ И. В., МЕНЬШОВ И. С. К расчету турбулентных течений на основе модели Спаларта — Аллмараса с применением LU—SGS—GMRES алгоритма // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 119. С. 1–30.
 - [3] SPALDING D. A single formula for the «Law of the Wall» // J. of Applied Mechanics. 1961. Vol. 28. N. 3. P. 455–458.
 - [4] ЕФРЕМОВ В. Р., КУРЬЛИН В. В., КОЗЕЛКОВ А. С. и др. Использование пристеночных функций для моделирования турбулентного теплового пограничного слоя // ЖВМ и МФ. 2019. Т. 59. № 6. С. 1037–1046.
- 2.55. Уфимцев К.П. Геометрически нелинейное моделирование неупругого поведения композитных материалов на основе редукции модели**
- Метод FEM², также известный как многоуровневый подход к моделированию методом конечных элементов [1], применяется для вычислительной гомогенизации. FEM² учитывает микроструктурные свойства анализируемых композитных материалов, поскольку микроструктура явно определяется представительным объёмным элементом (RVE). Когда в постановке задачи задействованы геометрические и физические нелинейности применение FEM² становится вычислительно затратным, поскольку в каждой точке Гаусса требуется полномасштабное КЭ моделирование дискретизированного RVE. Частичное решение этой проблемы предложено в [2], основанное на введении упрощённых статистически подобных RVE. В докладе предлагается более эффективное решение с использованием редукции модели. Для заданного дискретизированного RVE создается эрзац-модель (ЭМ), имитирующая механические свойства RVE для произвольных непропорциональных нагрузок. Отличительной особенностью ЭМ является крайне малое число степеней свободы. В работе предложены алгоритмы автоматической калибровки и проверки ЭМ. Кроме того, мы оцениваем работоспособность ЭМ с точки зрения вязкоупругой композитной модели, основанной на подходе Simo & Miehe [3,4]. Мы показываем, что некоторые композиты могут быть смоделированы с хорошей точностью при 5-10 степенях свободы, что ускоряет вычисления на несколько порядков.
- Научный руководитель — д.ф.-м.н. Шутов А. В.*

Список литературы

- [1] MIEHE C., SCHOTTE J., SCHRÖDER J. Computational micro-macro transitions and overall moduli in the analysis of polycrystals at large strains // Comp. Mater. Sci. 2019. Vol. 16. P. 372–382.
- [2] SCHRÖDER J., BALZANI D., BRANDTS D. Approximation of random microstructures by periodic statistically similar representative volume elements based on lineal-path functions // Arch. Appl. Mech. 2011. Vol. 81. P. 975–997.
- [3] SHUTOV A. V., LANDGRAF R., IHLEMANN J. An explicit solution for implicit time stepping in multiplicative finite strain viscoelasticity // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 2013. Vol. 256. P. 213–225.

[4] Shutov A. V. Efficient time stepping for the multiplicative Maxwell fluid including the Mooney–Rivlin hyperelasticity // *Int. J. Num. Meth. Engng.* 2018. Vol. 113. N. 12. P. 1851–1869.

2.56. Цгоев Ч.А. Реакционно-диффузионная модель инфаркта миокарда

Цепочка событий, приводящих к тяжелым повреждениям сердечной мышцы при ишемических инфарктах миокарда, установлена в клинических исследованиях и воспроизводится в лабораторных условиях. Даже кратковременные сбои в системе коронарного кровоснабжения приводят к истощению запасов кислорода в кардиомиоцитах (основных клетках миокарда, выполняющих сократительную функцию). Вследствие этого возникает локализованный очаг необратимого некротического повреждения миокарда, внутри которого и в его окрестности разворачивается, с одной стороны — каскад патологических процессов, связанных с накоплением токсических продуктов обмена, а с другой — восстановительная ответная реакция организма на повреждение, центральным звеном которой является активация иммунного ответа в виде асептического воспаления. Наиболее важными факторами и биомаркерами воспаления считаются клетки иммунной системы, в первую очередь — лейкоциты, а также медиаторы воспаления — цитокины (среди них интерлейкины IL-1, IL-10, хемокин фактор некроза опухолей TNF- α).

Для описания этого процесса в рамках единой биологической и математической идеализации биохимических процессов предложены локальная и пространственно неоднородная математические модели, исследованы некоторые свойства решений этих задач и даны их биологические интерпретации, основанные на сопоставлении с экспериментальными данными [1]. При калибровке моделей в качестве эталонного процесса рассматривался острый инфаркт в левом желудочке сердца мыши. Конечно-разностный алгоритм численного решения задач основан на методе типа предиктор-корректор второго порядка с A-устойчивым методом Адамса в качестве корректора, классической неявной схеме расщепления по пространственным направлениям и идее метода Зейделя. Алгоритм обеспечивает численное решение задач с порядком точности, весьма близким к теоретическому.

В рамках принятых моделей проанализирован характер пространственно-временного распространения веществ (клеточных популяций и медиаторов воспаления) и формирование нелинейных динамических структур в используемой реакционно-диффузионной системе уравнений при отсутствии конвективных слагаемых. Исследован типичный сценарий развития воспаления в крупном очаге повреждения, характеризующийся благоприятным исходом инфаркта. Проанализированы базовые меха-

низмы воспалительной реакции, выполнена оценка роли основных медиаторов воспаления [2].

Изучен механизм поляризации макрофагов и его роль в «типичном» сценарии развития крупноочагового инфаркта с относительно благоприятным исходом. Вычислительный эксперимент, базирующийся на известных экспериментальных данных о развитии инфаркта в левом желудочке сердца мыши, сфокусирован на двух взаимосвязанных направлениях — на общей проблеме изучения закономерностей функционирования механизма поляризации макрофагов и на анализе терапевтического потенциала гипотетических стратегий управления макрофагами. Показано, что M1/M2 поляризация макрофагов представляет собой аддитивный эффект функционирования, как минимум, двух механизмов — цитокин-зависимого механизма активации и перепрограммирования активированных макрофагов. Первый из них является решающим для инициации и формирования воспалительного ответа, обеспечивающего очищение зоны повреждения от продуктов распада, а второй во многом определяет дальнейший сценарий развития инфаркта, сдерживая избыточную воспалительную реакцию при инфаркте.

Проанализированы возможные варианты управления поляризацией макрофагов с одной, двумя и четырьмя мишенями, и определен континуум наиболее успешных терапевтических стратегий. Показано, что терапия, составной частью которой является управление перепрограммированием активных макрофагов, является орган-сберегающей, при этом терапевтический эффект обеспечивается за счет благоприятного динамического соотношения пулов про- и противовоспалительных макрофагов во время острой фазы воспаления. Наибольшую эффективность продемонстрировала комбинированная стратегия, сочетающая в себе одновременно управление цитокин-зависимой активацией макрофагов и их перепрограммированием.

Результаты моделирования демонстрируют вариативность возможных терапевтических воздействий на макрофаги, что создает основу для выработки эффективной стратегии управления поляризацией макрофагов в лабораторных условиях, в том числе и для адаптации оптимального выбора «терапевтического окна» к индивидуальным условиям течения инфаркта. Результаты моделирования качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ФИЦ ИВТ.

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

Список литературы

[1] Воропаева О. Ф., Цгоев Ч. А. Численное моделирование инфаркта миокарда // *Математическая био-*

логия и биоинформатика. 2023. Т. 18. № 1. С. 49–71.
[2] 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.

2.57. Чусовитина А.И. Математическая модель замкнутой микроэкосистемы

Замкнутой экологической системой называется система, которая не зависит от обмена какими-либо веществами с окружающей средой и предусматривает механизмы воспроизводства питательных веществ и утилизации отходов жизнедеятельности. Предварительное математическое моделирование замкнутой экосистемы позволяет на этапе проектирования спрогнозировать поведение системы и рассчитать соотношения концентраций веществ, необходимых для ее нормального функционирования.

В ходе работы была построена модель замкнутой микроэкосистемы, включающая микроводоросль рода *Chlorella* в роли продуцента и бактерию рода *Pseudomonas* в роли консумента и редуцента. Круговорот вещества был рассмотрен для углерода и азота. Основой для построения данной модели служат экспериментальные данные, которые были получены в результате экспериментов, проводимых в Институте физики им. Л. В. Киренского под руководством Б. Г. Коврова. Некоторые из результатов описаны в работах [1–3].

Для модели были выдвинуты следующие предположения:

- 1) скорость роста популяций ограничивается по принципу лимитирующего фактора Либиха [4], т. е. лимитирующим является вещество, концентрация которого в системе минимальна в каждый конкретный момент времени;
- 2) питательные вещества поглощаются независимо, т. е. скорость поглощения углерода не зависит от скорости поглощения азота;
- 3) поглощенные *Pseudomonas* биологические соединения мгновенно минерализуются.

На основе описанных предположений была получена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая поведение системы в зависимости от заданных параметров и начальных концентраций питательных веществ в системе. Модель также учитывает поведение системы при нехватке и переизбытке питательных веществ.

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

Список литературы

[1] Ковров Б. Г. Искусственные микроэкосистемы с замкнутым круговоротом веществ как модель биосферы / Биофизика клеточных популяций и надорганизменных систем: сборник научных трудов. Новосибирск: Наука, Сибирское Отделение, 1992. С. 62–70.

[2] Фиштейн Г. Н. Экспериментальные замкнутые экосистемы на основе одноклеточных организмов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Тарту: Тартуский государственный университет, 1983. 194 с.

[3] Губанов В. Г. Биотический круговорот и взаимодействие трофических звеньев в искусственных и естественных биосистемах: дис. на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук. Красноярск: Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, 2004. 399 с.

[4] Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование / Пер. с франц. О. Н. Бондаренко, под ред. Ю. М. Свирижева. М.: Наука, 1976. 286 с.

2.58. Шарова А.В. Численный сравнительный анализ спектров систем и уравнений

С XIX века актуальной остается тема гидродинамической устойчивости. Потеря устойчивости, с точки зрения математики, начального ламинарного течения в вязких несжимаемых жидкостях, движение которых описывают уравнения Навье — Стокса, связано с неустойчивостью решения системы данных дифференциальных уравнений в частных производных. Многолетние исследования показали, что только численное решение задач устойчивости течений вязкой жидкости является эффективным, при этом способ дискретизации дифференциального оператора влияет на результат численного исследования его спектра. Одним из часто встречающихся для исследования гидродинамической устойчивости является спектральный метод, смысл которого состоит в определении расположения спектра дифференциального оператора, линеаризованного в окрестности основного течения. Спектральная задача для линеаризованной системы Навье — Стокса может быть сведена к задаче о спектре оператора четвертого порядка Орра — Зоммерфельда для плоско-параллельных течений вязкой несжимаемой жидкости [1].

В данной работе сравниваются и анализируются полученные с помощью численных методов спектры оператора Орра — Зоммерфельда и оператора, соответствующего уравнениям Навье — Стокса. Используемый численный подход основан на интерполяции собственных функций полиномами Чебышева в точках Гаусса — Лобатто [2]. Для исследования спектров дискретизированных операторов использовались как спектральные портреты так и стандартные методы [3]. Обнаруженные расхождения объясняются накопленными ошибками округлений. По разнице между вычисленными критическими собственными значениями, а также по величине спектральных пятен, делается вывод о величине итоговой вычислительной погрешности.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Бибердорф Э. А.

Список литературы

- [1] Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях / М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2006. 304 с.
- [2] TREFETHEN L. N. Spectral methods in Matlab. [Электронный ресурс]. URL: <https://matlab4engineers.com/wp-content/uploads/2019/09/Spectral-Methods-in-MATLAB-Lloyd-N.-Trefethen.pdf>
- [3] БИБЕРДОРФ Э. А. Гарантированная точность в прикладных задачах линейной алгебры / Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2008. 145 с.

2.59. Шебелева А.А., Минаков А.В. Математическое моделирование разрушения капли воды в потоке за ударной волной в зависимости от числа Онезорге

Актуальность данного исследования обусловлена широким приложением процессов деформации и разрушения капель жидкости во многих отраслях, таких как фармацевтика, двигателестроение, газотурбо- и ракетостроение, ядерная энергетика, сельское хозяйство т. д. Проведено расчетное исследование дробления отдельных капель воды в диапазоне чисел Онезорге $0.0002 \leq Oh \leq 0.2212$. Для моделирования был использован пакет программ Ansys Fluent. Численная методика основана на VOF-методе, LES-модели для учета турбулентности, для описания поведения межфазной границы на основных турбулентных масштабах применялась технология адаптированных динамических сеток, которая позволяет разрешить вторичные капли воды размером до 20 мкм. Основные особенности численной методики описаны в работе [1].

Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами $3 \times 3 \times 5$ см. В качестве граничных условий на одной из граней параллелепипеда задавалось условие входа с фиксированным значением скорости, на остальных гранях расчетной области ставились условия свободного выхода. В начальный момент времени на расстоянии 5 мм от входа в расчетную область помещалась сферическая капля воды диаметром 2.8 мм, на которую воздействует проходящая ударная волна, генерирующая воздушный поток. Скорость потока была равна 78.3 м/с, число Вебера было фиксированным $We = 400$, коэффициент поверхностного натяжения 0.073 Н/м.

Исследована структура потока вблизи и в следе капли на различных этапах ее деформации, установлены особенности обтекания капли и тип разрушения. Было выявлено, что в диапазоне чисел Онезорге $0.0002 \leq Oh \leq 0.0221$ происходит разрушение капли по типу «срыв погранслоя». Массоунос происходит в несколько стадий: на поверхности капли образуются волны, с которых срываются крупные фрагменты. Эти фрагменты дробятся, пока не образуются достаточно мелкие капли. При числах

Онезорге $0.1106 \leq Oh \leq 0.2212$ аэродинамические силы превосходят силы поверхностного натяжения настолько, что происходит непрерывная деформация капли, которая раздувается в направлении потока. Однако, как такового разрыва жидкой пленки на мелкие капли здесь не происходит. Вместо этого, поток отрывает от внешней кромки жидкой пленки кольцо, которое уносится вниз по потоку, в центре же остается сплюснутая капля, напоминающая форму диска. Данный характер деформации капли воды напоминает тип разрушения «парашют со струйкой». Установлено, что время взаимодействия капли с потоком $t_i \approx 867$ мкс; период индукции массоуноса $t_i = 312$ мкс.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSRZ-2020-0012).

Список литературы

- [1] MINAKOV A. V., SHEBELEVA A. A., STRIZHAK P. A. ET. AL. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals // Fuel. 2019. Vol. 254. P. 23.

2.60. Юмин К.В., Данилкин Е.А., Старченко А.В., Лещинский Д.В. Исследование влияния растительности в уличном каньоне на структуру течения и концентрацию примеси

При проектировании современных жилых кварталов требуется обеспечить максимальную комфортность проживания населения. Жилая застройка снижает скорость приземного ветра, приводит к формированию особых условий циркуляции воздуха в приземных слоях. Выбросы от автотранспорта распространяются вдоль дорог, оказывая вредное воздействие на пешеходов и жителей окрестных зданий. В качестве важных параметров, влияющих на структуру течения в городской среде, среди прочих выделяют деревья и живые изгороди.

Данная работа посвящена применению разрабатываемой микромасштабной математической модели турбулентного течения и переноса примеси, для исследования влияния растительности в уличном каньоне на структуру течения и концентрацию примеси. Интерес представляет изучение локальных особенностей изменения скорости течения и образования зон повышенных концентраций загрязнителей атмосферного воздуха в городских кварталах с растительностью.

Разрабатываемая математическая модель опирается на многомерные нестационарные отфильтрованные уравнения Навье — Стокса, для определения полей компонент скорости и давления, а также транспортные уравнения для расчета полей скалярных величин - температуры, концентрации примеси. В качестве турбулентного замыкания используется модель Смагоринского с параметром. Влияние

растительности учитывается с помощью дополнительных источников членов в отфильтрованных уравнениях Навье — Стокса [1].

На основе построенной математической модели турбулентного течения несжимаемой среды проведен ряд расчетов для трехмерной модели уличного каньона. В работе исследуется характер распространения примеси в зависимости от положения и высоты живой изгороди. Результаты расчетов показывают, что наличие растительности в уличном каньоне приводит к замедлению интенсивности циркуляции воздуха в каньоне, как результат возрастают значения максимальной и средней концентрации примеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-21-00165).

Список литературы

- [1] Старченко А. В., Нутерман Р. Б., Данилкин Е. А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах / Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. 252 с.

3. Информационно-вычислительные технологии

3.1. *Городилов Д. В., Салтыков И. Е. Разработка модульной архитектуры в веб-ориентированной платформе облачных вычислений в задачах гидродинамики*

При решении задач в области вычислительной гидродинамики крайне важно обладать необходимой инфраструктурой для полной автоматизации гидродинамических расчетов. Эти расчеты включают в себя множество этапов и требуют значительных вычислительных ресурсов. Вручную подготавливать каждый этап может быть сложной и трудоемкой задачей, которая отнимает слишком много времени у исследователей [1]. Поэтому автоматизация вычислений играет важную роль в данной области.

При интеграции пользовательского интерфейса для ввода параметров расчетного кейса для генерации геометрии сетки может быть удобным использовать виджетов. Автономный виджет представляет из себя веб-страницу, оно может быть также независимым веб-приложением, которое взаимодействует со своими отдельными сервисами и которое может быть внедрено в платформу [2]. Использование микросервиса заключается в возможности интеграции стороннего генератора расчетных кейсов. Микросервис отвечает за формирование расчетного кейса. Чтобы сформировать кейс, компонент платформы обращается к API микросервиса [3], передавая необходимые данные. После обработки запроса, микросервис генерирует расчетный кейс в соответствии с переданными параметрами. Такой подход позволяет пользователям интегрировать свои собственные решения без необходимости внесения изменений в ядро платформы.

Данная работа посвящена разработке модульной архитектуры и связана с платформой для автоматизации гидродинамических расчетов, предназначенная для широкого круга исследователей, которые могут проводить расчеты через интерактивную веб-среду.

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», приуроченной к 300-летию Кузбасса / Сост. Ю. А. Степанов, С. Ю. Завозкин. Вып. 22. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2021. С. 107–110.*
- [2] Автономные и серверные виджеты. [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/dev/wdgt/doc/dg/>

concepts/widget-types.html/ (Дата обращения 29.08.2022).

- [3] АХМЕТЗЯНОВ И. И. Микросервисы в разработке программного обеспечения // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов и учащихся с международным участием «Наука в движении: от отражения к созданию реальности» / Под ред. С. В. Юдиной. М.: ООО «КОНВЕРТ», 2020. С. 164–167.

3.2. Звонарева Т.А. Анализ запаздывания процесса распространения информации в онлайн социальных сетях в задаче восстановления начальной плотности вовлеченных пользователей

В работе построена и проанализирована математическая модель распространения информации в онлайн социальных сетях, описываемая диффузионно-логистическим уравнением. Модель характеризуется коэффициентами и начальным условием, отражающими специфику процесса.

Рассматривается модель с запаздывающим аргументом и исследуется решение задачи определения источника для параболического уравнения по дополнительной информации о процессе в фиксированные моменты времени [1], которая в общем случае является некорректной [2], и решение задачи определения источника по зашумленным данным.

Поставленные обратные задачи были сведены к задаче минимизации целевого функционала, которая решалась методом глобальной оптимизации тензорного поезда и его комбинацией с многоуровневым градиентным методом [3]. Применены методы регуляризации А. Н. Тихонова и гиперболической регуляризации для повышения устойчивости решения обратной задачи.

Для синтетических данных показано преимущество использования комбинированных алгоритмов регуляризации к решению задачи об источнике.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-71-10068).

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Криворотько О. И.

Список литературы

- [1] KRIVOROTKO O., ZVONAREVA T., ZYATKOV N. Numerical solution of the inverse problem for diffusion- logistic model arising in online social networks // Commun. Comput. Info. Sci. 2021. Vol. 1476. P. 444–459.
- [2] КАВАНИХИН S. I. Definitions and examples of inverse and ill-posed problems // J. Inverse Ill-Posed Probl. 2008. Vol. 16. N. 4. P. 317–357.
- [3] ЗВОНАРЕВА Т. А., КАВАНИХИН С. И., КРИВОРОТЬКО О. И. Численный алгоритм определения источника диффузионно-логистической модели по данным интегрального типа, основанный на тензорной оптимизации // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2023. Т. 63. № 9. С. 1513–1523.

3.3. Кабанов А.А., Кругляков А.С. Технология обработки данных сейсморазведки 2Д/3Д ОГТ с целью прямого прогноза НГЗ

В работе описана технология обработка данных сейсморазведки 2Д/3Д ОГТ (общая глубинная точка) с целью прямого прогноза нефтегазовых залежей (НГЗ). В период с 2010 по 2023 гг. сделаны попытки экспериментально подтвердить возможность прямого прогноза залежей углеводородов при регистрации геофизическими методами воздействия резонансов гравитационных приливов на подвижные флюидные нефтегазовые залежи. На этой основе предложена технология с использованием в качестве источника физического воздействия на НГЗ резонанса гравитационных приливов.

Резонансы гравитационных приливов вызывают стоячие волны в НГЗ. Это позволяет устойчиво регистрировать низкочастотную составляющую (от 0.1 до 3.0 Гц) в спектре на фоне сильных помех без использования искусственных источников возбуждения.

Низкочастотные колебания залежей при резонансах гравитационных приливов длятся до трёх-четырёх суток. В течение лунного месяца (28–29 суток) обычно фиксируется не менее двух сильных резонансов.

Данная технология для прямого прогноза залежей углеводородов применима в различных горно-геологических и климатических условиях — от тундры до горно-таежной местности в летнее и зимнее время. Она отличается технологической простотой: низкочастотные сейсмоприемники-велосиметры (0.1–10 Гц) устанавливаются на исследуемой площади на срок от 15 до 30 суток с плотностью, соответствующей детальности решаемой задачи (обычно для площади 200 квадратных километров достаточно установить 100 приборов). Дополнительно устанавливается аппаратура для регистрации естественного импульсного электромагнитного поля земли и углеводородных газов (метан, пропан).

Стоимость работ по представленной технологии ниже стоимости традиционного комплекса геофизических нефтегазопроисковых работ. Естественно, технология не исключает применение традиционной сейсморазведки, но позволяет оптимизировать её объемы и затраты на геолого-геофизические работы на нефть и газ как при поисках в малоизученных регионах, так и при детализации нефтегазовых месторождений.

3.4. Макаров Д.С., Харламов Д.В., Малимонов М.И. Сервис обработки и хранения данных рефлектометрии и радиопросвечивания сигналов ГНСС в диапазоне L1

Метод рефлектометрии и радиопросвечивания с помощью сигналов НС (навигационных спутников) заключается в регистрации приемником от-

раженных и ослабленных сигналов диапазона L1 от земных покровов [1]. Это позволяет восстанавливать электрофизические параметры зондируемого объекта и проводить мониторинг состояния земных покровов.

Существует множество решений, которые позволяют проводить первичную обработку данных (OriginPro, Microsoft Excel, MATLAB, LabVIEW и т. д.), но они не предоставляют возможности создать базу экспериментальных данных с возможностью быстрого обращения к ней, оперативной обработки результатов экспериментов и одновременной работы с несколькими пользователями. Возникает необходимость автоматизировать процессы хранения и обработки результатов практических экспериментов.

Объем получаемых данных одного эксперимента составляет 80–100 МБ, содержит более трёхсот тысяч строк. Данные с каждого спутника находятся в отдельном файле (всего порядка 40 файлов), который содержит следующую информацию: дата, время, азимут, угол возвышения, амплитуда (отношение сигнала к шуму) [1].

Разработанный сервис фильтрует данные по заданным параметрам и визуализирует зависимости амплитуды сигнала от угла возвышения/номера кадра. Также реализована возможность наложения амплитудно-временных зависимостей на один график и построения полярных диаграмм для оценки траектории движения спутников. Для пост-обработки данных можно скачать отфильтрованные файлы. Для работы с данными используется API сервера, который проверяет авторизацию пользователя по токену доступа, сохранённому в локальном хранилище браузера.

Сервис состоит из трех частей: клиент, сервер и база данных. Для разработки клиентской части используется фреймворк vue.js [2], с расширениями vueх и vue-router. Пользовательский интерфейс построен с помощью библиотеки primevue. Отображение графических материалов реализовано с помощью библиотеки apache ECharts. В серверной части используется программная платформа node.js [3], фреймворк nest.js и ORM equalize для работы с базой данных. Базой данных выступает PostgreSQL.

Таким образом, был реализован сервис обработки и хранения данных сигналов НС полученных с помощью методов рефлектометрии и радиосвечения земных покровов. В дальнейшем планируется разработка дополнительных модулей, таких как расчеты траектории зондирующего участка, моделирование теоретической кривой интерферограммы, возможность перекрестного анализа этих функций по нескольким экспериментам. Данная версия продукта является продолжением предыдущей работы [4].

Список литературы

- [1] Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Симонов К. В. и др. Прикладные аспекты исследования геосфер с использованием спутниковых технологий / Красноярск: СФУ, 2023. 256 с.
- [2] NIAN L., BO Z. The Research on Single Page Application Front-end Development Based on Vue // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1883 (1). Art. 012030.
- [3] FABIAN K., PHILIPP B. Return of the JS: Towards a Node.js-Based Software Architecture for Combined CMS/CRM Applications // Procedia Computer Science. 2018. N 141. P. 454–459.
- [4] Малимонов М. И., Макаров Д. С., Харламов Д. В. Облачный сервис первичной обработки, визуализации, фильтрации и сохранения данных с четырёхканального приемника-регистратора сигналов навигационных спутников в частотном диапазоне L1 (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2022667433) / М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2022.

3.5. Никифорова А. Ю. Применение модифицированной модели Рида — Фроста к анализу распространения компьютерных вирусов в сложных сетях, ассоциированных со случайными графами

Компьютерные вирусы, несмотря на широко применяемое и постоянно обновляемое производителем антивирусное программное обеспечение, продолжают ежегодно наносить значительный ущерб, как организациям, так и отдельным людям. Поэтому актуальным направлением исследований является моделирование распространения «абстрактного» вируса. В данной работе исследуется применение модифицированной модели Рида — Фроста, предложенной Л. Биллингс и соавторами в [1], для компьютерных сетей, ассоциированных с графами Эрдёша — Реньи.

В данной модели компьютерная сеть представляется в виде случайного графа, состоящего из N узлов (компьютеров). Важным параметром является связность графа c , определяемая как среднее относительное число соседей у узла. Время в модели предполагаем дискретным. В каждый момент времени узел может быть либо инфицированным, либо восприимчивым для инфицирования. На следующем временном шаге: инфицированный узел может вылечиться с постоянной вероятностью δ , либо остаться инфицированным с вероятностью $(1 - \delta)$; восприимчивый узел может стать инфицированным с вероятностью μ , которая имеет сложную зависимость от связности c и вероятности передачи инфекции β , или остаться восприимчивым с вероятностью $(1 - \mu)$. В работе [2] была предложена упрощенная формула для вычисления μ и рекуррентная формула для приближенной оценки среднего числа зараженных узлов.

Целью настоящего исследования является уточнение результатов, полученных в [2]. Была проведена серия имитационных экспериментов с помощью программы [3], в результате которых подтвердились определенные теоретически граничные значения β , в диапазоне которых свойства исследуемой модели хорошо согласуются с экспериментальными.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Магазев А. А.

Список литературы

- [1] BILLINGS L., SPEARS W. M., SCHWARTZ I. B. A unified prediction of computer virus spread in connected networks // *Physics Letters A*. 2002. Vol. 297. P. 261–266.
- [2] БЕЛЬЧЕНКО А. О., МАГАЗЕВ А. А., НИКИФОРОВА А. Ю. Приближённая оценка среднего числа заражённых узлов в марковской модели распространения компьютерных вирусов // *Математические структуры и моделирование*. 2022. № 1 (61). С. 92–104.
- [3] МАГАЗЕВ А. А., НИКИФОРОВА А. Ю. Программа для моделирования процесса распространения компьютерных вирусов в связанных сетях (свидетельство № 2022662048) / М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2022.

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

Глобальное изменение климата является одной из важнейших и широко обсуждаемых тем в научных и практических кругах. Эта проблема оказывает существенное влияние на экономику, социальную сферу и окружающую среду. Исследование потоков парниковых газов, таких как углекислый газ и метан, составляет ключевой аспект для понимания и противодействия глобальному изменению климата [1, 2].

Современные технологии и методы обработки данных позволяют получать все более точные и детальные данные о состоянии окружающей среды и изменениях, которые происходят в ней. Спутниковые наблюдения стали одним из наиболее эффективных и удобных способов получения данных об изменении климата. Однако, обработка и анализ этих данных требует использования соответствующих методов и инструментов [3].

В связи с этим, в настоящее время все больше исследователей обращаются к использованию методов усвоения данных — комбинированию результатов расчётов математических моделей и данных наблюдений для получения оценки концентраций и эмиссии интересующих нас величин. В докладе предлагается методика оценки пространственно-временного распределения потоков метана на основе спутниковых данных и прогнозов, с использованием расчётов модели переноса-диффузии. Разработан алгоритм получения оптимальной оценки по-

токов метана, основанный на методе наименьших квадратов. Алгоритм представляет собой частный случай детерминированного варианта ансамблевого фильтра Калмана. Предложенный алгоритм позволяет оптимально оценить области с высокими эмиссиями метана, а также изучить динамику этих оценок в разные сезоны. Эта методика представляет собой эффективный инструмент для идентификации потенциальных источников метана и проведения более детального исследования этих областей. *Научный руководитель — д.ф.-м.н. Климова Е. Г.*

Список литературы

- [1] 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 (6). P. 2789–2803.
- [2] 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] МОРДВИН Е. Ю., ЛАГУТИН А. А. Метан в атмосфере Западной Сибири / Барнаул: Азбука, 2016. 230 с.

3.7. Проценко Н. А. Моделирование вычисления истинности утверждений в вычислительных сетях и потоках на основе временной модальной логики

Современная темпоральная логика была сформулирована в 1950-е годы Артуром Прайором. Сейчас она активно используется в искусственном интеллекте, как язык для формального описания процессов, поведения систем, рассуждения о знаниях, проверки безопасности и надежности систем [1, 2]. В моей работе моделируется вычисление истинности утверждений, касающихся поведения вычислительных сетей и потоков. Такого рода модели опираются на представления сетей и потоков реляционными моделями Кришке.

Модели в моей работе — это реляционные структуры вида $M = \langle N, \leq, V \rangle$. Синтаксис можно описать так:

$$\varphi ::= p|\varphi \wedge \varphi|\varphi \vee \varphi|\neg\varphi|\varphi \rightarrow \varphi|\Box\varphi|Next(\varphi).$$

Истинность формул определяется классически для связок классической логики и следующим образом для остальных:

$$(M, x) \models_V \Box\varphi \iff (\forall y \in \mathbf{N})(y \geq x) \Rightarrow (M, y) \models_V \varphi \\ (M, x) \models_V Next(\varphi) \iff (M, x + 1) \models_V \varphi$$

В процессе исследования таких моделей удалось развить некоторые общие техники и решить несколько фундаментальных проблем: выполнимость формул и разрешимость логики как множества формул, которые истинны на таких моделях.

При решении проблемы выполнимости формул было выявлено, что в таких моделях существует

точка стабилизации, которая позволяет бесконечную модель привести к конечной, причем любая подобная модель может быть сведена к модели, размер которой зависит от размера входа т.е. от длины формулы, которая подается на вход. Это позволяет говорить о решении проблемы разрешимости для подобных систем.

Результаты работы несут теоретическое и прикладное значение и могут быть применены при моделировании сложных систем и формальной верификации программ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-21-00213).

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

Список литературы

- [1] RYBAKOV V. V. Multiagent temporal logics with multivaluations // *Siberian Mathematical Journal*. 2018. Vol. 59. N. 4. P. 710–720.
- [2] RYBAKOV V. V. Non-transitive linear temporal logic and logical knowledge operations // *Journal of Logic and Computation*. 2015. Vol. 26. N. 3. P. 945–958.

3.8. Рудин С.А., Павский К.В., Ревун А.Л. Решение задачи оптимизации алгоритмов моделирования гетэроэпитаксиального роста Ge на Si(100)

Исследования гетероструктур с квантовыми точками является одной из приоритетных задач в области материаловедения. Молекулярно-лучевая эпитаксия — метод получения пространственное упорядоченных массивов полупроводниковых квантовых точек. Одним из направлений исследования процессов гетэроэпитаксии является компьютерное моделирование. В данной работе представлена оптимизация алгоритмов моделирования гетэроэпитаксиального роста Ge на Si методом Монте-Карло [1].

При моделировании гетэроэпитаксиального роста на структуре размера 38×38 нм с высотой 8 нм, однопоточная программа выполняется более трех месяцев [2]. Для интерпретации экспериментальных данных, возникает потребность моделирования структур размером в десятки раз превышающую описанную выше структуру.

Процесс моделирования роста представляет собой последовательность элементарных событий, выбираемых случайным образом в соответствии с их вероятностями. Итерация Монте-Карло включает одно из элементарных события: осаждение, диффузионный прыжок. Суммарно итерации Монте-Карло занимают ~50% от исполняемого времени программы, вне зависимости от размера подложки. Для получения результата в более короткие сроки следует использовать технологии параллельного программирования OpenMP или MPI. Для того чтобы эффективность параллельной программы росла при увеличении количества вычислителей, следует максимально оптимизировать все ее медленные фраг-

менты, которые не могут быть распараллелены в силу ограничений, накладываемых моделью.

Была проведена оптимизация алгоритмов моделирования гетэроэпитаксиального роста Ge на Si методом Монте-Карло. Изменения внесенные в итерации Монте-Карло позволили сократить время его выполнения на 32%.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФП СО РАН (ГЗ 0242-2021-0011).

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.
- [2] Информационно-вычислительный центр Новосибирского государственного университета: сайт. [Электронный ресурс]. URL: <http://nusc.nsu.ru/wiki/doku.php> (дата обращения 14.09.2023).

3.9. Уразов С.О. Сравнительный анализ алгоритмов моделирования случайной последовательной адсорбции частиц на квадратную решетку

Случайная последовательная адсорбция (RSA) представляет собой процесс, когда объекты случайно и необратимо осаждаются на подложку без перекрытия с ранее адсорбированными объектами. RSA является полезной моделью для исследования многих физических, химических и биологических процессов [1].

В докладе рассматривается частный случай RSA, в котором подложка представляет собой квадратную решётку, а объекты — линейные частицы, которые занимают некоторое количество последовательных ячеек решётки. Прямой алгоритм, реализующий RSA, предполагает равномерный случайный выбор ориентации частиц и их начальной позиции в решётке для осаждения. Из-за обратной экспоненциальной зависимости роста концентрации покрытия от времени, прямое программное моделирование является трудоёмкой задачей. При этом для полноценного исследования процесса необходим статистически значимый объем данных, из-за чего возникает задача эффективной симуляции процесса RSA.

Технически, для решения данной задачи уже разработаны различные методы, использующие вспомогательные списки [2]. Временная эффективность программных реализаций этих методов зависит от размеров решётки и длин частиц. В докладе представлены результаты полномасштабного экспериментального исследования с опорой на теоретическую оценку [3] трудоёмкости алгоритмов этих методов. Даны рекомендации по выбору метода и его параметров в зависимости от размеров решётки и длин частиц.

Список литературы

- [1] ЛЕБОВКА Н. И., ТАРАСЕВИЧ Ю. Ю., ГИГИБЕРИЯ В. А. и др. Образование структур в двумерных системах стержнеобразных частиц // Труды XX Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем — 2017». Красноярск, 2017. С. 80–83.
- [2] ULYANOV M. V., TARASEVICH YU. YU., ESERKEROV A. V., GRIGORIEVA I. V. Characterization of domain formation during random sequential adsorption of stiff linear k -mers onto a square lattice // Phys. Rev. E. 2020. Vol. 102. N. 4. Art. 042119.
- [3] УЛЬЯНОВ М. В., УРАЗОВ С. О. Реализация случайной последовательной адсорбции (RSA) методом редукции вспомогательных массивов: аналитическое рассмотрение и вычислительный эксперимент // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 2. С. 74–90.

4. Информационные технологии

4.1. Боков А.И. Применение клеточных автоматов для моделирования движения амёб

Работа посвящена моделированию двумерного движения абстрактных объектов (в данном случае амёб) с помощью клеточных автоматов. Используемый клеточный автомат, является динамической моделью, в которой пространство и время рассматриваются дискретными. Клеточный автомат представляет собой совокупность (систему) отдельных элементов (клеток), которые в каждый из моментов дискретного времени могут находиться в каком-либо одном из возможных состояний. Обновление состояний элементов происходит синхронно на каждом шаге модельного времени в соответствии с локальными правилами перехода, т.е. подобно функционированию абстрактного автомата. Новое состояние элемента определяется как его предыдущими состояниями, так и состояниями его ближайших соседей [1].

Клеточные автоматы могут быть использованы для моделирования динамики скопления микроорганизмов, таких как амёбы. В данной модели используется ортогональная пространственная решетка с шагом $h = 1$. Каждая из частиц (амёба) может иметь скорость, направленную в один из соседних узлов. За один шаг по времени частица может переместиться только в соседний узел [2].

Объектами моделирования являются амёбы и производимое им вещество [3]. Это вещество является также и притягивающим веществом. За счет этого происходит скопление амёб. Моделирование производится в двумерных областях, в которых могут быть расположены непреодолимые препятствия. В области также имеется поле скоростей, которое влияет на движение производимого амёбами вещества.

Модель частично основана на НРР-модели, одной из разновидностей клеточного автомата, моделирующего решетчатый газ. Основное отличие от НРР-модели состоит в отсутствии столкновения частиц. Несколько частиц могут находиться в одном узле. Движение относительно хаотично, частица с равной вероятностью может перемещаться в одном из четырех направлений. Вероятности каждого направления могут быть переопределены в зависимости от концентрации притягивающего вещества.

Для модели создана прикладная программа, визуализирующая результаты моделирования. Представлены результаты, демонстрирующие образования скопления амёб, влияние стенок на движение амёб и производимого им вещества.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Кучунова Е. В.

Список литературы

- [1] Бобков С. П., Соколов В. Л. Дискретное моделирование течения газа при пониженном давлении // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. № 2. С. 79–84.
- [2] Бобков С. П., Соколов В. Л. Анализ возможностей применения решеточных моделей для исследования процессов в газах при пониженном давлении // Вестник ИГЭУ. 2015. № 4. С. 1–6.
- [3] САМАРСКИЙ А. А., МИХАЙЛОВ А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / М.: Физматлит, 2001. 320 с.

4.2. Джангиров Б.И. Особенности контейнеризации научных приложений для высокопроизводительной вычислительной среды

При разработке программного обеспечения (ПО) разработчикам необходимо учитывать значительное число вариантов конфигураций целевой операционной системы (ОС). Для решения этой проблемы зачастую используются средства автоматической конфигурации или виртуализации. Они позволяют оперативно создавать необходимую среду выполнения ПО [1]. Однако в случае, отсутствия возможности гибкой настройки системного ПО, могут возникать проблемы обеспечения совместимости приложений.

Решением большинства озвученных проблем является использование системы контейнеризации на базе Docker, которая упрощает работу с механизмами виртуализации на уровне ОС. В рамках Docker рассматриваются образы и контейнеры (по аналогии как класс и экземпляр класса), на взаимодействии с которыми и строится весь процесс работы с Docker. Более того, контейнер — это новое осмысление исполняемого файла. Контейнер (образ) содержит в себе все необходимое для запуска приложений, настроенные системные библиотеки и т. д. При этом ядро ОС, общие системные компоненты используются из родительской ОС. Благодаря этому образы контейнеров занимают в разы меньше места, чем образы виртуальных машин. Особое место Docker занимает в средствах непрерывной интеграции программного обеспечения. Однако, нетривиальной является контейнеризация задач, требующих выполнения в высокопроизводительной кластерной среде.

В связи с этим, в докладе представлены особенности внедрения контейнеризации для облегчения разворачивания и запуска научных приложений в высокопроизводительной кластерной среде, состоящей из разнородных ресурсов. Практические эксперименты показали, что использование Docker-образов является достойным дополнением к классическому сценарию запуска заданий в арсенале разработчиков и пользователей кластера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Рос-

сийской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах».

Научный руководитель — к.т.н. Костромин Р. О.

Список литературы

- [1] SHANIN M., BABAR M. A., ZHU L. Continuous integration, delivery and deployment: a systematic review on approaches, tools, challenges and practices // IEEE Access. 2018. Vol. 5. P. 3909–3943.

4.3. Зайцева Н.Ю., Моисеева Т.В. Разработка архитектуры СППР при применении интересубъективного подхода к разрешению проблемных ситуаций

Концепция интересубъективного подхода к управлению разрешением проблемных ситуаций, предложенная В.А. Виттихом [1], основывается на помощи акторам (главным действующим лицам), оказавшимся в затруднении и осознающим себя в проблемной ситуации.

В настоящее время данная концепция совершенствуется [2, 3], в частности, ведется научная работа в области применения информационных технологий, которые могут применить акторы при разрешении проблемных ситуаций. Научная новизна исследования заключается в разработке архитектуры системы поддержки принятия решений (СППР), с помощью которой предлагается организовать процесс разрешения проблемных ситуаций и коммуникации акторов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующую задачу – разработать архитектуру СППР для разрешения проблемных ситуаций с использованием интересубъективного подхода к управлению (на основании алгоритма разрешения проблемных ситуаций с применением интересубъективного подхода к управлению, разработанного авторами исследования в [4]).

Предложена архитектура СППР, основные элементы которой следующие: база данных акторов о проблемных ситуациях, база знаний акторов по проблемным ситуациям, библиотека методов поддержки принятия решений, необходимых акторам в процессе поиска выхода из проблемных ситуаций, интерфейс актора-пользователя.

Список литературы

- [1] ВИТТИХ В. А. Introduction to the theory of intersubjective management // Group Decision and Negotiation. 2015. Vol. 24. P. 67–95.
- [2] ПОЛЯЕВА Н. Ю. Разрешение проблемных ситуаций: архитектура системы поддержки принятия решений // Эргодизайн. 2023. № 2 (20). С. 117–124.
- [3] МОИСЕЕВА Т. В., МЯТИШКИН Ю. В. Методология теории интересубъективного управления // Тр. IV Всерос. Конф. «Омские научные чтения - 2020». Омск: Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, 2020. С. 716–718.

[4] МОИСЕЕВА Т. В., ПОЛЯЕВА Н. Ю. Моделирование проблемной ситуации в теории интересубъективного управления // Вестник Дагестанского технического университета. Технические науки. 2018. № 45 (1). С. 160–171.

4.4. *Зубрицкий П.А.* Организация пространственного поиска по фондовым материалам

За годы работы организаций, которые в своих изысканиях опираются на труды предшественников, накапливается огромное количество фондовых материалов. В связи с этим возникает задача поиска необходимых отчетов по уже имеющимся. При небольшом количестве отчетов еще возможно определить территорию, на которой проводились изыскания предшественников. Но если суммарное количество отчетов стремится к 1000 и более, то это становится непростой задачей.

Для решения данной задачи и доступа заинтересованных пользователей без дополнительного программного обеспечения было решено использовать WEB-технологии и ГИС. ГИС использовать в качестве инструмента подготовки данных, а WEB-технологии для их публикации и доступа к ним. Реализацию поиска можно разбить на несколько этапов.

1. Подготовительный этап. На данном этапе в корневой папке каждого отчета создается отдельный share-файл с контуром территории, на которой велись работы. В атрибуты заносится краткая информация: номер отчета, название, путь, год, автор, масштаб работ;
2. Сборка итогового share-файла. Разработан скрипт, который перебирая корневые папки собирает из отдельных share-файлов один итоговый;
3. Оформление стилей. В ГИС NextGIS [1] или QGIS [2] итоговому share-файлу назначается символ отображения. Также в ГИС оформляются share-файлы OSM [3], которые будут использоваться в качестве подложки (реки, дороги, железные дороги, населенные пункты, административные границы). Все стили сохраняются в файл стиля SLD;
4. Загрузка, оформление и публикация данных. Все share-файлы загружаются на Geoserver [4]. Используя ранее сохраненные файлы стиля SLD, каждому загруженному слою присваиваем символ отображения. Публикуется каждый слой по отдельности. На последнем шаге из загруженных и оформленных слоёв составляется итоговая карта, на которой верхним слоем показаны контуры фондовых отчетов, а в качестве подложки данные OSM.

После выполнения всех этапов, пользователи могут получить доступ к поиску фондовых материалов с помощью браузера. Поиск осуществляется

путем перемещения в область проведения изыскательных работ. При клике мышью в необходимой области происходит выборка фондовых материалов и их вывод в виде таблицы, в которой содержится информация, внесенная на этапе создания share-файлов с контурами территории работ.

Научный руководитель — к.т.н. Гостева А. А.

Список литературы

- [1] Официальный сайт ГИС NextGIS. [Электронный ресурс]. URL: <https://nextgis.ru/> (дата обращения 27.09.2023).
- [2] Официальный сайт ГИС QGIS. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qgis.org/ru/site/> (дата обращения 27.09.2023).
- [3] Официальный сайт OpenStreetMap. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения 27.09.2023).
- [4] Официальный сайт Geoserver. [Электронный ресурс]. URL: <https://geoserver.org/> (дата обращения 27.09.2023).

4.5. *Калашников Р.А.* Подсчет количества растений подсолнечника и кукурузы на ранних стадиях роста и обнаружение сорняков по RGB-изображениям с квадрокоптера с использованием свёрточных нейронных сетей

Изображения сверхвысокого пространственного разрешения, получаемые с помощью беспилотных летательных аппаратов, приобретают все большее значение при решении задач мониторинга и оценки состояния как природных, так и антропогенных объектов. Точное земледелие — одно из наиболее перспективных направлений применения беспилотных технологий [1].

Свёрточные нейронные сети находят все более широкое применение для анализа изображений сверхвысокого пространственного разрешения [2]. Глубокое обучение позволяет извлекать сложные паттерны из изображений и эффективно использовать как спектральную, так и пространственную информацию.

В докладе предлагается метод автоматизированного распознавания и подсчета экземпляров подсолнечника и кукурузы, а также обнаружения сорняков по RGB-изображениям, полученным с использованием квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro V2.0.

Для распознавания всходов созданы две обучающие выборки общим объемом 6500 размеченных фрагментов. На каждой из этих выборок обучены две архитектуры свёрточных нейронных сетей — DeepLabv3+ и модификация U-Net. Определение количества растений осуществлялось путем проведения регрессионного анализа.

Карты сорной растительности построены путем исключения из карт растительности, полученных с использованием вегетационных индексов, масок всходов кукурузы и подсолнечника.

Валидация предложенного метода на основе результатов полевых исследований свидетельствует о высокой точности подсчета растений, которая составляет от 93 до 98%. Предложенный автоматизированный метод может быть использован для количественной и качественной оценки всходов сельскохозяйственных культур, а также для эффективного использования гербицидов в борьбе с сорной растительностью.

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

Список литературы

- [1] Альт В. В., Пестунов И. А., Мельников П. В., Ёлкин О. В. Автоматизированное обнаружение сорняков и оценка качества всходов сельскохозяйственных культур по RGB-изображениям // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т. 48. № 5. С. 52–60.
- [2] XU B., FAN J., CHAO J. ET AL. Instance segmentation method for weed detection using UAV imagery in soybean fields // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 211. Art. 107994.

4.6. Киселев А.В., Кучунова Е.В. Применение диаграммы Вороного для визуализации ландшафта

Диаграмма Вороного конечного множества точек S на плоскости представляет такое разбиение плоскости, при котором каждая его область образует множество точек, более близких к одному из элементов множества S , чем к любому другому элементу множества. Диаграмма Вороного состоит из локусов — областей, в которых присутствуют все точки, которые находятся ближе к данной точке, чем ко всем остальным. В диаграмме Вороного локусы являются выпуклыми многоугольниками [1].

В работе представлен метод визуализации ландшафта некоторой местности с помощью диаграммы Вороного по векторным картам в польском формате. Исходные данные представляются в виде текстового файла, который содержит информацию об объектах местности (леса, тропы, здания, дороги, озера, и т. п.), а также наборы изолиний. Каждая изолиния представляет собой координаты (широта и долгота) набора точек, имеющая одинаковую высоту. По этим данным строится диаграмма Вороного [2]. Далее по построенной диаграмме выполняется несколько итераций релаксации Ллойда для избавления от слишком мелких полигонов. Главное свойство диаграммы Вороного состоит в нерегулярности локусов [3]. Это позволяет визуализированному на её основе ландшафту выглядеть более естественным.

В работе используется два алгоритма построения диаграммы Вороного: алгоритм «в лоб» и рекурсивный алгоритм. Основа алгоритма состоит в нахождении точек пересечений серединных перпендикуляров.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Кучунова Е. В.

Список литературы

- [1] ПРЕПАРАТА Ф., ШЕЙМОС М. Вычислительная геометрия: Введение: учебное пособие / М.: Мир, 1989. 479 с.
- [2] КУЧУНОВА Е. В., РУЛЕВ А. В. Вычислительный алгоритм построения поверхности рельефа местности // Информационные технологии. 2016. Т. 2 (14) С. 192–195.
- [3] ИВАНОВА М. А., ЛИТВИНОВ Ю. В. Решение задачи разбиения поля методом диаграммы Вороного // Современные технологии в теории и практике программирования: сборник материалов конференции. 2018. С. 81–84.

4.7. Корякин П.В., Пистунов И.И. Разработка испытательного стенда тестирования компонентов распределенных научных приложений

Качественные разработка, внедрение и сопровождение сложных технических систем затруднительны без предварительных экспериментов, позволяющих промоделировать их работу в различных эксплуатационных условиях. Такие эксперименты, как правило, проводятся в процессе имитационного моделирования (ИМ). Универсальные системы моделирования общего назначения (GPSS, AnyLogic) позволяют с необходимой степенью детализации описать предметную область и выполнить моделирование. Специализированные подсистемы позволяют дополнительно отслеживать изменения переменных, проводить анализ, строить таблицы и графики. Однако в GPSS эти подсистемы имеют ограниченные функциональные возможности, а AnyLogic и подобные ей системы являются коммерческими и их применение в научно-исследовательской деятельности не всегда оправдано. При этом потребность в различных средствах визуализации в процессе ИМ остается актуальной.

В докладе представлен опыт разработки веб-ориентированной панели управления (англ., dashboard) вычислениями для задач ИМ. Представлены основные ее компоненты, сформулированы ключевые функциональные возможности и технические требования к ней. Данная панель управления позволяет проводить вычислительные эксперименты в рамках ИМ. Она обеспечивает интеграцию с существующими научными веб-сервисами для проведения экспериментов в рамках ИМ, представленными в [1].

В результате применения панели управления сокращаются временные затраты на проведение экспериментов, а также обеспечивается автоматизация визуализации результатов экспериментов в виде графиков и диаграмм, необходимых для принятия решений относительно управляющих параметров модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах».

Научный руководитель — к.т.н. Костромин Р. О.

Список литературы

[1] Феокистов А. Г., Костромин Р. О., Сидоров И. А. Сервис-ориентированный подход к имитационному моделированию процессов функционирования инфраструктурных объектов // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 9. С. 76–81.

4.8. Котлер В.Д., Платонова М.В. Разработка информационно-вычислительной системы оценки потоков парниковых газов с поверхности Земли по спутниковым данным

Современное человечество живет в эпоху небывалого развития научно-технического прогресса, сопровождающегося активным воздействием на природную среду. Деятельность человека, в частности, вырубка деревьев, вредные выбросы промышленных предприятий ведет к увеличению концентрации парниковых газов, что, в свою очередь, приводит к неизбежному нагреванию атмосферы и климатическому сдвигу в сторону глобального потепления [1, 2]. Без проведения оценки и анализа потоков парниковых газов невозможно проводить поиск эффективного решения данной проблемы мирового масштаба. Для решения подобных задач часто используются усвоения данных. Для организации процесса обработки данных измерений и результатов вычислений по математической модели требуется разработка информационно-вычислительной системы. В докладе представлена архитектура и структура данных для информационно-вычислительной системы, позволяющей проводить оценку потоков парниковых газов с поверхности Земли.

В качестве исходных данных для выполнения вычислений в информационно-вычислительной системе используются спутниковые данные AIRS (измерения концентрации метана), и данные расчетов модели MOZART-4 (информация о прогнозах концентрации метана и иные показатели).

Важным этапом организации работы информационно-вычислительные системы является этап доработки и организации данных. В докладе представлена структурная организация этапов подготовки и организация хранения больших объемов спутниковых данных и результатов расчетов математической модели [3].

Создаваемая информационно-вычислительная система позволит выполнять работы с помощью удобного пользовательского интерфейса, а также

получать наглядное оперативное представление данных вычислений.

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

Список литературы

- [1] КОКОРЕВ Д. С., ЮРИН А. А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloquium-journal. 2019. № 10-2 (34). С. 101–104.
- [2] ВИХМАН В. В., РОММ М. В. «Цифровые двойники» в образовании: перспективы и реальность // Высшее образование в России. 2021. Т. 30. № 2. С. 22–32.
- [3] АГАТОВ В. Цифровые двойники в ритейле // New Retail. 2018. № 1. С. 232.

4.9. Краснощёков К.В. Расчёт пространственного распределения загрязнения над Красноярском по спутниковым данным

В Красноярске проживает более одного миллиона человек. Город активно развивается. Промышленные предприятия, частный сектор, увеличивающееся количество автотранспорта — всё это негативно влияет на качество атмосферного воздуха.

В работе [1] авторами было показано, что повышенные концентрации PM_{2.5} и PM₁₀ (твердые частицы с диаметром менее 2.5 и 10 мкм соответственно) наблюдаются вблизи территорий, примыкающих к промышленным предприятиям. В многочисленных работах [2, 3] авторы указывают на негативное влияние на здоровье человека повышенных значений PM.

Основным методом измерения концентраций PM являются наземные автоматизированные посты мониторинга. Однако точечные значения не предоставляют пространственного распределения загрязнения на территории города.

В нашей работе для расчёта загрязнения использовались данные спутникового мониторинга, совместно с данными метеорологического реанализа. Формула для расчёта PM_{2.5} была взята из работы [4]. Необходимые значения брались из следующих источников. В качестве спутниковой информации использовались данные аэрозольной оптической толщины атмосферы (AOD), полученной со спектрофотометра MODIS, продукт MCD19A2. Метеорологические параметры, такие как высота пограничного слоя атмосферы и влажность воздуха, брались по информации с модели GFS.

Одним из ограничений использования спутниковой информации является невозможность получить данные по AOD на территорию с высоким коэффициентом отражающей поверхности, такой как облачность, вода и снег. Следовательно, данные за зимний период недоступны. Из-за этого были использованы только данные с мая по октябрь.

При обработке исходной информации был сформирован архив, содержащий ежедневные значения PM_{2.5} на территорию Красноярска, а также центральных и южных районов Красноярского края. Кроме ежедневных значений, архив содержит

и среднемесячные значения PM_{2.5} с 2015 по 2022 года. Полученные данные позволяют увидеть пространственное распределение загрязнения на территории города, а также центральных и южных районов Красноярского края.

Список литературы

- [1] Клейн С. В., Загороднев С. Ю., Кокоулина А. А. и др. Оценка пылевого загрязнения атмосферного воздуха с учётом фракционного состава частиц как фактора риска здоровью населения промышленной территории // *Здоровье семьи — 21 век*. 2015. № 4. С. 45–61.
- [2] KAUFMAN Y., TANRÉ D., BOUCHER O. A satellite view of aerosols in the climate system // *Nature*. 2002. Vol. 419. N. 6903. P. 215–223.
- [3] SCHWARTZ J., LADEN F., ZANOBETTI A. The concentration-response relation between PM (2.5) and daily deaths // *Environmental Health Perspectives*. 2002. Vol. 110. N. 10. P. 1025–1029.
- [4] LIN C., LABZOVSKI L. ET AL. Observation of PM_{2.5} using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring // *Atmospheric Environment*. 2020. Vol. 227. Art. 117410.

4.10. Кузнецова А. С. Технологии обработки современных цифровых моделей рельефа для системы аграрного мониторинга

В настоящее время для эффективного управления сельскохозяйственным производством активно разрабатываются и внедряются информационные системы аграрного мониторинга. Существующие системы по большей части направлены на сбор и анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и информационных продуктов, получаемых на их основе (сведения о погодных условиях, индексы растительности) [1]. Однако в системах аграрного мониторинга необходимо также учитывать информацию о рельефе местности, который влияет на интенсивность освещения и прогревания поверхности, термический и ветровой режимы, распределение осадков и др. [2].

В данной работе рассматривается получение морфометрических характеристик рельефа с применением методов ДЗЗ и геоинформационных технологий на примере опытно-производственного хозяйства (ОПХ) «Михайловское». Из распространенных цифровых моделей рельефа (ЦМР) глобального масштаба, находящихся в открытом доступе (MERIT DEM, SRTM и другие) наиболее новой и точной считается FABDEM [3]. Данный набор выбран в качестве исходных данных. Дополнительно в работе использованы высокоточные аэрофотоснимки, полученные при помощи съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

В результате выполненных работ составлены технологии обработки набора данных FABDEM и массива аэрофотоснимков в геоинформационной системе QGIS и программном обеспечении Agisoft

Metashape Professional соответственно. Основные этапы преобразования обработки данных FABDEM выполнялись с помощью программ библиотеки GDAL. Для автоматизации запуска, которых подготовлена модель обработки, содержащая алгоритм всего рабочего процесса с использованием инструмента QGIS — «Processing Modeler».

Разработаны цифровые карты, характеризующие основные морфометрические характеристики рельефа сельскохозяйственных угодий ОПХ «Михайловское» включая ортофотоплан местности, карты горизонталей, преобладающей экспозиции полей, уклонов поверхности рельефа и др. Подготовленные карты лежат в основе системы аграрного мониторинга ФИЦ КНЦ СО РАН. Импорт карт в систему осуществляется через веб-форму создания нового слоя на странице администрирования. После отправки формы проект каждой цифровой карты помещается в специализированное хранилище, которое находится в области видимости QGIS-сервера.

Научный руководитель — к.т.н. Ерунова М. Г.

Список литературы

- [1] FRITZ S., SEE L., BAYAS J. C. L. ET AL. A comparison of global agricultural monitoring systems and current gaps // *Agricultural Systems*. 2019. Vol. 168. P. 258–272.
- [2] Пашков С. В., Мажитова Г. З. Применение ГИС-технологий и аэрофотосъемки для геоинформационного картографирования и моделирования рельефа агроландшафтов // *Известия Иркутского государственного университета*. Серия: Науки о Земле. 2020. Т. 34. С. 82–95.
- [3] HAWKER L., UHE P., PAULO L. ET AL. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17. P. 024016.

4.11. Кузнецова И. В. Разработка и реализация системы комплексного анализа метроритмических и строфических характеристик русских поэтических текстов

Филологи и лингвисты, занимающиеся поэтическими текстами, сталкиваются с рутинной работой, связанной с анализом корпусов больших текстов. Поэтому актуально создание системы автоматического анализа русского стиха, имеющей практическое значение для специалистов.

В данной работе представлена часть системы, а именно модули анализа текстов на структурном уровне, который в себя включает анализ метроритмических (метра, ритма) и строфических (рифмы) характеристик [1]. Для достижения этой цели были построена математическая модель фактуры русского стиха, основанная на модифицированной нами модели метроритмики Пильщикова И. А. [2] и разработанной нами модели рифмы. На основе этой математической модели были разработаны и реализованы алгоритмы определения метроритмиче-

ских и строфических характеристик русских поэтических текстов, а также алгоритм определения фактуры, на основе которого реализована программа на языке Python, определяющая фактуру входного стихотворения.

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

Список литературы

- [1] БАРАХНИН В. Б., КОЖЕМЯКИНА О. Ю., КУЗНЕЦОВА И. В. и др. Модель фактуры русских поэтических текстов // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. № 3. С. 107–117.
- [2] БОЙКОВ В. Н., КАРЯЕВА М. С., СОКОЛОВ В. А. и др. Об автоматической спецификации стиха в информационно-аналитической системе // CEUR Workshop Proceedings. 2015. Vol. 1536. P. 144–151.

4.12. Ликсонова Д.И., Якунин Ю.Ю., Шестаков В.Н., Даничев А.А. О задаче прогнозирования успеваемости студентов с использованием инструментов машинного обучения

В настоящее время все большее внимание уделяется улучшению образовательного процесса в высших учебных заведениях, а также прогнозированию результатов обучения на основе текущей успеваемости. В связи с этим в образовательную деятельность происходит внедрение разнообразных цифровых помощников, автоматизированных систем и веб-приложений, которые позволяют студентам ориентироваться в процессе обучения. В некотором смысле цифровая поддержка необходима для студентов, особенно на первом курсе, когда происходит знакомство и адаптация студентов к среде высшего образования. Цифровой помощник, в виде мобильного приложения, позволяющий прогнозировать результаты обучения и вовремя проинформировать студента, может оказаться весьма полезным и помочь обучающемуся вовремя обратить внимание на дисциплины с низкой успеваемостью.

Можно отметить, что на сегодняшний момент работы о прогнозировании успеваемости студентов с использованием методов машинного обучения весьма актуальны, приведем некоторые из них [1–3]. Причем в данных исследованиях применяются различные методы, например, нейронные сети, машина опорных векторов, дерево решений, наивный байесовский метод, метод k -ближайших соседей, линейная регрессия и другие методы.

В настоящей работе основной акцент направлен на разработку системы прогнозирования результатов обучения студентов, на основе текущей успеваемости из электронных образовательных курсов с использованием непараметрической оценки функции регрессии Надарая — Ватсона [4]. Предполагалось, что такая система могла бы информировать студентов, через мобильное приложение, о вероятном результате их обучения по каждой дисциплине. Проведенные исследования позволили применить полу-

ченные результаты на практике и разработать мобильное приложение для студентов [5].

Таким образом, была построена прогнозная модель результатов обучения студентов на основе непараметрической оценки и создано удобное мобильное приложение для студентов на базе данных доступных из электронных курсов, которое позволяет студентам самостоятельно контролировать вероятные результаты обучения на каждой неделе обучения.

Список литературы

- [1] ВРАНИМ G. B. Predicting student performance from online engagement activities using novel statistical features // Arabian Journal for Science and Engineering. 2022. Vol. 47 (8). P. 1–19.
- [2] ТОКТАРОВА В. И., ПАШКОВА Ю. А. Предиктивная аналитика в цифровом образовании: анализ и оценка успешности обучения студентов // Сибирский педагогический журнал. 2022. № 1. С. 97–106.
- [3] ПОГРЕБНИКОВ А. К., ШЕСТАКОВ В. Н., ЯКУНИН Ю. Ю. Влияние использования элементов персональной образовательной среды на успеваемость студентов и их мотивацию к обучению // Информатика и образование. 2020. Т. 35. № 1 (310). С. 42–50.
- [4] НАДАРАЯ Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии / Тбилиси: Изд-во Тбилисского ун-та, 1983. 194 с.
- [5] ЯКУНИН Ю. Ю., ШАПОШНИК С. С. Мобильное приложение «Студент СФУ» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681221) / Красноярск: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2022.

4.13. Максакон Н.В. Стенд солнечных панелей: система сбора, обработки и визуализации информации

Установленный в ИСЭМ СО РАН экспериментальный стенд солнечных панелей используется для обоснования оптимального угла наклона панелей, целесообразности автоматизированной следящей за солнцем системы и верификации регрессионных моделей определения солнечной радиации [1].

Авторами разработан счетчик — устройство для мониторинга энергетических показателей в цепи постоянного тока на основе микроконтроллера Arduino. Счетчик собран на фабричной плате с возможностью модульного подключения компонентов. Данные автоматически загружаются на сервер с помощью одноплатного компьютера Raspberry Pi 3, который работает как промежуточный центр связи и принимает данные по протоколу Bluetooth [2].

Счетчик собирает данные со средним значением за 1 час, передает их на сервер и дублирует на локальную SD карту для резервирования при сбоях беспроводной передачи информации. Полученные данные сохраняются в формате *.csv для упрощения дальнейшего просмотра и обработки.

Для визуализации полученных данных разработано Web-приложение на основе языка JavaScript

с использованием технологий: фреймворк ReactJS, библиотека ChartJS, Redux Toolkit и другие. Данные подключаются из локальной директории и преобразуются в JSON объекты для дальнейшей обработки. Информация отображается как в виде исходных показаний, так и в виде обработанных сервисом мощности панели и солнечной радиации на квадратный метр.

Поскольку значения солнечной радиации зависят от погодных условий, таких как облачность, температура, влажность и т. д. [3], возникает необходимость в визуальном наблюдении за панелями. Для этих целей разрабатывается серверное приложение с использованием NodeJS и фреймворк Expressjs, которое позволит подключить IP камеру и передавать изображение в web-приложение. Помимо вышеупомянутых возможностей сервер позволит удалённо обрабатывать информацию, которая далее будет отправляться в готовом виде в Web-приложение для отрисовки графиков.

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] IVANOV R., МАКСАКОВ N. Development of a solar energy meter for an experimental array // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 289. Art. 05001.
- [2] IVANOV R., МАКСАКОВ N. System for Storing and Processing the Results of Energy Test Facility Data Monitoring // Energy Systems Research. 2022. Vol. 5. N. 3. P. 21–26.
- [3] MYERS D. Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications / Boca Raton: CRC Press, 2013. 182 p.

4.14. Марданшин В.М. Актуальные проблемы мониторинга смешанной высокопроизводительной вычислительной среды

В докладе обсуждается проблема мониторинга смешанной вычислительной инфраструктуры, обеспечивающей проведение научных экспериментов. Особенностью такой инфраструктуры является интеграция не только bare-metal оборудования (вычислительный кластер, сервер, персональный компьютер и т. д.), но и виртуализированного окружения (виртуальные машины, контейнеры) [1]. Сбор метрик об общей загрузке ресурсов в такой гибридной среде является нетривиальной задачей.

Как правило, мониторинг, хранение метрик и визуализация архивных метрик обеспечиваются различными системами специального назначения, а для их интеграции необходимы внешние программные средства. Кроме того, в тех случаях, е-

ли требуется мониторинг специализированного оборудования (микрокомпьютеры, инфраструктурное оборудование) или заданных параметров приложений, то возникает потребность в разработке новых средств сбора данных для системы мониторинга (экспортеров). Также, важной ролью систем мониторинга является автоматическое обнаружение и уведомление о возникновении аварийных ситуациях.

Совокупность задач мониторинга и проведения научных экспериментов с применением смешанных видов ресурсов, а также широкий спектр систем специального назначения для решения этих задач, обоснованно требует проведения исследований в этой сфере информационных технологий. В связи с этим, в докладе сформулированы системные и функциональные требования к системам мониторинга, приведен перечень таких систем и выполнен обзор их возможностей. Целью данного обзора является обоснованный выбор комбинации систем, интеграциях которых позволит решить задачи, связанные с мониторингом вычислительных ресурсов, контролем за их состоянием, архивным хранением и анализом вычислительной истории.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах».

Научный руководитель — к.т.н. Костромин Р. О.

Список литературы

- [1] SIDOROV I. A., KOSTROMIN R. O., FEOKTISTOV A. G. System for monitoring parameters of functioning infrastructure objects and their external environment // CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2638. P. 252–264.

4.15. Матушко А.К., Гостева А.А. Современные возможности тепловых космических снимков для наблюдения за территориями

История пространственных данных в тепловом космическом диапазоне начинается с 60-х годов прошлого столетия. Но массовое изучение началось только в 2000-х с момента предоставления архива спутниковых данных в открытом доступе. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) — это ключевой инструмент на борту спутников Terra и Aqua. Эти спутники ежедневно собирают данные о всей поверхности Земли в 36 спектральных диапазонах, в том числе в тепловых [1]. Данные в тепловом диапазоне дают понимание глобальной динамики и процессов, происходящих на суше, в океанах и нижних слоях атмосферы. Тепловые каналы имеют пространственное разрешение 1000 м, что боль-

ше подходит для глобальных исследований. В продукте MOD11/MYD11 предоставляется уже рассчитанная температура поверхности Земли в градусах Кельвина.

Данные миссии Landsat стали доступными в декабре 2009 года [2]. Спутник Landsat 8 был запущен в 2013 году, с использованием двух разных датчиков — Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Изображения Landsat 8 состоят из 11 спектральных каналов, где 10-й и 11-й являются дальними инфракрасными полосами, что позволяет анализировать энергию поверхности Земли с размером ячейки 100 метров. Что больше подходит для исследования городской территории и небольших объектов.

В 2021 году стали доступны новые данные Landsat Collection 2 Level 2, значения температуры напрямую хранятся в канале B10. В этом наборе наблюдается частичная потеря данных во многих территориальных областях. Значение температуры поверхности в этих ячейках NULL. Для разрешения этой ситуации было необходимо восстановить алгоритм получения температуры поверхности с сохранением всех дополнительных параметров, содержащихся в Level 2 [3].

Учитывая особенности различных источников по предоставлению температуры поверхности, можно сделать вывод, что для качественных исследований необходимо использовать совместно разные космические системы.

Список литературы

- [1] GIGLIO L., BOSCHETTI L., ROY D. ET AL. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 217. N. 1. P. 72–85.
- [2] WENG Q., FU P., GAO F. Generating Daily Land Surface Temperature at Landsat Resolution by Fusing Landsat and MODIS Data // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 145. P. 55–67.
- [3] ГОСТЕВА А. А., ЗАЙЦЕВ Н. Е., МАТУЗКО А. К. Автоматизация вычисления температуры поверхности по данным теплового диапазона Landsat 8-9 на территории Центральной Сибири // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3. С. 56–60.

4.16. Назаров Н.А. Torch PIV: Фреймворк для анализа двумерных PIV экспериментов с поддержкой CUDA

Метод PIV (Particle Imaging Velocimetry или лазерная анемометрия по изображениям частиц) широко используется для бесконтактного измерения полей скорости потока. Этот метод основан на вычислении перемещения групп специальных трассеров на последовательных изображениях посредством корреляционного анализа для определения скорости течения среды. PIV эксперименты зачастую требуют анализа большого количества изображений для определения статистических характери-

стик потока, поэтому для ускорения анализа данных в этой области активно применяются графические процессоры. Одна из первых GPU реализаций кросскорреляционного метода PIV была представлена еще в 2004 году [1]. Для первых реализаций GPU PIV все этапы корреляционного алгоритма были реализованы без использования специализированных библиотек. Позже, с появлением технологии CUDA, стали появляться более высокоуровневые, гибкие и сложные решения задачи PIV, такие как OpenPIV [2] или [3] предназначенные непосредственно для анализа экспериментальных данных. Однако в таких проектах отсутствуют стабильные GPU версии. Например, GPU версия OpenPIV библиотек все еще находится в beta режиме и давно не развивается. От пользователя требуется сборка библиотек, и некоторые сторонние ресурсы, необходимые для работы GPU OpenPIV, на сегодняшний день не поддерживаются.

В работе продемонстрированы возможности применения высокоуровневых библиотек для анализа данных с поддержкой GPU вычислений на языке Python. Была разработана библиотека Torch PIV для анализа 2D PIV экспериментов на основе фреймворка глубокого обучения PyTorch с поддержкой CUDA. Библиотека реализует итерационный кросскорреляционный БПФ PIV алгоритм со смещением окна поиска, последующей валидацией векторов скорости, а также интерполяцией эффекта потери пары. Выбранная реализация не требует от пользователя сборки, имеет компактную кодовую базу, способна работать как на CPU, так и на GPU в зависимости от выбора пользователя, а также обладает гибкостью Python модуля. Реализация на Python позволяет использовать модуль в качестве бэкенда для более сложных систем обработки экспериментальных данных, а базовая библиотека для данного метода является одной из самых надежных и распространенных в области машинного обучения. Кроме того, в библиотеку встроены упрощенный Qt интерфейс, позволяющий визуализировать полученные поля скорости.

В ходе работы было проведено сравнение производительности CPU версии разработанного метода с Open Source аналогами. Показано, что основные функции разработанного модуля могут быть выполнены на GPU со скоростью CUDA реализаций. Разработанная библиотека прошла классический цикл валидации на синтетических изображениях и открытых базах экспериментальных данных [4]. Было получено хорошее соответствие между полученными распределениями скоростей и тестовыми значениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Мегагрант (Соглашение № 075-15-2021-575).

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

Список литературы

- [1] SCHIWIETZ T., WESTERMANN R. GPU-PIV // Proc. Intern. Conf. «Vision, Modeling And Visualization». Stanford, USA: Ios Press. 2004. P. 666.
- [2] DALLAS C., WU M., CHOU V. ET AL. Graphical Processing Unit-Accelerated Open-Source Particle Image Velocimetry Software for High Performance Computing Systems // J. Fluids Eng. 2019. Vol. 141. N. 11. Art. 111401.
- [3] AGUILAR-CABELLO J., PARRAS L., DEL PINO C. DPVSoft-OpenCL: A multicore CPU-GPU accelerated open-source code for 2D Particle Image Velocimetry // SoftwareX. 2022. Vol. 20. N. 3. Art. 101256.
- [4] NEAL D. R., SCIACCHITANO A., SMITH B. L. ET AL. Collaborative framework for PIV uncertainty quantification: the experimental database // Meas. Sci. Technol. 2015. Vol. 26. N. 7. Art. 074003.

4.17. Перышкова Е.Н. Внедрение структурно-ориентированного алгоритма формирования подсистем выполнения MPI-программ в систему управления ресурсами SLURM

В современных вычислительных системах с массовым параллелизмом одним из важнейших архитектурных свойств является глубокая иерархия доступа к оперативной памяти процессорных ядер. Количество каналов связи, используемых для передачи сообщений между параллельными процессами в MPI-программах, зависит от первоначального распределения процессов по процессорным ядрам вычислительных узлов в системе. При взаимодействии процессорных ядер в вычислительной системе, обмен данными может осуществляться как через память и межпроцессорные обмены внутри узла, так и через сетевой адаптер, объединяющий узлы. Во время коммуникации параллельных ветвей MPI-программ может возникнуть конкуренция за ресурсы разделяемого канала связи (network contention), что может привести к падению производительности и увеличению времени передачи сообщений между ветвями параллельной программы [1]. В статье [2] описан эвристический алгоритм формирования подсистем выполнения MPI-программ, учитывающий падение производительности каналов связи. Целью данной работы являлось реализация и внедрение разработанного алгоритма в исходный код системы управления ресурсами (СУР) SLURM.

Разработан и внедрён алгоритм формирования подсистем выполнения MPI-программ в исходный код СУР SLURM. Проведено экспериментальное исследование времени выполнения MPI-программ при формировании подсистемы выполнения эвристическим алгоритмом по сравнению со стандартным алгоритмом СУР SLURM. Результаты экспериментов подтвердили эффективность применения разработанного алгоритма.

Проведён анализ исходного кода СУР SLURM.

В среду параметров добавлен новый флаг — `ntasks-alloc-algorithm`, а также внедрена структурно-ориентированная политика формирования подсистем выполнения MPI-программ. Созданный программный инструментарий расширяет возможности СУР SLURM.

Работа выполнена в рамках гос. задания ИФП СО РАН (ГЗ 0242-2021-0011).

Список литературы

- [1] STEFFENEL L. A. Modeling Network Contention Effects on All-to-All Operations // IEEE International Conference on Cluster Computing. 2006. P. 1–10.
- [2] ПЕРЫШКОВА Е. Н., КУРНОСОВ М. Г. Формирование подсистем элементарных машин в вычислительных системах с учетом конкурентного разделения каналов связи // Вестник ТГУ. 2019. № 47. С. 93–101.

4.18. Поляков С.А., Казаков Г., Иванов К.О. Разработка модели машинного обучения для автоматической генерации гитарных табулатур

В данной исследовательской работе в области, глубинного обучения в обработке звука, представлена разработка модели машинного обучения, целью которой является автоматическая генерация гитарных табулатур на основе аудиофайлов. Этот проект имеет важное практическое применение в мире музыки, предоставляя музыкантам и композиторам инструмент для более эффективной работы с музыкальными данными. Разработанная модель может быть использована для автоматической транскрипции музыки, что экономит время и усилия музыкантов при создании нотных записей. Кроме того, она может быть востребована для создания гитарных аранжировок, открывая новые возможности в области музыкального творчества.

Для обучения модели были использованы следующие датасеты:

1. MAESTRO. Датасет, содержащий классическую музыку, который предоставляет разнообразие стилей и инструментов.
2. MusicNet Dataset. Этот датасет включает разнообразные музыкальные произведения и предоставляет ценную информацию для обучения модели.
3. GuitarSet. Специализированный датасет для гитаристов, содержащий записи гитарных звуков и метаданные.
4. Самостоятельно Синтезированные Датасеты. Дополнительно были созданы датасеты, включающие аудиофайлы и соответствующие midi-файлы.

Также для обучения и достижения хороших результатов были использованы библиотеки: Librosa, PyTorch, Music21, Matplotlib, Numpy, Pandas, а другие стандартные библиотеки языка программирования Python.

Вместо обучения на целых музыкальных файлах было разработано решение, при котором аудиофайл разделяется на паттерны, такие как вокал, бас, барабаны и аккомпанемент. Для каждого паттерна генерируется соответствующий MIDI файл, что позволяет более точно извлекать информацию о мелодии и аккордах из аудиофайла с помощью специального алгоритма.

В процессе разработки модели возникли следующие проблемы:

1. Наличие шумов и дополнительных музыкальных эффектов в аудиофайлах оказывает существенное влияние на качество предсказаний.
2. Сложность разделения аудио-файла на паттерны.

Для достижения максимальной точности в процессе реализации нашей модели мы применили несколько важных методов. В частности, мы использовали преобразование Фурье, которое позволило улучшить качество обработки аудиоданных. Кроме того, мы предложили использовать не только мел-спектрограммы, но и хроматограммы для обучения модели. Это решение существенно повысило эффективность и точность нашей модели в анализе звуковых данных.

В целом наша модель показала неплохие результаты по придуманным нами метрикам. В дальнейшем планируется улучшить качество модели за счет увеличения количества тренировочных данных.

Список литературы

- [1] 33 научных статьи посвященных музыкальной транскрипции. [Электронный ресурс]. URL: <https://paperswithcode.com/task/music-transcription>.
- [2] Сайт открытой библиотеки Pytorch. [Электронный ресурс]. URL: <https://pytorch.org/>.
- [3] Документация библиотеки librosa. [Электронный ресурс]. URL: <https://librosa.org/doc/latest/index.html>.

4.19. Пушкарев А.А. Методология разработки компонентов оболочек для инструментов визуализации данных в среде React JS

В последние годы стандартом разработки клиентских веб-приложений стало использование JavaScript фреймворков (React, Vue, Angular), что вызывает сложности в совместном использовании данных инструментов с библиотеками визуализации данных. Решением данной проблемы стала разработка компонентов оболочек, позволяющих пользоваться библиотеками визуализации данных с удобным API в конкретном фреймворке. Однако не для всех библиотек существуют удачные решения, как например для картографической библиотеки Leaflet, для другой популярной open source библиотеки OpenLayers все существующие решения являются либо устаревшими, либо не реализующими необходимую функциональность.

В настоящем докладе представлен подход к разработке компонентов оболочек для инструментов визуализации данных в среде React JS на примере библиотек OpenLayers и ChartJs. В случае если в веб-приложении не требуются выполнять сложные манипуляции с данными, переключать слои на карте, динамически добавлять или удалять данные на график, то можно обойтись и без дополнительной обертки над инструментом визуализации данных. Однако при создании более крупных приложений без грамотной декомпозиции кода на отдельные модули будут возникать трудности с дальнейшей разработкой и поддержкой программного продукта.

В основе предлагаемого подхода к разработке компонентов оболочек лежит React Context Api [1] и представление всех сущностей в виде компонента с собственным состоянием и набором функций для изменения параметров конкретной сущности, что позволяет точно вносить изменения без дополнительных перезагрузок компонентов. В результате получается набор компонентов, предоставляющих удобный API для визуализации пространственных данных на карте и построения графиков.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Якубайлик О. Э.

Список литературы

- [1] Официальная документация React JS. [Электронный ресурс]. URL: <https://react.dev/>.

4.20. Рудов М.С. Элементы геоэкологического мониторинга на основе интеллектуальных датчиков

В настоящий момент промышленные предприятия загрязняют воздух различными веществами, что является фактором опасности для здоровья населения. В связи с этим, одной из актуальных задач наблюдения за степенью техногенного воздействия является создание системы сбора, хранения и обработки данных для геоэкологического мониторинга, используя современные цифровые системы на основе интеллектуальных датчиков. В связи с большим объемом данных отправляемых интеллектуальными датчиками необходима комплексная система сбора, обработки и хранения потоковых данных, характеризующих изменение среды обитания, а также их представление в удобно читаемом формате.

Непрерывно отправляемые данные с датчиков принято называть потоковыми данными. Обычно для обработки потоковых данных используют ETL [1] технологии (extract-transform-load), примером которых могут служить такие системы как: Apache Airflow, Streamsets, Apache NiFi. Поток-овые данные с различных датчиков передаются с помощью различных протоколов передачи, так у системы должна быть возможность получать такие данные или же работать с очередями сообщений

(RabbitMQ) так как они тоже поддерживают как минимум протокол mqtt [2]. В предлагаемом нами варианте используются несколько датчиков, которые собирают информацию и отправляют данные в очередь сообщений (RabbitMQ) по протоколу mqtt, эти датчики при желании можно настроить даже по мобильному телефону, используя Bluetooth и программу «Sena BTerm» [3]. Первый датчик собирает информацию пыли (PM1, PM2.5, PM10, PM100), второй датчик собирает информацию по газам (CO, CO₂, SO₂, NO₂). У датчиков можно настроить периодичность отправки данных, режим соединения: online/periodic (постоянная передача данных / периодами: подключение, передача данных, отключение). Данные вида json по протоколу mqtt попадают в очередь RabbitMQ на сервер. Далее с помощью NiFi данные отправляются на наш сервер и затем обрабатываются с помощью Java. Далее данные проверяются и сохраняются в базу данных PostgreSQL и пользователь может посмотреть данные в виде графика.

В заключении, нами сформирован процесс получения данных с интеллектуального датчика, который позволяет гибко настроить, а при смене формата данных, добавить несколько блоков в NiFi и привести все входные данные к единому формату.

Таким образом, сохранение и обработка данных реализована на языке Java и представляет собой корректно написанный код минимальной длины, подходящий под нашу задачу. Данный подход опробован на реальных данных, собираемых на угольных разрезах и показал хорошую работоспособность и надежность.

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

Список литературы

- [1] ETL. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ETL> (дата обращения 12.09.2023).
- [2] Протокол MQTT концептуальное погружение. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/463669/> (дата обращения 12.09.2023).
- [3] Sena BTerm. [Электронный ресурс]. URL: http://www.senanetworks.co.kr/download/manual_bterm/overview.html (дата обращения 05.09.2023).

4.21. Сиротинин А.А. Построение оптимальной топологии беспроводных внутренних сетей для технологии интернета вещей

При организации беспроводных сетей существуют такие проблемы, как хаотичное расположение точек доступа, отсутствие учета материалов конструкций и геометрии здания, что приводит к нестабильной работе интернета в целом и устройств интернета вещей в частности. В настоящей работе рассмотрены проблемы организации сетей стандартов 802.11

и 802.15.4. Методом измерений проведено исследование уровней мощностей сигнала с построением цифровой модели здания научного института. Уровни мощности сигнала, полученные методом измерений, хорошо согласуются с рассчитанными по расширенной модели Мотли — Кинана [1, 2], которая учитывает затухание сигнала в стенах и перекрытиях этажей. Данный метод можно применить для определения строительных конструкций и материалов отделки. Поставлена задача оптимизации, которая учитывает такие параметры, как минимальное количество оборудования и его стоимость, а также максимально возможную скорость передачи данных. Для решения задач оптимального расположения беспроводных точек доступа применяются различные методы, например, основанные на генетических алгоритмах [3].

Научный руководитель — к.т.н. Исаев С.В.

Список литературы

- [1] MOTLEY A. J., KEENAN J. M. P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz // Electronics Letters. 1988. Vol. 24. N. 12. P. 763–764.
- [2] ZHANG Y., WANG F., SHEN Y., HUO W. A study of indoor distributed calculation model of mobile communication // Proc. Intern. Conf. «Information Computing and Applications». China: Springer Berlin Heidelberg, 2011. P. 458–465.
- [3] SRINIDHI N. N., KUMAR S. D., VENUGOPAL K. R. Network optimizations in the Internet of Thing: A review // Engineering Science and Technology. 2019. Vol. 22. N. 1. P. 1–21.

4.22. Степанов А.В. Описание концепции и разработка защищенного облачного хранилища данных

В современном мире угроза нарушения конфиденциальности, целостности и доступности хранимых данных является серьезной проблемой для людей и организаций. Деятельность организаций нередко тесно связана с использованием облачных технологий, в том числе облачных хранилищ данных. Согласно отчету «Cloud Security Report 2019» компании Synopsys основной проблемой безопасности в облачных технологиях является утечка и потеря данных пользователей [1]. Результаты исследования «Лаборатории Касперского» также подтверждают наличие угрозы безопасности хранимых в облаке данных [2].

С целью снизить риск нарушения конфиденциальности данных в облачном хранилище и сделать его удобным в использовании, было принято решение разработать свое защищенное облачное хранилище данных с применением симметричного и асимметричного шифрований и с элементами социальной сети, используя SaaS в качестве подхода по предоставлению услуг, так как, согласно отчету «2020 SaaS Trends Report» от Blissfully, та-

кой формат предоставления услуг является наиболее удобным для пользователей [3]. Элементы социальной сети добавляют разработанному программному комплексу уникальности. В качестве алгоритмов шифрования файлов были выбраны отечественный алгоритм шифрования «Кузнечик» [4], описанный в ГОСТ Р 34.12–2015, а также AES-256 на выбор пользователя. В качестве асимметричного алгоритма шифрования для разделения доступа к зашифрованным файлам был выбран RSA. Загружаемые пользователем файлы шифруются на его стороне симметричным шифром, после чего он может разделить к ним доступ с другим пользователем из его списка друзей в данном облачном хранилище. Доступ разделяется путем шифрования симметричного ключа шифрования файла первого пользователя открытым ключом второго, после чего среди файлов второго пользователя появляется переданный ему таким образом файл, зашифрованный ключ которого расшифровывается на стороне второго пользователя с использованием его закрытого ключа. Помимо описанной возможности разделения доступа к файлу среди элементов социальной сети, в данном программном комплексе, разработанном на ReactJS и Node.js, также присутствует возможность поиска человека в сервисе для добавления в список друзей и в черный список, возможность текстового обмена сообщениями, а также возможность совершать аудио и видео звонки. Для удобства пользователя информация о предоставленном доступе к файлам представляет собой всплывающие окна с уведомлением.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Вайнштейн В. И.

Список литературы

- [1] Cloud Security Report 2019. [Электронный ресурс]. URL: https://arato.inf.unideb.hu/huszti.andrea/ibiza/2019_Cloud_Security_Report.pdf (дата обращения 15.09.2023).
- [2] «Лаборатория Касперского»: 9 из 10 утечек данных из облаков происходит из-за человеческого фактора. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kaspersky.ru/about/press-releases/2019_laboratoriya-kasperskogo-9-iz-10-utechek-dannyh (дата обращения 15.09.2023).
- [3] Cloud Security Report. [Электронный ресурс]. URL: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2093754/eBooks/2020%20SaaS%20Trends%20Report.pdf> (дата обращения 15.09.2023).
- [4] ГОСТ Р 34.12–2015. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры. Введён 2016-01-01 / М.: Стандарт информ, 2015. 20 с.

4.23. Чижова И.Г. Обработка и визуализация медицинских изображений

Современные информационно-вычислительные технологии активно внедряются в различные сферы деятельности человека, в том числе и в ме-

дицинскую практику. Радиомика – современное направление в радиологии, совмещающее клинический текстурный анализ и компьютерный анализ визуальных данных. Такой подход позволяет анализировать экспериментальные медицинские изображения для извлечения из них важных особенностей, необходимых для решения диагностических задач [1–4].

В рамках концепции радиомики разработана вычислительная методика, основанная на традиционных подходах обработки медицинских снимков. Методика включает в себя следующие этапы: предварительная обработка снимков, а именно усиление контрастности, удаление шумов, повышение яркости, сегментация, выделение объектов интереса на снимке и создание контурной карты органа, подчеркивающей его особенности. Методика протестирована на элементах базы данных, содержащих МРТ-снимки головного мозга с опухолевыми поражениями, маммографии с опухолевыми поражениями, а также КТ-снимки легких, пораженных COVID-19. Результаты, полученные в процессе работы, согласуются с оценками экспертов-медиков.

Дальнейшая работа основана на обработке данных медицинского эксперимента. Поставлена задача отделить интересующие объекты от фона, а также показать различную глубину, на которой находятся ткани изучаемых структур. Эта задача является важной, поскольку при малоинвазивных полостных операциях операционное поле может быть залито кровью, что практически перекрывает обзор эндоскопа. В рамках этого эксперимента выполнен выбор оптимального алгоритма для предварительной обработки изображения [5].

Список литературы

- [1] КНЯЗЕВ Д. В. Обзор некоторых алгоритмов сегментации изображений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 393–400.
- [2] CAI L., GAO J., ZHAO D. A review of the application of deep learning in medical image classification and segmentation // Annals of translational medicine. 2020. Vol. 8. N 11. Art. 713.
- [3] Литвин А. А., Буркин Д. А., Кропинов А. А., Парамзин Ф. Н. Радиомика и анализ текстур цифровых изображений в онкологии (обзор) // Современные технологии в медицине. 2021. Т. 13. № 2. С. 97–106.
- [4] Мелдо А. А., Уткин Л. В., Трофимова Т. Н. и др. Новые подходы к разработке алгоритмов искусственного интеллекта в диагностике рака легкого // Лучевая диагностика и терапия. 2019. № 1. С. 8–18.
- [5] Медиевский А. В., Зотин А. Г., Симонов К. В. и др. Вычислительная методика обработки и анализ снимков медицинского эксперимента на основе шпирлет-преобразования изображений // Медицина и высокие технологии. 2023. № 1. С. 5–14.

4.24. Чирко Р.А., Урманцева Н.Р. Интеллектуальная система комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента

В статье рассматривается проектирование и разработка интеллектуальной системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента. Задача системы — помощь в принятии решений при определении кода классификации СЕАР путем распознавания обученной сверточной нейронной сетью загруженного в программу снимка формата DICOM или фотографии ног пациента.

Для повышения эффективности распознавания использовались методы контрастности для снимков формата DICOM и метод приведения к черно-белому формату для фотографий ног пациентов. Таким образом, среднее значение процента распознавания DICOM снимков варьируется от 86.1 до 97.4 процента, а фотографий ног пациентов — от 82 до 99 процентов [1].

На текущем этапе отсутствуют подходы, позволяющие диагностировать на ранних стадиях нарушение венозного оттока от нижних конечностей, которое, как правило, протекает в форме хронической венозной недостаточности — самая часто встречающаяся патология сосудов у человека; в РФ свыше 30 000 000 человек имеют хронические заболевания вен (ХЗВ) нижних конечностей [2].

Несмотря на то, что искусственный интеллект активно внедряется в жизнь, в частности, в области медицины [3], в создании и функционировании интеллектуальной системы, тем не менее, существуют препятствия, в частности, отсутствие набора снимков для обучения модели предсказания и поддержки актуальности моделей очередными снимками.

Метод контрастности применялся для подготовки DICOM-набора. Набор снимков обрабатывался по следующему алгоритму: загрузка снимка в редактор, подбор параметров контрастирования, загрузка в нейронную сеть, завершение обработки при проценте ошибки меньше 10, возврат на этап подбора параметров в противном случае. Метод контрастности помог улучшить результаты распознавания. При изменении набора снимков использовались следующие параметры: насыщенность 60, контраст 10, автоулучшение 10.

Метод приведения изображения к черно-белому формату применялся для подготовки набора фотографий ног. Изначально нейронная сеть обучалась на оригинальных снимках; среди 12 тестовых изображений было верно классифицировано 4 фотографии, ошибка составила 33 процента. Для улучшения результата набор снимков был переведен в черно-белые тона, после чего загружен в нейронную сеть. При обучении нейронная сеть прошла 100 эпох, что улучшило показатели модели. Метод контрастности помог снизить ошибку неверного распознава-

ния, так, например, среди 12 тестовых изображений на оригинальных снимках были ошибочно распознаны 7 снимков, а на контрастированных снимках ошибочное распознавание произошло 1 раз, что говорит об ошибке в 8 процентов. При использовании метода приведения изображения к черно-белому формату среди 14 тестовых изображений было допущено одно ошибочное распознавание, что говорит об ошибке в 7 процентов. Две обученные модели были объединены в рамках системы комплексной оценки состояния вен нижних конечностей пациента.

С помощью описанных методов удалось улучшить результаты распознавания и классификации изображений нейронной сетью. В дальнейшем планируется продолжить разработку программы и расширение функционала, запустить программы на сервере РВК в связи с тем, что для вычислений результатов нейронной сетью требуются ресурсы ПК. Переход на WEB-приложение поможет существенно снизить нагрузку на рабочий ПК врача-флеболога.

Список литературы

- [1] Чирко Р.А., Урманцева Н.Р. Система анализа результатов неинвазивных исследований пациента для поддержки принятия решений сердечно-сосудистого хирурга-флеболога // Успехи кибернетики. 2022. Т. 3. № 3. С. 42–51.
- [2] Варикозное расширение вен. Лечение. [Электронный ресурс]. URL: <https://formulzd.ru/varicose-vein> (дата обращения 03.02.2023).
- [3] Ле Мань Ха. Сверточная нейронная сеть для решения задачи классификации // Труды МФТИ. 2016. № 8 (3). С. 91–97.

4.25. Шашок Н.А., Кожемьякина Э.Д. Разработка структуры документов с пересекающейся сегментацией в системе Elasticsearch

Один из ключевых модулей системы автоматизированного комплексного анализа русских поэтических текстов [1, 2], разработанной в ФИЦ ИВТ, — модуль автоматического составления словарей авторского языка и конкордансов. В процессе создания словарей такого типа возникает задача определения контекста употребления лексики.

Термин «контекст» может обозначать различные уровни сегментирования текста: в качестве сегмента, включающего контекст, выступает строфа, строка, или предложение. Строфы и строки явно связаны иерархическими отношениями, поскольку строфы состоят из строк. Однако строки и предложения, а также предложения и строфы иерархических отношений не имеют: предложение может быть частью строки или строфы, занимать несколько строк, начинаться на одной строфе и заканчиваться на другой; такие сегменты поэтического текста будем называть пересекающимися.

Модуль автоматического составления словарей авторского языка и конкордансов должен предоставлять возможность работы с любым доступным

контекстом, на любом уровне сегментирования. Поскольку форматы хранения и передачи текстовых данных имеют, как правило, иерархичный характер, практический интерес представляет разработка принципов структуризации текстов с учетом выявленных пересекающихся сегментов в рамках задачи поиска контекста с предварительно заданным уровнем сегментирования.

Для решения поставленной задачи целесообразно использование поисковой системы Elasticsearch, документы в которой хранятся в формате JSON. В работе представлена структура документов JSON, использование которой в рамках индекса Elasticsearch позволяет осуществлять поиск контекста употребления лексики в корпусе поэтических текстов, хранящегося в индексе. Разработка имеет общие черты с решениями проблемы пересекающихся сегментов в языках разметки [3,4], в частности, с решением типа Segmentation. Принципиальна возможность применения разработанной структуры также к корпусам не только поэтических текстов, что расширяет область потенциального использования модуля автоматического составления словарей в других информационных системах.

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

Список литературы

- [1] Система комплексного анализа поэтических текстов. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.poeem.ict.nsc.ru> (дата обращения 29.08.2023).
- [2] Кожемякина О. Ю. Программная система комплексного анализа русских поэтических текстов: модели и алгоритмы: дис. ... д-ра т. наук. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Новосибирск, 2022. 288 с.
- [3] Di Iorio A., Peroni S., Vitali F. Towards markup support for full GODDAGs and beyond: the EARMARK approach // Proc. Intern. Conf. «Balisage: The Markup Conference». Montréal: Mulberry Technologies, Inc., 2009. Vol. 3.
- [4] Schmidt D. The role of markup in the digital humanities // Historical Social Research. 2012. Vol. 27. N 3. P. 125–146.

4.26. Широков И.А., Евгеньев В.Е. Анализ и сравнение методов глубокого обучения для распознавания лиц в социальных сетях

Социальные сети стали неотъемлемой частью современного информационного обмена, и многие пользователи активно загружают и обмениваются фотографиями, из чего возникает потребность в автоматизированном распознавании лиц на изображениях, поскольку это полезно для обеспечения безопасности, улучшения пользовательского опыта и других задач. Глубокое обучение с использованием нейронных сетей стало одной из наиболее эффек-

тивных методик для решения задачи распознавания лиц.

Целью исследования является проведение анализа существующих методов глубокого обучения, применяемых к задаче распознавания лиц в социальных сетях, а также разработка программного комплекса для распознавания лиц, в котором будет реализован наиболее эффективный метод обучения.

При проведении анализа уже существующих систем по распознаванию лиц (Face Recognition API от Microsoft Azure, Face++ и др.), были выявлены их недостатки: отсутствие возможности работ с социальной сетью ВКонтакте, недоступность использования на территории Российской Федерации, платное использование. Далее были выявлены наиболее подходящие инструменты, разработан программный комплекс, позволяющий определить пользователя социальной сети по фотографии.

Программный комплекс может быть полезен в работе спецслужб, например, для поиска лиц, представляющих угрозу безопасности страны или террористическую опасность. Банковский сектор может использовать подобную систему для идентификации своих клиентов.

Для разработки алгоритма распознавания лиц в социальных сетях мы выбрали язык программирования Python [1], поскольку он предоставляет все необходимые библиотеки для работы с нейронными сетями.

Задачей алгоритма является распознавание лица на поступающем на вход изображении, для чего мы применяем сверточные нейронные сети [2], так как они демонстрируют более высокую точность распознавания. Алгоритм включает в себя следующие шаги: изображение, загруженное в программу, обрезается для удаления лишних деталей, затем на нем применяется фильтр контрастности, после чего обработанное изображение передается на вход нейронной сети, и результат распознавания лица выводится на экран пользователя.

Параметры контрастирования были подобраны опытным путем. Применение метода контрастности существенно улучшило точность распознавания, достигая уровня в пределах 75-98%. Средняя вероятность правильного распознавания различных лицевых характеристик составила 91.4%, что свидетельствует о высокой эффективности нейронной сети в определении характеристик лиц.

Дальнейшие исследования планируется сосредоточить на улучшении производительности моделей при большем разнообразии данных и учете проблем приватности, что может сделать социальные сети более безопасными и удобными для пользователей.

Научный руководитель — к.т.н. Камальдинова З. Ф.

Список литературы

- [1] ТАРШХОЕВА Ж. Т. Язык программирования Python. Библиотеки Python // Молодой учёный. 2021. Т. 5 (347). С. 20–21.
- [2] ХА Л. М. Сверточная нейронная сеть для решения задачи классификации // Труды МФТИ. 2016. Т. 8. № 3. С. 91–97.

4.27. Яковлев Г.А., Тренькаев В.Н. Платформа SecureDBMS для исследования защищенных облачных СУБД

Применение мощных облачных вычислительных ресурсов и производительных хранилищ данных, а также их высокая доступность для бизнеса привели к росту популярности облачных решений. В время переноса процессов обработки и хранения данных в «облако» требуется обеспечить достаточный уровень безопасности, в частности, конфиденциальности передаваемых, хранимых и обрабатываемых данных.

Зачастую в различных информационных системах используются развернутые в «облаке» системы управления базами данных (СУБД). Современные решения в большинстве своем обеспечивают защиту данных при их передаче и хранении. Объектами множества исследований являются алгоритмы защиты данных; на их основе были построены некоторые исследовательские проекты, например, CryptDB [1] и ZeroDB [2], реализующие СУБД с применением таких алгоритмов для шифрования данных.

В результате проведенного авторами анализа литературы и существующих решений была предложена архитектура платформы для разработки и исследования защищенных облачных СУБД. Авторами была разработана концепция программной платформы SecureDBMS, которая обобщает разработки других исследователей. Данная платформа позволяет построить защищенную облачную СУБД на базе целевого сервера базы данных (в данном случае MySQL), сделать оценку производительности разработанной СУБД, а также провести практические исследования по анализу безопасности используемых алгоритмов и протоколов защиты. В процессе работы с платформой исключается использование нестандартных клиентских библиотек и модификация сервера базы данных.

Единая универсальная архитектура позволяет моделировать различные варианты облачных СУБД. Важными особенностями платформы являются использование компонентов с открытым исходным кодом, а также предоставление интерфейсов для подключения пользовательских модулей, реализующих основной функционал — шифрование данных или управление ключами. Это дает возможность развивать проект в будущем, с упором на исследование в рамках облачных СУБД алгоритмов защиты данных (реализация алгоритмов

из СУБД Arx [3], для которой исходные коды не доступны), кроме того, позволит проводить сравнение с уже известными алгоритмами, которые представлены в виде программных библиотек или в составе существующих решений (например, алгоритм шифрования OPE [4]).

Список литературы

- [1] POPA R. A., REDFIELD C., ZELDOVICH N., BALAKRISHNAN H. CryptDB: Protecting confidentiality with encrypted query processing // SOSP'11 — Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Operating Systems Principles. 2011. P. 85–100.
- [2] EGOROV M., WILKISON M. ZeroDB white paper // Cryptography and Security (cs.CR). arXiv. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1602.07168.
- [3] PODDAR R., BOELTER T., POPA R. A. Arx: an encrypted database using semantically secure encryption // Proceedings of the VLDB Endowment. 2019. Vol. 12. P. 1664–1678.
- [4] BOLDYREVA A., CHENETTE N., LEE Y., O'NEILL A. Order-Preserving Symmetric Encryption // EUROCRYPT 2009. LNCS 5479. 2009. P. 224–241.

Алфавитный указатель

Абгарян Гарник Владимирович

Казанский (приволжский) федеральный университет (Казань), Россия
g.v.abgaryan@gmail.com

Стр. 9

Аносова Елизавета Петровна

Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа), Россия
elizavetaanosova.0809@gmail.com

Стр. 9

Аргучинцев Александр Валерьевич

Иркутский государственный университет (Иркутск), Россия
arguch@math.isu.ru

Стр. 25

Арендаренко Максим Сергеевич

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия
m.arendarenko@inbox.ru

Стр. 9

Ахунов Аделъ Айратович

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ (Казань), Россия

Стр. 39

Богданюк Даниил Олегович

Балтийский Государственный Технический Университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова (Санкт-Петербург), Россия

bogdaniuk@mail.ru

Стр. 10

Бокиев Тимур Парвизович

Томский государственный университет (Томск), Россия
praktikana100@gmail.com

Стр. 11

Боков Адам Исрапилович

Институт математики и фундаментальной информатики СФУ (Красноярск), Россия
adambokov@list.ru

Стр. 49

Бочарников Владислав Александрович

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), Россия

Стр. 14

Брындин Лука Сергеевич

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

l.bryndin@g.nsu.ru

Стр. 12

Булавская Ангелина Александровна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия

Стр. 37

Бушмина Елизавета Алексеевна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия

Стр. 37

Ван Ли

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

l.van3@g.nsu.ru

Стр. 12

Вардосанидзе Отари Доментиевич

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

otarivard@gmail.com

Стр. 13

Варшавчик Лидия Александровна

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), Россия

lidia.varsh@mail.ioffe.ru

Стр. 14

Ветрова Анна Викторовна

Томский государственный университет (Томск), Россия

Стр. 27

Вирц Рудольф Александрович

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия

virtsrudolf@gmail.com

Стр. 14

Володько Ольга Станиславовна

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия

Стр. 7

Воробьева Диана Александровна

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

d.vorobeva@g.nsu.ru

Стр. 15

Вяткин Александр Владимирович

*Институт вычислительного моделирования
СО РАН (Красноярск), Россия*
Стр. 15

Галицын Дмитрий Дмитриевич

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
РАН (Санкт-Петербург), Россия*
Стр. 14

Гарбузов Дмитрий Николаевич

*Томский государственный университет (Томск),
Россия*
dmitrij.garbuzov.98@mail.ru
Стр. 16

Глуздов Дмитрий Сергеевич

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
(Новосибирск), Россия*
gluzdov1@yandex.ru
Стр. 17

Голубев Роман Андреевич

*Институт вычислительного моделирования
СО РАН (Красноярск), Россия*
roma_golubev1999@bk.ru
Стр. 17

Горбунова Ксения Дмитриевна

*РНМЦ «Красноярский математический центр»
(Красноярск), Россия*
gorbunova.kd@icm.krasn.ru
Стр. 17

Городилов Даниил Владимирович

*Федеральный исследовательский центр информа-
ционных и вычислительных технологий (Новоси-
бирск), Россия*
dealenx@yandex.ru
Стр. 44

Горынин Арсений Глебович

*Новосибирский государственный университет
(Новосибирск), Россия*
arsgorunin@yandex.ru
Стр. 18

Гостева Анна Александровна

*Институт вычислительного моделирования
СО РАН (Красноярск), Россия*
Стр. 56

Гренкин Глеб Владимирович

*Владивостокский государственный университет
(Владивосток), Россия*
glebgrenkin@gmail.com
Стр. 19

Григорьева Анна Анатольевна

*Национальный исследовательский Томский поли-
технический университет (Томск), Россия*
Стр. 37

Гуань Сюэлинь

*Новосибирский государственный университет
(Новосибирск), Россия*
s.guan@g.nsu.ru
Стр. 31

Гущин Владимир Евгеньевич

*Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера
СО РАН (Новосибирск), Россия*
wolfhabitss@gmail.com
Стр. 19

Данилкин Евгений Александрович

*Томский государственный университет (Томск),
Россия*
Стр. 43

Даничев Алексей Александрович

*Сибирский федеральный университет (Красно-
ярск), Россия*
Стр. 55

Джангиров Бахтияр Идрис Оглы

*Институт динамики систем и теории управления
им. В.М. Матросова СО РАН (Иркутск), Россия*
bah2002ti@gmail.com
Стр. 50

Джелилов Элизов

*Томский государственный университет (Томск),
Россия*
Стр. 21

Евгеньев Владислав Евгеньевич

*Самарский государственный технический универ-
ситет (Самара), Россия*
evg.vladislav@yandex.ru
Стр. 63

Жигарев Владимир Алексеевич

*Сибирский федеральный университет (Красно-
ярск), Россия*
zhigarev.vladimir@yandex.ru
Стр. 19, 20

Зайцева Наталья Юрьевна

*Самарский федеральный исследовательский центр
РАН, Институт проблем управления сложными
системами РАН (Самара), Россия*
nat.polyaeva@yandex.ru
Стр. 50

Звонарева Татьяна Александровна

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН (Новосибирск), Россия
t.zvonareva@g.nsu.ru

Стр. 45

Зубрицкий Павел Анатольевич

Институт вычислительного моделирования СО РАН, ООО «Территориальный центр «Эвенкиягеомониторинг» (Красноярск), Россия
falcon151186@mail.ru

Стр. 51

Ибрагимов Фарид Шаринович

Томский государственный университет (Томск), Россия

mr.farid.2004@mail.ru

Стр. 21

Иванов Кирилл Олегович

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

Стр. 58

Кабанов Алексей Анатольевич

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Красноярск), Россия

weller86@inbox.ru

Стр. 45

Кадырова Ольга Александровна

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

o.kadyrova@g.nsu.ru

Стр. 21

Казаков Глеб

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

Стр. 58

Калашников Роман Александрович

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия

r.kalashnikov@g.nsu.ru

Стр. 51

Капитонов Алексей Антонович

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия

alekskap99@mail.ru

Стр. 22

Кириллов Павел Иванович

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск), Россия

Tea2805@mail.ru

Стр. 23

Киселев Андрей Викторович

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия

andreikiselev2000@mail.ru

Стр. 52

Клименко Александра Игоревна

Институт цитологии и генетики СО РАН (Новосибирск), Россия

Стр. 15

Ключанцев Владислав Сергеевич

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия

vsklyuchantsev@gmail.com

Стр. 23

Когай Алина Дмитриевна

Балтийский федеральный университет им. И. Канта (Калининград), Россия

ad.kogai@yandex.ru

Стр. 24

Кожемякина Элина Дмитриевна

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия

kojemyakina.elina2017@yandex.ru

Стр. 62

Кожемяченко Антон Андреевич

Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет) (Долгопрудный), Россия

kozhenyachenko.aa@mipt.ru

Стр. 24

Колотилов Вадим Алексеевич

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия

kolotilov1992@gmail.com

Стр. 25

Копылов Даниил Евгеньевич

Иркутский государственный университет (Иркутск), Россия

it-daniil@yandex.ru

Стр. 25

Корякин Павел Владимирович

Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН (Иркутск), Россия
k_pavel_10@mail.ru
Стр. 52

Котлер Василий Дмитриевич

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия
vaskotler@yandex.ru
Стр. 47, 53

Кочарина Алена Романовна

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия
a.kocharina@g.nsu.ru
Стр. 26

Краснощёков Константин Вячеславович

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Красноярск), Россия
kraspeed1994@gmail.com
Стр. 53

Кругляков Алексей Сергеевич

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия
piggsy@gmail.com
Стр. 45

Крушев Даниил Русланович

Томский государственный университет (Томск), Россия
daniilkrushev@mail.ru
Стр. 27

Кузнецов Кирилл Сергеевич

Дальневосточный Федеральный Университет (Владивосток), Россия
kuznetsovks17@gmail.com
Стр. 27

Кузнецова Анна Сергеевна

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Красноярск), Россия
anna.simakina.97@mail.ru
Стр. 54

Кузнецова Ирина Владимировна

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия
irkuznetsova92@gmail.com
Стр. 54

Кучунова Елена Владимировна

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия
HKuchunova@sfu-kras.ru
Стр. 15, 52

Ласковец Екатерина Валерьевна

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия
katerezanova@mail.ru
Стр. 28

Латипов Айзат Рафаилович

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва), Россия
latipov257@gmail.com
Стр. 29

Лещинский Дмитрий Викторович

Томский государственный университет (Томск), Россия
Стр. 43

Ликсонова Дарья Игоревна

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия
LiksonovaDI@yandex.ru
Стр. 55

Лысакова Евгения Игоревна

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия
Стр. 20

Макаров Даниил Сергеевич

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Красноярск), Россия
mcdan3991@yandex.ru
Стр. 45

Макаров Евгений Евгеньевич

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия
evgeniimakarov1995@gmail.com
Стр. 29

Максаков Никита Владимирович

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН (Иркутск), Россия
nikita.max@isem.irk.ru
Стр. 55

Максимова Анна Алексеевна

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия
sokolova.ann2001@gmail.com
Стр. 30

Малимонов Максим Игоревич

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Красноярск), Россия
malimonov.mi@ksc.krasn.ru

Стр. 45

Мамазова Дилара Абдурасуловна

Томский государственный университет (Томск), Россия
mamazova.dilara@mail.ru

Стр. 30

Манцурова Снежана Викторовна

Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск), Россия
SnegKyd@mail.ru

Стр. 31

Марданшин Владимир Михайлович

Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН (Иркутск), Россия
vova_mardanshin@mail.ru

Стр. 56

Матузко Александра Константиновна

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия
slope@rambler.ru

Стр. 56

Милойчикова Ирина Алексеевна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия

Стр. 37

Минаков Андрей Викторович

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия

Стр. 19, 20, 43

Мищенко Евгения Васильевна

Институт математики им С. Л. Соболева СО РАН (Новосибирск), Россия

Стр. 31

Моисеева Татьяна Владимировна

Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт проблем управления сложными системами РАН (Самара), Россия

Стр. 50

Москвичев Егор Владимирович

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Красноярск), Россия

jugr@ict.nsc.ru

Стр. 7

Мухина Светлана Сергеевна

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва), Россия
sveta.mukhina.1998@mail.ru

Стр. 32

Назаров Никита Андреевич

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск), Россия
nazarov.nik.an@gmail.com

Стр. 57

Найденова Кристина Евгеньевна

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия
kristina-akulova00@mail.ru

Стр. 33, 35

Насырова Дина Ахметовна

Институт механики им. Р. Р. Мавлютова – обособленное структурное подразделение УФИЦ РАН (Уфа), Россия
dinasyrova@mail.ru

Стр. 33

Никифорова Ангелина Юрьевна

Омский государственный технический университет (Омск), Россия
skt-omgtu@mail.ru

Стр. 46

Остапенко Владимир Викторович

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия

Стр. 25

Павский Кирилл Валерьевич

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Новосибирск), Россия

Стр. 48

Пекарская Татьяна Андреевна

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия
pekarskayat@yandex.ru

Стр. 34

Перышкова Евгения Николаевна

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск), Россия

e.peryshkova@gmail.com

Стр. 58

Песня Евгений Александрович

Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет) (Долгопрудный), Россия
resnyaevgeniy@yandex.ru
Стр. 34

Петракова Виктория Сергеевна

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия
Стр. 8

Пистунов Илья Игоревич

Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН (Иркутск), Россия
ilya-pistunov@mail.ru
Стр. 52

Платонова Марина Владимировна

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия
gumoznaya@gmail.com
Стр. 47, 53

Поляков Степан Андреевич

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия
s.polyakov@g.nsu.ru
Стр. 58

Прокопчук Владимир Евгеньевич

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия
vova_veola@mail.ru
Стр. 35

Проценко Никита Александрович

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия
nikitaprotsenko2003@gmail.com
Стр. 47

Пушкарев Александр Александрович

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Красноярск), Россия
flash550@yandex.ru
Стр. 59

Ревун Артем Леонидович

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Новосибирск), Россия
FarLionDirk@yandex.ru
Стр. 48

Рудин Сергей Алексеевич

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск), Россия
rudin@isp.nsc.ru
Стр. 48

Рудов Михаил Сергеевич

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Кемерово), Россия
sanctumdeus@yandex.ru
Стр. 59

Рыжков Илья Игоревич

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия
Стр. 30

Сабуров В. О.

Стр. 37

Салтыков Илья Евгеньевич

Стр. 44

Сибин Антон Николаевич

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия
Стр. 34

Сибирякова Татьяна Андреевна

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия
sibiriakova.tatiana@mail.ru
Стр. 33, 35

Сизаско Всеволод

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия
Sevsizzz@gmail.com
Стр. 36

Сиротинин Анатолий Андреевич

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия
slitch@icm.krasn.ru
Стр. 60

Скиба Василий Савельевич

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия
vassiliyskiba@gmail.com
Стр. 37

Сорокина Аида Арсеновна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия
sorokina.ajda@ya.ru
Стр. 37

Старовойтов Евгений Александрович

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), Россия
Стр. 14

Старченко Александр Васильевич

Томский государственный университет (Томск), Россия
Стр. 43

Степанов Андрей Владимирович

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия
bumer19981@gmail.com
Стр. 60

Стрелкова Софья Евгеньевна

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия
s.strelkova@g.nsu.ru
Стр. 38

Стучебров Сергей Геннадьевич

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия
Стр. 37

Сухинина Ксения Сергеевна

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия
k.sukhinina@g.nsu.ru
Стр. 38

Титова Анастасия Вячеславовна

Институт прикладной механики УрО РАН (Ижевск), Россия
titovaspace@ya.ru
Стр. 39

Тренькаев Вадим Николаевич

Томский государственный университет (Томск), Россия
Стр. 64

Тукмаков Алексей Львович

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ (Казань), Россия
Стр. 39

Тукмакова Надежда Алексеевна

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ (Казань), Россия
NadejdaTukmakova@ya.ru
Стр. 39

Уразов Станислав Олегович

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва), Россия
urazov.msu@gmail.com
Стр. 48

Урманцева Нелли Руслановна

Сургутский государственный университет (Сургут), Россия
Стр. 62

Уфимцев Кирилл Павлович

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия
Kirill.ufimtzev@yandex.ru
Стр. 40

Фаворская Алена Владимировна

Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет) (Долгопрудный), Россия
Стр. 24

Филиппенко Павел Сергеевич

Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет) (Долгопрудный), Россия
Стр. 24

Харламов Дмитрий Валентинович

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Красноярск), Россия
dimageadz@gmail.com
Стр. 45

Харьков Виталий Викторович

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ (Казань), Россия
Стр. 39

Цгоев Чермен Аланович

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия
chermen@tsgoyti.ru
Стр. 41

Цымарман Яков Дмитриевич

*Томский государственный университет (Томск),
Россия*
Стр. 11

Чижова Ирина Геннадьевна

ИКИТ СФУ (Красноярск), Россия
chizhovaig20@gmail.com
Стр. 61

Чирко Роман Анатольевич

ПАО «Сургутнефтегаз» (Сургут), Россия
chirko-99@mail.ru
Стр. 62

Чусовитина Александра Игоревна

*Институт математики и фундаментальной
информатики СФУ (Красноярск), Россия*
chusovitina2001@mail.ru
Стр. 42

Шайдуров Владимир Викторович

*Институт вычислительного моделирования
СО РАН (Красноярск), Россия*
shidurov@icm.krasn.ru
Стр. 8

Шапеев Василий Павлович

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск),
Россия*
Стр. 23

Шарова Алёна Витальевна

*Новосибирский государственный университет
(Новосибирск), Россия*
a.sharova@g.nsu.ru
Стр. 42

Шашок Наталья Александровна

*Федеральный исследовательский центр информа-
ционных и вычислительных технологий (Новоси-
бирск), Россия*
n.shashok@alumni.nsu.ru
Стр. 62

Шварц Наталия Львовна

*Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск),
Россия*
Стр. 31

Шебелева Анна Андреевна

*Сибирский федеральный университет (Красно-
ярск), Россия*
an_riv@mail.ru
Стр. 43

Шестаков Вячеслав Николаевич

*Сибирский федеральный университет (Красно-
ярск), Россия*
Стр. 55

Широков Илья Антонович

*Самарский государственный технический универ-
ситет (Самара), Россия*
ilshir63@mail.ru
Стр. 63

Юмин Кирилл Викторович

*Томский государственный университет (Томск),
Россия*
juminkir@mail.ru
Стр. 43

Яковлев Григорий Алексеевич

*Томский государственный университет (Томск),
Россия*
yakovlev-grisha@mail.ru
Стр. 64

Якубайлик Олег Эдуардович

*Институт вычислительного моделирования
СО РАН (Красноярск), Россия*
oleg@icm.krasn.ru
Стр. 8

Якунин Юрий Юрьевич

*Сибирский федеральный университет (Красно-
ярск), Россия*
Стр. 55

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., Синявский Ю. Н.

Компьютерная верстка в системе \LaTeX

Гусев О.И., Скиба В.С., Синявский Ю.Н.,
Городилов Д.В., Горынин А.Г.,
Жирнов А.А., Котлер В.Д., Кузнецова И.В.,
Платонова М.В., Цгоев Ч.А., Шашок Н.А.