

Федеральный исследовательский центр информационных  
и вычислительных технологий

XXIII Всероссийская конференция  
молодых учёных  
по математическому моделированию  
и информационным технологиям

Тезисы докладов

Алфавитный указатель участников

Новосибирск  
24–28 октября 2022 г.

УДК 004, 519.6  
ББК 22.19, 32.81  
М34

Тезисы XXIII Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия, 24–28 октября 2022 г. — Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2022. — 79 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 проблем, представленных в докладах участников.

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

#### **Организаторы конференции:**

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

Ответственные за выпуск: Гусев О. И., Рылов С. А.

## **Программный комитет:**

- академик Ю. И. Шокин (Новосибирск) — председатель
- академик И. В. Бычков (Иркутск) — зам. председателя
- к.т.н. С. А. Рылов (Новосибирск) — ученый секретарь
- академик В. В. Альт (Новосибирск)
- академик М. П. Федорук (Новосибирск)
- чл.-корр. РАН В. М. Садовский (Красноярск)
- чл.-корр. РАН С. И. Смагин (Хабаровск)
- чл.-корр. РАН В. В. Шайдуров (Красноярск)
- профессор В. Б. Барахнин (Новосибирск)
- профессор В. В. Москвичев (Красноярск)
- профессор В. П. Потапов (Кемерово)
- профессор В. С. Тимофеев (Кемерово)
- профессор М. В. Ульянов (Москва)
- профессор А. Н. Фионов (Новосибирск)
- профессор С. П. Шарый (Новосибирск)
- к.ф.-м.н. И. Ю. Турчановский (Томск)

## **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.т.н. Ю. Н. Синявский (Новосибирск)
- м.н.с. И. В. Кузнецова (Новосибирск)
- м.н.с. П. В. Мельников (Новосибирск)
- инж.-прогр. Т. С. Михаханова (Новосибирск)
- асп. Д. В. Городилов (Кемерово)
- асп. А. Г. Горынин (Новосибирск)
- асп. М. Г. Ермаков (Новосибирск)
- асп. Ю. Г. Ермаков (Новосибирск)
- асп. В. Д. Котлер (Новосибирск)
- асп. Д. А. Скорик (Новосибирск)
- асп. Ч. А. Цгоев (Новосибирск)

## **Научные направления**

### **1. Математическое моделирование**

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

### **2. Численные методы**

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

### **3. Высокопроизводительные и распределённые вычисления**

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

### **4. Информационные и геоинформационные системы**

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

### **5. Интеллектуальный анализ данных и задачи искусственного интеллекта**

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

### **6. Управление, обработка, защита и хранение информации**

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

### **7. Автоматизация и теория управления**

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

## Содержание

Тезисы докладов .....	6
1. Пленарные доклады .....	6
2. Вычислительные технологии .....	6
3. Информационно-вычислительные технологии .....	43
4. Информационные технологии .....	47
Алфавитный указатель участников .....	70

## 1. Пленарные доклады

### 1.1. Ульянов М.В. Оптимальный порог переключения в алгоритме моделирования случайной последовательной адсорбции методом вспомогательных списков

В докладе рассматривается задача определения оптимального порога переключения в алгоритме моделирования случайной последовательной адсорбции методом вспомогательных списков в целях повышения временной эффективности программной реализации. Случайная последовательная адсорбция (RSA) представляет собой процесс, когда частицы случайно и необратимо осаждаются на подложку без перекрытия с ранее адсорбированными частицами. RSA является полезной моделью для многих физических, химических и биологических процессов.

Из-за обратной экспоненциальной зависимости роста концентрации покрытия от времени прямое моделирование состояния джамминга на компьютере является очень трудоемкой задачей. Технически решить эту проблему можно путем перехода при определенной концентрации осаждаемых частиц к вспомогательным спискам ячеек, доступных для осаждения. Есть результаты по экспериментальному определению порога переключения на формирование списков, но в аспекте теоретического рассмотрения остается открытым вопрос, при какой концентрации использование списков становится эффективным.

Доклад посвящен изложению результатов теоретического анализа алгоритма метода списков на основе аппроксимаций функций концентрации свободных ячеек по экспериментальным данным. Полученные предварительные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментально определенным порогом переключения.

### 1.2. Чеховской И.С. Численные методы для нелинейного преобразования Фурье

Нелинейное преобразование Фурье (nonlinear Fourier transform — NFT) представляет собой набор техник для решения нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ) с использованием перехода в пространство нелинейных частот. NFT позволяет численно находить решение НУШ при любом значении эволюционной переменной за одинаковое количество операций, что кардинально отличает NFT от традиционных подходов. В докладе будет обсуждаться текущее развитие численных методов для задачи с затухающими граничными условиями, а также перспективы использования NFT при обработке оптических сигналов.

## 2. Вычислительные технологии

### 2.1. Абгарян Г.В. Дифракция электромагнитной волны в волноводе с продольной перегородкой

Исследованию дифракционных задач в волноводных структурах посвящено множество работ, отметим, например, [1–3]. При этом, для решения этих задач используются самые разные подходы, например, метод интегральных уравнений [4], метод конечных элементов (МКЭ) [5], метод частичных областей (МЧО) [6] и т. д.

Отметим, что в работе [5] также приводится сравнение МЧО и МКЭ на примере решения задачи дифракции в полубесконечном волноводе с диафрагмой, расположенной перед заглушкой, показана хорошая согласованность данных методов.

В этой работе исследована двумерная задача дифракции ТЕ-поляризованной электромагнитной волны в бесконечном волноводе с продольной перегородкой. Математическая формулировка данной физической задачи соответствует краевой задаче для уравнения Гельмгольца с граничными условиями типа Дирихле на металле и условиями непрерывности (сшивания) на границах раздела сред.

Для решения задачи используется метод частичных областей (МЧО). Согласно МЧО, рассматриваемая область задачи разбивается на частичные подобласти, решение в выделенных подобластях ищется, как правило, в виде рядов от функций с разделяющимися переменными. В дальнейшем процедура построения решения сводится к наложению на искомое решение граничных условий или условий непрерывности на общих границах соприкасающихся подобластей. Получающиеся в результате парные сумматорные функциональные уравнения (ПСФУ) сводятся тем или иным способом к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений (БСЛАУ) относительно неизвестных коэффициентов разложений.

Для численного решения БСЛАУ используется метод усечения (редукции) [7]. Исследовано решение задачи в зависимости от параметра усечения БСЛАУ.

Также в работе найдены резонансные частоты для области волновода, соответствующей разветвленной части с продольной перегородкой. Построены графики электромагнитного поля на резонансных частотах.

#### Список литературы

- [1] BORGNIS F. E., PAPAS C. H. Electromagnetic waveguides and resonators / Electric Fields and Waves. Encyclopedia of Physics, Vol. 4/16. Berlin, Heidelberg: Springer, 1958. P. 285–422.
- [2] SCHWINGER YU. Inhomogeneities in waveguides (lecture notes) / Zarub. Elektron., 1970. Vol. 3. P. 3–106.

- [3] LEWIN L. Theory of Waveguides / London: Newnes-Butterworths, 1975.
- [4] Смирнов Ю. Г. Математические методы исследования задач электродинамики / Пенза: Пензенский гос. ун-т, 2009. 268 с.
- [5] AVGARYAN G. V. Finite Element Method and Partial Area Method in One Diffraction Problem // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2022. Vol. 43. N. 5. P. 1228–1235.
- [6] МИТТРА Р., ЛИ С. Аналитические методы теории волноводов / М.: Мир, 1974. 327 с.
- [7] ТЕМНОВ В. М., ВЕСЕЛОВ Г. И. О применении метода редукции при решении алгебраических систем в некоторых задачах дифракции // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1974. № 24 (9). С. 1381–1391.

## 2.2. Аносова Е. П., Нагаева З. М. Динамика давления в трещине ГРП, перпендикулярной скважине

Трещина, образованная гидроразрывом пласта, расположена перпендикулярно к горизонтальной цилиндрической скважине. В исходном состоянии флюид в трещине и окружающей ее пористой среде находится в равновесии, и в какой-то момент времени давление в скважине изменяется на определенную величину и далее поддерживается постоянным. Течение в трещине радиально симметричное.

Распределение давления в трещине описывается интегро — дифференциальным уравнением [1]. С помощью преобразования Лапласа найдены аналитические решения, описывающие эволюцию давления в трещине и расхода жидкости из трещины в пласт.

С использованием метода последовательной смены стационарных состояний (ПССС) построены достаточно простые приближенные аналитические решения, также описывающие динамику распределения давления в трещине и изменения расхода жидкости при поддержании постоянного перепада давления на скважине. Сравнение численных результатов по точным и приближенным решениям, в плане определения полей давления в трещине и объемного расхода жидкости из скважины в трещину, показали, что они практически совпадают.

Работа может быть полезна при интерпретации результатов гидродинамических испытаний скважин для анализа результатов проведенного ГРП.

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

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Шагапов В. Ш.*

### Список литературы

- [1] ШАГАПОВ В. Ш., НАГАЕВА З. М., АНОСОВА Е. П. Упругий режим фильтрации жидкости к скважине через перпендикулярную ей трещину, образовавшуюся при гидроразрыве пласта // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63. № 4. С. 105–115.

## 2.3. Архипов Е. Д., Стормин И. В., Шумкова Е. А., Левшин М. А. Аппроксимация кривой намагничивания ферромагнитного материала функцией ошибок

В работе решалась задача создания математической модели феррозондового датчика [1] путем использования функции ошибок для аппроксимации кривой намагничивания ферромагнитного сердечника. Преимущество функции ошибок в сравнении с полиномом третьей степени [2], который обычно применяется для аппроксимации кривой намагничивания, заключается в том, что выбранная функция описывает участок насыщения сердечника, тогда как полиномиальная функция в пределе стремится к бесконечности. Таким образом, такая математическая модель позволит описать поведение ферромагнитного сердечника в большем диапазоне напряженности магнитного поля без увеличения порядка полинома.

Одним из преимуществ использования данной функции в отличие от других возможных аппроксимаций является упрощенное дифференцирование, обусловленное тем, что изначальная функция представляет собой неберущийся интеграл.

Электродвижущая сила (ЭДС) в измерительной обмотке дифференциального феррозонда при использовании функции ошибок будет иметь вид:

$$\varepsilon(t) = A \cdot sh(2H_0 \cdot H_M \cdot \sin(\omega t)) \cdot \cos(\omega t) \cdot \exp(B),$$

где  $A$  и  $B$  — это коэффициенты, зависящие от материала ферромагнитного сердечника, а  $H_0$  и  $H_m$  — амплитуды напряженности внешнего поля и возбуждающего поля соответственно.

Зависимость выходной ЭДС на измерительной обмотке соответствуют результатам, получаемым при использовании полиномиальной модели и повторяют результаты экспериментов. Это подтверждает гипотезу о том, что данная модель применима для моделирования датчиков и преобразователей с ферромагнитным сердечником [3].

*Научный руководитель — Коломейцев А. А.*

### Список литературы

- [1] RИРКА Р. Magnetic Sensors and Magnetometers / Boston: Artech house, 2000. 494 p.
- [2] АФАНАСЬЕВ Ю. В. Феррозонды / Л.: Энергия, 1969. 169 с.
- [3] КОЛОМЕЙЦЕВ А. А., ЗАТОНОВ И. А., ПИЩАНСКАЯ М. И. ET AL. Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology // Devices and Methods of Measurements. 2021. Vol. 12. N. 2. P. 117–123.

## 2.4. Бабенко М. А. К неустойчивости установившихся сдвиговых плоско-параллельных течений идеальной баротропной жидкости

В работе изучается задача линейной устойчивости стационарных сдвиговых плоско-параллельных

течений невязкой баротропной жидкости по отношению к плоским возмущениям в плоском же бесконечном канале с параллельными твёрдыми неподвижными непроницаемыми стенками.

Актуальность работы обусловлена тем, что модель идеальной баротропной жидкости по-прежнему является одной из основных математических моделей в механике жидкости, газа и плазмы, а проблема устойчивости установившихся сдвиговых плоско-параллельных течений относительно малых плоских возмущений — фундаментальной задачей в газогидродинамике и смежных ей областях науки. Так, например, если в какой-то части атмосферы, которая представляет собой природную газогидродинамическую систему, возникают условия для роста малых возмущений, то в ней появляется возможность для формирования, нарастания и распространения многомасштабных и разнородных волновых и вихревых движений: планетарных волн, циклонов, антициклонов и т. п. Отслеживание возникновения таких условий не только поможет более точно предсказывать погоду, но и дополнительно позволит проверять на адекватность существующие прогностические методы.

В данной работе посредством прямого метода Ляпунова [1] рассматривается устойчивость стационарных сдвиговых плоско-параллельных течений невязкой баротропной жидкости по отношению к малым плоским возмущениям. Цель работы — доказать абсолютную линейную неустойчивость этих течений относительно данных возмущений.

В работе М. А. Гринфельда [2] достаточное условие линейной устойчивости получено в случае чисто эйлеровых возмущений величины отношения завихренности к плотности, когда лагранжевы возмущения этого отношения равны нулю, т. е. данное условие справедливо лишь для некоего подкласса малых плоских возмущений, что как раз и наводит на мысль об абсолютной линейной неустойчивости установившихся сдвиговых плоско-параллельных течений идеальной баротропной жидкости по отношению к плоским возмущениям.

Для достижения поставленной в этой работе цели удалось найти для функционала Ляпунова линейное обыкновенное дифференциальное неравенство второго порядка с постоянными коэффициентами [1]. В ходе интегрирования этого неравенства были обнаружены достаточные условия практической неустойчивости стационарных сдвиговых плоско-параллельных течений невязкой баротропной жидкости по линейному приближению. Если данные условия выполнены, построена априорная экспоненциальная оценка снизу роста малых плоских возмущений, доказывающая абсолютную линейную неустойчивость изучаемых установившихся течений. Следовательно, достаточное условие линейной устойчивости М. А. Гринфельда носит фор-

мальный характер и верно только для некоторого неполного незамкнутого класса малых плоских возмущений. Кроме того, в отличие от работы М. А. Гринфельда [2], полученные здесь достаточные условия линейной практической неустойчивости справедливы также и для сверхзвуковых стационарных сдвиговых плоско-параллельных течений идеальной баротропной жидкости.

В заключение, стоит подчеркнуть, что обнаруженным условиям практической неустойчивости свойственна конструктивность, благодаря чему их можно использовать как механизм тестирования и/или контроля при осуществлении физических экспериментов и проведении численных расчётов. Более того, с помощью этих условий может быть разработан метод предсказания появления и дальнейшего наблюдения за эволюцией волновых и вихревых движений в атмосфере.

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Губарев Ю. Г.*

#### Список литературы

- [1] ГУБАРЕВ Ю. Г. Прямой метод Ляпунова. Устойчивость состояний покоя и стационарных течений жидкостей и газов / Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2012. 192 с.
- [2] ГРИНФЕЛЬД М. А. Устойчивость плоских криволинейных течений идеальной баротропной жидкости // Механика жидкости и газа. 1981. № 5. С. 19–25.

#### 2.5. Белоногов В.А. Определение коэффициента теплопередачи в слоистых средах в цилиндрической пространственной области

В работе рассматривается вопрос о корректности в пространствах Соболева обратных задач об определении коэффициента теплообмена на границе раздела сред, входящего в условие сопряжения типа неидеального контакта в случае цилиндрической пространственной области. Показана теорема существования и единственности решений. Метод является конструктивным и на основе предложенного подхода возможно построение численных методов решения обратных задач теплопереноса. Доказательство основано на получаемых априорных оценках и теореме о неподвижной точке.

Мы исследуем обратные задачи об определении коэффициентов теплопередачи, входящих в условие сопряжения. Рассматривается параболическое уравнение вида

$$Mu = u_t - Lu = f(t, x), \quad (t, x) \in Q = (0, T) \times G, \quad (1)$$

где  $Lu = \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(t, x)u_{x_i x_j} + \sum_{i=1}^n a_i(t, x)u_{x_i} + a_0(t, x)u$ ,  $G \in \mathbb{R}^n$  — ограниченная область с границей  $\Gamma$ . Считаем, что область  $G$  разделена на два открытые множества  $G^+$  и  $G^-$ . Мы рассматриваем один частный, но важный случай, когда условие  $G^- \subset G$



не выполнено. В этом случае в качестве пространственной области берем цилиндрическую область  $G = \Omega \times (0, l)$  ( $\Omega \subset \mathbb{R}^{n-1}$ ,  $\partial\Omega \in C^2$ ), причем  $G^+ = \cup_i G^{2i}$ ,  $G^- = \cup_i G^{2i-1}$ ,  $G^i = \Omega \times (l_{i-1}, l_i)$ ,  $l_0 = 0 < l_1 < \dots < l_m = l$ . Введём обозначения:  $\Gamma^0 = \partial\Omega \times (0, l)$ ,  $S^0 = (0, T) \times \Gamma^0$ .

Уравнение (1) дополняется начальными и крайними условиями:

$$Ru|_{S^0} = \varphi, \quad (2)$$

где  $Ru = u$  или  $Ru = \sum_{i,j=1}^{n-1} a_{ij}u_{x_j} \nu_i + \sigma u$ ;

$$u(0, x) = u_0(x) \quad (x \in G), \\ R_0 u(t, x', 0) = \varphi_0, \quad R_1 u(t, x', l) = \varphi_1, \quad (3)$$

где  $R_0 u = u$  или  $R_0 u = -u_{x_n} + \sigma_0 u$ , соответственно,  $R_1 u = u$  или  $R_1 u = u_{x_n} + \sigma_1 u$ , а также условиями сопряжения:

$$B_i^+ u = \frac{\partial u_i^+}{\partial N} - \beta_i (u_i^+ - u_i^-) = g_i^+, \\ \frac{\partial u_i^+}{\partial N} = \frac{\partial u_i^-}{\partial N}, \quad i = 1, \dots, m-1, \quad (4)$$

где  $\frac{\partial u_i^\pm}{\partial N}(t, x') = \lim_{x_n \rightarrow l_i \pm 0} a_{nn} u_{x_n}(t, x', x_n)$ ,  $u_i^\pm = \lim_{x_n \rightarrow l_i \pm 0} u(t, x', x_n)$ .

Пусть  $x_{ij} = (x'_{ij}, l_j) \in \Gamma_0 = \partial G^+ \cap \partial G^-$  ( $j = 1, 2, \dots, m-1$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_j$ ) — некоторый набор точек. К условиям сопряжения мы добавляем условия переопределения вида

$$u(t, x'_{ij}, x_n)|_{x_n=l_j+0} = \varphi_{ij}(t), \quad i = 1, 2, \dots, M_j, \\ u(t, x'_{ij}, x_n)|_{x_n=l_j-0} = \varphi_{ij}(t), \quad i = M_j + 1, \dots, N_j. \quad (5)$$

Задача состоит в нахождении решения уравнения (1), удовлетворяющего условиям (2)–(5) и известным функциям  $\beta_i$  вида  $\beta_i = \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(t) \Phi_{ij}(t, x')$  ( $i = 1, 2, \dots, m-1$ ,  $x' = (x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ ), где функции  $\Phi_{ij}$  заданы, а функции  $\alpha_{ij}$  считаются неизвестными. В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных решению обратных задач теплопереноса в различных постановках, возникающих в приложениях. Например, работы [1–3]. Но результаты связаны в основном с численным решением обратных задач. Насколько нам известно, теоретических результатов о разрешимости (или единственности решений) задач вида (1)–(5) в литературе не имеется. Однако теоретическое исследование и построение на этой основе новых теоретических результатов и надежных численных методов имеет большое значение. Как раз в данной работе мы изучаем вопросы корректности задачи (1)–(5), в частности, теоремы существования и единственности решений.

## Список литературы

- [1] ZHUO L., LESNIK D. Reconstruction of the heat transfer coefficient at the interface of a bimaterial // Inverse Problems in Science and Engineering. 2019. Vol. 28. P. 374–401.
- [2] VEILINA L., KLIVANOV M. V. Approximate global convergence and adaptivity for coefficient inverse problems / New York: Springer, 2012. 424 p.
- [3] PESTOV L. Inverse problem of determining absorption coefficient in the wave equation by BC method // Journal of inverse and ill-posed problems. 2012. Vol. 20. P. 103–110.

## 2.6. Бородина А.А., Дымнич Е.М. Моделирование деформационного отклика микроструктур аддитивного силумина

Как правило, микроструктура аддитивных материалов существенно отличается от структуры материалов с таким же химическим составом, полученных традиционными методами. Наличие сложной иерархической структуры, характерной для большинства аддитивных металлов и сплавов, делает их поведение сложно предсказуемым в рамках существующих теорий [1, 2]. Отсутствие научно-обоснованных общих принципов получения аддитивных металлических материалов с контролируемой микроструктурой определяет постоянный высокий спрос на научные исследования в данной области. Прогноз деформационного поведения аддитивных металлов и сплавов требует знаний механизмов деформации, развивающихся на различных масштабных уровнях, и их вкладов в макроскопический отклик. Зачастую отделить влияние различных факторов в рамках экспериментальных исследований не представляется возможным. В этой связи, привлекательной является идея проведения численного анализа деформационных процессов на определенных масштабных уровнях с явным учетом значимых структурных элементов.

В работе представлены результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния аддитивного силумина на микроуровне. Анализ проводился по результатам экспериментальных и численных испытаний на одноосное растяжение. Расчеты упругого поведения микроструктуры силумина проводились в рамках подходов микромеханики с явным учетом геометрических особенностей структурных элементов микроуровня. Конечно-элементные (КЭ) модели микроструктур с явным учетом геометрических особенностей структурных элементов были построены путем графической обработки экспериментальных изображений, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии. Для построенных моделей были проведены расчеты растяжения с помощью КЭ пакета ABAQUS.

Эффективные упругие характеристики были получены путем осреднения характеристик напряженно-деформированного состояния по всем

элементам расчетной области. Наряду с оценкой эффективных свойств, проводился анализ распределений напряжений и деформаций на микроуровне. Была получена зависимость значения эффективных упругих характеристик от кристаллографической ориентации зерна.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, FWRW-2021-/0002/.

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

#### Список литературы

- [1] DYMNIKH E., ROMANOVA V. A., BALOKHONOV R. R. ET AL. A Numerical Study of the Stress-Strain Behavior of Additively Manufactured Aluminum-Silicon Alloy at the Scale of Dendritic Structure // Physical Mesomechanics. 2021. Vol. 24. P. 32–39.
- [2] FERRO P., MENEGHELLO R., RAZAVI S. M. J. ET AL. Porosity Inducing Process Parameters in Selective Laser Melted AlSi10Mg Aluminium Alloy // Physical Mesomechanics. 2020. Vol. 23. N. 3. P. 256–262.

#### 2.7. Ботороева М.Н., Индуцкая Т.С., Соловарова Л.С. Многошаговые методы численного решения интегро-алгебраических уравнений с переменными пределами интегрирования

В докладе будут рассматриваться интегро-алгебраические уравнения (ИАУ)

$$A(t)x(t) + \int_{bt}^t K(t,s)x(s)ds = f(t), \quad (1)$$

$$t \in [0; T], \quad b \in [0; 1),$$

где квадратные матрицы  $A(t)$  и  $K(t,s)$  размерности  $n$ ,  $f(t)$  — известная, а  $x(t)$  — неизвестная  $n$ -мерные вектор-функции. Матрица  $A(t)$  удовлетворяет условиям

$$A(t) \neq \mathbb{O}, \quad \det A(t) = 0,$$

здесь  $\mathbb{O}$  — нулевая матрица соответствующего размера.

Переменный нижний предел интегрирования является принципиальным отличием поставленной задачи от ИАУ с постоянным нижним пределом интегрирования (см., например, [1]).

В виде сформулированной задачи (1) может быть представлена интегральная модель развивающихся систем В.М. Глушкова [2]. Указанного вида переменный нижний предел интегрирования в различных приложениях может означать: переменный срок службы оборудования (в экономике), переменный срок жизни либо возраст репродукции особей (в экологии), изменение интенсивности отмирания клеток (в биологии).

В докладе для численного решения задачи (1) будут предложены многошаговые методы, основанные

на экстраполяционных формулах для главной части и на явных методах типа Адамса для интегрального слагаемого. Для ИАУ с постоянным нижним пределом интегрирования данные методы были предложены и реализованы в работе [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00173.

#### Список литературы

- [1] BRUNNER H. Collocation methods for Volterra integral and related functional differential equations / Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 612 p.
- [2] Глушков В. М., Иванов В. В., Яненко В. М. Моделирование развивающихся систем / М.: Наука, 1983. 350 с.
- [3] Будникова О. С., Булатов М. В. Численное решение интегро-алгебраических уравнений многошаговыми методами // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2012. Т. 52. № 5. С. 829–839.

#### 2.8. Будникова О.С., Индуцкая Т.С. Двустадийные многошаговые методы численного решения интегро-алгебраических уравнений

Доклад посвящен численному решению вырожденных систем взаимосвязанных интегральных уравнений Вольтерра первого и второго рода:

$$A(t)x(t) + \int_0^t K(t,s)x(s)ds = f(t), \quad (1)$$

здесь

$$\det A(t) \equiv 0,$$

где  $A(t)$ ,  $K(t,s)$  — матрицы размерности  $(n \times n)$ ,  $f(t)$  и  $x(t)$  —  $n$ -мерные известная и искомая вектор-функции.

Системы (1) в современной литературе принято называть интегро-алгебраическими уравнениями (ИАУ).

Активное изучение рассматриваемого класса задач началось в конце 80-х гг. в связи с исследованием весьма сложных технических и природных динамических процессов. В первой статье 1987 года [1] сформулированы достаточные условия существования единственного непрерывного решения линейных ИАУ и предложен алгоритм их численного решения первого порядка точности. На данный момент разработкой численных алгоритмов приближенного решения ИАУ занимаются три научные группы из России, Ирана и Китая.

Для численного решения задачи (1) предложено строить неявные двустадийные многошаговые методы. В докладе будут представлены условия на весовые коэффициенты, при которых разработанные алгоритмы являются устойчивыми. Результаты численных расчетов тестовых примеров приведены для иллюстрации теоретических положений

и выявления реально достигнутого порядка точности.

Представляемые результаты являются естественным продолжением исследований [2] и [3].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00173.*

#### Список литературы

- [1] Чистяков В. Ф. О сингулярных системах обыкновенных дифференциальных уравнений и их интегральных аналогах // *Функции Ляпунова и их применения*. Новосибирск: Наука, 1987. С. 231–239.
- [2] Будникова О. С., Булатов М. В. Численное решение интегро-алгебраических уравнений многошаговыми методами // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2012. Т. 52. № 5. С. 829–839.
- [3] BULATOV M. V., HADIZADEN M., CHISTYAKOVA E. V. Construction of implicit multistep methods for solving integral algebraic equations // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Seriya 10. Prikladnaya Matem. Informatika. Protsessy Upravleniya*. 2019. Vol. 15. N. 3. P. 310–322.

#### 2.9. Ван Л. Отдельные аспекты задачи дихотомии матричного спектра

Исследование матричного спектра является неотъемлемой частью решения задач из разных областей науки и техники. В конце 20-го века была предложена новая постановка алгебраической спектральной задачи, заключающаяся в определении расположения спектра относительно заданной кривой, то есть задача дихотомии спектра [1]. Такая постановка наиболее точно отражает вопросы, возникающие во многих практических задачах.

К настоящему моменту были созданы алгоритмы дихотомии относительно окружности и прямой, которые можно назвать базовыми. Также разработаны алгоритмы для кривых второго порядка. Определенные модификации алгоритмов позволяют с успехом применять их при решении спектральных задач для дифференциальных операторов [2, 3]. При этом остается целый ряд открытых вопросов, например, дихотомия относительно ломаной. Кроме того, обосновано использование дробно-линейного преобразования вместо экспоненциального для разделения спектра относительно мнимой оси. На основе этого нового подхода был создан алгоритм разложения многочлена на множители, корни которых лежат по разные стороны от мнимой оси.

В рамках данной работы было создано несколько новых алгоритмов для решения следующих спектральных задач:

1. определение отсутствия собственных значений матрицы на луче;
2. определение отсутствия собственных значений матрицы на отрезке;
3. дихотомии относительно произвольной прямой без использования матричной экспоненты;

4. разделение матричного спектра относительно угла, прямоугольника, усеченного сектора;
5. разложение многочленов на множители.

#### Список литературы

- [1] Годунов С. К. Задача о дихотомии спектра матрицы // *Сиб. мат. журн.* 1986. Т. 27. № 5. С. 57–59.
- [2] БИБЕРДОРФ Э. А., БЛИНОВА М. А., ПОПОВА Н. И. Модификации метода дихотомии матричного спектра и их применение к задачам устойчивости // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 2018. Т. 21. № 2. С. 139–153.
- [3] BIBERDORF E. Development of the matrix spectrum dichotomy method / In: G. V. Demidenko, E. Romenski, E. Toro and M. Dumbser (Eds.) *Continuum mechanics, applied mathematics and scientific computing: Godunov's legacy — A liber amicorum to Professor Godunov*. Cham: Springer, 2020. P. 37–40.

#### 2.10. Васильев Е. В., Король А. О., Пержу А. В. Компьютерное моделирование процессов управления скирмионами методом Монте-Карло

Работа посвящена численному моделированию спиновой динамики магнитного скирмиона в тонкой магнитной пленке. В работе предложены методы компьютерного моделирования эволюции спиновых систем, являющиеся общими для изучения как доменных границ, так и скирмионов.

Магнитные скирмионы [1] представляют особый интерес для разработки устройств хранения памяти и логических элементов, поскольку их положением и свойствами можно управлять с помощью различных воздействий — магнитного поля, электрического тока, лазерных импульсов.

В представленной работе рассмотрены основные возможности управления движением магнитного скирмиона, реализуемого с помощью спиновой системы Гейзенберга. Магнитные пленки имитировались с помощью двумерной решеточной Монте-Карло модели [2]. Для проведения расчетов авторами было разработано собственное программное обеспечение.

Предложенный метод основан на численном стохастическом моделировании. На основе математической модели, авторами был получен обобщенный Гамильтониан (1), применяемый для последующего расчета:

$$\hat{H} = \hat{H}_{ex} + \hat{H}_{DMI} + \hat{H}_z + \hat{H}_{an}, \quad (1)$$

$$\hat{H}_{ex} = - \sum_{\langle i,j \rangle} J_{i,j} \cdot (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j),$$

$$\hat{H}_{DMI} = - \sum_{\langle i,j \rangle} D_{i,j} \cdot (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j),$$

$$\hat{H}_z = -\mu_0 \sum_i^N \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{B}_i^z, \quad \hat{H}_{an} = - \sum_i^N (\mathbf{S}_i^z)^2 \cdot K_i.$$

Указанный метод применяется нами для изучения способов управления движением скирмиона. Проведены численные опыты воздействия последовательно перемещающихся волн анизотропии через систему и воздействия импульсов магнитного поля непосредственно на скирмион.

В результате проделанной работы исследованы перспективы применения магнитных скирмионов в устройствах спинтроники благодаря возможности реализации с их помощью программируемых численных моделей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-72-00058).*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Капитан В. Ю.*

#### Список литературы

- [1] AVANOV A., POKROVSKY V. L. Skyrmion in a real magnetic film // *Physical Review B*. 1998. Vol. 58. N. 14. R8889.
- [2] BORTZ N. B., KALOS M. H., LEWOWITZ J. L. A new algorithm for Monte Carlo simulation of Ising spin systems // *Journal of Computational Physics*. 1975. Vol. 17. N. 1. P. 10–18.

#### 2.11. Вири Р.А. Моделирование фильтрации углекислого газа в горной породе с переменной пористостью

В работе предложена математическая модель фильтрации газа в среде с переменной пористостью. В основу модели положены 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].

В двумерном случае определяющая система уравнений в предположении малости скорости твердой фазы сведена к параболическому уравнению для эффективного давления среды и уравнению первого порядка для пористости [1]. Проведено численное исследование полученной начально-краевой задачи. Экспериментально определены порядки равномерной сходимости по пространственным и временным переменным. 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.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образова-*

*ния РФ по теме «Современные методы гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (номер темы: FZMW2020-0008)*

*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., PAPIN A., TOKAREVA M. Non-isothermal filtration of a viscous compressible fluid in a viscoelastic porous medium // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1666. N. 1. 012041.
- [3] PAPIN A., TOKAREVA M., VIRTS R. 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., TOKAREVA M., SHISHMAREV K. Unsteady non-isothermal problem of fluid filtration in soils // *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2528. N. 1. 020009.
- [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. 103950.

#### 2.12. Воробьева В.П., Зеленая А.Э., Луцык В.И., Мельников К.А., Парфенова М.Д. Аппроксимация гиперповерхностей фазовых диаграмм состояния тройных и четверных систем в программе «Конструктор ФД»

Предложена идея разработки компьютерных пространственных моделей многомерных фазовых диаграмм многокомпонентных систем, которая воплощается в защищаемых патентами моделях (как реальных систем, так и прокси-систем с определенной топологией). Они не связаны со специальными базами данных и могут использовать гипотетическую информацию для расчета прототипа фазовых диаграмм (ФД), когда исходных данных недостаточно.

Разработка методов компьютерного моделирования ФД и сопутствующего программного обеспечения позволяет получить 3D-модели для тройных систем с различным топологическим строением.

Компьютерные модели ФД дают возможность воспроизводить пространственную модель всей диаграммы и ее отдельных элементов, например, поверхностей или фазовых областей; рассматривать произвольные горизонтальные и вертикальные сечения; рассчитывать пути кристаллизации; проводить анализ микроструктуры.

При выборе математического аппарата описания границ фазовых областей отдается предпочтение тем моделям, при которых на основе минимального количества исходных экспериментальных данных можно воспроизвести конструкцию ФД любой сложности. Наибольшие возможности дает кинематический метод задания поверхностей, так как он позволяет моделировать границы фазовых областей любой сложности, включая поверхности с экстре-

мальными точками, с разрывами гладкости, складками и вырезами на поверхностях.

Для построения гиперповерхностей на T-x-y-z диаграммах используется кинематическое описание интерполяционным полиномом Лагранжа в виде

$$F(p, q, r) = \prod_{m+1}(r) \sum_{j=0}^m \frac{\prod_{k+1}(q) \sum_{i=0}^k \frac{A_j(p)}{(q-q_i) \prod'_{k+1}(q_i)}}{(r-r_j) \prod'_{m+1}(r_j)},$$

где

$$\prod_{m+1}(r) = (r-r_0)(r-r_1) \cdots (r-r_m),$$

$$\prod'_{m+1}(r) = \sum_{j=0}^m (r-r_0) \cdots (r-r_{j-1})(r-r_{j+1}) \cdots (r-r_m),$$

$$\prod_{k+1}(q) = (q-q_0)(q-q_1) \cdots (q-q_k),$$

$$\prod'_{k+1}(q) = \sum_{j=0}^k (q-q_0) \cdots (q-q_{j-1})(q-q_{j+1}) \cdots (q-q_k),$$

$$r_0 = 0 < r_1 < \cdots < r_{m-1} < r_m = 1,$$

$$q_0 = 0 < q_1 < \cdots < q_{m-1} < q_m = 1.$$

Если при конструировании поверхности кинематическим способом требуется задать на одном и том же множестве базовых точек два семейства кривых и если  $n+1$  кривых  $H_i$  ( $i = \overline{0, n}$ ) считать направляющими, то им должно соответствовать семейство  $m+1$  кривых порядка  $n$ -образующих  $O_j$  ( $j = \overline{0, m}$ ), проходящих через базовые точки. Объединение двух семейств кривых дает параметрическое описание гиперповерхности в четырехмерном пространстве. Одно из семейств кривых рассматривается как направляющие, кривые второго становятся образующими, то есть линиями, перемещение которых задается направляющими. Если образующие — прямые, то есть  $n=1$  или  $m=1$ , тогда поверхность является линейчатой. При  $n=m=1$  поверхность превращается в плоскость.

Таким образом, гиперповерхность задается по  $n+1$  направляющим  $H_i(p)$ , проходящим через  $m$  точек. Направляющие (s-1)-поверхности (линии при  $s=3$ , поверхности при  $r=4$  и т. д.) задаются в виде многочленов  $m$ -ой степени. Для параметрического описания образующих используется параметр  $q$  ( $0 \leq q \leq 1$ ), и порядок многочлена, задающего образующую, равен  $n$ : при  $n=1$  образующей является отрезок, концы которого сканируют направляющие и формируют линейчатую гиперповерхность.

Исследование выполнено в соответствии с заданием ФГБУН ИФМ СО РАН на 2021-2023 гг. (проект № 0270-2021-0002) и частично поддержано проектом РФФИ 19-38-90035.

### 2.13. Воробьева Д.А., Клименко А.И. Анализ параметрической чувствительности моделей динамических систем на основе данных численного моделирования

В настоящее время современная математическая биология повсеместно использует параметрические модели биологических систем, в частности системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), а также модели динамических систем, описанных в других формализмах. Параметрами являются численные значения величин, таких как коэффициенты ОДУ, отражающие определённые свойства моделируемой системы и влияющие на решения модели.

В литературе предлагаются несколько методов исследования параметрической чувствительности. Среди них стоит отметить как традиционные подходы, использующие частные производные по параметрам для выявления коэффициентов чувствительности (например, [1]), метод продолжения по параметру, так и методы для исследования параметрической чувствительности агентных моделей. Проблема данных методов заключается в том, что они применимы лишь для узких классов моделей, для которых указанные методы и были разработаны.

Данная работа посвящена разработке метода исследования параметрической чувствительности моделей динамических систем на основе данных численного моделирования. Основное отличие предложенного в данной работе метода от уже имеющихся способов исследования параметрической чувствительности заключается в том, что он является универсальным, он не привязан к какому-то определённому типу моделей, что позволяет ему покрывать широкий класс задач математической биологии и других сфер, активно использующих математическое моделирование динамических систем.

Разработанный метод основан на композиции алгоритма динамического сжатия временной шкалы (DTW-алгоритма [2]) и метода главных координат (РСоА [3]). Такой способ позволяет получить качественную визуализацию результатов множества решений математической модели, благодаря чему можно оценить чувствительность решений модели к различным её параметрам как визуально, так и формально, посчитав корреляции главных координат с параметрами модели. Кроме того, разработанный метод позволяет получать интерпретации осей с помощью корреляционного анализа главных координат с предполагаемыми характеристиками решений.

В качестве примера в работе использовалась модель Лотки—Вольтерры [4] — модель взаимодействия двух популяций типа «хищник — жертва». Она имеет параметры  $a, b, c, d$  — коэффициенты, отражающие взаимодействия между популяциями

и внутренние свойства отдельных популяций. С помощью созданного метода было выявлено, к изменению каких из параметров рассматриваемая модель оказалась более чувствительна.

Разработанный метод может применяться для исследования параметрической устойчивости в моделях различных динамических систем. Учёт большего числа характеристик решений позволит расширить класс рассматриваемых кривых решений. В перспективе подход, реализованный в данном методе, может быть применён также для анализа устойчивости решений относительно начальных данных для моделей, описанных в неклассических, в том числе дискретных, формализмах.

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

#### Список литературы

- [1] ШАРАФУТДИНОВ Р. Ф., ДАВЛЕТШИН Ф. Ф. Исследование параметрической чувствительности температурного поля в пласте с трещиной гидроразрыва // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2021. С. 207–208.
- [2] GIORGINO T. Computing and visualizing dynamic time warping alignments in R: The dtw package // Journal of Statistical Software. 2009. Vol. 31. Iss. 7.
- [3] GROTH D. Principal components analysis // Methods Mol. Biol. 2013. Vol. 930. N. May. P. 527–547.
- [4] WANGERSKY P. Lotka — Volterra population models // Annual Reviews Inc. 1978. P. 189–218.

#### 2.14. Воробаева Е.С. Методы численного решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле

Для решения задач определения траектории и скорости движения заряженных частиц в электромагнитных полях наиболее часто используется метод Бориса [1]. Он относится к схемам типа «чехарда», обладает вторым порядком точности и достаточно экономичен. Метод Бориса часто используется в рамках метода частиц в ячейках, разработанный Ф. Х. Харлоу. В этом методе плазма представляется как набор модельных частиц, движущихся в электромагнитном поле. Плотности зарядов и токов вычисляются как функции координат и скоростей частиц и используются для определения электромагнитного поля по уравнениям Максвелла. В последние годы появляются новые модификации метода Бориса, позволяющие повысить точность или ускорить вычисления.

В настоящей работе метод Бориса и его наиболее часто используемые модификации сравниваются по точности и эффективности вычислений на тестовых задачах с аналитически заданным электромагнитным полем. Предлагается новая модификация метода Бориса, обладающая повышенной точностью и не проигрывающая по быстродействию другим рассматриваемым модификациям. Работа является развитием и продолжением исследования, начатого в [2, 3], и касается случая релятивистского движения частицы.

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Вшивков В. А.*

#### Список литературы

- [1] BORIS J. P. Relativistic plasma simulation — optimization of a hybrid code // Proceedings of 4th Conference On Numerical Simulation of Plasmas. Washington, 1970. P. 3–67.
- [2] ВОРОПАЕВА Е. С., ВШИВКОВ К. В., ВШИКОВА Л. В. и др. Алгоритмы движения в методе частиц в ячейках // Вычислительные методы и программирование. 2021. Т. 22 (4). С. 281–293.
- [3] VOROPAeva E., Vshivkov K., Vshivkova L. et al. New motion algorithm in the particle-in-cell method // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2028 (1). 012011.

#### 2.15. Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р. Задачи волнового зондирования для обнаружения трещин гидроразрыва в низкопроницаемых пластах

Предложен метод акустического «телевизора» для исследования наличия и проводимости гидроразрывных трещин. С помощью численных экспериментов на основе предложенной математической модели получено, что данный метод будет работать для зондирования пластов проницаемостью порядка санти- и миллиарды.

Рассмотрены задачи акустического зондирования кольцевого канала с акустически сжимаемой жидкостью, представляющего зазор между открытой стенкой скважины в низкопроницаемом пласте и соосным цилиндрическим зондом с источником и датчиками-анализаторами сигналов. Аналитически получено дисперсионное уравнение для гармонической волны в канале при наличии продольных скважине гидроразрывных трещин. С помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье проанализирована динамика возмущения давления конечной длительности в канале при различных радиусах канала, проницаемостях пласта, проводимости гидроразрывных трещин [1].

В задачах с радиальными гидроразрывными трещинами возникают отраженные сигналы, представляющие собой импульсы «разгрузки». Аналитически получены коэффициенты отражения для гармонической волны [2, 3]. Получена интегральная зависимость модуля коэффициента отражения сигнала от проводимости трещины ( $C_f = d_f k_f$ , где  $d_f$  и  $k_f$  — ширина и проницаемость трещины). Построены теоретические осциллограммы динамики импульсного сигнала в канале.

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

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Шагапов В. Ш.*

#### Список литературы

- [1] ШАГАПОВ В. Ш., ГАЛИАКБАРОВА Э. В., ХАКИМОВА З. Р. К теории локального зондирования трещин, образовавшихся при гидроразрыве пласта, с использованием импульсных волн давления // Прикладная

- механика и техническая физика. 2021. Т. 62. № 4. С. 46–56.
- [2] SHAGAROV V., GALIAKBAROVA E., KNAKIMOVA Z. On the theory of acoustic sounding of hydraulic-fracturing cracks perpendicular to the well // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021. Vol. 94. N. 5. P. 1160–1169.
- [3] ГАЛИАКБАРОВА Э. В. К теории локального зондирования трещин, образовавшихся при гидроразрыве пласта, с использованием импульсных волн давления // Вестник Башкирск. ун-та. 2021. Т. 26. № 4. С. 866–870.
- [2] АНДЕРСОН Д., ГАННЕХИЛЛ ДЖ., ПЛЕТЧЕР Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. / М.: Мир, 1990.

## 2.16. Гарбузов Д.Н. Численное исследование процесса отверждения смолы в кольцевом зазоре

Процесс отверждения является важной технологической операцией при формировании изделий из реактопластов в авиастроении, ракетных двигателей на твёрдом топливе, производстве строительных материалов и т. п.

В работе проведено численное исследование процесса отверждения смолы в кольцевом зазоре. Математическая постановка задачи включает уравнение энергии, записанное с учетом экзотермического эффекта реакции [1]. Степень отверждения определяется в соответствии с кинетическим уравнением, в основе которого лежит реакция  $n$ -ого порядка с самоускорением. В начальный момент времени степень отверждения во всей области равна нулю. На внешней стенке задана температура, равная начальной температуре в области, при которой не наблюдается значимой скорости отверждения смолы. На внутренней стенке коаксиального цилиндра задано высокое значение температуры, обеспечивающей протекание реакции отверждения. Сформулированная задача решается методом контрольного объема [2]. При этом используется неструктурированная расчетная сетка, что позволяет без препятствий распространять разработанную методику на области произвольной геометрии. Проведена проверка аппроксимационной сходимости и оценка порядка точности. Выполнена верификация оригинальной программы расчета путем сравнения с результатами других авторов.

В результате параметрических исследований были получены распределения поля температуры степени отверждения с течением времени в зависимости от температуры горячей границы. Проведена оценка времени полного отверждения эпоксидной смолы в зависимости от различных условий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 18-19-00021П).*

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

### Список литературы

- [1] САФОНОВ А. А. Опыт применения математического моделирования технологических процессов изготовления композиционных изделий // Композиты и наноструктуры. 2014. Т. 6. № 2 (60). С. 65–83.

## 2.17. Гатиятуллина Д.Д. Численное исследование влияния объемной доли керамических частиц на деформацию и разрушение металлокерамических композитов

В работе проведено численное исследование влияния объемной доли упрочняющих керамических частиц на деформацию и разрушение металлокерамического композиционного покрытия «алюминий-карбид бора» на мезоскопическом масштабном уровне при охлаждении и последующем механическом нагружении. Для учета сложной формы керамических частиц в численных расчетах, было рассмотрено экспериментальное изображение композиционного покрытия и выбран представительный мезообъем покрытия. Подготовлены две дополнительные структуры мезообъемов, полученные из базовой структуры путем удаления нескольких частиц. Объемная доля частиц в базовой структуре составляет 27%, в двух дополнительных — 16 и 8%, соответственно. Структура композитов учитывает сложную форму частиц в явном виде. Для описания механической реакции алюминиевой матрицы использовалась изотропная упругопластическая модель, а для керамических частиц — упруго-хрупкая модель. Динамические краевые задачи решались методом конечных элементов в программном пакете ABAQUS/Explicit.

Для описания кривой пластического течения алюминиевой матрицы, используется ассоциированный закон течения с функцией изотропного упрочнения. Для исследования процессов зарождения и распространения трещин в керамических частицах, выбран критерий разрушения типа Губера, учитывающий вид локального напряженного состояния в материале (объемное растяжение или сжатие). Моделирование остаточных напряжений предполагает введение шага с охлаждением структуры от температуры, близкой к температуре рекристаллизации алюминия, до комнатной температуры.

Проведены расчеты одноосного растяжения и сжатия структур с различной объемной долей частиц. Ранее были проведены численные исследования деформации и разрушения композитов и покрытий на разных масштабных уровнях без учета остаточных напряжений [1, 2].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 18-19-00273).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Балохонов Р. Р.*

### Список литературы

- [1] BALOKHONOV R. R., EVTUSHENKO E. P., ROMANOVA V. A. ET AL. Formation of bulk tensile regions in metal matrix composites and coatings

under uniaxial and multiaxial compression // Physical Mesomechanics. 2020. Vol. 23. P. 135–146.

- [2] KADOLKAR P. B., WATKINS T. R., DE HOSSON J. TH. M. ET AL. State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys // Acta Materialia. 2007. Vol. 55. P. 1203–1214.

**2.18. Голубев Р.А. Разностные схемы для обыкновенных дифференциальных уравнений со свойствами корректора и предиктора на основе схем Нюстрёма**

В работе предлагаются новые численные методы высоких порядков точности решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка со свойствами корректора и предиктора, построенные на основе метода Нюстрёма [1]. Представленные методы имеют следующую алгоритмическую реализацию: для нахождения решения второго порядка точности используется метод Нюстрёма, а для получения решения произвольного четного порядка в схему Нюстрёма вносится поправка, выражающаяся через приближенное решение на два порядка ниже. Это решение получаем методом Рунге — Кутты соответствующего порядка. Для начала расчетов уточненной схемой необходимо также дополнительно задать начальное условие, которое мы численно получаем методом Рунге — Кутты необходимой точности.

В результате работы были получены численные методы произвольного четного порядка точности на основе метода Нюстрёма, выполнены вычислительные эксперименты, а также проведено теоретическое обоснование порядка сходимости представленных методов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 20-61-46017).*

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

**Список литературы**

- [1] ХАЙРЕР Э., НЁРСЕТТ С., ВАННЕР Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи / Под ред. С.С. Филиппова. М.: Мир, 1990. 512 с.

**2.19. Голубничий Е.Н., Касымов Д.П., Перминов В.В., Якимов А.С. Экспериментальное исследование воздействия очага горения на некоторые образцы материалов на основе древесины**

Пожары на природно-урбанизированных территориях приобретают все более серьезное значение. Во всем мире регулярно случаются пожары, нередко крупные лесные пожары возникают вблизи населенных пунктов. Такие пожары, распространяющиеся на городские территории, принято называть природно-урбанизированными пожарами. Для России, где большую часть территории занимают леса,

исследования перехода из лесного пожара на территории населенных пунктов не теряет актуальности. При проектировании и эксплуатации объектов сооружений, в том числе жилых домов, торгово-развлекательных и деловых центров, одной из главных задач является создание условий для обеспечения пожарной безопасности. Способность к воспламенению и распространение горения — вот одни из основных факторов, которые определяют пожарную опасность древесины. Целью данной работы является экспериментальное исследование воздействие поражающего фактора лесного пожара, представляющего собой горящие и тлеющие частицы природного происхождения, на древесные виды строительных материалов и конструкций. Эксперименты проводились в большой аэрозольной камере ИОА СО РАН.

По результатам экспериментального исследования по воздействию очага горения были получены следующие данные: набор термограмм, характеризующих тепловую картину на поверхности образца при воздействии частиц; величина расхода частиц в единицу времени; скорость нагрева поверхности материалов из древесины при тепловом воздействии. Помимо бесконтактных методов ИК-диагностики в экспериментах использовались контактные датчики в виде термопар, а также водоохлаждаемых датчиков (сенсоров) теплового потока.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-21-00068).*

**2.20. Гондюл Е.А. Повышение эффективности сейсмического моделирования с помощью комбинирования методов конечных разностей и машинного обучения**

В данной работе используются cGan (Conditional Generative Adversarial Network) [1, 2] для подавления численной дисперсии в задаче моделирования сейсмических волновых полей в сложноустроенных средах. Задача сводится к аппроксимации нелинейного оператора с помощью нейронной сети, отображающего синтетические данные, рассчитанные на грубой сетке, в данные, смоделированные на мелкой сетке. При сейсмической съемке система наблюдения состоит из большого числа источников, что приводит к необходимости решения ряда задач с различными правыми частями. Суть предлагаемого подхода состоит в том, чтобы точное решение рассчитывалось лишь для небольшой части источников, и эти данные использовались в качестве обучающей выборки. После чего нейросеть применяется ко всему набору данных, рассчитанных на грубой сетке для повышения точности численного решения.

cGAN это модификация GAN [3], построенных на двух состязательных нейронных сетях: генера-



тора  $G : x \rightarrow z$  и дискриминатора  $D$ , который отличает сгенерированные изображения от реальных. Такие сети обучаются по схеме минимально-максимальной оптимизации для функции  $G$ :

$$G = \arg \min_G \max_D L(G, D),$$

где функция потерь  $L$  для cGAN выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} L_{cGAN}(G, D) = & E_{x, y \sim p_{data}(x, y)} [\log D(x, y)] + \\ & + E_{x \sim p(x), z \sim p(z)} [\log(1 - D(x, G(x, z)))] + \\ & + E_{x, y, z} [\|y - G(x, z)\|_1], \end{aligned}$$

а  $E[\cdot]$  — математическое ожидание,  $y$  — дополнительная информация, которая подаётся в  $D$  и  $G$ .

Данный алгоритм хорошо показал себя в поставленной задаче, по сравнению с другими модификациями GANs. Максимальная ошибка в норме  $L_1$  составила менее 4%.

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Лисица В. В.*

#### Список литературы

- [1] ISOLA P., ZHU J. Image-to-Image translation with conditional adversarial networks // arXiv:1611.07004. 2018.
- [2] MIRZA M., OSINDERO S. Conditional generative adversarial nets // arXiv:1411.1784. 2014.
- [3] GOODFELLOW I., POUGET-ABADIE J., MIRZA M. ET AL. Generative adversarial nets // NIPS. 2014.

### 2.21. Горынин А.Г. Асимптотическое расщепление задачи деформирования композитных цилиндрических оболочек под действием внутреннего давления

Цилиндрические оболочки из однородных изотропных и композиционных материалов являются важнейшими элементами многих современных конструкций, таких как трубопроводы, нефтепроводы и газопроводы, баллоны давления и т. д. При расчете прочности цилиндрических оболочек актуальным является вопрос построения непротиворечивых математических моделей, позволяющих определять напряженно-деформированное состояние оболочки с высокой точностью во всех слоях композита.

Рассматривается задача упругого деформирования композитной цилиндрической оболочки под действием внутреннего давления в осесимметричной постановке. Согласно методу асимптотического расщепления [1, 2], решение построено путем разложения компонент тензора напряжений и вектора перемещений по степеням дифференциальных операторов, действующих вдоль оси цилиндра. При этом малым параметром выступает отношение толщины оболочки к длине цилиндра. Такой подход позволяет свести исходную двумерную осесимметричную постановку к последовательному решению одномерных задач, которые в свою очередь допускают аналитическое решение.

В случае если получение аналитического решения затруднено, краевые задачи по толщине стенки цилиндра решаются численно с использованием конечно-элементного пакета с открытым исходным кодом FEniCS Project [3]. Произведено сравнение полученных аналитических и численных решений с решением исходной двумерной задачи в конечно-элементном пакете COMSOL, показавшее хорошее совпадение (в пределах 10%) для различных значений радиуса, длины и толщины цилиндрической оболочки.

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

#### Список литературы

- [1] GORYNIN G., NEMIROVSKY Y. Deformation of laminated anisotropic bars in the three-dimensional statement 1. Transverse-longitudinal bending and edge compatibility condition // Mechanics of Composite Materials. 2009. Vol. 45. N. 3. P. 257–280.
- [2] Голушко С. К., Горынин Г. Л., Горынин А. Г. Метод асимптотического расщепления в динамических задачах пространственной теории упругости // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование, Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз. 2020. Т. 188. С. 43–53.
- [3] ALNAES M., BLECHTA J., HAKE J. ET AL. The FEniCS project version 1.5 // Archive of Numerical Software. 2015. Vol. 3. N. 100.

### 2.22. Григорьев А.С., Лапшина А.А., Бужков А.С. Определение локальных прочностных и упругих характеристик пористого огнеупора на основе SiO<sub>2</sub>

Разработка многомасштабных механических моделей перспективных огнеупорных материалов является одним из наиболее востребованных направлений в механике деформируемого твердого тела, что определяется, в том числе возможностью их использования для создания цифровых двойников перспективных огнеупоров. Ранее авторами была развита и валидирована мезоскопическая модель широко применяемого в металлургии огнеупорного материала на основе SiO<sub>2</sub>, учитывающая его характерные структурные особенности в интервале масштабов  $10^{-5}$ – $10^{-2}$  м и особенности механического отклика в широком спектре скоростей нагружения [1]. Однако полноценное применение развитой модели требует знания локальных механических свойств мезоскопических структурных элементов, в частности, высокопористых областей материала, образованных мелкодисперсными зёрнами размером менее  $10^2$  мкм. Экспериментальное определение эффективных характеристик структурных элементов на микроскопическом уровне является крайне затруднительной задачей. Поэтому в рамках данной работы проведена оценка упругих и прочностных характеристик микромасштабных пористых образцов огнеупора в зависимости от величины пористости и морфологии порового пространства. Ис-

следование проводилось путем численного моделирования с использованием метода дискретных элементов [2, 3]. В работе построены двумерные образцы, моделирующие мелкозернистые области огнеупора на основе  $\text{SiO}_2$  и характеризующиеся различной величиной пористости и типом поровой структуры (канальная или закрытая пористость). Получены оценки прочностных характеристик и интервалы изменения модуля Юнга исследуемых образцов в зависимости от величины пористости и морфологии порового пространства. Показан определяющий вклад пористости закрытого типа в интегральные механические характеристики огнеупора, хотя объемное содержание таких пор невелико в сравнении с содержанием протяженных пор канального типа. Полученные данные могут быть использованы в качестве входных параметров мезомасштабной модели огнеупора для решения актуальных задач, связанных с изучением влияния параметров микроструктуры на макроскопические механические и термомеханические свойства огнеупоров на основе  $\text{SiO}_2$ .

*Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 22-19-00688).*

#### Список литературы

- [1] GRIGORIEV A. S., ZAVOLOTSKIY A. V., SHILKO E. V. ET AL. Analysis of the quasi-static and dynamic fracture of the silica refractory using the mesoscale discrete element modelling // *Materials*. 2021. Vol. 14. Article 7376.
- [2] PSAKHIE S. G., SHILKO E. V., GRIGORIEV A. S. ET AL. A mathematical model of particle–particle interaction for discrete element based modeling of deformation and fracture of heterogeneous elastic–plastic materials // *Engineering Fracture Mechanics*. 2014. Vol. 130. P. 96–115.
- [3] GRIGORIEV A. S., SHILKO E. V., SKRIPNYAK V. A., PSAKHIE S. G. Kinetic approach to the development of computational dynamic models for brittle solids // *International Journal of Impact Engineering*. 2019. Vol. 123. P. 14–25.

#### 2.23. Григорьева А.А., Милойчикова И.А., Черепенников Ю.М., Стучебров С.Г. Применение математических преобразований для определения профиля электронного пучка

Развитие новых методов лечения электронными пучками и усложнение дозиметрических планов предъявляет высокие требования к точности доставки дозы при процедурах лучевой терапии. В связи с чем важной задачей является обеспечение контроля пространственных характеристик пучков на всех этапах проведения процедур лучевой терапии [1].

В клинической практике для проведения дозиметрии используются матричные детекторы, однако они могут обеспечивать лишь низкое пространственное разрешение результатов измерения — по

рядка 10 мм. Для измерения поперечного профиля пучка в высоком разрешении могут быть пригодны дозиметрические пленки, но они не позволяют получать результат в режиме реального времени.

Авторами работы ранее предложена концепция [2] определения поперечного профиля электронных пучков, в основу которого был положен метод многоугольного сканирования. При применении данной концепции предложено проводить математическую реконструкцию полученных сканирований пучка для восстановления его поперечного профиля. В работе были реконструированы профили электронного пучка при разном угловом шаге сканирования. Было показано, что для достоверной реконструкции профиля электронного пучка необходимо использовать угловой шаг равный  $15^\circ$  при полном угловом смещении —  $180^\circ$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2021-273 (проект № МК-4867.2021.1.2).*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Булавская А. А.*

#### Список литературы

- [1] VAN ELMPT W., MCDERMOTT L., NIJSTEN S. ET AL. A literature review of electronic portal imaging for radiotherapy dosimetry // *Radiotherapy and oncology*. 2008. Vol. 88. N. 3. P. 289–309.
- [2] BULAVSKAYA A. A., CHEREPENNIKOV Y. M., GRIGORIEVA A. A. ET AL. Multiangle scanning for measuring radiation beam profiles with a typical size of 10 millimetres — Proof-of-principle experiments // *Journal of Instrumentation*. 2022. Vol. 17. N. 07. T07004.

#### 2.24. Гуань С., Мищенко Е.В. Об одной задаче нахождения потенциала и объёмного заряда в нестационарных ЭГД течениях несжимаемой полимерной жидкости

Реологическая модель Покровского — Виноградова, предложенная в [1], описывающая нестационарные ЭГД течения несжимаемой полимерной жидкости, представляет собой систему нелинейных уравнений для компонент скорости, анизотропного тензора, давления и заряда и уравнение Пуассона для потенциала. При некоторых упрощающих предположениях, а именно, для течения полимерной жидкости пуазейлевского типа в плоском канале, система распадается на две задачи. Одной из полученных задач является начальная — краевая задача для нахождения потенциала  $\Phi(t, y)$  и заряда  $q(t, y)$

$$q_t - b \cdot \Phi_y \cdot q_y + b \cdot q^2 = 0,$$

$$\Phi_{yy} = -q,$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi|_{y=0} = 0, \Phi|_{y=1} = 1, \quad t > 0, \\ q = a \cdot \Phi_y(a > 0) \quad \text{при} \quad y = 1, \quad t > 0, \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi|_{t=0} &= \Phi_0(y), & 0 < y < 1, \\ q|_{t=0} &= q_0(y), & 0 < y < 1. \end{aligned} \right\}$$

Целью данного исследования является численное нахождение потенциала и заряда. Предложены два подхода для достижения цели. В первом случае в рассмотрение вводится функция  $L(t, y) = \frac{1}{q(t, y)} - b \cdot t$ , для которой было получено уравнение переноса. Во втором случае дифференциальное уравнение 1-го порядка было получено для функции  $\mathcal{L}_y(t, y) = -Q_y(t, y)$ ,  $Q(t, y) = \int_0^y q(t, s) ds$ . Для нахождения численного решения использована схема «бегущего счёта» на равномерной сетке с шагом  $\tau$  по времени  $t$  и  $h$  по переменной  $y$ ,  $r = \frac{\tau}{h}$ .

Уравнения содержат два параметра  $a$  и  $b$ . Для учета нелинейности в расчетную схему введен дополнительный параметр  $l$ , характеризующий число итераций по нелинейности. Численные расчёты проведены для различных значений параметров:  $a = b$ ,  $a \ll b$ ,  $b \ll a$ ,  $l = 0, 1, 2$ . Оба метода дают сходные результаты: значения искомого величин со временем стабилизируются. Значение  $a$  влияет на степень кривизны числовой функции. Величина параметра  $b$  влияет только на время остановки.

#### Список литературы

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

#### 2.25. Емельянова Е.С., Писарев М.А. О корреляции характеристик интенсивности деформационного рельефа с локальными деформациями в технически чистом титане

Численно и экспериментально исследуется зависимость интенсивности мезомасштабного деформационного рельефа от локальных деформаций в технически чистом титане. На основе данных EBSD анализа методом пошагового заполнения [1] были сгенерированы трехмерные модельные микроструктуры. Структура и текстура моделей характерны для прокатанного титана и различных зон поперечного сечения титанового прутка. Деформационное поведение зерен описывалось с помощью определяющих соотношений физической теории пластичности с учетом упруго-пластической анизотропии и особенностей дислокационного скольжения в гексагональных кристаллах. Краевые задачи об одноосном растяжении модельных микроструктур решались в динамической постановке в конечно-элементном пакете Abaqus/Explicit.

Для проведения экспериментов на одноосное растяжение были подготовлены образцы в форме двусторонних лопаток. Рабочая часть каждого образца была разделена на участки мониторинга по 5 мм. Эволюция мезоскопического деформационного рельефа на свободной поверхности в процессе одно-

осного растяжения исследовалась в соответствии с методикой «stop-and-study» [2]. Растяжение образцов осуществлялось на электромеханической испытательной машине Biss Nano 15 kN. При достижении заданной степени деформации образцы извлекались из испытательной машины для регистрации профилограмм поверхности на каждом участке мониторинга с помощью контактного профилометра. После этого образцы вновь помещались в испытательную машину и их нагружение продолжалось. Таким образом профили поверхности были получены в диапазоне деформаций от начала нагружения до момента образования шейки с интервалом 2–2.5%.

Для количественной оценки рельефных образований для полученных профилограмм был определен безразмерный параметр интенсивности деформационного рельефа, представляющий собой отношение длины профиля поверхности к длине проекции профиля. Локальные деформации вдоль оси растяжения измерялись для каждого участка мониторинга на каждом этапе остановки растяжения и снятия нагрузки по изменению расстояния между реперными точками по формуле линейного удлинения.

Сравнение проведенных расчетов одноосного растяжения поликристаллической модели с экспериментальными данными показали качественное и количественное сходство картин деформационного рельефа. Отклонение пиков и впадин от среднего уровня, а также характерный период частотных составляющих профилограмм при одинаковых степенях деформации варьировались в одинаковых пределах в эксперименте и расчете. Качественное и количественное согласие было получено для экспериментальных и численных зависимостей интенсивности деформационного рельефа от степени деформации, а также кривых нагружения, что свидетельствует о корректности построенной модели. Результаты подтверждают предположение о том, что место локализации пластической деформации может быть определено из оценок мезомасштабного деформационного рельефа.

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 20-19-00600).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Романова В. А.*

#### Список литературы

- [1] ROMANOVA V. A., BALOKHONOV R. R. A method of step by step packing and its application in generating 3D microstructures of polycrystalline and composite materials // Engineering with Computers. 2021. Vol. 37. P. 241–250.
- [2] ROMANOVA V., BALOKHONOV R., EMELIANOVA E. ET AL. Early prediction of macroscale plastic strain localization in titanium from observation of mesoscale surface roughening // International Journal of Mechanical Sciences. 2019. Vol. 161-162. P. 105047-1–105047-12.

## 2.26. *Индущая Т.С.* Численное решение дифференциально-алгебраических уравнений с производной Римана — Лиувилля порядка $\alpha$

Дифференциальные уравнения (ДУ) дробного порядка возникают в различных разделах физики сплошных сред [1]. В настоящее время направление вычислительной математики, связанное с численными методами решения систем ДУ с дробными производными, находится в начале своего развития. Представляемая работа посвящена разработке численных методов решения вырожденных систем ДУ дробного порядка с производной Римана — Лиувилля. Такие задачи будем называть дифференциально-алгебраическими уравнениями (ДАУ) дробного порядка, по аналогии с ДАУ целого порядка.

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений

$$D_{0+}^{\alpha} (A(t)u(t)) + B(t)u(t) = f(t), \quad t \in (0; 1], \quad (1)$$

с производной Римана — Лиувилля дробного порядка  $0 < \alpha < 1$

$$D_{0+}^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t (t-s)^{-\alpha} f(s) ds,$$

где  $A(t), B(t)$  — переменные ( $n \times n$ ) матрицы, причем  $A(t) \equiv 0$ ,  $f(t)$  и  $u(t)$  — известная и искомая  $n$ -мерные вектор-функции. Предполагается, что элементы  $A(t), B(t), f(t)$  обладают необходимой степенью гладкости. Для уравнения (1) зададим начальное условие

$$D_{0+}^{\alpha-1} (A(t)u(t)) \Big|_{t \rightarrow 0+} = u_0, \quad u_0 \in \mathbb{R}^n. \quad (2)$$

Задача (1), (2) традиционно называется задачей типа Коши [2]. Для ДАУ дробного порядка (1), (2) доказана теорема существования единственного непрерывного решения с помощью сведения к соответствующему интегро-алгебраическому уравнению. Разработаны численные методы решения на основе квадратурных формул левых и средних прямоугольников, а также метода интегрирования произведений. Результаты проведенных численных экспериментов показывают эффективность разработанных алгоритмов и демонстрируют сходимость порядка не хуже  $(1-\alpha)$ , а в некоторых случаях достигается первый порядок.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00173.*

### Список литературы

- [1] Учайкин В. В. Дробно-дифференциальные модели в гидродинамике // Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2019. Т. 27. № 1. С. 5–40.

- [2] Самко С. Г., Килбас А. А., Маричев О. И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения / Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.

## 2.27. *Кайгородцева А.А.* Моделирование ратчетинга конструкционной стали при учете накопления повреждений и стохастического разброса

Разработана геометрически и физически нелинейная модель ратчетинга на основе модели с нелинейным кинематическим и изотропным упрочнением [1]. Для надежной калибровки в модель внесены изменения, включая правило стагнации упрочнения и новое правило накопления повреждений. Рассматриваются методики калибровки, учитывающие и не учитывающие деградацию модуля упругости материала. Показано, что модели, учитывающие стагнацию упрочнения, более точно описывают имеющиеся экспериментальные данные.

Для калибровки и валидации модели применяются экспериментальные данные по накоплению неупругих деформаций в образцах из конструкционной стали [2]. Рассматриваемые образцы подвергались мягкому циклическому нагружению с положительным средним напряжением на цикле.

В силу большого разброса прочностных свойств от образца к образцу невозможно описать всю совокупность экспериментов с помощью единого набора параметров. Сделана гипотеза, что стохастическую природу разброса механических свойств можно описать, введя разброс одного параметра материала, а именно начального предела текучести. Для задачи идентификации в контексте стохастического разброса механических свойств создан соответствующий математический аппарат: введено понятие модельного веера и понятие протрузии. Для полученной двукритериальной задачи оптимизации предложен упрощенный алгоритм построения фронта Парето. Показано преимущество предложенного метода над стандартным методом, основанном на применении генетических алгоритмов.

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

### Список литературы

- [1] SHUTOV A. V., KREISSIG R. Finite strain viscoplasticity with nonlinear kinematic hardening: Phenomenological modeling and time integration // Computer Methods in Applied Mechanics Engineering. 2008. Vol. 197. N. 21–24. P. 2015–2029.
- [2] ZAKHARCHENKO K. V., KAYGORODTSEVA A. A., KAPUSTIN V. I., SHUTOV A. V. Method for studying the kinetics of plastic deformation and energy dissipation during fatigue of structural materials // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1942. N. 1.

**2.28. Кармушин С.Р. Нестационарные течения Пуазейля в вязкоупругой жидкости максвелла с двумя временами релаксации**

Одной из характерных особенностей движения вязкоупругих сред, привлекающих внимание исследователей, является аномальное поведение жидкости при определенных параметрах течения. Ярким проявлением развития неустойчивости потока является эффект сдвигового расслоения (shear banding), когда в течении неньютоновской жидкости возникает конечное число однонаправленных слоев, отличающихся скоростью сдвига. Это явление охватывает широкий класс течений, характеризующихся возникновением внутренних разрывов и, в конечном итоге, приводит к резкому уменьшению сопротивления при транспортировке вязкоупругих жидкостей в каналах и трубах.

В работе [1] предложена и проанализирована нелинейная модель Джонсона—Сигалмана—Олдройда, которая объединяет в себе модель Джонсона—Сигалмана с несколькими временами релаксации и подход с введением искусственной ньютоновской вязкости в законе сохранения импульса. Ключевая особенность этой модели — немонотонная зависимость стационарного напряжения сдвига от скорости сдвига. Это приводит к образованию скачков скорости сдвига в стационарном течении, когда градиент давления превышает некоторое критическое значение. Благодаря этой особенности, модель позволяет описывать различные неустойчивости потока, включая shear banding. В работе [2] исследовано течение Куэтта в рамках модели Джонсона—Сигалмана с двумя временами релаксации, но без ньютоновской вязкости и построена численная модель для расчета нестационарных решений с учетом сдвигового расслоения потока.

В данной работе рассмотрены одномерные нестационарные течения несжимаемой вязкоупругой жидкости между параллельными пластинами и в трубе (течение Пуазейля) в рамках модели Джонсона—Сигалмана с двумя временами релаксации. Проведены нестационарные расчеты различных режимов течения, продемонстрировано возникновение внутренних линий скольжения при увеличении скорости потока (shear banding). Построены стационарные решения и исследована их структура. Показано, что стационарные решения с внутренними линиями скольжения могут быть получены как численный предел нестационарных течений. На основе нестационарных расчетов построены диаграммы зависимости напряжения сдвига от скорости для течений Куэтта и Пуазейля. Проанализировано явление гистерезиса при циклическом изменении скорости потока.

Результаты исследования были использованы при выполнении индустриального проекта по моде-

лированию трехмерного течения геля ГРП в пропантной пачке.

*Научные руководители — д.ф.-м.н. Ляпидевский В. Ю., д.ф.-м.н. Головин С. В.*

**Список литературы**

- [1] MALKUS D. S., NONEL J. A., PLOHR B. J. Analysis of new phenomena in shear flow of non-newtonian fluids // SIAM J. Appl. Math. 1991. Vol. 51. N. 4. P. 899–929.
- [2] Ляпидевский В. Ю. Течение Куэтта вязкоупругой среды максвелловского типа с двумя временами релаксации // Тр. МИАН. 2018. Т. 300. С. 146–157.

**2.29. Кириллова Н.Е., Акинъшин А.А. Математическое моделирование малокомпонентной модели циркадного осциллятора**

Мы исследуем математическую модель малокомпонентной генной сети, которая участвует в регуляции суточных ритмов, связанных с важными процессами метаболизма многих видов живых организмов. Рассматривается нелинейная гладкая динамическая система кинетического типа, которая является шестимерной моделью такого циркадного осциллятора. Для этой системы проверяется неустойчивость стационарной точки и ищутся циклы в её фазовом портрете.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= k_1(\Gamma_1(x_2) \cdot \gamma_1(x_3) - x_1); \\ \dot{x}_\ell &= k_\ell(\Gamma_\ell(x_5) \cdot L_\ell(x_1) - x_\ell); \ell = 2, 3, 4; \\ \dot{x}_5 &= k_5(\Gamma_5(x_6) - x_5); \\ \dot{x}_6 &= k_6(L_6(x_4) - x_6). \end{aligned} \quad (1)$$

Переменные динамической системы (1) описывают концентрации компонент  $x_j$ , а скорости их естественного разложения характеризуются положительными коэффициентами  $k_j$ , здесь  $1 \leq j \leq 6$ .

Положительные функции  $L_s$ ,  $s = 2, 3, 4, 6$ , являются монотонно убывающими и описывают отрицательные обратные связи, при этом  $L'_s < 0$ . Положительные функции  $\gamma_1$ ,  $\Gamma_p$ ,  $p = 1, 2, 3, 4, 5$ , являются монотонно возрастающими и соответствуют отрицательным обратным связям. Здесь также  $\Gamma'_p > 0$ . Подробную биологическую интерпретацию и изучение похожей динамической системы см. в [1,2]. В нашей работе мы не конкретизируем вид убывающих и возрастающих функций, указанных выше.

Для системы (1) получено достаточное условие единственности стационарной точки  $S_0$ :

$$L_4 L'_2 \Gamma'_4 \Gamma_2 \geq L'_4 L_2 \Gamma_4 \Gamma'_2; \quad L_4 L'_3 \Gamma'_4 \Gamma_3 \geq L'_4 L_3 \Gamma_4 \Gamma'_3. \quad (2)$$

**Теорема.** Если условие (2) выполнено и

$$-L'_6 \Gamma_5 L_4 \Gamma'_4 > 8 - 2(\Gamma_1 \gamma'_1 L'_3 \Gamma_3 + \Gamma'_1 \gamma_1 L'_2 \Gamma_2),$$

тогда стационарная точка  $S_0$  неустойчива и система (1) имеет цикл.

Производные  $L'_s$ ,  $\Gamma'_p$ ,  $\gamma'_1$  и значения этих функций образуют матрицу линеаризации  $M$  системы (1) в стационарной точке  $S_0$ .

Далее, мы провели численные эксперименты с траекторией системы (1) и её предельным циклом, используя специальное облачное приложение. Для численного моделирования системы дифференциальных уравнений (1) использован алгоритм lsoda из пакета deSolve, подробнее см. [3]. С помощью этого приложения была построена проекция найденного цикла на двумерную плоскость, натянутую на пару собственных векторов, соответствующих собственным значениям матрицы  $M$  с положительной вещественной частью. В отдельных случаях мы наблюдали здесь бифуркации циклов. Для некоторых других динамических систем биохимической кинетики нами доказано существование не менее двух циклов в их фазовых портретах.

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Голубятников В. П.*

#### Список литературы

- [1] Голубятников В. П., Подколотная О. А., Подколотный Н. Л. и др. Об условиях существования циклов в двух базовых моделях циркадного осциллятора млекопитающих // Сибирский журнал индустриальной математики. 2021. Т. 24. № 4. С. 39–53.
- [2] Podkolodnaya O., Tverdokhlebov N., Podkolodnuyu N. Computational modeling of the cell-autonomous mammalian circadian oscillator // BMC Systems Biology. 2017. Vol. 11. P. 27–42.
- [3] Акиншин А. А., Аюпова Н. Б., Голубятников В. П. и др. Об одной численной модели циркадного осциллятора // Сибирский журнал вычислительной математики. 2022. Т. 25. № 3. С. 227–240.

#### 2.30. Ключанцев В.С. Уточненная теория разрушения на основе силового и деформационного критериев

Наиболее часто трещины в инженерных конструкциях располагаются в зонах концентрации напряжений, таких как окрестности вершин вырезов и границы отверстий. Для анализа на прочность требуется строить простые, пригодные для инженерных расчетов аналитические модели процесса разрушения материалов и конструкций.

Данная работа состоит из двух этапов. Первый этап посвящен развитию инженерной теории трещин. Полуаналитическая методика расчета критической нагрузки развита на основе двухпараметрического критерия прочности [1]. Новизна по сравнению с классическим вариантом теории состоит в более точном вычислении регулярной части эпюры напряжений. Второй этап работы заключается в апробации улучшенного критерия прочности. Так, для проверки смоделированы процессы разрушения трех типов образцов: образец на трехточечный изгиб, компактный образец и образец с краевой трещиной.

Материалы, исследованные в работе, имеют малый запас пластичности, что соответствует квазихрупкому разрушению [2]. Многообразие синте-

тических данных получено посредством варьирования радиуса делокализации  $h_{\text{nonlocal}}$  в нелокальных моделях накопления повреждений [3]. Кроме того, применялись три модели материала с различными гипотезами о влиянии трехосности на пластичность и накопление повреждений в материале [4].

Основные результаты исследования состоят в следующем:

- для материалов с внутренним линейным размером предложен уточнённый вариант инженерной теории трещин;
- представлен метод калибровки инженерных моделей на основе численных экспериментов;
- семейства виртуальных материалов подобраны таким образом, чтобы обеспечить качественный анализ влияния механических эффектов на прочность конструкций с трещиной;
- сравнение с данными синтетических экспериментов выявило, что базовый вариант инженерной теории недостаточно точно описывает совокупность экспериментальных данных для различных типов образцов. В тоже время, уточнённый вариант позволяет описать имеющиеся данные с применением только одного набора констант материала.

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

#### Список литературы

- [1] DUGDALE D.S. Yielding of steel sheets containing slits // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1960. Vol. 8. N. 2. P. 100–104.
- [2] Кургужов В. Д., Корнев В. М. Построение диаграмм квазихрупкого и квазивязкого разрушения материалов на основе необходимых и достаточных критериев // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54. № 1. С. 179–194.
- [3] BAŽANT Z.P., JIRÁSEK M. Nonlocal integral formulations of plasticity and damage: survey of progress // Journal of Engineering Mechanics. 2002. Vol. 128. P. 1119–1149.
- [4] SHUTOV A.V., KLYUCHANTSEV V.S. Large strain integral-based nonlocal simulation of ductile damage with application to mode-I fracture // International Journal of Plasticity. 2021. Vol. 144. Art. 103061.

#### 2.31. Костюченко Т.С., Богданов Н.М., Шапеев А.В., Новиков И.С. Разработка машинно-обучаемого потенциала на решетке с магнитными степенями свободы

Численное моделирование в задаче дизайна материалов стало неотъемлемой частью современного исследования новых материалов. В частности, особый интерес представляют многокомпонентные сплавы, как перспективные конструкционные материалы. Однако большое конфигурационное пространство задачи может требовать значительных затрат ресурсов. Одной из целей развития вычислительно эффективных методов численного исследо-

вания материалов является возможность оптимального планирования экспериментов.

В данной работе представлена методология, разработанная на основе канонического метода Монте—Карло с применением малорангового машинно обучаемого потенциала «на решетке». Потенциал строится на основе расчетов из первых принципов. Методология успешно применялась для исследования химического ближнего порядка и устойчивости в эквивалентных сплавах NbMoTaW, VCoNi и AlNbTiV. Причем при исследовании VCoNi расчеты из первых принципов производились с неявным учетом магнитных спинов атомов, что оказалось критичным для температуры фазового перехода порядок-беспорядок. Так было принято решение о разработке потенциала с явным учетом магнитных моментов с целью повышения точности потенциала, а также для реализации возможности исследования магнитного порядка материалов.

Современные модели, предлагающие явный учет магнитных взаимодействий параметризуются на расчетах из первых принципов с коллинеарными спинами (неколлинеарные требуют значительно больших вычислительных ресурсов). Эти модели предлагают аппроксимацию при отклонении от коллинерного направления. Так было принято решение построить модель малорангового потенциала с коллинеарными спинами и апробировать ее на примере систем объемно-центрированных кристаллических решеток Fe и FeCo. Учет магнитных моментов значительно повысил точность модели малорангового потенциала, однако, коллинеарная модель некорректно воспроизводит температуры магнетизации. Вследствие полученных результатов было принято решение о разработке потенциала с возможностью учета неколлинеарных спинов. Успешное построение малорангового машинно обучаемого потенциала с возможностью учета неколлинеарных магнитных моментов позволит изучать параметры магнитного порядка материалов с высокой точностью и вычислительной эффективностью.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 22-73-10206).*

### 2.32. Кузнецов К.С. Решение задач дизайна тепловых оболочек при помощи машинного обучения

В работе [1] представлено применение машинного обучения для решения обратной задачи дизайна тепловых оболочек. Авторами была численно решена прямая задача теплового рассеяния, сформирована база данных, обучены нейронные сети на предсказание двух выбранных функционалов. Также авторы утверждают, что не существует хорошо прогнозируемой внутренней связи между свойствами материалов слоёв оболочки и одним из выбран-

ных функционалов. Целью текущей работы является проверить данное утверждение, а также дополнительно исследовать возможность решения задачи дизайна тепловых оболочек при помощи машинного обучения.

Обратная задача полной тепловой маскировки имеет следующий вид:

$$\Delta T(k_1, k_2, k_3, k_4) + M_\nu(k_1, k_2, k_3, k_4) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  — коэффициенты теплопроводности слоёв оболочки.

Функционал  $M_\nu$  — предложен в работе [2], характеризует эффективность внутренней тепловой маскировки и имеет следующий вид:

$$M_\nu = \frac{\int_{\Omega_5} |T_5(x, y) - T_r(x, y)| dx dy}{\int_{\Omega_5} dx dy},$$

где  $T_r(x, y) \in \Omega_5$  — тепловое поле до внесения оболочки.

Функционал  $\Delta T$  [1] характеризует эффективность внешней тепловой маскировки:

$$\Delta T = |T_0|_{x=\frac{L}{2}-R_0, y=\frac{L}{2}} - T_0|_{x=\frac{L}{2}+R_0, y=\frac{L}{2}}|.$$

Решение обратной задачи полной маскировки (1) заключается в нахождении оптимальных значений  $k_1, k_2, k_3, k_4$  по известным значениям  $\Delta T$  и  $M_\nu$ . Значения функционалов находятся при помощи обученных нейронных сетей. Для обучения использовалось множество решений прямой задачи теплового рассеяния [3]:

$$\Delta T_i = 0, \quad (r, \varphi) \in \Omega_i, \quad i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \quad (2)$$

$$k_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = k_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial r}, \quad T_i(r, \varphi) = T_{i+1}(r, \varphi), \quad (3)$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad r = R_i, \quad i = 0, 1, 2, 3, 4,$$

$$T_5|_{x=0} = T_l, \quad T_5|_{x=L} = T_r,$$

$$\frac{\partial T_5}{\partial y}|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial T_5}{\partial y}|_{y=L} = 0, \quad (4)$$

где  $T_l, T_r$  — заданные функции,  $\Omega_i, k_i, T_i$  — область, теплопроводность и температурное поле подобласти  $i$  соответственно, где  $i = 0$  соответствует телу внутри оболочки,  $i = 1, 2, 3, 4$  соответствуют слоям оболочки,  $i = 5$  соответствует области вокруг оболочки.

Прямая задача (2)–(4) решается численно методом конечных элементов при помощи программного обеспечения FreeFem++. Для решения обратной задачи было сформировано несколько баз данных решений прямой задачи для разных распределений набора параметров  $k_1, k_2, k_3, k_4$ , включая распределение параметров из работы [1]. Было успешно

обучено несколько нейронных сетей разной архитектуры для предсказания  $\Delta T$ ,  $M_r$  и их суммы. Для оптимизации функции предсказания нейронной сети был использован метод имитации отжига. Были получены оптимальные наборы параметров  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , произведено сравнение с результатами других авторов.

#### Список литературы

- [1] Ji Q., Qi Y., Liu S. et al. Design of thermal cloaks with isotropic materials based on machine learning // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 189.
- [2] Ji Q., Chen X., Fang G. et al. Thermal cloaking of complex objects with the neutral inclusion and the coordinate transformation methods // AIP Advances. 2019. Vol. 9. N. 4.
- [3] Алексеев Г. В., Левин В. А., Терешко Д. А. Анализ и оптимизация в задачах дизайна устройств невидимости материальных тел / М.: Физматлит, 2021. 328 с.

### 2.33. Ларкин Д. О., Кагенов А. М. Математическое моделирование течения двухфазной среды при взаимодействии сверхзвуковой струи с преградой

Во время взлета или посадки космических аппаратов воздействие сверхзвуковых струй продуктов сгорания двигательной установки может приводить к возникновению эрозии места старта или посадки. В результате возможно образование пылевого облака. Отдельные частицы грунта могут повредить полезную нагрузку космического аппарата и его аппаратуру. Также пылевое облако может сказаться на показаниях ряда приборов.

В работе рассматривается задача о течении двухфазной среды при натекании одиночной сверхзвуковой струи на плоскую преграду. Для математического описания физической постановки используются допущения: газ идеальный, невязкий, сжимаемый. Частицы сферической формы, учитываются силы тяжести и сопротивления. Сверхзвуковое течение газа в декартовой системе координат описывается с использованием уравнений Эйлера [1]. Движение частиц описывается вторым законом Ньютона.

Для разрешения уравнений Эйлера использовался метод контрольных объёмов. Суть данного метода заключается в сведении дифференциальных законов сохранения в частных производных к интегральным. Для получения монотонного решения используются различные TVD-схемы [2]. В данной работе представлена схема *limitedLinear* с ограничителем наклона *Sweby* [3]. Полученная система уравнений газовой динамики решалась с использованием алгоритма PIMPLE. Данный алгоритм обладает надёжностью и скоростью счёта, а так же позволяет использовать число Куранта больше единицы.

В данной работе расчёт производился в пакете с открытым исходным кодом OpenFOAM [4] с ис-

пользованием решателя rhoPimpleFoam. Для тестирования данного решателя было проведено сравнение результатов расчетов с данными работы. Получено хорошее количественное и качественное совпадение.

В результате параметрических исследований были получены траектории движения для пробных частиц диаметром  $10^{-5}$ ,  $5 \cdot 10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ . А так же рассмотрены случаи равномерного распределения частиц вдоль плоской преграды. Замечено, что траектории лёгких частиц совпадают с линиями тока.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (грант № МК-761.2022.1.1).*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Кагенов А. М.*

#### Список литературы

- [1] Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976. 464 с.
- [2] Toro E. F., Spruce M., Speares W. Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver // Shock Wave. 1994. P. 25–34.
- [3] Sweby P. K. High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws // SIAM Journal on Numerical Analysis. 1984. N. 21. P. 995–1011.
- [4] Официальный сайт. OpenFOAM. [Электронный ресурс]. URL: <https://openfoam.org/> (дата обращения 12.09.2022).

### 2.34. Лемешев В. С. Математическое моделирование гидродинамических процессов в прибрежных водах Японского моря

Изучение гидродинамических процессов, происходящих в акватории проектирования, имеет прикладное значение при решении конкретных инженерных задач. Математическое описание гидродинамических процессов относится к сложным задачам механики сплошных сред, а построение такого рода моделей в условиях импортозамещения ПО сегодня является актуальной задачей.

В работе [1] рассмотрена трехмерная нестационарная математическая модель, не учитывающая влияние береговой линии и рельеф дна. Рассчитаны диффузия и дрейф массы взвеси в жидкости под действием течения и ветровых нагрузок.

Двумерная нестационарная математическая модель, описывающая гидродинамические процессы на геометрии мелководного водоема была изучена в исследовании [2].

Работа посвящена математическому моделированию гидродинамических процессов в прибрежных водах Японского моря, учитывающих такие физические факторы, как сложная геометрия дна и граница береговой линии, ветровые напряжения и трение о дно, сила Кориолиса, турбулентный обмен, стоки рек. На поверхности моря учитываются относительная влажность воздуха, скорость выпадения



ния атмосферных осадков, поток тепла, обусловленный радиацией и испарением. На жидких открытых границах задаются уровень воды, ее расход, температура и соленость. Данные для начальных условий рассчитываются из соответствующей стационарной модели. На основе гидрографической информации разработан численный метод восстановления рельефа дна и береговой линии, что важно для прибрежных районов. Система уравнений Навье — Стокса записана в предположении гидродинамического приближения [3] на основе трёхмерных уравнений течений неоднородной жидкости.

Решение проблемы включает в себя рассмотрение стационарной задачи для определения начальных значений компонент скоростей, температуры, солености и нестационарной задачи, где определялись характеристики среды в зависимости от изменения параметров, зависящих от времени. При задании граничных условий учитывается квадратичный закон трения на поверхности воды и на дне.

Для численного моделирования применяется программный пакет FreeFem++, в котором были реализованы различные геометрии области, а также конечно-разностная аппроксимация стационарной и нестационарной гидродинамических задач. В результате решения были получены графики скоростных полей течения, изменения функции плотности, температуры, солености, давления и функции свободной поверхности жидкости с течением времени.

Гидродинамические данные, полученные при моделировании динамики участка моря, используются для расчёта дрейфа массы и концентрации загрязняющих веществ при проведении гидротехнических работ в прибрежных морских зонах.

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Амосова Е. В.*

#### Список литературы

- [1] АМОСОВА Е. В., КИКЕЛИН Д. С. Математическое моделирование распространения зон загрязнения взвесью в морской среде // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 4 (38). С. 72–79.
- [2] АМОСОВА Е. В., САПОЖНИКОВ А. Д., ЛИ А. О., и др. Математическое моделирование распространения зон примесями на акватории мелкой воды // Тр. XII Всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2021. С. 201.
- [3] БУХТЕЕВ В. Г., ДОРНИН Ю. П., ЗУВОВА М. М. и др. Динамика океана / Л.: Гидрометеиздат, 1980. 304 с.

#### 2.35. Ли Х. Основанное на данных развитие моделей турбулентности с помощью методов машинного обучения

Модели подхода RANS для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса имеют ряд ограничений из-за невысокой точности и неуниверсальности. Однако, они до сих пор широко применяются в инженерных расчетах, не тре-

буя больших вычислительных мощностей, что является значительным преимуществом этого подхода. Поэтому актуальна задача по улучшению точности RANS-моделей. В этом могут помочь алгоритмы машинного обучения (ML), использующие доступные наборы данных высокой точности, которые получены путем измерений или численного моделирования вихреразрешающими методами DNS (Direct Numerical Simulation) и LES (Large Eddy Simulation) для канонических течений жидкости и газа.

В данной работе рассматривается применение различных методов машинного обучения: нейронная сеть с тензорным базисом (TBNN) [1] для аппроксимации напряжений Рейнольдса; программирование экспрессии генов (GEP) [2]. Последний метод предназначен для получения явных алгебраических выражений для напряжений Рейнольдса. Для обучения и калибровки моделей используется высокоточные данные DNS для канонических турбулентных течений в двумерных каналах с выступами, документированные в ряде работ.

Модели анизотропии напряжений Рейнольдса, полученные при помощи TBNN с обучением на DNS-данных [3], встроены в модифицированный решатель OpenFOAM. Проведены априорные оценки и предварительные тестовые расчеты по новому решателю для турбулентных течений в каналах с сужением — расширением и с периодическими холмами. Результаты показывают, что использование ML-методов приводит к уточнению распределений для компонент тензора анизотропии напряжений Рейнольдса по сравнению с их аналогами, вычисленными по базовой линейной модели вихревой вязкости (градиентной гипотезы Буссинеска).

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-19-00587).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Яковенко С. Н.*

#### Список литературы

- [1] LING J., KURZAWSKI A., TEMPLETON J. Reynolds averaged turbulence modelling using deep neural networks with embedded invariance // J. Fluid Mech. 2016. Vol. 807. P. 155–166.
- [2] WEATHERITT J., SANDBERG R. A novel evolutionary algorithm applied to algebraic modifications of the RANS stress-strain relationship // J. Comput. Phys. 2016. Vol. 325. P. 22–37.
- [3] XIAO H., WU J.-L., LAIZET S. ET AL. Flows over periodic hills of parameterized geometries: A dataset for data-driven turbulence modeling from direct simulations // Comput. Fluids. 2020. Vol. 200. 104431.

#### 2.36. Мерзоева Л. Р. Моделирование гемодинамики в бифуркации аорты при наличии аневризмы

Аневризма брюшного отдела аорты является распространенной аномалией сосудистой системы, нарушающей нормальный режим кровотока [1]. Би-

фуркация аорты при наличии аневризмы представляет собой сложную гидродинамическую систему. Описание течения жидкости в бифуркации является предметом многих исследований [2].

В работе исследуются свойства брюшного отдела аорты при включении в систему аневризмы локализованной на стволе аорты. Геометрические и гидродинамические параметры системы берутся из медицинских данных, предоставленных ФГБУ НМИЦ им. акад. Е. Н. Мешалкина. Проведено численное моделирование течения крови в идеализированных конфигурациях с патологией и без. Рассчитаны и проанализированы такие энергетические параметры: нормированная функция вязкой диссипации (1) и диаграммы «давление — скорость».

$$D = \frac{4\mu}{V} \int_{\Omega} |\omega|^2 dV, \quad (1)$$

где  $\omega$  — вектор вихря скорости;  $\mu$  — вязкость жидкости;  $\Omega$  — область течения;  $V$  — объем области  $\Omega$ .

Результаты моделирования согласуются с общепринятым представлением о физиологических процессах в абдоминальном отделе аорты. Выявлены следующие эффекты:

- снижение значений нормированной диссипативной функции с появлением патологии;
- рост давления и уменьшение площади, ограниченной кривой диаграммы «давление — скорость», выше аневризмы с увеличением радиуса последней в сравнении с конфигурацией без патологии.

Полученные результаты дают лучшее понимание причин ретроградного влияния аневризмы на сердечную функцию.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-15-00091).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Чупахин А. П.*

#### Список литературы

- [1] VIGNALI E., GASPAROTTI E., CELI S., AVRIL S. Fully-coupled FSI computational analyses in the ascending thoracic aorta using patient-specific conditions and anisotropic material properties // *Frontiers in Physiology*. 2021. Vol. 12. DOI:10.3389/fphys.2021.732561.
- [2] CORREA P. G., MAC INTYRE J. R., GOMBA J. M. ET AL. Three-dimensional flow structures in X-shaped junctions: Effect of the Reynolds number and crossing angle // *Phys. Fluids*. 2019. Vol. 31. N. 4. Art. 043606.

#### 2.37. Мухоманова Т.С. Триггерная модель динамики острого и хронического асептического воспаления

Центральным звеном защитно-приспособительной реакции организма в ответ на повреждение является воспалительный ответ. Он формируется и регулируется, прежде всего, системой иммунитета через сложные взаимодействия тканей и иммунных

клеток между собой, а также с другими системами белковых молекул. В медицине различают острую и хроническую формы воспаления. Последняя, как известно, в значительной мере может осложнить весь процесс заживления: раны могут заживать в течение длительного времени или не зажить совсем. Поэтому понимание биохимии этого сложного многофакторного многоуровневого процесса позволит формулировать, изучать и внедрять в клиническую практику новые терапевтические стратегии, способствующие снижению риска возникновения неблагоприятных исходов и осложнений и ускорению процесса заживления.

Поиск новых способов предотвращения хронизации воспалительного ответа проводится в рамках достаточно полной математической модели [1], которая представляет собой жесткую нелинейную систему функционально-дифференциальных уравнений. В настоящей работе основное внимание уделено исследованию качественных свойств решений этой системы. Обнаружена мультистабильность динамической системы в окрестности биологически значимых решений. Определены условия на входные (начальные) данные, при которых система способна описывать не только состояние условной нормы (отсутствие раны) и классический острый воспалительный ответ, но и его переход в хроническую форму. Изучен триггерный механизм переключения этих состояний.

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

#### Список литературы

- [1] ВОРОПАЕВА О. Ф., БАЯДИЛОВ Т. В. Математическая модель динамики асептического воспаления // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2020. Т. 23. № 4. С. 30–47.

#### 2.38. Мошкин Д.А. Моделирование процесса переноса излучения для обеспечения радиометрических испытаний на реакторе ИРТ-Т

Для обеспечения надлежащего качества радиометрических испытаний, а также для удовлетворения условий безопасности при их проведении необходимы знания о параметрах источника ионизирующего излучения, ведь в зависимости от области его применения будут меняться и предъявляемые к нему требования.

Однако на данный момент для некоторых экспериментальных каналов на реакторе ИРТ-Т отсутствует актуальная информация о параметрах нейтронных полей. Как уже было сказано ранее, отсутствие данной информации напрямую влияет на качество радиометрических испытаний, а также на возможное влияние опасных для жизни факторов на обслуживающий персонал исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т.

Все работы проводились на ядерном реакторе бассейнового типа ИРТ-Т. Реактор имеет 10 горизонтальных и 14 вертикальных экспериментальных каналов, а также вертикальный канал большого диаметра ВЭК-200.

В рамках работы была выбрана программа MCU-PTR из комплекса программ MCU в качестве основной расчетной программы. MCU-PTR позволяет проводить расчеты нейтронно-физических характеристик исследовательских ядерных реакторов бассейнового типа, учитывая выгорание ядерного топлива, поглотителя в регулирующих стержнях системы управления и защиты и их перемещений, основываясь на методе Монте-Карло. Константное обеспечение программы MCU базируется на библиотеке ядерных данных MCUDB50. В 2015 году проведена верификация программы MCU-PTR с библиотекой констант MCUDB50 для полномасштабного расчета исследовательского реактора ИРТ-Т.

На основе аттестованной модели активной зоны реактора была создана модель реактора ИРТ-Т, включающая в себя: активную зону, экспериментальные каналы с актуальным геометрическим расположением и биологическую защиту для проведения данного исследования. На основе данной модели проведены расчеты параметров нейтронных полей в вертикальных экспериментальных каналах.

С целью апробации полученных значений был проведен ряд экспериментов с облучением образцов в экспериментальных каналах. Измерение количества событий, облученных образцов проводилось на гамма-спектрометре многоканальном для измерения рентгеновского и гамма-излучения «Санбегга» (УРС-06/07), помимо использования гамма-спектрометра, также был задействован спектрометр бета-излучения сцинтилляционный «ПРОГРЕСС-БЕТА».

Всего в процессе экспериментов в канале ГЭК-1 были облучены детекторы из меди, марганца и золота. Среднее значение на основе трех экспериментов составило  $4.65 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , расчетное значение в аттестованной модели MCU составило  $4.5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , относительная погрешность среднего значения по отношению к расчетному составила 3.3%.

В процессе экспериментов в канале ВЭК-6 были облучены пороговые детекторы из ртути, никеля, железа, серы, алюминия и кремний. Сравнивая результаты можно сделать вывод, что использование порогового детектора из железа для измерения плотности потока быстрых нейтронов на основе (n,p) реакции  $\text{Fe}^{54}$  с образованием  $\text{Mn}^{54}$  не целесообразно. Среднеквадратичная погрешность на основе 5 измерений плотности потока быстрых нейтронов составила 23.34%, что является показателем точности проведения экспериментов и актуализированной модели, которую можно использовать

при проведении радиометрических испытаний в каналах ИРТ-Т.

### 2.39. Найденкова К.Е. Вычисление характеристик струйного течения тонкого жидкого слоя за косым ударом упругим телом с учетом гравитации

В рамках теории мелкой воды рассматривается двумерная нестационарная задача о динамике тонкого жидкого слоя в следе после косоугольного удара упругим телом. Данное исследование мотивировано экспериментами по осаждению капель в кольцевом газожидкостном потоке [1]. Задача исследуется в двумерной постановке. В начальный момент времени упругое тело ударяется о жидкость в точке  $x = 0$  ( $x, y$  — декартовы координаты) и затем движется в положительном направлении оси  $x$ , проникая в слой жидкости заданной толщины [2]. Нестационарный поток жидкости в след за ударом задается в виде численных массивов, вычисленных при анализе удара упругим телом в крайней точке контакта жидкости и упругого тела, что накладывает ограничения на способы решения задачи. Поведение жидкости в следе описывается системой уравнений Навье — Стокса, где неизвестными функциями являются:  $u(x, y, t)$  — горизонтальная компонента вектора скорости жидкости;  $v(x, y, t)$  — вертикальная компонента вектора скорости жидкости;  $p(x, y, t)$  — гидродинамическое давление;  $\eta(x, t)$  — высота свободной поверхности. Для решения системы используются асимптотические методы. В данном случае неизвестные функции раскладываются в ряд по малому параметру  $\epsilon$ , который равен отношению вертикальной и горизонтальной компонент вектора скорости. Параметры течения на входе пластины в слой жидкости таковы, что вязкостью и поверхностным натяжением можно пренебречь из-за малых порядков, а эффект гравитации может оказывать влияние на поведение свободной поверхности в главном приближении. Для искомым функций выведены аналитические формулы для главного приближения и первой поправки, и разработан алгоритм вычисления искомым параметров. Полученные решения сравниваются с результатами динамики тонкого жидкого слоя в следе без учета гравитации, полученными в работе [3].

*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] КНАВАКНРАШЕВА Т. И., КОРОВКИН А. А. Oblique elastic plate impact on thin liquid layer // Physics of Fluids. 2020. Vol. 32. N. 6. Art. 062101.  
 [3] 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.

#### 2.40. Нехорошева О.А., Зиновьева О.С. Компьютерное моделирование структуры и свойств аддитивной стали

Основной проблемой изготовления аддитивных металлических изделий является сложная зависимость их микроструктуры от технологических параметров производства и физико-механических свойств исходных материалов. В этой связи привлекательной идеей является замена экспериментальных исследований компьютерным моделированием.

Целью работы является численное определение упругих характеристик стали 316L, полученной методом селективного лазерного плавления при двух стратегиях сканирования — однонаправленной и двунаправленной, в рамках подхода микромеханики, где зеренная структура учитывается явно.

Модели микроструктур, используемых в конечно-элементных расчётах, смоделированы в рамках комбинированного подхода на основе методов конечных разностей для расчета термических полей и клеточных автоматов для моделирования кристаллизации (Cellular Automata Finite Difference — CAFD) [1, 2].

Анализ результатов численных исследований показал, что стратегия сканирования оказывает существенное влияние на текстуру и упругие свойства готового образца [3]. Для однонаправленной стратегии сканирования различные кристаллографические текстуры реализуются для всех трех направлений и значения трех модулей Юнга отличаются в диапазоне от 18 до 51%. Однако для двунаправленной стратегии сканирования одинаковые кристаллографические текстуры и близкие по значению модули Юнга наблюдаются для двух направлений — направления наращивания слоев и направления поперечного движению лазера. В обоих рассматриваемых случаях модуль Юнга вдоль направления движения лазера является наименьшим относительно других направлений.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, FWRW-2021-0002.*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Романова В. А.*

#### Список литературы

- [1] ZINOVIEVA O., ZINOVIEV A., ROMANOVA V. ET AL. Three-dimensional analysis of grain structure and texture of additively manufactured 316L austenitic stainless steel // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 36. P. 101521-1–101521-15.

- [2] ZINOVIEVA O., ROMANOVA V., BALOKHONOV R. Effects of scanning pattern on the grain structure and elastic properties of additively manufactured 316L austenitic stainless steel // Materials Science and Engineering: A. 2022. Vol. 832. P. 142447-1–142447-16.  
 [3] DYMNICH E., ROMANOVA V., BALOKHONOV R. ET AL. A numerical study of the stress-strain behavior of additively manufactured aluminum-silicon alloy at the scale of dendritic structure // Physical Mesomechanics. 2021. Vol. 24. N. 1. P. 32–39.

#### 2.41. Патрин Г.А., Штырина О.В., Чеховской И.С. Численный алгоритм для расчёта многосердцевинных световодов с учетом насыщения усиления сигнала

При численном моделировании лазерных систем на основе многосердцевинных волокон (multi-core fibers, MCF) необходимо учитывать различные физические эффекты, в том числе потери и усиление в световоде. Также это важно при расчете волоконно-оптических линий связи на основе MCF, когда необходима численная реализация модели распределенного рамановского усиления [1].

Многосердцевинные волокна состоят из нескольких сердцевин, расположенных под общей оболочкой. Распространение электромагнитного поля в MCF с одноименными сердцевинами может быть описано системой связанных нелинейных уравнений Шрёдингера (coupled nonlinear Schrödinger equations, CNLSE), заданных в приближении медленно меняющейся огибающей. В этой системе рассматриваются связи только между соседними сердцевинами. Систему CNLSE, описывающую распространение сигнала по  $(N+1)$ -сердцевинному волокну, можно представить в векторном виде следующим образом [2]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{A} = -i \frac{\beta}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{A} + i \gamma |\mathbf{A}|^2 \mathbf{A} + \sigma \mathbf{A} + i \mathbf{C} \mathbf{A}. \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{A} = (A_0, A_1, \dots, A_n)^T$ ,  $A_n(t, z)$  — комплексная огибающая сигнала в  $n$ -й сердцевине;  $t$  — время;  $z$  — пространственная координата;  $\sigma = \frac{g(A_n)}{2} - \frac{\alpha}{2}$  — разность усиления и линейных потерь;  $g(A_n) = \frac{g^{\text{const}}}{1 + E_n(A_n)/E^{\text{sat}}}$  — коэффициент насыщенного усиления;  $g^{\text{rmconst}}$  — усиление по малому сигналу;  $\alpha$  — коэффициент линейных потерь;  $E_n(A_n)$  — энергия сигнала и  $E^{\text{sat}}$  — энергия насыщения;  $\beta$  — коэффициент дисперсии групповых скоростей;  $\gamma$  — коэффициент нелинейности Керра. Энергия сигнала определяется как  $E_n(A_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} |A_n|^2 dt$ . В общем случае

для каждого уравнения коэффициенты NLSE индивидуальны и обозначены соответствующим индексом  $n$ . Матрицу  $\mathbf{C}$  называют матрицей связей.

Для моделирования динамики оптического сигнала в MCF в рамках системы (1) был разрабо-

тан эффективный численный алгоритм. Его особенностью является возможность учета линейных потерь и насыщенного усиления в волокне. Поскольку в дальнейшем планируется моделирование световодов с небольшим числом сердцевин (до 9), предпочтение было отдано разработке алгоритма на основе Фурье метода расщепления по физическим процессам (SSFM), а не применению разностных схем повышенного порядка точности. Моделирование с помощью разностных схем предпочтительнее для численного интегрирования больших систем НУШ, поскольку их вычислительная сложность растёт линейно с увеличением числа сердцевин, в то время как реализация SSFM требует вычисления матричной экспоненты и векторно-матричного умножения на каждом шаге интегрирования.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение фундаментальных исследований (FSUS-2020-0034) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-11-20040).*

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

#### Список литературы

- [1] BARNARD C., MYSLINSKI P., CHROSTOWSKI J. ET AL. Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers // IEEE J. Quantum Electronics. 1994. Vol. 30. N. 8. P. 1817–1830.
- [2] СНЕКНОВСКОЙ И., РУБЕНЧИК А., ШТЫРИНА О. ET AL. Nonlinear pulse combining and pulse compression in multi-core fibers // Optics Letters. 2015. Vol. 40. N. 5. P. 721–724.

#### 2.42. Писарев М.А., Емельянова Е.С. Статистическая оценка деформационного рельефа $\alpha$ -титана для модельных и экспериментальных структур

В работе представлены результаты оценки деформационного рельефа  $\alpha$ -титана при помощи вычисления различных статистических параметров для профилей, полученных в результате экспериментальных и численных испытаний на одноосное растяжение.

Экспериментальный образец представлял из себя лопатку с рабочей частью размером  $50 \times 8 \times 3$  мм. Рабочая часть была разделена на 10 участков по 5 мм. Эксперимент проводился по методике «stop-and-study», описанной в [1]. Модельная микроструктура [2] состояла из 13 500 000 конечных элементов. Модель генерировалась методом пошагового заполнения [3] на основе экспериментальных данных EBSD анализа. Одноосное растяжение проводилось в конечно-элементном пакете Abaqus/Explicit в рамках физической теории пластичности.

В качестве параметров использовались среднее арифметическое  $R_a$ , среднее квадратичное  $R_{RMS}$ , фрактальная размерность  $D_F$  [4] и безразмерный параметр интенсивности деформационного рельефа  $R_d$  [1].

Были построены зависимости статистических параметров от деформации участка и деформации образца. Была получена корреляция между статистическими параметрами и деформациями образца и участков.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-19-00600).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Романова В. А.*

#### Список литературы

- [1] ROMANOVA V., BALOKHONOV R., EMELIANOVA E. ET AL. Early prediction of macroscale plastic strain localization in titanium from observation of mesoscale surface roughening // International Journal of Mechanical Sciences. 2019. Vol. 161–162. P. 105047–1–105047-12.
- [2] EMELIANOVA E. S., ROMANOVA V. A., BALOKHONOV R. R. ET AL. A numerical study of the contribution of different slip systems to the deformation response of polycrystalline titanium // Physical Mesomechanics. 2021. Vol. 24. N. 2. P. 166–177.
- [3] ROMANOVA V. A., BALOKHONOV R. R. A method of step by step packing and its application in generating 3D microstructures of polycrystalline and composite materials // Engineering with Computers. 2021. Vol. 37. P. 241–250.
- [4] SANCHEZ GRANERO M. A., TRINIDAD SEGOVIA J. E., GARCIA PEREZ J. Some comments on Hurst exponent and the long memory processes on capital markets // Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications. 2008. Vol. 387. N. 2. P. 5543–5551.

#### 2.43. Попов А.Ю. Моделирование возбуждения внутренних волн при впадении реки в море методом конечных элементов с частицами PFEM-2

Математическое моделирование в задачах океанологии играет особую роль, поскольку, с одной стороны, представляют интерес собственно процессы, происходящие в морях и океанах (например, образование отложений, перенос примесей, живых организмов), а с другой требуется учитывать влияние морских течений на инфраструктуру, в т. ч. береговую. Натурный эксперимент здесь зачастую невозможен, а данные наблюдений, несмотря на их большое разнообразие (спутниковые снимки, данные с метеостанций, результаты измерений в экспедициях и пр.), не обладают достаточной полнотой, могут быть сделаны через довольно большие промежутки времени и фиксировать ограниченный набор величин.

Сравнительно недавно было обнаружено [1], что при впадении небольших, но быстрых рек в море или океан в месте впадения могут возбуждаться внутренние волны. В этих задачах еще не накоплено больших массивов данных измерений и потому вычислительный эксперимент особенно актуален. Однако он осложняется, в частности, необходимостью рассматривать протяженные области

и большие промежутки времени, поскольку интерес представляют стационарные (или квазистационарные) режимы. Это предъявляет повышенные требования к численному методу моделирования. В этой задаче влиянием вязкости и температурного градиента можно пренебречь или учитывать их весьма приближенно, перепад давления наблюдается на довольно крупных масштабах, а основным механизмом в части распространения внутренних волн выступает перенос среды. По этим причинам здесь представляется эффективным применение метода конечных элементов (МКЭ) с частицами PFEM-2 (Particle Finite Element Method, 2nd generation [2]).

Этот метод предлагает моделировать перенос в рамках лагранжева описания среды, отслеживая движение нематериальных частиц по линиям тока, а редуцированную линейную гидродинамическую задачу (без конвективного члена) решать традиционно на сетке с использованием МКЭ. Это позволяет вести расчет на грубой сетке с крупным шагом по времени. В данной работе рассматривается модификация метода PFEM-2 для моделирования впадения пресной речной воды в соленое море. Задача решается в трехмерной постановке, для учета различной плотности соленой и пресной воды вводится величина солёности, изменение которой описывается уравнением конвекции — диффузии. Однако, поскольку основным механизмом распространения солёности — это перенос среды, а не диффузия, то решения отдельного уравнения не требуется, а солёность переносится без изменения по линиям тока жидкости как пассивная примесь. Естественная конвекция при этом моделируется в приближении Буссинеска.

Решение модельной задачи подтвердило эффективность метода PFEM-2 и позволило вести расчет на сравнительно грубой сетке с крупным шагом по времени. При этом вычислительная сложность задачи остается довольно высокой, и для ее эффективного решения разработана параллельная версия алгоритма с использованием технологий MPI и CUDA [3].

#### Список литературы

- [1] OSADCHIEV A. A. Small mountainous rivers generate high-frequency internal waves in coastal ocean // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. N. 1. Art. No. 16609.
- [2] IDELSON S. R., NIGRO N. M., GIMENEZ J. M. ET AL. A fast and accurate method to solve the incompressible Navier — Stokes equations // Engineering Computations. 2013. Vol. 30. N. 2. P. 197–222.
- [3] POPOV A., MARCHEVSKY I. MPI-based PFEM-2 method solver for convection-dominated CFD problems // Communications in Computer and Information Science. 2022. Vol. 1618. P. 261–275.

#### 2.44. Прохоров Д.И. Алгоритм численного решения системы уравнений Аллена — Кана и Кана — Хиллиарда для моделирования процесса спекания зернистых материалов

Производство современных материалов с заданными свойствами требует глубоких знаний о процессе спекания, а также о характере эволюции микроструктуры материала, сопутствующей этому процессу. Например, ключевыми свойствами сорбента являются прочность и емкость (связанная с площадью поверхности). Измерение этих свойств химическими и физическими методами, особенно, если речь идет о большом количестве образцов, является ресурсоемкой задачей. С другой стороны, такие эксперименты можно проводить для цифрового представления образца. Поэтому компьютерное моделирование спекания представляет интерес как для промышленности, так и для вычислительной математики.

Наиболее перспективным и быстро развивающимся подходом к моделированию спекания является метод фазового поля [1]. Общий принцип метода фазового поля заключается в том, что физические величины описываются набором фазовых полей, которые принимают постоянные значения в определенных областях и плавно изменяются на их границах. Одной из возможных моделей является система, состоящая из одного уравнения Кана — Хиллиарда и  $I$  уравнений Аллена — Кана, где  $I$  — число зерен. Уравнение Кана — Хиллиарда определяет эволюцию плотности массы, а уравнения Аллена — Кана описывают поведение параметров порядка.

Для моделирования больших образцов, состоящих из нескольких тысяч зерен, предложен следующий подход: решение уравнений Аллена — Кана методом конечных разностей вычисляется только в небольшой подобласти, содержащей соответствующее зерно. В процессе микроструктурной эволюции положение и размер зерен меняется, поэтому меняются и области, в которых вычисляется решение. Проведено сравнение результатов полученных с помощью предложенного подхода с результатами, полученными стандартным способом (решение уравнений во всей расчетной области). Показана производительность алгоритма для образца из 4302 зерен.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-71-20003).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Базайкин Я. В.*

#### Список литературы

- [1] WANG YU. U. Computer modeling and simulation of solid-state sintering: A phase field approach // Acta Materialia. 2006. Vol. 54. Is. 4. P. 953–961.

#### 2.45. Рудин С.А., Павский К.В. Монте-Карло модель для трехмерного моделирования гетероэпитаксии

Одной из приоритетных задач в области материаловедения является создание пространственно-упорядоченных массивов полупроводниковых квантовых точек (КТ). Для интерпретации экспериментальных данных по росту таких гетероэпитаксиальных структур, а в некоторых случаях и для предсказания результатов при изменении условий эксперимента, используют различные компьютерные модели. Разработана физическая модель Монте-Карло для моделирования гетероэпитаксиального роста [1]. В основе модели лежит трехмерная алмазоподобная кристаллическая решетка. Процесс моделирования роста состоит из последовательности элементарных событий, выбираемых случайным образом в соответствии с их вероятностями. Возможны события двух типов: осаждение и диффузионный прыжок атома по поверхности. Для учета изменения деформации в пространстве с течением времени добавлен третий тип событий — тепловые колебания атомов вокруг их равновесных положений. Моделирование процессов гетероэпитаксиального роста является вычислительно сложной задачей. Возникновение неоднородностей в распределении деформации или в морфологии поверхности является проблемой при разработке параллельных алгоритмов для систем с распределенной памятью. Около 98% вычислений модели занимают блоки «прыжок/осаждение атома» и «термический отжиг», конструкции которых были распараллелены для систем с общей памятью. Тестовые расчеты [2] показали, что разработанные параллельные алгоритмы позволяют сократить машинное время для моделирования роста Ge на Si на 20–60% в зависимости от условий эксперимента.

*Работа выполнена в рамках государственного задания № 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. [Электронный ресурс]. URL: <http://nusc.nsu.ru/wiki/doku.php> (дата обращения 14.09.2022).

#### 2.46. Рыбков М.В. Алгоритм переменного порядка с адаптивными областями устойчивости

При моделировании процессов химической кинетики, теории электрических цепей в ряде случаев возникают жесткие системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которые в [1] предлагается решать с помощью алгоритмов на основе явных ме-

тодов. Известно, что эффективность явного метода зависит от длины его интервала устойчивости, поэтому построение таких методов с расширенными областями устойчивости является актуальной задачей. Применение алгоритмов с возможностью переключения между явными методами и адаптация областей устойчивости под задачу позволяют эффективно производить расчет систем большой размерности, которые часто возникают в упомянутых областях [2].

Здесь построен алгоритм на основе явного метода высокого порядка точности и набора методов первого порядка с согласованными областями устойчивости, которые фактически играют роль неявного метода с точки зрения длины интервала устойчивости. Разработаны критерии контроля устойчивости, которые служат механизмом переключения между методами внутри алгоритма, позволяя на конкретном участке использовать наиболее эффективный метод. Повышение эффективности интегрирования задачи достигается за счет использования методов высокого порядка на переходных участках и методов низкого порядка на участках установления. При этом адаптация областей устойчивости первого низкого порядка позволяет обеспечить более контролируемое поведение шага интегрирования (в численных экспериментах наблюдается сокращение числа возвратов, уменьшение числа вычислений правой части дифференциальной задачи). Приведены результаты расчетов задач (уравнение Ван-дер-Поля, реакция Белоусова — Жаботинского), показывающие более высокую эффективность предлагаемых методов в сравнении с наиболее широко применяемыми.

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Новиков Е. А.*

##### Список литературы

- [1] Новиков Е. А. Явные методы для жестких систем: монография / Новосибирск: Наука, 1997. 195 с.
- [2] Ryvkov M. V., Novikov A. E., Knaub L. V., Litvinov P. S. Solving problems of moderate stiffness using methods of the first order with conformed stability domains // Университетский научный журнал. 2016. № 22. С. 49–58.

#### 2.47. Сактеева К.П. Построение устойчивых неявных одношаговых методов численного решения линейных интегралгебраических уравнений с гладким ядром

В докладе будут рассматриваться интегралгебраические уравнения

$$A(t)x(t) + \int_0^t K(t,s)x(s)ds = f(t), \quad (1)$$

где квадратные матрицы  $A(t)$  и  $K(t,s)$  размерности  $n$ ,  $f(t)$  — известная, а  $x(t)$  — неизвестная  $n$ -мерные вектор-функции. Матрица  $A(t)$  удовлетворяет условиям

$$A(t) \neq \mathbb{O}, \quad \det A(t) = 0,$$

здесь  $\mathbb{O}$  — нулевая матрица.

Предполагается, что входные данные удовлетворяют условиям существования единственного непрерывного решения задачи (1), сформулированных в работе [1].

В статье [2] построены устойчивые неявные  $k$ -шаговые методы для численного решения задачи (1), представлены матрицы весов для  $k = 2, 3$  и приведены результаты численных расчетов модельных примеров, подтверждающие, что порядок точности методов равен  $k$ . Там же указано, что устойчивость методов при  $k > 3$  требует тщательного анализа.

Автором доклада с помощью метода неопределенных коэффициентов в явном виде были получены веса для численных методов при  $k = 1, 4, 5$ . С помощью критерия Рауса — Гурвица было установлено, что при  $k = 4, k = 5$  среди корней характеристических уравнений встречаются значения превышающие единицу по модулю, что означает неустойчивость четырех и пятишаговых методов. Устойчивые одношаговые алгоритмы были программно реализованы в математическом пакете Maple. Результаты расчетов модельных задач, подтверждающих первый порядок точности методов, будут представлены в докладе.

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Будникова О. С.*

#### Список литературы

- [1] Чистяков В. Ф. О сингулярных системах обыкновенных дифференциальных уравнениях и их интегральных аналогах // *Функции Ляпунова и их приложения*. Новосибирск: Наука, 1987. С. 231–239.
- [2] BULATOV M. V., HADIZADEN M., CHISTYAKOVA E. V. Construction of implicit multistep methods for solving integral algebraic equations // *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2019. Vol. 15. N. 3. P. 310–322.

#### 2.48. Семенова И.В., Корнеева А.А. Поле направленного низкочастотного излучателя в многослойной области

В работе представлены полученные авторами точное и приближенное решения краевой задачи, позволяющей моделировать поле направленного низкочастотного акустического излучателя в реальных средах.

Рассматривается точечный излучатель, описываемый мультипольной моделью [1], который находится в многослойной области, состоящей из однородных в горизонтальном направлении слоев  $\Omega_1 \dots \Omega_m \dots \Omega_{m+n}$ . Каждый слой имеет неидеальные границы  $\Sigma_i$  и  $\Sigma_{i+1}$ , а также характеризуется толщиной  $d_i$ , постоянной плотностью  $\rho_i$  и фазовой скоростью распространения волны  $c_i$ . Над слоем  $\Omega_{m+n}$  находится полупространство  $\Omega_{m+n+1}$ , а под слоем

$\Omega_1$  находится полупространство  $\Omega_0$ , оба полупространства являются однородными в горизонтальном направлении и характеризуются постоянными плотностью  $\rho_{m+n+1}$ ,  $\rho_0$  и фазовой скоростью распространения колебаний  $c_{m+n+1}$ ,  $c_0$ . Излучатель находится в точке  $r = 0$ ,  $z = z_1$ ,  $z_1 > 0$  слоя  $\Omega_m$  на расстоянии  $z_0$  от его верхней границы.

Получено следующее соотношение, позволяющее приближенно рассчитывать поле рассматриваемого излучателя в области  $\Omega_m$ :

$$\psi(r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \frac{C_{nm}}{kr} e^{i(m\phi+kr)} (-i)^{n+1} \left( \left( 1 + \frac{a}{\sin \theta} \right) \left( (F_n(\theta))^* - \frac{i(F_n(\theta))^*}{8kr(\sin \theta)^2} - \frac{i((F_n(\theta))^*)'}{2kr} \right) - \left( 1 - \frac{a}{\sin \theta} \right) \left( \frac{i((F_n(\theta))^*)'}{2kr \tan \theta} - \frac{i((F_n(\theta))^*)}{2kr(\sin \theta)^2} \right) \right),$$

где:

$$(F_n(\theta))^* = P_n^{|m|}(\cos \theta) F_n(\beta_j),$$

$$F_n(\beta_j) = \frac{1 + \chi_{nm} e^{2b(d_n - z_0)} V_n + \chi_{nm} e^{2b(z_j - z_j)} V_{n+1}}{1 - V_n V_{n+1} e^{2bd_n}} + \frac{e^{2bd_n} V_n V_{n+1}}{1 - V_n V_{n+1} e^{2bd_n}}.$$

Также получены необходимые для вычисления поля соотношения для коэффициентов отражения от границ слоя:

$$V_m(\beta_m) = \frac{Z^{(i)} - Z_m}{Z^{(i)} + Z_m}, \quad V_{m+1}(\beta_m) = \frac{Z^{(j)} - Z_m}{Z^{(j)} + Z_m},$$

$$Z^i = \frac{(Z^{i-1} + Z_i) e^{-2ik_{iz} z_{i+1}} + (Z^{i-1} - Z_i) e^{-2ik_{iz} z_i}}{(Z^{i-1} + Z_i) e^{-2ik_{iz} z_{i+1}} - (Z^{i-1} - Z_i) e^{-2ik_{iz} z_i}} Z_i,$$

где  $1 \leq i \leq m - 1$ ,

$$Z^0 = Z_0 = \frac{\rho_0 c_0}{\cos \beta_0},$$

$$Z^{m+n+1} = Z_{m+n+1} = \frac{\rho_{m+n+1} c_{m+n+1}}{\cos \beta_{m+n+1}},$$

$$Z^j = \frac{(Z^{j+1} + Z_j) e^{-2ik_{jz} z_{j+1}} + (Z^{j+1} - Z_j) e^{-2ik_{jz} z_j}}{(Z^{j+1} + Z_j) e^{-2ik_{jz} z_{j+1}} - (Z^{j+1} - Z_j) e^{-2ik_{jz} z_j}},$$

где  $m \leq j \leq m + n$ ,

$$k_{jz} = k_j \cos \beta_j, \quad k_j = \frac{\omega_j}{c_j}, \quad k_j \sin \beta_j = k_{j+1},$$

$$\sin \beta_i = k_{i-1} \sin \beta_i - 1,$$

$$z_i = - \sum_{q=i}^{m+1} d_q + z_0, \quad z_j = \sum_{q=m+2}^{j-1} d_q + z_0.$$

Проведена серия вычислительных экспериментов, в ходе которых был проведен анализ эффективности полученных соотношений.

#### Список литературы

- [1] СТЕПАНОВ А. Н. Мультипольная модель гидроакустических источников / Самара: Самарский университет, 2000. 212 с.



#### 2.49. Сибирякова Т.А. Исследование установившегося движения подводного тела в замороженном канале с линейно изменяющейся толщиной льда

Рассматривается трехмерная задача о распространении колебаний в ледовом покрове, вызванном движением подводного тела, движущегося с постоянной скоростью вдоль замороженного канала прямоугольного сечения. Лёд моделируется тонкой упругой пластиной с изменяющейся толщиной поперёк канала и постоянной толщиной вдоль канала. Края пластины приморожены к стенкам. Рассматривается случай линейного изменения толщины ледового покрова, симметричного относительно центральной линии канала. Жидкость под пластиной невязкая и несжимаемая. Течение жидкости, вызванное прогибами льда, является потенциальным. Задача решается в рамках линейной теории гидроупругости [1].

Движущееся подводное тело моделируется трехмерным диполем. Двигаясь в неограниченной жидкости с постоянной скоростью, диполь генерирует поток и давление, которые соответствуют жесткой сфере, движущейся с той же скоростью. Скорость диполя и его интенсивность связаны с радиусом сферы.

Потенциал скорости диполя, помещённого в прямоугольный канал с жёсткими стенками, определяется методом зеркальных отображений. Задача в изначальной постановке сформулирована с учетом нелинейных кинематического и динамического условий. Введением малых параметров проведен асимптотический анализ уравнений в безразмерной форме и определены случаи, когда линейная теория остается корректной. Рассмотрен случай такой скорости и интенсивности диполя, при котором движение диполя в канале моделирует движение сферы небольшого радиуса. Задача решается в системе координат, движущейся со сферой. Решение ищется с использованием преобразования Фурье вдоль пластины и введения нормальных мод колебаний упругой балки с переменной толщиной.

Найдены установившиеся прогибы ледового покрова и распределение относительных деформаций в ледовом покрове для некоторых характерных параметров задачи. Исследовано влияние разного положения диполя в сечении канала и параметра изменения толщины льда на характеристики гидроупругих волн в ледовом покрове. Получено, что деформации в ледовом покрове сильно зависят, от скорости диполя, его траектории, а также от параметра изменения толщины льда. Вычислены профили волн, создаваемых в канале, а также относительные удлинения в ледовом покрове при изменении его толщины и изменения скорости диполя. Также проведено сравнение с результатами для канала постоянной толщины [2].

*Работа выполнена в рамках госзадания 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] SQUIRE V., HOSKING R., KERR A., LANGHORNE P. Moving loads on ice plates / Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [2] SHISHMAREV K., КНАВАКНРАШЕВА Т., КОРОВКИН А. Ice response to an underwater body moving in a frozen channel // Applied Ocean Research. 2019. Vol. 91. Art. 101877.

#### 2.50. Симонов Е.В. Трехмерное моделирование непрерывной спиновой детонации смеси водород-воздух в плоскорадиальной камере сгорания

В [1] для смеси водород-воздух в плоскорадиальной камере сгорания (КС: внешний диаметр  $d_{c1} = 204$  мм, выходное отверстие  $d_{c2} = 100$  мм, расстояние между стенками  $\Delta = 15$  мм) впервые экспериментально реализована непрерывная спиновая детонация (НСД) при истечении продуктов к центру. Первые численные расчеты НСД в плоскорадиальных КС проведены в [2]. В работе [3] построена трехмерная модель и проведено численное моделирование НСД для смеси водород-воздух в кольцевой цилиндрической КС. Представляет интерес доработать указанную модель для возможности трехмерных расчетов в плоскорадиальных КС и провести численное моделирование НСД в плоскорадиальной КС с геометрическими размерами и параметрами в системе подачи, близкими к эксперименту [1]. В данной работе, на основе [3], в трехмерной нестационарной постановке сформулирована замкнутая математическая модель НСД смеси водород-воздух в плоскорадиальной КС с подачей горючей смеси через внешнюю стенку и истечением продуктов сгорания к центру. Задача решалась численно конечно-разностным методом, основанным на схеме Годунова, с использованием программного пакета Openfoam. Для КС с геометрическими параметрами ( $d_{c1} = 204$  мм,  $d_{c2} = 100$  мм,  $\Delta = 15$  мм) и параметрами в системе подачи смеси (давление торможения  $p^* = 40$  атм, суммарная площадь форсунок  $S^* = 0.02$  м<sup>2</sup>), соответствующими эксперименту, впервые численно получен устойчивый режим НСД с двумя поперечными детонационными волнами (ПДВ), высотой  $h \approx 2$  см, распространяющимися со скоростью  $D \approx 1.83$  км/с относительно внешней цилиндрической стенки КС. Уменьшением давления  $p^*$  показано, что полученное решение является физически допустимым, т.к. переходит от двухволнового режима к одноволновому в окрестности  $p^* = 30$  атм. Сравнение с экспериментами показыва-

ет соответствие по скорости и числу волн, отличие по высоте фронта.

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Ждан С. А.*

#### Список литературы

- [1] Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф. Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33. № 3. С. 120–131.
- [2] Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. и др. Детонационное сжигание смеси водород-кислород в плоскорадиальной камере с истечением к центру // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 4. С. 82–93.
- [3] RYBNIKOV A., SIMONOV E., GURIN A. ET AL. Three-dimensional numerical simulation of continuous spin detonation in hydrogen-oxygen and hydrogen-air mixtures using OpenFOAM package // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1404. Art. 012065.

#### 2.51. Скиба В. С. Зависимость силового воздействия волн на прибрежные сооружения от формы набегающей волны и особенностей акватории

Настоящая работа посвящена проблеме численного моделирования различных сценариев взаимодействия длинных поверхностных волн типа цунами с большими неподвижными частично погруженными в воду сооружениями. Задача решалась в рамках математической модели двумерных потенциальных течений идеальной жидкости со свободной границей [1]. Численный алгоритм основан на использовании подвижных неравномерных сеток, адаптирующихся к подвижной свободной границе и сгущающихся в окрестности неподвижного полупогруженного тела с вертикальными боковыми гранями и горизонтальным дном.

Исследовано влияние формы набегающих волн на значения максимальных заплесков и силовых нагрузок. Сравнения проводились на примере набегающих на тело уединенной волны, одиночной волны положительной полярности и N-волны с лидирующей волной повышения или понижения [2]. Показано, что при одинаковой крутизне переднего склона и одинаковой амплитуде набегающих волн наибольшее силовое воздействие оказывает N-волна с лидирующей волной понижения. Также в данной работе исследовано влияние гладкой неровности дна акватории на характеристики взаимодействия жидкости с телом. Показано, что с увеличением глубины донной траншеи уменьшаются как амплитуда отражённой волны, так и горизонтальная составляющая вектора силы, действующей на конструкцию.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-71-00127).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Хакимянов Г. С.*

#### Список литературы

- [1] KNAKIMZYANOV G. S., DUTYKH D. Long wave interaction with a partially immersed body. Part I: Mathematical models // Communications in Computational Physics. 2020. Vol. 27. N. 2. P. 321–378.
- [2] ГУСЕВ О. И., СКИБА В. С., ХАКИМЗЯНОВ Г. С. Силовое воздействие длинных поверхностных волн на полупогруженное в воду тело. I. Влияние формы набегающей волны. // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 4. С. 33–62.

#### 2.52. Скопецкий А. Г., Поляса В. А. Компьютерное моделирование динамики одномерных деформаций разномодульных материалов

Разномодульные материалы широко применяются в современном производстве, однако экспериментальные исследования их физико-механических свойств требуют больших затрат финансов и времени. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет заменить натурный эксперимент математическим и компьютерным моделированием.

Настоящая работа посвящена созданию программной системы, позволяющей получать обобщенные решения нестационарных краевых задач одномерного деформирования разномодульного полупространства в графической форме. Для моделирования механических свойств материала принято кусочно-линейное приближение соотношений разномодульной упругой среды [1]. Для получения полного решения краевой задачи строится кусочно-линейная аппроксимация изначально гладкой функции граничного перемещения и последовательно решаются связанные локальные подзадачи. Такой подход использовался в [2], где ключевыми параметрами являлись моменты времени — узлы кусочно-линейного краевого условия и вычисленные моменты времени взаимодействия волн деформаций. Наш вариант алгоритма, в отличие от предложенного в [2], фиксирует факты совпадения координат волновых фронтов в режиме реального времени, что позволяет получать анимированные графики динамических полей перемещений и деформаций во всей области деформирования.

Программная система состоит из пользовательского графического интерфейса и подсистемы симуляции. Пользователь вводит механические параметры материала (упругие модули и плотность), графически задает гладкую функцию граничных перемещений и устанавливает узловую точку ее кусочно-линейной аппроксимации. Заданные параметры передаются подсистеме симуляции, строящей решение задачи в форме анимированных графиков перемещений и деформаций с изображением движущихся волновых фронтов. В процессе симуляции пользователю предоставляется возможность управлять частотой кадров, останавливать процесс симуляции

и сохранять результаты в выбранный момент времени.

Достоверность результатов, получаемых описанной программной системой, подтверждается их совпадением с аналитическими решениями [2]. Дальнейшее развитие проекта заключается в реализации пользовательской компоненты для задания результатов столкновения волновых фронтов различных типов, что позволит расширить область применения нашей программной системы в рамках модели [1] на задачи с произвольными краевыми условиями (например, импульсным или циклическим воздействием).

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Дудко О. В.*

*Консультант — к.ф.-м.н. Лаптева А. А.*

#### Список литературы

- [1] Ляховский В. А., Мясников В. П. О поведении упругой среды с микронарушениями // Известия АН СССР. Физика Земли. 1984. № 10. С. 71–75.
- [2] Дудко О. В., Лаптева А. А., Рагозина В. Е. Нестационарные одномерные динамические задачи разномодульной упругости с кусочно-линейной аппроксимацией краевых условий // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 4. С. 5–15.

#### 2.53. Сметанников М.А. Декомпозиция и интегральные многообразия в задачах энзимной кинетики

В данной работе рассматривается пример кооперативного явления, субстрат в котором известен как суицидный субстрат, потому что он связывается с активным ферментом, как субстрат, но фермент превращает его в ингибитор, который необратимо инактивирует фермент. Таким образом, фермент «совершает самоубийство». Цель работы состоит в применении метода интегральных многообразий к редукции [1] системы [2] кинетики суицидного субстрата. Подробно изложенный алгоритм применения методов декомпозиции и интегральных многообразий описывается в работе [3], в данной работе приводятся результаты применения вышеуказанных методов к системам кинетики суицидного субстрата и сравнения решений исходной и конечной систем. Сравнения решений для четырех уравнений приводятся графически, графики созданы посредством программы Microsoft Excel.

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Соболев В.А.*

#### Список литературы

- [1] СОБОЛЕВ В. А., ЩЕПАКИНА Е. А. Редукция моделей и критические явления в макрокинетике / М.: Физматлит, 2010. 320 с.
- [2] MURRAY J. D. Mathematical biology: I. An introduction / N.Y.: Springer, 2001. 551 p.
- [3] ВОРОПАЕВА Н. В., СОБОЛЕВ В. А. Геометрическая декомпозиция сингулярно возмущенных систем / М.: Физматлит, 2009. 256 с.

#### 2.54. Сорокина А.А., Булавская А.А., Григорьева А.А., Милойчикова И.А. Методы численного моделирования для оценки возможности применения болусов для гамма-терапии, изготовленных с помощью трехмерной печати

В современной медицине с помощью методов Монте-Карло проводят планирование облучения пациентов при проведении сеансов лучевой терапии, в том числе с учетом применения различных дополнительных устройств: болусов, фантомов и т. д. Болус — это специальное устройство, которое изготавливается из тканеэквивалентных материалов и располагается на поверхности тела пациента. Такое устройство позволяет изменять распределение поглощенной дозы в облучаемом объеме [1].

Целью данного исследования является моделирование взаимодействия гамма-излучения с пластиковым болусом, изготовленным методом трехмерной печати. Численное моделирование проводилось в программном обеспечении PCLAB [2] методом Монте-Карло. Для достижения поставленной цели была построена модель ABS-пластика а также создан тестовый объект, имитирующий медицинский болус. В качестве источника излучения был выбран медицинский гамма-терапевтический аппарат Theratron Equinox 80 и создана модель его пучка.

Были получены поверхностные распределения гамма пучка в тестовом образце болуса с помощью расчета и в эксперименте. Полученные расчетные и экспериментальные данные совпали в пределах погрешностей. Таким образом, разработанная численная модель может в дальнейшем использоваться для разработки геометрии болуса в соответствии с клинической задачей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2021-271 (проект № МК-3481.2021.4).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Стучёров С. Г.*

#### Список литературы

- [1] КАПРИН А. Д. Терапевтическая радиология: национальное руководство / М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. 704 с.
- [2] БЕСПАЛОВ В. И. Компьютерная лаборатория (версия 9.6) / Томск: ТПУ, 2015. 115 с.

#### 2.55. Сотсков В.Е. Предсказание новых материалов с заданной кристаллической решёткой

Важным условием для развития технологических отраслей является наличие новых материалов. В связи с этим, в последние десятилетия стала активно развиваться такая область, как компьютерный дизайн материалов. Она включает в себя вычислительные методы, основанные на квантово-механических моделях межатомного взаимодей-

ствия. Такие методы позволяют предсказывать кристаллическую структуру новых материалов с высокой точностью и при этом не нуждаются в каких-либо эмпирических параметрах.

Однако, для предсказания кристаллической структуры необходимо перебрать все возможные пространственные расположения атомов на энергетическом ландшафте, что является невыполнимой задачей. На данный момент, различные эволюционные алгоритмы [1] применяются для решения упрощенных постановок этой задачи. Тем не менее, они не обладают достаточной эффективностью для предсказания многокомпонентных систем. Очевидно, разработка нового алгоритма, позволяющего эффективно предсказывать многокомпонентные структуры, является необходимой.

Был разработан алгоритм по предсказанию структур на фиксированной кристаллической решётке. Использование данного подхода существенно снижает вычислительную сложность задачи и, фактически, сводит её к поиску структур с наиболее стабильной стехиометрией при заданной решётке. Разработанный алгоритм основан на поэтапном построении кристаллической структуры с отбором наиболее низкоэнергетического варианта на каждом этапе. Кристаллическая структура представляется в виде совокупности групп атомов, именуемых кластерами. Для расчёта энергии структуры была использована модель кластерного разложения [2]:

$$E(\sigma) = \sum_i J_i \sigma_i + \sum_{ij} J_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_{ijk} J_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k + \dots,$$

где  $J$  — так называемый коэффициент взаимодействия кластера,  $\sigma_i$  — тип атома  $i$ , а  $\sum_i J_i \sigma_i$ ,  $\sum_{ij} J_{ij} \sigma_i \sigma_j$ ,  $\sum_{ijk} J_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k$  — энергетические вклады кластеров из одного, двух и трёх атомов соответственно. Для обучения данной модели была использована обучающая выборка из пар структура-энергия, рассчитанных с помощью теории функционала плотности с использованием программного пакета VASP [3]. В общей сложности понадобилось около 300 структур размером от 4 до 16 атомов для достижения приемлемой среднеквадратической ошибки обучения в 3 мЭв/атом. На данном этапе эффективность алгоритма была продемонстрирована на бинарных соединениях. Так, им были найдены все известные стабильные соединения сплава Nb-W с ОЦК решёткой, в частности, со структурами B2 и B32. Помимо этого, были обнаружены новые сплавы Nb<sub>2</sub>W<sub>3</sub> и Nb<sub>2</sub>W<sub>5</sub>. Также были получены все известные стабильные соединения сплава Ni-Pt с ОЦТ решёткой. Полученные результаты демонстрируют способность алгоритма к поиску структур с большей эффективностью чем известные на данный мо-

мент методы, что подтверждает его теоретическую и прикладную значимость.

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Шанеев А.В.*

#### Список литературы

- [1] GLASS C. W., OGANOV A. R. Crystal structure prediction with evolutionary algorithms // IUCr Commission on Powder Diffraction Newsletter. 2007. Vol. 35. P. 9–12.
- [2] WU Q., HE B., SONG T. ET AL. Cluster expansion method and its application in computational materials science // Computational Materials Science. 2016. Vol. 125. P. 243–254.
- [3] KRESSE G., FURTHMULLER J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set science // Physical Review B. 1996. Vol. 54. P. 11169–11186.

#### 2.56. Спиридонова О.Н. Разностный метод решения одной задачи насыщенной фильтрационной консолидации с предельным градиентом

В работе предлагается и исследуется разностный метод решения начально-краевой задачи для системы уравнений следующего вида:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = f(x, t), \quad (x, t) \in Q_T, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( g \left( \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right| \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0, \quad (x, t) \in Q_T, \quad (2)$$

$$u(0, t) = 0, \quad t \in (0, T), \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(L, t) + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}(L, t) = 0, \quad t \in (0, T), \quad (4)$$

$$p(0, t) = p(L, t) = 0, \quad t \in (0, T), \quad (5)$$

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad p(x, 0) = p_0(x), \quad x \in (0, L), \quad (6)$$

где  $Q_T = (0, L) \times (0, T)$ . Задача (1)–(6) носит прикладной характер: соотношения (1)–(6) могут быть использованы для описания одномерного процесса фильтрационной консолидации с предельном градиентом [1]. При этом  $p$  определяет поровое давление,  $u$  — перемещение частиц скелета,  $f$  — плотность массовых сил. Функция  $g$ , задающая закон фильтрации, имеет следующий вид:

$$g(|\xi|) = \begin{cases} 0, & |\xi| \leq \xi_0, \\ 1, & |\xi| > \xi_0. \end{cases}$$

Рассматривается неявная по времени разностная схема. Аппроксимация пространственного оператора осуществляется с помощью метода сумматорных тождеств и существенно опирается на обобщенную постановку задачи. В этом случае полагается, что

$$u \in W_2^{(1)}(0, T; \overset{\circ}{V}), \quad p \in L_2(0, T; \overset{\circ}{V}_1),$$

$u(x, 0) = u_0(x), \quad p(x, 0) = p_0(x)$  п. в. при  $x \in (0, L)$

и для любых  $v \in W_2^{(1)}(0, T; \overset{\circ}{V})$ ,  $z \in L_2(0, T; \overset{\circ}{V}_1)$  имеет место равенство

$$\int_{\overline{Q}_T} \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} - p \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} z + g \left( \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right| \right) \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial x} \right\} dx dt = \int_{\overline{Q}_T} f(x, t) \frac{\partial v}{\partial t} dx dt.$$

Здесь  $\overline{Q}_T = [0, T] \times [0, L]$ ,  $\overset{\circ}{V}$  — замыкание гладких функций, равных нулю при  $x = 0$ , в норме пространства  $W_2^1(0, L)$ ,  $\overset{\circ}{V}_1$  — замыкание гладких функций, равных нулю на границе отрезка  $[0, L]$ , в норме того же пространства.

Доказана разрешимость и сходимость построенной разностной схемы. Следует отметить, что с математической точки зрения (1)–(6) представляет собой систему уравнений в частных производных относительно перемещений упругой среды и давления жидкости. Причем уравнение относительно давления — вырождающееся, с нелинейностью в пространственном операторе, порождающей негладкость решения. В связи с этим исследование сходимости проводится при минимальных условиях на гладкость исходных данных, оно основано на получении ряда априорных оценок, позволяющих, в дальнейшем, с помощью метода монотонности, установить сходимость кусочно-постоянных восполнений разностного решения к обобщенному решению рассматриваемой задачи.

*Научные руководители — д.ф.-м.н. Павлова М. Ф., к.ф.-м.н. Рунг Е. В.*

#### Список литературы

- [1] Кадыров Ф. М., Костерин А. В., Скворцов Э. В. Плоская задача фильтрационной консолидации для упругого полупространства с разрывными начальными условиями // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57. № 6 (60). С. 1–7.

#### 2.57. Стояновская О. П., Савватеева Т. А., Аношин С. А. Исследование скорости сходимости метода гидродинамика сглаженных частиц для системы одномерных уравнений газовой динамики

Метод гидродинамика сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) представляет собой лагранжевый бессеточный численный метод, который широко применяется в таких областях науки, как астрофизика (моделирование протопланетных дисков), химия (моделирование газофазных химических реакций) и других. Суть метода заключается в вычислении пространственных производных по нерегулярно расположенным в пространстве частицам — лагранжевым узлам с помощью специальной интерполирующей гладкой

финитной функции — ядра, в носитель которого попадает несколько соседних частиц. Это означает, что в методе SPH точность интерполирования функций и вычисления пространственных производных зависит от двух переменных — размера носителя ядра  $h$  (радиус сглаживания) и расстояния между модельными частицами  $\Delta x$ , а также вида ядра.

В работе проводится анализ сходимости метода SPH на системе одномерных уравнений газовой динамики. Для исследования сходимости используется дисперсионный анализ [1, 2] и вычислительные эксперименты. В качестве теста рассматривается начально-краевая задача о распространении акустических колебаний в изотермическом газе.

Дисперсионный анализ позволяет предположить, что гладкость используемого ядра совпадает с порядком аппроксимации по  $\Delta x$ . Для ядер, которые представляют собой полиномы Вендланда гладкости 2 и 4, экспериментально воспроизведен 2 и 4 порядок сходимости численного решения к аналитическому соответственно.

#### Список литературы

- [1] STOYANOVSKAYA O., LISITSA V., ANOSHIN S., MARKELOVA T. Dispersion analysis of Smoothed Particle Hydrodynamics to study convergence and numerical phenomena at coarse resolution // In: O. Gervasi, B. Murgante, E. M. T. Hendrix et al. (Eds.) Computational Science and Its Applications — ICCSA 2022. LNCS. Vol. 13375. Cham: Springer, 2022.
- [2] Стояновская О. П., Лисица В. В., Аношин С. А., и др. Скорость сходимости метода гидродинамика сглаженных частиц: дисперсионный анализ и численные результаты для одномерных уравнений газовой динамики (направлено в журнал).

#### 2.58. Тихвинский Д. В., Карпенко А. А., Чупахин А. П. Гемодинамика бифуркационной аневризмы абдоминального отдела аорты

Бифуркационная аневризма абдоминального отдела аорты является широко распространенным заболеванием сердечно-сосудистой системы: от 1.5% до 5% людей старше 65 лет имеют данную патологию [1]. Прогнозирование момента ее разрыва является важной задачей для современной сосудистой хирургии. При этом мало внимания уделяется сочетанным патологиям, которые, зачастую являются причинами тяжелых послеоперационных осложнений или летального исхода. Настоящая работа посвящена численному исследованию гемодинамики модельной геометрии для возможных локализаций аневризмы брюшной аорты на ее бифуркации.

По DICOM-изображениям реальных пациентов, проходивших лечение в НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина были восстановлены 30 геометрий аорты. Эти данные использовались для нахождения различных

геометрических характеристик аорты и ее аневризмы, а также для построения соответствующих им идеализированных конфигураций.

В пакете ANSYS было проведено численное моделирование течения крови по модельным конфигурациям аорты и ее аневризмы. В результате проведенного исследования оказалось, что реальное распределение диаметров, проксимального по отношению к аневризме, отдела аорты и подвздошных артерий отличается от предсказанного по закону Мюррея [2] с параметром  $\gamma = 3$ . Было найдено значение этого параметра для рассмотренной выборки пациентов. Рассмотрены как жесткая, так и гидроупругая постановки (данные об эластических свойствах сосудов взяты из [3]) численного моделирования и проведено сравнение с конфигурацией аорты без аневризмы.

В ходе анализа результатов численного 3D моделирования было обнаружено немонотонное поведение функции вязкой диссипации в конфигурации при радиусе аневризмы равной 3.7 см, что соответствует предельной наблюдаемой в клинике величине аневризмы (при таком размере показана немедленная операция). Показано, что в случае локализации аневризмы на бифуркации давление в аорте возрастает вверх по потоку. Причем, только в случае специальной геометрии: когда радиусы подвздошных артерий равны ( $r_1 = r_2$ ), а угол между ними составляет 60 градусов — имеет место линейная зависимость между величиной давления в аорте выше аневризмы и размером самой аневризмы: наклон прямой такой линейной регрессии находится в интервале  $a \in (0.003; 0.857)$ , а коэффициент детерминации  $R^2 \geq 0.75$ . Установлено, что площадь, ограниченная кривой диаграммы «давление — скорость» для значений скорости и давления вверх по потоку при наличии аневризмы падает по сравнению со здоровым случаем (сосудом без аневризмы). Результаты моделирования в жесткой и гидроупругой постановках качественно согласуются между собой.

Полученные результаты дают лучшее понимание связи геометрических параметров аневризмы с перестройкой гемодинамики в бифуркации аорты и ее влияния на сердечно-сосудистую систему вверх по потоку относительно аневризмы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-15-00091).*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Паршин Д. В.*

#### Список литературы

[1] WANHAINEN A., VERZINI F., VAN HERZEELE I. ET AL. European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2019 clinical practice guidelines on the management of abdominal aorto-iliac artery aneurysms // European Journal of Vascular and Endovascular Surgery. 2018. Vol. 10. N. 1. P. 26–46.

[2] ZHENG X., SHEN G., WANG C. ET AL. Bio-inspired Murray materials for mass transfer and activity // Nat. Commun. Vol. 8. Art. 14921.

[3] Липовка А. И., Карпенко А. А., Чупахин А. П., Паршин Д. В. Исследование прочностных свойств сосудов абдоминального отдела аорты: результаты экспериментов и перспективы // ПМТФ. 2022. № 2. С. 84–93.

#### 2.59. Трифонова Г.О. Решение нелинейного уравнения с младшим слагаемым при наличии точечного источника в правой части

В настоящей работе, продолжающей [1, 2], изучается нелинейное уравнение в присутствии младшего слагаемого. Рассматривается первая краевая задача для уравнения в ограниченной области  $\Omega \subset R^n$  с точечным источником:

$$-\operatorname{div} g(x, \nabla w(x)) + g_0(x)w = q \delta(x), \quad x \in \Omega, \quad (1)$$

$$w(x) = w_\gamma(x), \quad x \in \Gamma. \quad (2)$$

Здесь  $\Gamma$  — Липшиц-непрерывная граница  $\Omega$ , функция  $w_\gamma$  задана на границе и является следом функции из пространства Соболева  $W_2^{(1)}(\Omega)$ , функция  $g_0 : \Omega \rightarrow R^1$  почти всюду неотрицательна и ограничена:

$$0 \leq g_0(x) \leq \bar{g}_0.$$

Функция  $g = g(x, \lambda) : \Omega \times R^n \rightarrow R^n$  сильно монотонна, Липшиц — непрерывна по  $\lambda$  для всех  $x \in \Omega$ , измерима по  $x \in \Omega$  для каждого  $\lambda \in R^n$ . Существуют постоянная  $\alpha$ , удовлетворяющая неравенству  $\alpha > \alpha^* = (n - 2)/2$ , и симметричная, положительно определенная матрица  $G$  такие, что для всех  $x \in B_r(0) \subset \Omega$  и для каждого  $\lambda \in R^n$  выполняется неравенство  $|g(x, \lambda) - G\lambda| \leq c|x|^\alpha|\lambda| + C$ , где  $r, c, C > 0$  — положительные постоянные,  $B_r(y) = \{x \in R^n : |x - y| < r\}$ .

Решение задачи ищется в виде суммы двух функций  $w = w_0 + u$ , где функция  $u$  принадлежит пространству  $\dot{W}_2^{(1)}(\Omega)$ , а функция  $w_0$  из пространства  $W_1^{(1)}(\Omega)$  удовлетворяет задаче:

$$\int_{\Omega} (G\nabla w_0(x), \nabla \eta(x)) dx = q\eta(0) \quad \forall \eta \in C_0^\infty(\Omega),$$

$$w_0(x) = w_\gamma(x), \quad x \in \Gamma.$$

Для поиска функции  $u$  рассматривается следующий итерационный процесс:

$$\int_{\Omega} (\nabla(u^{(k+1)} - u^{(k)}), \nabla \eta) dx =$$

$$= -\tau \int_{\Omega} (g(x, \nabla u^{(k)} + \nabla w_0) - G\nabla w_0, \nabla \eta) +$$

$$+ g_0(x)(u^{(k)} + w_0)\eta dx.$$

Устанавливается сходимость итерационной последовательности в пространстве  $\dot{W}_2^{(1)}(\Omega)$  со скоростью геометрической прогрессии. Рассматриваемый

метод решения задачи (1), (2) доказывает существование и единственность этой задачи в пространстве  $W_1^{(1)}(\Omega)$ .

*Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).*

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

#### Список литературы

- [1] Задворнов О. А. Существование решения квазилинейной эллиптической краевой задачи при наличии точечных источников // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2010. Т. 1. № 152. С. 155–163.
- [2] Задворнов О. А., Трифонова Г. О. Итерационный метод решения нелинейной краевой задачи с точечным источником // Изв. ВУЗов. Матем. 2022. № 5. С. 74–79.

#### 2.60. Тужмакова Н.А., Харьков В.В., Тужмаков А.Л. Исследование конвективно-плёночного охлаждения криволинейной пластины

Задача повышения газодинамической эффективности газовых турбин является одной из важнейших при создании современных газотурбинных двигателей, поскольку они оказывают непосредственное влияние на удельный расход топлива. Проектирование современных турбин тесно связано с точностью и адекватностью результатов аналитического исследования её температурного состояния. Принятые в настоящее время расчетные методы определения температурного состояния деталей турбины отличаются значительной сложностью и недостаточной адекватностью получаемых результатов особенно для предельных значений температуры лопаток турбины. В работе решается актуальная проблема, направленная на моделирование и разработку расчетно-аналитической методики, обеспечивающей оптимизацию процессов конвективно-плёночного охлаждения турбинных лопаток. Представлена нестационарная модель течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа, позволяющая описать тепловые и скоростные поля, создаваемые основным горячим потоком воздуха, протекающим с внешней стороны криволинейной пластины, моделирующей лопатку, внутренним охлаждающим потоком воздуха и струёй, создающей охлаждающую пленку на защищаемой поверхности пластины. Движение газа описывается с помощью численного решения системы уравнений Навье—Стокса явным методом Мак-Кормака с расщеплением исходного оператора по пространственным направлениям и схемой нелинейной коррекции. Блочная конечно-разностная сетка построена методом Томпсона со сгущением узлов в пристеночной области. В качестве модели подсеточной турбулентности применяется алгебраическая модель Смагоринско-

го. Записана итерационная схема Зейделя для стационарного уравнения теплопроводности в обобщенных криволинейных координатах. Определены тепловые и скоростные поля по обе стороны от криволинейной пластины при различных углах вдува охлаждающего потока воздуха из цилиндрической щели. Температура поверхностей пластины найдена с применением скоростной и тепловой пристеночных функций.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00207.*

#### 2.61. Фокеева Н.О., Башимаков Р.А. Распределение дебита и давления в скважине с ГРП при переходных режимах работы

В наши дни в разработку привлекаются месторождения с низкопроницаемыми и неоднородными коллекторами, а также старые месторождения с трудноизвлекаемыми запасами. Метод гидравлического разрыва пласта (ГРП) является одним из самых популярных методов увеличения нефтеотдачи.

Большое количество результатов накопила теория ГРП за более 70 лет применения. Так, например, в работе [1] описание распределения давления в трещине сведено к одному интегродифференциальному уравнению и изучены вопросы об эволюции давления в окрестности трещины ГРП и динамике распределение давления в скважине и вертикальной трещине при поддержании постоянного расхода и постоянного давления на скважине. В случае низкопроницаемых пластов, жидкость в основном растекается по трещине, и из трещины перетекает в пласт.

Данный доклад посвящен переходному режиму работы скважины: случай изменения давления на скважине и случай изменения дебита скважины. Формулы, выведенные в работе, позволяют описывать связь между расходом жидкости на скважине и эволюцией давления в трещине и скважине при скачкообразных (ступенчатых) изменениях давления на скважине или скачкообразных изменениях расхода. Полученные в работе решения были изучены с точки зрения практики [2]. Изменение дебита и давления в течение года работы скважины — именно такие промысловые данные были предоставлены авторам. На основе известного дебита было отстроено давление и проанализировано в сравнении с известным промысловым. Динамика изменения кривых давлений рассчитанного и промыслового схожа, значения лежат в одном диапазоне, что приводит к выводу о применимости решений и подхода. Также результаты позволяют оценить проводимость трещины ГРП.

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

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Шагапов В. Ш.*

### Список литературы

- [1] НАГАЕВА З. М., ШАГАПОВ В. Ш. Об упругом режиме фильтрации в трещине, расположенной в нефтяном или газовом пласте // ПММ. 2017. Т. 81. № 3. С. 319–329.
- [2] БАШМАКОВ Р. А., ФОКЕЕВА Н. О., ШАГАПОВ В. Ш. Особенности фильтрации флюидов в коллекторах, подверженных гидроразрыву пласта, при переходных режимах работы скважины // ПМТФ. 2022. Т. 63. № 3. С. 117–127.

### 2.62. Цгоев Ч.А. Численное моделирование инфаркта миокарда

Инфаркт миокарда является наиболее опасным для жизни человека повреждением сердечной мышцы, которое протекает как сложный многостадийный и все еще слабо изученный процесс. Асептическое воспаление — это одна из основных стадий инфаркта, которая определяет тяжесть повреждения и будущий сценарий течения заболевания.

В работе представлены результаты цикла исследований, которые направлены на математическое моделирование биохимических процессов, сопровождающих гибель клеток миокарда во время острого инфаркта. Создана технологическая основа в виде алгоритмов численного решения прямых и обратных коэффициентных задач для нелинейных жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений типа реакция–диффузия, экономичной вычислительной технологии конструирования новых и модификации существующих математических моделей, а также комплекса компьютерных программ для решения этих задач [1]. Разработана иерархия новых математических моделей и выполнено численное исследование динамики гибели клеток сердечной мышцы при инфаркте миокарда во время острой фазы заболевания.

Особое внимание уделяется численному исследованию особенностей пространственно-временного развития воспалительной реакции при реализации сложных сценариев инфаркта миокарда. Продемонстрировано качественное и количественное согласие с экспериментальными данными [2]. Полученные в численных экспериментах данные согласуются с известными представлениями о том, что воспаление имеет механизмы саморазвития и является основной движущей силой патогенеза критических осложнений, в том числе таких, которые становятся главными причинами летальных исходов при инфаркте. Результаты численного анализа показывают, что использование полученной еще на ранней стадии инфаркта информации о формировании демаркационного «валика» в сочетании с удачно подобранной таргетной противовоспалительной терапией может существенно повысить шанс на более благоприятное течение и исход заболевания, а анализ лейкоцитарной формулы позволяет выявить общесистемные нарушения в работе иммунной системы,

которые могут осложнить воспалительный процесс.  
*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Воропаева О. Ф.*

### Список литературы

- [1] ВОРОПАЕВА О. Ф., ЦГОЕВ Ч. А. Численная модель динамики факторов воспаления в ядре инфаркта миокарда // Сибирский журнал индустриальной математики. 2019. Т. 22. № 2 (78). С. 13–26.
- [2] ВОРОПАЕВА О. Ф., ЦГОЕВ Ч. А., ШОКИН Ю. И. Численное моделирование воспалительной фазы инфаркта миокарда // Журнал прикладной механики и технической физики. 2021. Т. 62. № 3 (367). С. 105–117.

### 2.63. Чепеленкова В.Д. Моделирование одноосного нагружения упругого материала методом дискретных элементов

Моделирование поведения упругих сред при больших деформациях и смещениях, соответствующих наличию в материале нарушений сплошности (трещины, разломы), с помощью стандартных сеточных методов сопряжено с рядом сложностей, появляющихся в связи с основным предположением этого класса методов о непрерывности характеристик рассматриваемой среды.

Метод дискретных элементов использует представление моделируемого тела в виде совокупности отдельных частиц конечного размера, являющихся твердыми телами, связанными между собой системой пружин и взаимодействующими в рамках ньютоновской механики. Сравнительный анализ данных классов методов приведен в работе [1].

Одной из основных особенностей метода дискретных элементов является необходимость калибровки параметров отдельных частиц до соответствия с упругими характеристиками используемого материала в целом. В работе [2] рассмотрено влияние входных параметров на систему при моделировании свойств сыпучих сред.

В данной работе представлена программная реализация метода дискретных элементов с использованием технологии параллельных вычислений CUDA и проведена серия численных экспериментов по одноосному нагружению сгенерированных образцов для получения данных о таких характеристиках среды, как модуль Юнга и прочность тела на сжатие. По полученным результатам выявлены зависимости этих характеристик от варьируемых входных параметров. Данные зависимости в дальнейшем могут быть использованы при калибровке материала, имеющего заранее известные упругие характеристики.

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Лисица В. В.*

### Список литературы

- [1] GRAY G. G., MORGAN J. K., SANZ P. F. Overview of continuum and particle dynamics methods for mechanical modeling of contractional geologic



structures // Journal of Structural Geology. 2014. Vol. 59. P. 19–36.

- [2] YAN Z., WILKINSON S. K., STITT E. H., MARIGO M. Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis // Computational Particle Mechanics. 2015. Vol. 2. N. 3. P. 283–299.

**2.64. Чернова О.С., Булавская А.А., Григорьева А.А., Стучебров С.Г. Применение расчетных методов для исследования характера взаимодействия протонных пучков с различными материалами с целью создания дозиметрических фантомов**

На сегодняшний день существует несколько методов лечения онкологических заболеваний, в число которых входит лучевая терапия. Данный метод основывается на облучении пораженных тканей высокоэнергетическими частицами, под действием которых происходит их разрушение. Одним из эффективных методов является протонная лучевая терапия. В связи с особенностями взаимодействия протонов с веществом необходимым этапом эффективного лечения является планирование терапевтических процедур с помощью тканеэквивалентных дозиметрических фантомов [1].

В данной работе в инструментарии Geant4 с помощью метода Монте-Карло было проведено численное моделирование взаимодействия медицинских протонных пучков с пластиками, пригодными для методов трехмерной печати. В результате были получены кривые глубинного распределения поглощенной дозы в исследуемых пластиках и биологических тканях.

Также был проведен ряд экспериментальных исследований в медицинском радиологическом научном центре им. А.Ф. Цыба на медицинском протонном пучке. На основе полученных результатов была проведена оценка исследуемых изделий на эквивалентность биологическим тканям в отношении их взаимодействия с протонным медицинским пучком.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2022-620 (проект № МК-26.2022.1.2).*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Милойчикова И. А.*

**Список литературы**

- [1] JARLSKOG C. Z., LEE C., VOLCH W. E. ET AL. Assessment of organ-specific neutron equivalent doses in proton therapy using computational whole-body age-dependent voxel phantoms // Phys. Med. Biol. 2008. Vol. 53. N. 3. P. 693–717.

**2.65. Чуприков А.И. Моделирование температурного распределения графитового рассеивателя нейтронного излучения реактора ИРТ-Т**

Исследовательские реакторы — это ядерные реакторы, которые используются в различных сферах научных исследований, разработок и образования. На территории города Томск расположен реактор данного типа ИРТ-Т. Исследовательский реактор ИРТ-Т — это многофункциональная ядерная научная установка, на базе которой в наши дни проводят огромное количество научных исследований в различных областях: нейтронно-трансмутационное легирование, наработка медицинских и технических изотопов и нейтрон-захватная терапия.

На данный момент на исследовательском реакторе ИРТ-Т производятся исследования в области нейтрон-захватной терапии с использованием изотопа гадолиния Gd157, который является более экономически выгодным аналогом В10. И для оптимизации выходных характеристик пучка нейтронов принято решение добавить графитовый рассеиватель нейтронного излучения в горизонтальный экспериментальный канал ГЭК-1. Что создало необходимость создания верифицированной модели для рассеивателя нейтронного излучения.

В данной работе представлены экспериментальные и расчетные результаты моделирования в SOLIDWORKS и MCU теплофизических свойств графитового рассеивателя [1] нейтронного излучения с отсутствием внешнего источника охлаждения и для нескольких режимов работы системы охлаждения. А также проведена верификация полученной модели, для получения разрешения на установку моделируемого объекта на действующую ядерную установку.

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Наймушин А. Г.*

**Список литературы**

- [1] СТАНКУС С. В., САВЧЕНКО И. В., АГАЖАНОВ А. Ш. и др. Теплофизические свойства графита МПГ-6 // ТВТ. 2013. Т. 51. № 2. С. 205–209.

**2.66. Шульженко П.Д., Мешкова В.Д. Численное исследование формирования характерных ветровых зон при обтекании близкостоящих зданий разной высоты**

Обеспечение ветрового комфорта в пешеходной зоне вокруг жилых зданий является одной из приоритетных задач современного градостроения. Как правило, оценка ветрового комфорта осуществляется с помощью изучения аэродинамики течения в результате обтекания здания или групп зданий (микрорайонов). В связи с этим, цель научного исследования заключалась в изучении формирования ветровых зон в результате обтекания тандема зданий разной высоты.

Исследования осуществлялись с помощью метода вычислительной гидродинамики. Использовалась микромасштабная численная модель атмосферы городской среды, основанная на нестационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнениях Навье — Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью, которая включает в себя уравнения неразрывности, движения и сохранения энергии. В качестве базовой модели турбулентности используется двухпараметрическая  $k$ - $\epsilon$  SST. Рассматриваемая микромасштабная численная модель была реализована на базе программного комплекса SigmaFlow [1].

Для расчета использовалась модель, имитирующая два здания разной высоты в реальных масштабах: высотное ( $2H \times L \times B$ ) и малоэтажное здание ( $H \times L \times B$ ), где  $H = L = B = 50$  м. Скорость потока ветра задавалась равной 5 м/с.

В ходе исследования были получены картины течения ветрового потока в разных сечениях. Определены области формирования характерных ветровых зон и численные значения скоростей ветра в них. Также было выполнено сопоставление размеров площадей рассматриваемых ветровых зон, полученных в результате численного исследования, с расчетными значениями, полученных на основе данных нормативных документов [2]. Анализируя результаты было выявлено, что значения, вычисленные по нормативным оценкам, превышают значения численных исследований на 17%. Это свидетельствует о том, что используемый численный подход может стать качественным альтернативным методом, позволяющий обосновать технические решения при строительстве жилых микрорайонов.

*Научный руководитель — к.т.н. Дектерев А. А.*

#### Список литературы

- [1] FILIMONOV S. A., MESHKOVA V. D., DEKTEREV A. A. ET AL. Analysis of vortex structures formed in the winter in the atmosphere of Krasnoyarsk city // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2088. Art. 012014.
- [2] Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки / М.: Стройиздат, 1986. 59 с.

#### 2.67. Яковлев Г.А. Моделирование в Geant4 гамма-постоянной радионуклидов — продуктов распада радона и торона

Увеличение радиационного гамма-фона в виде всплесков разной формы и длительности в периоды выпадения атмосферных осадков регистрируется практически в любых уголках земного шара. Основной задачей при радиационном мониторинге является точная идентификация природы возникновения зарегистрированных всплесков. Решение этой задачи не может обойтись без моделирования гамма-фона и сопоставления с измеренными данными.

При атмосферных осадках происходит вымывание радиоактивных аэрозолей, основную долю которых составляют короткоживущие дочерние продукты распада радона и торона. В основном считают, что  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$  вносят наибольший вклад в суммарный гамма- и бета-фон приземной атмосферы, поскольку их активность в атмосфере почти на два порядка больше, чем активность короткоживущих дочерних продуктов торона. Однако, существуют территории, где содержание  $^{232}\text{Th}$  в почве или строительных конструкциях жилых или общественных зданий довольно большое. Это может приводить к сильному повышению активности продуктов распада торона в атмосфере.

Если в подоблачном пространстве будет содержаться много продуктов распада торона, то необходимо оценить вклады каждого осаждаемого дождем на земную поверхность радионуклида в суммарную мощность дозы гамма-излучения. Возможно, это поможет лучше понять роль продуктов распада торона в формировании радиационного фона приземной атмосферы в периоды выпадения осадков и после вплоть до их полного радиоактивного распада, а также выявить новые закономерности в динамике радиационного фона в регионах с потенциально повышенным содержанием тория-232 в грунте.

В работе описаны результаты моделирования коэффициента перехода от осаждаемой дождями единичной активности гамма-излучающих дочерних продуктов распада радона и торона к создаваемой ими мощности дозы гамма-излучения в зависимости высоты над земной поверхностью с использованием инструментария Geant4. В качестве источника рассмотрены тонкие слои воды, грунта и воздуха, представленные в виде тонкого 0.1-10 мм слоя для того, чтобы изучить влияет ли состав среды источника излучения на результат моделирования. Промоделированы случаи с различной плотностью поглотителя-атмосферы. Определен вклад каждого радионуклида  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Tl}$  в суммарный гамма-фон. Численно исследована зависимость роста мощности дозы в период осадков от положения детектора по отношению к области покрытия территории осадками. Полученные коэффициенты пересчета могут быть использованы для решения как прямых задач по восстановлению радиационного фона во время осадков, так и обратных задач по определению интенсивности и количества осадков по известному гамма-фону. Показано как дочерние продукты распада торона могут изменять форму отклика гамма-фона на атмосферные осадки.

### 3. Информационно-вычислительные технологии

#### 3.1. Али М. Dual-hop RF and underwater visible light communication

A dual-hop radio frequency (RF) and visible light communication (VLC) has become a significant alternative approach for underwater wireless communication towards the advanced next-generation 5G or 5G beyond (5GB) networks [1]. Nevertheless, the bottleneck exist due to distinctive turbulence channel impairments along with alignment of the transceivers. Therefore, the necessity to deploy a high reliability communication setup in boisterous channels for improving the system capacity along with the performance outcomes. The proposed system model is contained a terrestrial based source ( $s$ ) which broadcasts the RF signals towards to a decode-and-forward (DF) relay ( $r$ ) protocol and simultaneously received the feedback of the relay in downlink mode. However, the DF relay transmits the received signals from the source to the underwater-based autonomous underwater vehicle (AUV) ( $d$ ) through an optical beam under line of sight (LOS) conditions. In this study the  $s - r$  link is modelled by Nakagami- $m$  fading distribution under BPSK modulation scheme. Nonetheless, the  $r - d$  (underwater VLC) hop is designed by following Gamma-Gamma (GG) distribution fading under heterodyne detection and intensity modulation/direct detection (IM/DD) technique in consideration of pointing errors between transceivers and moderate-to-strong turbulence conditions [2]. In particular, the cumulative density function (CDF) and probability density function (PDF) are used to derive the closed-form expressions and to obtain the end-to-end (E2E) performance analysis of the proposed system model in term of Extended Bivariate Generalized G-Meijer Function (EBGMF) [3]. Additionally, the performance metrics such as bit-error-rate (BER), outage probability, the system capacity performance of the system are analytically derived and verified by the Monte-Carlo simulation approach. The E2E performance metrics are obtained based on the experimental data, which has been taken in Southern Indian Ocean (SIO) on varying vertical depth of AUV. Moreover, this study emphasize the importance effectiveness of varying physio-chemical properties of water such as temperature, pressure, salinity, dynamic viscosity, and density etc., on the real-time data monitoring of E2E performances of the proposed system model. Finally, the simulation results are obtained to depict the received E2E SNR of the proposed hybrid dual-hop UVLC system model.

*This research was funded by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal under Grant No UIDB/04111/2020(COPELABS).*

*Научный руководитель — Ph.D. Душанта Налин Кумар Джаяджи.*

#### Список литературы

- [1] WU S., WANG H., YOUN C.-H. Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications // IEEE Network. 2014. Vol. 28. N. 6. P. 41–45.
- [2] ELAMASSIE M., SAIT S. M., UYSAL M. Underwater visible light communications in cascaded gamma-gamma turbulence // Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2018. P. 1–6.
- [3] «Wolfram Functions». [Electronic resource]. URL: <https://functions.wolfram.com> (accessed 25.08.2022).

#### 3.2. Афанасенков А.А. Применение инструментов параллельного программирования для решения задач гетерогенной детонации

Для решения современных задач моделирования физических процессов потребность вычислительных мощностей становится все выше. Большинство стандартных инструментов не позволяют полностью реализовать мощности вычислительных машин. Чтобы это исправить, разработаны специальные библиотеки, в частности, реализующие параллельные вычисления. Данная работа посвящена исследованию и оценке методов параллельного программирования для решения задач динамики газозвесей с ударными волнами, горением и детонацией. Метод опробован на задаче взаимодействия развитой ячеистой детонации газозвеси частиц алюминия с облаками инертных частиц.

Основные уравнения физико-математической модели вытекают из законов сохранения массы, импульса и энергии для газа и частиц, дополняются уравнениями состояния и замыкаются уравнениями скоростной релаксации и теплообмена между газом и каждой из компонент дискретной фазы с учетом сверхзвукового обтекания частиц [1].

Для решения задачи использовались TVD схема Хартена—Лакса 2-го порядка аппроксимации для расчета газовой фазы и схема Джентри—Мартина—Дейли для дискретной. Обе схемы содержат большое количество логических операций. Для распараллеливания расчетов использовалась библиотека OpenMP [2].

Проведен сравнительный анализ затраченного времени при использовании стандартных инструментов компиляции и с использованием библиотеки OpenMP для различного числа потоков. Установлено, что с использованием библиотеки OMP на 8 потоках время расчетов для сетки с шагом 0.1 мм сократилось примерно в 4.5 раза, а при 0.2 мм — в 3.4 раза. Также получена нелинейная зависимость между временем расчета и количеством используемых потоков. Установлено, что время расчета задачи меняется линейно и не выходит на режим насыщения до 4 потоков, поэтому их использование

на 8-ядерном процессоре является наиболее эффективным. Также установлено, что эффективность параллельного программирования выше при использовании более мелкой сетки.

Использование параллельного программирования позволило провести ряд параметрических 1D- и 2D-расчетов задачи о взаимодействии волны гетерогенной детонации в газозвеси алюминия в кислороде с облаком инертных частиц оксида алюминия. Размер частиц алюминия 1 мкм и 200 нм, оксида алюминия 1 мкм, концентрация горючих и инертных частиц варьировалась. Получены карты режимов (распространение детонации, ослабление детонации, срыв детонации). Определены критические условия подавления детонации, которые оказались различными в 1D- и 2D-расчетах. Это объясняется наличием двумерных неоднородностей, влияющих на ре-иницирование детонации, что указывает на необходимость 2D-моделирования аналогичных процессов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-08-00295).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Хмель Т. А.*

#### Список литературы

- [1] LAVRUK S. A., FEDOROV A. V., КНМЕЛ Т. А. Cellular detonation propagation and degeneration in bi-disperse gas suspensions of micron- and nanosized aluminum particles // Shock Waves. 2020. Vol. 30. N. 3. P. 273–286.
- [2] Антонов А. С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP / М.: Издательство Московского университета, 2009. 77 с.

### 3.3. Егоров Н.М., Пономаренко В.И., Сысоев И.В., Сысоева М.В. Воплощение нейронной синаптической связи с регулируемой задержкой на основе аналоговой схемотехники

За последние годы появилось множество исследований, направленных на изучение работы биологических нейронных сетей. В мозгу человека могут присутствовать десятки миллиардов нейронов, которые соединены большим числом синапсов. Популярным методом исследования в различных областях, в том числе и при изучении работы мозга, является моделирование. Осуществить моделирование столь огромного числа нейронов в настоящий момент не представляется осуществимым, поэтому приходится идти на ряд уступок и упрощений. Предложено большое количество моделей биологических нейронов, которые с той или иной точностью описывают свойства реальных нейронов. Очевидно, что для исследования качеств и характеристик одиночных нейронов не требуется моделирование всего мозга, так для рассмотрения связи между нейронами, достаточно смоделировать два нейрона и синапс между ними. Задачей данной работы является разработка и имитационное моделирование си-

наптической связи между нейронами, а также анализ возбудимости нейронов в зависимости от параметров связи.

В качестве модели нейрона выбрана модель ФитцХью—Нагумо [1], для которой ранее уже была представлена радиотехническая реализация [2]. Функция связи, между нейронами описывается гиперболическим тангенсом со сдвигом с задержкой. Воплощение данной связи можно разделить на два функциональных блока, которые отвечают за ограничение сигнала гиперболическим тангенсом и задержку сигнала. В литературе встречаются работы, описывающие схемотехническое решение, для воспроизведения функции гиперболического тангенса [3]. В качестве блока задержки используется фильтр низких частот Бесселя второго порядка с заменой постоянных сопротивлений на переменные. Имитационное моделирование проводилось на базе программного обеспечения для моделирования электрических цепей NI Multisim. В результате было обнаружено, что осцилляторы ФитцХью—Нагумо обладают некоторой задержкой отклика на внешнее воздействие, которая зависит от силы связи.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-72-10030).*

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Сысоева М. В.*

#### Список литературы

- [1] FITZHUGH R. Mathematical models of threshold phenomena in the nerve membrane // Bull. Math. Biophysics. 1955. Vol. 17. P. 257–278.
- [2] EGOROV N. M., PONOMARENKO V. I., SYSOEV I. V. ET AL. Simulation of epileptiform activity using network of neuron-like radio technical oscillators // Technical Physics. 2021. Vol. 66. N 3. P. 505–514.
- [3] LI H., YANG Y., LI W. ET AL. Extremely rich dynamics in a memristor-based chaotic system // Eur. Phys. J. Plus. 2020. Vol. 135. N. 7. P. 579.

### 3.4. Ефимов Е.А. Параллельная реализация бездиссипативной схемы в задаче распространения волн в цилиндрическом вязкоупругом теле

Задача динамики вязкоупругой среды в осесимметричной постановке может рассматриваться, например, при моделировании сейсмических волн в средах с плоскостной структурой. При исследовании волновых полей, генерируемых импульсным сейсмоисточником, возникла потребность в корректной оценке сейсмического КПД. Однако применяемая разностная схема предиктор-корректор, основанная на методе распада разрыва Годунова, обладает искусственной диссипацией, учесть которую в расчётах затруднительно. В связи с этим было предложено воспользоваться бездиссипативной неявной схемой, на шаге предиктор которой возникает трёхдиагональная система уравнений [1].

В работе рассматриваются два различных способа реализации метода двуциклического расщепления по пространственным переменным. В одном случае одномерные задачи решаются при использовании схемы Годунова с ENO реконструкцией инвариантов Римана, в другом случае для плоских и цилиндрических волн применяется бездиссипативная схема. При реализации второго алгоритма возникают трудности, связанные с распараллеливанием метода прогонки. Предлагается способ, в котором обмен значений на стыках процессоров осуществляется по схеме Годунова, а затем по полученным приближениям в параллельном режиме идёт расчёт методом прогонки, после чего происходит итерационный пересчёт значений на стыках процессоров [2].

*Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (соглашение 075-02-2022-873).*

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Садовский В. М.*

#### Список литературы

- [1] Иванов Г. В., Волчков Ю. М., Богулский И. О., Анисимов С. А., Кургузов В. Д. Численное решение динамических задач упругопластического деформирования твердых тел / Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2002. 352 с.
- [2] Садовский В. М., Садовская О. В., Ефимов Е. А. Одномерные разностные схемы для реализации метода расщепления осесимметричных уравнений динамики упругой среды // Вычислительные методы и программирование. 2021. Т. 22. № 1. С. 47–66.

### 3.5. Колганова А. О. Параллельная реализация новой модификации алгоритма Барнса — Хата для расчета парных взаимодействий частиц на плоскости

Прямой алгоритм расчета парных взаимодействий частиц имеет квадратичную вычислительную сложность, что ограничивает его использование задачами, в которых число частиц не превышает десятков тысяч. От современных лагранжевых методов требуется весьма высокое разрешение, для этого число частиц должно иметь порядок миллионов.

«Экстенсивный» путь решения проблемы — применение технологий параллельных вычислений, однако проблему квадратичной сложности такой подход не решает. Решением проблемы является применение приближенных быстрых алгоритмов, имеющих квазилинейную вычислительную сложность  $O(N \log^\alpha N)$ ,  $\alpha \geq 0$ . Наиболее известны методы Барнса — Хата и быстрый метод мультиполей.

В работе представлена параллельная реализация «гибридной» модификации, в основе которой — обход дерева по аналогии с методом Барнса — Хата и построение достаточно «длинных» мультиполейных и локальных разложений функции влияния.

Расчет производится для точечных вихревых частиц; подобная задача возникает в вихревых методах вычислительной гидродинамики при моделировании плоских течений.

Последовательная реализация алгоритма не вызывает затруднений, однако создание параллельной версии, эффективно работающей на десятках вычислительных ядер (рассматриваются машины с общей памятью) наталкивается на проблему масштабируемости рекурсивных алгоритмов построения дерева. Данная проблема решена путем генерации  $k$ -d дерева на основе фрактальной кривой Мортонна [1]. Результирующее дерево не является адаптивным, но данный недостаток лишь незначительно снижает производительность всего алгоритма, в то время как процедура построения становится мало затратной и хорошо распараллеливаемой.

Для набора из  $N = 2 \cdot 10^6$  вихревых частиц в последовательном режиме при расчете на двухпроцессорном сервере (2 Intel Xeon Gold 6524) при обеспечении относительной погрешности  $\varepsilon = 10^{-5}$  время построения дерева (ТВК) составляет 0.82 с, время расчета мультиполейных моментов (SKK) — 1.31 с, время вычисления скоростей частиц (FCK) — 5.44 с.

Ниже показано, во сколько раз ускоряются все части алгоритма при проведении того же расчета на 4, 16 и 32 ядрах:

Число ядер	ТВК	SKK	FCK
4	3.28	3.74	3.68
16	9.88	14.6	14.6
32	12.1	27.3	28.9

Построение дерева масштабируется хуже остальных операций, но является наименее трудоемкой частью последовательного алгоритма.

Ниже дано сравнение времени решения той же задачи в миллисекундах в зависимости от обеспечиваемой точности при помощи вышеописанного кода (OpenMP) и разработанной на основе кода [2] модификации гибридного алгоритма для графических ускорителей (CUDA, расчет произведен на GPU Nvidia Tesla V100).

Погрешность	OpenMP	CUDA
$10^{-3}$	211	26
$10^{-5}$	306	51
$10^{-7}$	439	90

Эффективность расчетов на GPU снижается с увеличением обеспечиваемой точности.

Реализованные алгоритмы позволяют значительно повысить эффективность выполнения расчетов методами частиц, в частности, вихревыми методами. Исходный код разработанных алгоритмов доступен в репозитории <https://github.com/vortexmethods/fastm>.

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Марчевский И. К.*

### Список литературы

- [1] KARRAS T. Maximizing parallelism in the construction of BVHs, octrees, and  $k$ -d trees // Proc. Intern. Conf. «Eurographics / ACM SIGGRAPH Symposium on High Performance Graphics». The Eurographics Association, 2012. P. 33–37.
- [2] BURTSCHER M., PINGALI K. An efficient CUDA implementation of the tree-based Barnes Hut  $n$ -body algorithm // GPU Computing Gems Emerald Edition. 2011. Ch. 6. P. 75–92.

### 3.6. Коробова И.А. Анализ структуры течения и оценка эффективности сжатия данных методом POD в двумерных вихревых методах

При решении задач вычислительной механики сплошной среды в нестационарной постановке даже сравнительно редкое сохранение результатов расчетов (раз в сотни или тысячи шагов) с целью последующей их обработки и анализа приводит к необходимости хранения больших объемов данных. Оценка по порядку величины, исходя из сетки, содержащей порядка  $10^5$  узлов, в каждом из которых хранится 3-5 неизвестных скалярных величин, дает размер около 1,5 Мб для одного «кадра», считая, что данные сохраняются с одинарной точностью. Таких «кадров» может храниться до нескольких тысяч, что приводит к суммарным затратам в несколько гигабайт дискового пространства.

Для сжатия данных могут быть использованы такие алгоритмы, как «Proper Orthogonal Decomposition» (POD, он же метод главных компонент, или Principal Component Analysis) [1] и «Dynamic Mode Decomposition». Их суть — в представлении физических полей в узлах сетки в виде комбинации некоторых пространственных мод с коэффициентами, зависящими от времени. При этом, к примеру, в POD моды ранжированы по энергетической емкости, и удержание в приближенном представлении решения сравнительно малого их числа — не более 2-3 десятков — позволяет достаточно точно восстанавливать поля (с погрешностью порядка одного или долей процента; большая точность требует хранения и учета существенно большего числа мод), причем при необходимости — как непрерывные функции времени в каждом узле сетки, интерполируя временные коэффициенты. При этом для их хранения требуется лишь несколько десятков мегабайт дискового пространства.

Помимо сокращения в десятки раз объема хранимых данных, анализ указанных пространственных мод позволяет выявить особенности структуры течения. В выполненных вычислительных экспериментах основной расчет моделирования обтекания профилей производился в двумерной постановке с использованием лагранжевых вихревых методов; в низших POD-модах для полей скоростей и давления отчетливо проявляются крупные вих-

ревые структуры; в высших — значительно менее энергоемких — мелкие вихри. Анализ крупных вихревых структур позволил, в частности, объяснить наблюдаемую в экспериментах «ступенчатую» зависимость частоты пульсации гидродинамических сил, действующих на обтекаемую прямоугольную пластинку, от ее удлинения [2].

В работе предпринята попытка оценить эффективность сжатия данных при помощи технологии POD в сравнении с теоретически возможным пределом, оцениваемым по величине (условной) информационной энтропии с учетом того, что сжатие происходит с потерями. Полученные оценки подтверждают высокую эффективность алгоритма POD.

*Научный руководитель — д.ф.-м.н. Марчевский И. К.*

### Список литературы

- [1] LUMLEY J.L. The structure of inhomogeneous turbulent flows // In: A.M. Yaglom, V.I. Tatarsky (Eds.) Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation. Moscow, 1967. P. 166–178.
- [2] KUZMINA K., MARCHEVSKY I., SOLDATOVA I., IZMAILOVA Y. On the scope of Lagrangian vortex methods for two-dimensional flow simulations and the POD technique application for data storing and analyzing // Entropy. 2021. Vol. 23. Art. 118.

## 4. Информационные технологии

### 4.1. Апарин А.А. Определение оптимальности управленческой реакции на складывающуюся обстановку на пожаре при ведении оперативного видеомониторинга

Вопросы, связанные с использованием систем видеомониторинга (стационарных камер видеонаблюдения, установленных в городской среде) для информационной поддержки принятия управленческих решений при управлении сосредоточением пожарно-спасательных подразделений к месту вызова, стали рассматриваться с научной точки зрения совсем недавно [1]. Особо важны в данном направлении аспекты проблемы управления, связанные с математическим моделированием и прогнозированием обстановки на месте пожара по поступающим видеоданным. Получение подобных данных в момент времени, минимально удаленный от момента принятия вызова диспетчером дежурно-диспетчерской службы, может позволить скорректировать процесс вызова дополнительных подразделений на пожар оптимальным образом. Соответственно, для получения множества управленческих альтернатив (и дальнейшего анализа) требуется разработка математических моделей и алгоритмов, что стоит выделить как одну из центральных задач данной проблематики.

Автором выдвинута рабочая гипотеза о том, что теоретически могут существовать группы факторов (индикаторов), по-разному влияющих на оценку развивающегося деструктивного события, при работе оператора с системами видеомониторинга. Разработана математическая модель, позволяющая выдвинуть прогноз (в период до прибытия лиц, осуществляющих руководство пожаротушением, на место вызова) о возможной нехватке выехавших отделений на автоцистернах. На базе математической модели создана программа для ЭВМ [2].

Рассмотрен вопрос о том, какие альтернативные варианты для конкретной ситуации могут существовать и какие войдут в множество оптимальных управленческих решений. Для этого разработаны алгоритм многокритериального анализа предполагаемого управления и модель формирования очередности вызова дополнительных подразделений пожарной охраны, в зависимости от необходимого времени следования к месту пожара. Результатом работы модели является построения множества альтернативных вариантов, характеризующихся векторными оценками. Алгоритм и модель реализованы в виде программы для ЭВМ, написанной на языке Python 3.

Учитывая специфику темы, наилучшая векторная оценка не всегда может означать лучший вариант, поэтому был разработан верификационный механизм, основанный на определении значений тригонометрических функций для повторной проверки

«оптимальных вариантов» по векторным оценкам на принадлежность задаваемому диапазону значений.

Таким образом, для развития основ теории применения видеоданных для информационной поддержки лиц, принимающих решения на этапах до прибытия первых подразделений к месту вызова, были разработаны модели и алгоритмы, формализованные в виде программ, которые способны выполнить прогноз и помочь оператору видеомониторинга проверить принимаемое решение на оптимальность. В будущем планируется апробация данных моделей и проверка их на адекватность.

#### Список литературы

- [1] ТАРАКАНОВ Д. В., СЕМЕНОВ А. О., АПАРИН А. А. Модели мониторинга пожаров на открытых территориях / Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. С. 103.
- [2] АПАРИН А. А., ТАРАКАНОВ Д. В., СЕМЕНОВ А. О. Программа для аналитического обеспечения мониторинга техногенного пожара на основе информации со стационарных систем видеонаблюдения (свидетельство № 2022660075) / М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2022.

### 4.2. Бажиров В.А. Анализ и обучение моделей интерпретации показаний электрохимических датчиков с зашумленными данными

В докладе представлена модель машинного обучения с использованием временных рядов и ансамблевых методов применительно к анализу показаний электрохимических датчиков, которые чувствительны ко многим факторам окружающей среды. Предлагаемый подход включает в себя две идеи:

1. Использование взвешенных предшествующих показаний датчика при расчете концентрации газов.
2. Кластеризация обучающей выборки и последующее обучение слабых учеников на каждой её части.

Предложена методология сравнения моделей машинного обучения для интерпретации показаний электрохимических датчиков. В работе сравниваются следующие методы машинного обучения:

- линейная регрессия;
- случайный лес;
- адаптивный бустинг;
- градиентный бустинг;
- предлагаемый метод, работающий с временными рядами.

Проанализированы результаты сравнения моделей на данных, в которых измерения проводились эталонным оборудованием и прибором на основе электрохимического датчика. Установлено, что предложенная модель показывает наибольшую эффективность по предложенным метрикам.

### 4.3. *Болдаков В.С.* Восстановление аудиосигнала из скрытых представлений глубоких нейронных сетей

В настоящее время широкое распространение получили глубокие нейронные сети обработки аудиосигнала общего назначения, предназначенные для решения широкого спектра задач: распознавание речи, детекция ключевых слов, разделение речи дикторов, идентификация диктора. Например, низкие показатели WER (word error rate) получила нейронная сеть WavLM [1], обученная исследователями Microsoft. Из высокой эффективности подобных моделей при решении вышеуказанных задач можно сделать вывод о качестве и информативности скрытых представлений, полученных при помощи данных моделей.

Следующим шагом в использовании скрытых представлений является решение двух других известных задач: улучшение качества аудиосигнала и воспроизведение оригинального аудиосигнала из скрытых представлений. В данной работе исследуется возможность восстановления аудиосигнала из скрытых представлений на основе генеративно-состязательного подхода обучения нейронных сетей.

Основной мотивацией для использования скрытых представлений сигнала вместо хорошо зарекомендовавших себя подходов с использованием спектрограмм является высокая устойчивость скрытых представлений к различного рода шумам и помехам.

В данной работе предлагается рассмотреть возможность восстановления аудиосигнала из скрытых состояний модели WavLM, предоставляющей скрытые состояния из множества  $\mathbb{R}^{768}$  с размером окна 25 мс, при помощи расширения архитектуры восстановления аудиосигнала из мелспектрограмм HiFi-Gan [2], обученной при помощи генеративно-состязательного подхода. Функция потерь для обучения генератора имеет следующий вид:

$$L = E[D(G(\mathbf{h})) + (\text{mel}(G(\mathbf{h})) - \text{mel}(\mathbf{x}))^2],$$

где  $\mathbf{h}$  — скрытое состояние сигнала, полученное из WavLM,  $D$  — дискриминатор,  $G$  — обучаемый генератор,  $\text{mel}$  — функция вычисления мелспектрограммы,  $\mathbf{x}$  — истинный аудиосигнал.

В результате данной работы получено решение, позволяющее восстанавливать аудиосигнал из скрытых характеристик WavLM. Данный подход может быть использован для восстановления сигнала из более широкого спектра подобных архитектур, например из wav2vec 2.0 [3]. Также данный подход может быть использован для улучшения качества аудио, увеличения частоты дискретизации. Возможно использования в качестве второго этапа, вокодирования, в задаче синтеза речи.

*Научный руководитель — к.т.н. Ракитский А. А.*

### Список литературы

- [1] CHEN S., WANG C., CHEN Z. ET AL. WavLM: Large-Scale Self-Supervised Pre-Training for Full Stack Speech Processing // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2022. Vol. 1. N. 1. P. 1–14.
- [2] KONG J., KIM J., BAE J. HiFi-GAN: Generative Adversarial Networks for Efficient and High Fidelity Speech Synthesis // Proc. Intern. Conf. «2020 Conference on Neural Information Processing Systems». Vancouver, BC, Canada: NeurIPS, 2020.
- [3] REN Y., HU C., TAN X. ET AL. wav2vec 2.0: A framework for self-supervised learning of speech representations. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.11477> (дата обращения 12.09.2022).

### 4.4. *Глухов И.В.* Использование обучения с подкреплением при оптимизации управления формацией космических аппаратов

В докладе рассматривается групповая формация, состоящая из нескольких десятков космических аппаратов (КА). Распределенная архитектура космических систем используется при решении различных задач в космосе, таких как распределённые астрофизические наблюдения [1], исследования малых тел Солнечной системы [2], радиолокационная интерферометрия с синтезированной апертурой [3], реклама в космосе [4]. Формация выполняет регулярные маневры по реконфигурации в соответствии со своей полётной миссией. Все орбитальные построения известны заранее и выбираются путем назначения каждому космическому аппарату целевой траектории, соответствующей одному из периодических решений уравнений относительного движения, записанных относительно некоторой базовой орбитальной системы отсчета. Модель динамики КА помимо центрального гравитационного поля Земли включает возмущающее ускорение обусловленное влиянием второй зональной гармоники геопотенциала.

Для эффективного решения этой задачи важна оптимизация продолжительности миссии, которая считается оконченной, как только у любого из КА формирования заканчивается топливо и он не может маневрировать по заданной траектории. КА оснащен двигательной установкой малой тяги, управления которой основано на линейно-квадратичном регуляторе с учетом характеристик доступных двигателей малых спутников.

Оптимизация проводится в три этапа. Во-первых, оптимизируются относительные положения каждой пары последовательных орбитальных конфигураций, для этого сравниваются несколько метрик, описывающих расстояния между конфигурациями для определения фазы новой орбитальной конфигурации, обеспечивающей в среднем максимально короткие траектории перелета маневрирующих спутников. Во-вторых, настраивает-



ся линейно-квадратичный регулятор и находится Парето-фронт его оптимальных коэффициентов с выбором между временем манёвра и расходом топлива на каждый манёвр. Установлено, что оптимизированные траектории манёвра могут состоять из нескольких дуг с разными настройками регулятора. После настройки регулятора вычисляются матрицы стоимости реконфигурации, элементы которых есть масса топлива, необходимая каждому космическому кораблю на его текущей траектории для маневрирования на целевые траектории, доступные в новой конфигурации. Наконец, решается задача о многоэтапных назначениях, которая заключается в предварительном поиске назначения каждого КА для перемещения на определенную траекторию при каждой реконфигурации, при этом максимизируется целевая функция — количество реконфигураций. Поскольку обычные алгоритмы задач о назначениях хороши только для одноэтапного назначения, в работе предлагается использовать обучение с подкреплением для многоэтапной задачи.

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Притыкин Д. А.*

#### Список литературы

- [1] SCALA F., ZANOTTI G., CURZEL S. ET AL. The HERMES mission: A CubeSat constellation for multi-messenger astrophysics // 5th IAA Conference on University Satellite Missions and CubeSat Workshop. 2020. Vol. 173. P. 57–73.
- [2] D'ARRIGO P., SANTANDREA S. APIES: A mission for the exploration of the main asteroid belt using a swarm of microsatellites // Acta Astronautica. 2006. Vol. 59. N. 8-11. P. 689–699.
- [3] GILL E., RUNGE H. Tight formation flying for an along-track SAR interferometer // Acta Astronautica. 2004. Vol. 55. N. 3–9. P. 473–485.
- [4] ВІКТИМІРОВ С., ІВАНОВ Д., ПРИТЮКИН Д. A satellite formation to display pixel images from the sky: Mission design and control algorithms // Advances in Space Research. 2022. Vol. 69. Iss. 11. P. 4026–4044.

#### 4.5. Городилов Д.В., Салтыков И.Е. Архитектурное проектирование веб-ориентированной облачной платформы в задачах гидродинамики

Проектирование системы направлено на представление системы, соответствующее предусмотренной цели, принципам и замыслам [1], оно включает оценку и принятие решений по выбору таких компонентов системы, которые отвечают её архитектуре и укладываются в предписанные ограничения [2]. Это заставляет искать среди множества вариантов достижения цели оптимальный. Что касается строительной отрасли, например, если необходимо визуально передать архитектуру здания, то будут представлены планы подробных чертежей. Когда в разработчике программного обеспечения представляют

программную систему с помощью диаграмм, вероятно получают запутанные схемы из прямоугольников и линий, немаркированные отношения, смешанные абстракции и т. д. [3]. Кроме того, на сегодняшний день существуют такие языки моделирования, как UML, но вопрос в том, обеспечивают ли они эффективный способ передачи архитектуры программного обеспечения? Эти диаграммы быстро увеличиваются в количестве, довольно скоро их становится сложно поддерживать, к тому же фактически необходимо всегда иметь в виду масштаб всей системы, обеспечивая всестороннее описание архитектуры. Лондонским программным архитектором Саймоном Брауном представлена модель C4, предназначенная для описания архитектуры как при предварительном проектировании, так и при ретроспективном документировании кодовой базы, детализации различных уровней архитектуры и демонстрации архитекторам, разработчикам и руководителям абстрактных моделей для работы с архитектурными схемами [3].

Настоящая работа посвящена проектированию архитектуры веб-ориентированной платформы для автоматизации проведения гидродинамических расчетов широким кругом исследователей через интерактивную веб-среду. Представленные диаграммы отображают несколько уровней архитектуры программного обеспечения. Диаграмма системного контекста обеспечивает отправную точку, которая показывает, как программная система вписывается в окружающий ее мир. Диаграмма контейнеров показывает общую форму архитектуры, распределение функций и обязанностей. Она показывает устройство контейнера, архитекторы и разработчики видят, из чего состоит каждый контейнер, что представляет собой каждый из компонентов, их обязанности и детали реализации [4]. Диаграмма кода используется для изучения отдельных модулей — это дополнительный уровень детализации, который в идеале нужно генерировать автоматически с использованием среды разработки или других инструментов.

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

#### Список литературы

- [1] ISO/IEC/IEEE 42010:2011 Systems and software engineering — Architecture description. 1st ed. / ISO/IEC JTC 1/SC 7 Software and Systems Engineering, 2011. 37 p.
- [2] PUSTER A., OLWELL D., HUTCHISON N. ET AL. Guide to the systems engineering body of knowledge (SEBoK) version 1.0 / Hoboken, N.J.: The Trustees of the Stevens Institute of Technology, 2012. 852 p.
- [3] The C4 model for visualising software architecture. [Электронный ресурс]. URL: <https://c4model.com> (дата обращения 29.08.2022).
- [4] BROWN S. The C4 model for visualising software architecture. 1st ed. / Leanpub, 2022. 106 p.

#### 4.6. *Губанов С.А.* Решение задачи оптимального управления проектом с использованием методов тропической оптимизации

Под управлением проектами понимается согласование действий, выполняющихся для достижения целей проекта при рациональном расходовании имеющихся ресурсов. При этом задача составления оптимального календарного графика выполнения работ является важной проблемой [1,2]. Актуальным подходом к решению подобных задач является применение методов тропической математики, которая изучает полукольца с идемпотентным сложением [3,4]. После переформулирования на языке тропической математики, целевые функции и ограничения полученных задач тропической оптимизации часто становятся линейными, что значительно облегчает поиск их решения.

В настоящем докладе представлено решение задачи составления оптимального календарного плана, заключающейся в минимизации максимального отклонения от директивных сроков выполнения работ с ограничениями на сроки их выполнения. Приводится исследуемая задача планирования, вводятся ее целевая функция и ограничения, формулируется задача в виде обычной задачи оптимизации. Затем приводятся основные понятия тропической математики и результат решения задачи тропической оптимизации. Далее задача оптимального управления переформулируется в терминах тропической математики и сводится к решенной задаче тропической оптимизации. Представленный результат является прямым аналитическим решением, удобным как для практических вычислений так и для дальнейшего исследования, что подтверждает актуальность темы настоящего доклада.

##### Список литературы

- [1] T'KINDT V., VILLAUT J.-C. Multicriteria scheduling. 2 ed. / Berlin: Springer, 2006. 359 p.
- [2] KERZNER H. Project management. 10 ed. / Hoboken: Wiley, 2010. 1094 p.
- [3] Маслов В. П., Колокольцев В. Н. Идемпотентный анализ и его применение в оптимальном управлении / М.: Наука, 1994. 141 с.
- [4] Кривулин Н. К. Методы идемпотентной алгебры в задачах моделирования и анализа сложных систем / СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2009. 255 с.

#### 4.7. *Данилов М.Н.* Алгоритм фильтрации векторных и тензорных полей для применения в программно-аппаратных комплексах двухэкспозиционной спекл-фотограмметрии

Оптико-телевизионные методы измерения полей относительных деформаций на поверхности твердых деформируемых тел [1, 2] в настоящее время находят широкое применение при экспериментальном изучении процессов деформирования и разрушения структурно-неоднородных конструкций [3,4].

Лучшие результаты дают системы машинного стереозрения, позволяющие на основе автоматизированного анализа цифровых стереоизображений производить измерение перемещений точек криволинейной поверхности в 3D пространстве. Примером такой системы является система «Correlated Solutions VIC-3D». В основе подобных систем лежат алгоритмы корреляционного анализа изображений, вычисления оптического потока, а также алгоритмы идентификации параметров [5] математических моделей, описывающих проекцию точек в 3D пространстве на плоскость, а также алгоритмы фильтрации скалярных и векторных полей [6]. При этом основная часть данных, подлежащих обработке, имеет тензорную природу, т. е. представляют собой комбинацию нескольких составляющих (компонент тензора), каждая из которых несет определенную информацию о свойствах исследуемого явления или объекта. К подобным данным относятся векторные поля перемещений и тензорные поля механических деформаций (тензор ранга 2).

Разработано прикладное программное и алгоритмическое обеспечение системы двухэкспозиционной фотограмметрии для измерения полей перемещений и относительных деформаций. Программное и алгоритмическое обеспечение протестировано на доступных экспериментальных данных. Верификация выполнена путем сопоставления результатов, полученных с применением разработанного программного обеспечения, с результатами, получаемыми и помощью верифицированного коммерческого программного обеспечения «Correlated Solutions VIC-3D». Кроме того, результаты сопоставлены с данными, полученными методом электротензометрии в ходе эксперимента. Получено качественное и количественное совпадение результатов в пределах допустимой погрешности. Известной проблемой интерпретации результатов измерений, полученных с применением оптических датчиков перемещений и деформаций, является наличие шумовой составляющей сигнала измерительной системы, проявляющейся в виде «ряби» в изополях компонент векторов и тензоров, а также в виде осцилляций вблизи участков изображений, содержащих образ структурной неоднородности исследуемой конструкции или трещины.

Целью работы является совершенствование методов экспериментального исследования процессов деформирования и разрушения конструкций из хрупких структурно-неоднородных материалов. Основной решаемой задачей было создание эффективного алгоритма фильтрации векторных и тензорных полей для применения в программно-аппаратных комплексах двухэкспозиционной спекл-фотограмметрии.

Предложен алгоритм фильтрации полей вектора перемещений и тензора деформаций, имеющий

строго определенный физический смысл, так как в его основе лежит нелокальная теория упругости, сформулированная в работах Эрингена [7], и широко применяющаяся в методе перидинамики [8, 9], являющимся связующим звеном между методом молекулярной динамики и сеточными методами компьютерного моделирования нелинейной динамики сплошной среды. Работа алгоритма продемонстрирована на доступных экспериментальных данных в виде цифровых стереоизображений поверхности структурно-неоднородных конструкций с трещинами. Подтверждена высокая эффективность алгоритма.

#### Список литературы

- [1] SUTTON M. A., ORTEU J. J., SCHREIER H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Basic concepts, theory and applications / N.Y.: Springer, 2009. 332 p.
- [2] HELM J. D., MCNEILL S. R., SUTTON M. A. Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement // *Optical Engineering*. 1996. Vol. 7. N. 35. P. 1911–1920.
- [3] Любутин П. С., Панин С. В., Титков В. В. и др. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2019. № 1. С. 88–109.
- [4] Адищев В. В., Карпов Е. В., Демешкин А. Г. и др. Применение оптической системы Correlated Solutions Vic 3D для построения диаграмм деформирования бетона // *Известия ВУЗов. Строительство*. 2015. № 8. С. 68–81.
- [5] Восковойников Ю. Е. Устойчивые методы и алгоритмы параметрической идентификации / Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2006. 180 с.
- [6] Восковойников Ю. Е., Белявцев В. Г. Алгоритмы фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры // *Автометрия*. 1998. № 3. С. 45–52.
- [7] ERINGEN A. C. Nonlocal continuum field theories / N.Y.: Springer, 2002. 376 p.
- [8] SILLING S. A., ASKARI E. A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics // *Computers and Structures*. 2005. Vol. 83. P. 1526–1535.
- [9] GERSTLE W., SAU N., SILLING S. Peridynamic modeling of concrete structures // *Nuclear Engineering and Design*. 2007. Vol. 237. P. 1250–1258.

#### 4.8. Долгая А.А., Истомина В.О. Создание ГИС «Вулкано-гидротермальные системы Курильских островов»

В Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН на протяжении многих лет ведутся исследования вулкано-гидротермальных систем (ВГС), расположенных на Курильских островах [1]. В рамках этих работ получен большой объем данных о химическом и изотопном составе термальных вод, скорости разгрузки гидротермальных систем, объемах химической эрозии и других параметрах процессов, протекающих на гидротермальных площадках, приуроченных к активным вулканам. Основными

объектами исследований являются системы островов Парамушир, Шиашкотан, Кетой, Уруп, Итуруп и Кунашир.

Для систематизации и анализа накопленного объема данных было принято решение о создании специализированной геоинформационной системы, которая должна стать частью геопортала ИВиС ДВО РАН [2]. Это позволит обеспечить открытость данных и их доступность широкому кругу пользователей.

Слои исходных геопространственных данных создаются с помощью программного обеспечения ESRI ArcGIS. В настоящее время полностью подготовлены слои, содержащие общегеографическую информацию (цифровая модель рельефа, реки и озера, горы и вулканы, населенные пункты), а также оцифрованы геологические карты с переносом атрибутивной информации о возрасте и составе пород, слагающих острова, и геологических разломах. Для островов Парамушир и Шиашкотан созданы слои с водосборными площадями, необходимые для оценки объема химического выветривания, местами отбора проб воды с указанием типа минерализации, температуры и уровня рН. Этот набор данных будет впоследствии создан для каждого острова Курильской островной дуги (КОД), на котором есть ВГС.

ГИС имеет следующую структуру: на главной странице отображается интерактивная карта КОД. Пользователь может управлять набором отображаемых слоев, среди которых общегеографические данные, контуры ВГС, данные о геологии и точки отбора проб. По щелчку по интересующему объекту (ВГС или точке отбора проб) открывается окно с основной информацией, из которого пользователь может перейти на тематическую страницу, структура которой зависит от типа объекта. Для ВГС приводится более подробная карта, состав воды и газов, литературные источники, подборка фотоматериалов и другие данные. Тематические страницы для точек отбора проб не индивидуальные, а содержат информацию для всех точек отбора проб в пределах отдельного острова. Ссылка с главной страницы ведет к строке, содержащей данные выбранной точки.

Размещение собранных данных на геопортале ИВиС ДВО РАН запланировано на 2023 год.

#### Список литературы

- [1] КАЛАЧЕВА Е. Г. Химический состав и условия формирования ультракислых термальных вулканических вод Курильской островной дуги // *Мат. XXV ежег. науч. конф. «Вулканизм и связанные с ним процессы»*. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 123–126.
- [2] РОМАНОВА И. М. Геопортал ИВиС ДВО РАН как единая точка доступа к вулканологическим и сейсмологическим данным // *Геоинформатика*. 2013. № 1. С. 46–54.

#### 4.9. *Ефремова И.С., Постникова У.С.* **Применение Байесовских сетей в задачах управления экологическими рисками**

Применение риск-ориентированного подхода в сфере предупреждения нарушения устойчивости функционирования социально-природно-техногенных систем является одним из решений задачи обеспечения безопасности территорий. Эффективность управления рисками зависит от методик, предполагающих качественную или количественную оценку рисков, количества статистических данных, подвергающихся обработке с помощью данной методики, простоты и точности проведения расчетов.

В работе предлагается способ применения математической модели в виде Байесовской сети, которая помимо наличия вышеперечисленных характеристик позволяет проследить степень влияния отдельных факторов. Построение графических структур распространения событий позволяет выявить причинно-следственные связи между событиями разных групп. В настоящий момент методика применения Байесовских сетей активно используется в медицинской диагностике, при оценке экономических моделей, в программах машинного обучения [1]. В последние годы аппарат нечетких Байесовских сетей также используется при оценке экологических рисков [2]. Включение рассматриваемого аппарата в методику оценки рисков различных экосистем (водных, лесных и т. д.) позволит:

- сформировать модель взаимосвязанных природных процессов;
- проанализировать риск возникновения каждого события сети;
- облегчить процедуру принятия решений по снижению уровней риска и недопущения их реализации.

Байесовское моделирование в сфере управления окружающей средой позволит учесть различные аспекты экологических рисков, то есть обеспечить их комплексную оценку.

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Тасейко О. В.*

#### **Список литературы**

- [1] AGUILERA P., FERNANDEZ A., FERNANDEZ R. ET AL. Bayesian networks in environmental modelling // *Environmental Modelling and Software*. 2011. Vol. 26. N. 12. P. 1376–1388.
- [2] ДИМИТРОВА Л. К., ГОЛУБЕВА О. А. Применение байесовской сети в дифференциальной диагностике артериальной гипертензии // *Тр. V Междунар. Конф. «Технические науки в России и за рубежом»*. М.: Буки-Веди, 2014. С. 4–14.

#### 4.10. *Исаева Е.М., Поляева Н.Ю., Моисеева Т.В., Мятлишкин Ю.В.* **Подход к разработке средства информационной и методической поддержки акторов при применении интерсубъективного подхода к управлению разрешением проблемных ситуаций**

При разрешении проблемных ситуаций с использованием интерсубъективного подхода (когда решение принимают акторы — сами субъекты, оказавшиеся в проблемной ситуации, а не наделенные некоторой властью люди) [1–3] акторам необходима поддержка для оказания им методической и информационной помощи, которая в современных условиях может быть возложена на электронные ресурсы. При разработке средства информационной поддержки было выявлено, что принятие коллективного решения более эффективно в сообществах, члены которых объединены некоторыми формальными признаками, что привело к разработке универсальной системы поддержки принятия решений, но для подобных сообществ, которые стали объектом исследования.

Было дано определение формально ограниченных сообществ, как сообществ, ограниченных некоторыми условными границами относительно малые группы людей (акторов), объединенных общей проблемой ситуацией, в которой они оказались, и осознающих свою общность [4]. Обоснована важность выделения формально ограниченных сообществ, связанная с необходимостью ограничить по каким-либо признакам и объединить акторов в ситуативные ассоциации, и предотвратить «растекание» по сети. Предлагается ввести ограничения по географическому, административному (работа, учеба) или тематическому принципу.

Создание формально ограниченных сообществ позволит акторам, объединённым общими интересами и целями, легче разрешать возникающие проблемные ситуации за счет повышения доверия в группе и снижения времени достижения консенсуса.

#### **Список литературы**

- [1] ВИТКИН В. Evergetics: science of intersubjective management processes in everyday life // *Int. J. Manag. Concepts and Phil.* 2016. Vol. 9. N. 2. P. 63–72.
- [2] ВИТКИН В. Introduction to the theory of intersubjective // *Group Decision and Negotiation*. 2015. Vol. 24. N. 1. P. 67–95.
- [3] МОИСЕЕВА Т. В. От управления субъектами — к интерсубъективному управлению // *Наука о человеке: гуманитарные исследования*. 2019. № 2 (36). С. 166–173.
- [4] МОИСЕЕВА Т. В. Методологические основы поддержки принятия решений по управлению инновационным развитием социотехнических объектов на основе интерсубъективного подхода: дис. на соискание ученой степени доктора технических наук. УГАТУ, Уфа, 2022. 359 с.

#### 4.11. Кликно Д.Д., Буравлева М.Э. Исследование точности относительных режимов работы угломерных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

Современные навигационные системы, использующие сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), не могут обеспечить требуемый уровень точности в автономном режиме измерения радионавигационных параметров из-за большой величины погрешностей, которые определяются в основном внешними факторами, такими как погрешность эфемерид, влияние ионосферы и тропосферы и т. д.

Точность измерения радионавигационных параметров возрастает с использованием ГНСС-приемников, работающих в режиме относительной навигации. В таком режиме происходит компенсация медленно меняющихся составляющих погрешностей измерения радионавигационных параметров, что в общем приводит к улучшению точности позиционирования.

Для проведения исследований погрешностей измерения радионавигационных параметров был разработан программно-аппаратный комплекс моделирования взаимной высокоточной навигации (ПАК) [1].

По результатам проведенных исследований установлено, что среднеквадратичная погрешность при работе в относительном режиме как минимум в 53 раза меньше, чем при автономном измерении координат [2].

Таким образом, использование ГНСС-приемников в относительном режиме работы приводит к следующим достоинствам: высокая точность, отсутствие корректирующих станций и каналов связи с сетью Интернет и возможность формирования оптимальных траекторий движения без использования электронных карт, что позволяет осуществлять эксплуатацию беспилотных летательных аппаратов в труднодоступных и северных районах России, на территориях со сложным рельефом или отсутствием связи и при прочих неблагоприятных факторах.

*Научный руководитель — к.т.н. Гладышев А. Б.*

#### Список литературы

- [1] Кликно Д. Д., Буравлева М. Э. Программно-аппаратный комплекс моделирования взаимной высокоточной навигации воздушных судов // Тез. XXII Всерос. конф. молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2021. С. 53.
- [2] Дмитриев Д. Д., Тяпкин В. Н., Фатеев Ю. Л. и др. Методы взаимной высокоточной навигации, основанные на использовании относительных режимов работы угломерных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6. С. 123–132.

#### 4.12. Козлова С.В., Кулясов Н.В. Применение методов машинного обучения для поиска аномалий в данных, генерируемых системой мониторинга интернета вещей

В настоящее время концепция интернета вещей активно развивается, многие «умные» устройства активно вошли в нашу повседневную жизнь [1]. Рост объема цифровых данных, генерируемых в том числе устройствами интернета вещей, сделал актуальными исследования, связанные с применением методов машинного обучения [2] для обнаружения разного рода аномалий в данных.

В данной работе анонсировано исследование аномалий в данных, полученных с датчиков климат-контроля, размещенных в технических помещениях Института вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск). Замеры производятся для температуры воздуха и влажности.

На первом этапе мониторинга предполагается построение цифровой модели объекта на основе характеристик помещения, где размещены датчики, самих датчиков и правил измерения данных. На втором этапе цифровую модель необходимо обучить с помощью методов машинного обучения на «чистых» данных. Обученная модель объекта в дальнейшем способна предсказывать «нормальное» состояние системы [3], а отклонения от «нормальных» значений будет расцениваться как аномалия.

Поскольку измерения проводятся с заданной периодичностью (дискретно), в исследовании используются не абсолютные значения измеряемых величин, а разность между замерами. Так, обученная цифровая модель «знает» допустимые величины разности температуры и влажности (с учетом факторов цикличности: сезонности, времени дня, а также воздействия включенного кондиционера и пр.). Необычные изменения разности показателей будут сигнализировать об аномалиях в данных, что позволит проанализировать возможные причины такого поведения системы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Красноярского математического центра, финансируемого Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2022-873).*

#### Список литературы

- [1] LI S., XU L. D., ZHAO S. The internet of things: A survey // J. Industrial Inf. Integr. 2018. Vol. 10. P. 1–9.
- [2] CUI L., YANG S., CHEN F. ET AL. A survey on application of machine learning for Internet of Things // Int. J. Mach. Learn. & Cyber. 2018. Vol. 9. P. 1399–1417.
- [3] LIMTHONG K. Real-time computer network anomaly detection using machine learning techniques // J. Adv. Comp. Networks. 2013. Vol. 1. N. 1. P. 1–5.

#### 4.13. Козьмин А.Д. Применение методов машинного обучения для калибровки газового датчика

Основной функцией газовых сенсоров является преобразование концентрации анализируемого газа в электрический или другой выходной сигнал. Однако калибровка газовых сенсоров затрудняется неявной зависимостью между показаниями датчика (величиной выходного тока или сопротивления) и концентрацией целевого газа. Кроме этого, газовые сенсоры подвержены влиянию различных условий окружающей среды и высокой перекрёстной чувствительности к другим газам.

В данной работе исследовались возможности применения методов машинного обучения для восстановления концентрации угарного газа (СО) по выходным данным электрохимического датчика. В качестве таких методов использовались линейная и полиномиальная регрессия, метод ближайших соседей и полносвязные нейронные сети. Набор исследуемых данных состоял из точных концентраций целевого газа и 9358 измерений с периодичностью одно измерение в час, усреднённых по 5 различным датчикам. Измерения были проведены в центре города с интенсивным автомобильным движением с марта 2004 года по апрель 2005 года [1]. Для анализа использовались 7344 ненулевых значений измерений, состоящих из измеряемых сопротивлений датчиков, температуры и влажности воздуха.

В ходе исследований выполнен анализ структуры и корреляционный анализ выходных данных набора датчиков. На основе результатов анализа созданы новые признаки, в частности, учитывающие зависимость концентрации СО от времени внутри суток. Используя имеющиеся и созданные признаки были построены различные модели множественной линейной и полиномиальной регрессии (MLR), а также несколько простых архитектур нейронных сетей с прямой связью (FFNN) для восстановления реальных значений концентраций СО. На данных моделях анализировалось влияние различных способов регуляризации на калибровку газовых сенсоров.

В результате исследования было показано, что наибольший вклад в погрешность восстановления концентрации целевого газа вносят данные, соответствующие низким значениям реальной концентрации СО. Установлено, что учёт дневной периодичности концентрации СО позволяет улучшить точность и уменьшить время калибровки газового датчика. Выполнено сравнение результатов моделей FFNN и MLR и сделаны выводы о преимуществах и недостатках каждого из методов. Для методов установлены периоды калибровки, необходимые для достижения минимальной погрешности восстановления концентрации.

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

#### Список литературы

- [1] DE VITO S., PIGA M., MARTINOTTO L., DI FRANCA G. CO, NO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> urban pollution monitoring with on-field calibrated electronic nose by automatic Bayesian regularization // Sensors and Actuators B: Chemical. 2009. Vol. 143. P. 182–191.

#### 4.14. Кондратьев Д.А. Язык для задания семантических меток, позволяющих генерировать объяснения недоказанных условий корректности при дедуктивной верификации С-программ в системе C-lightVer

В ИСИ СО РАН разрабатывается система C-lightVer [1] для дедуктивной верификации программ на языке С. Дедуктивная верификация состоит в задании формальных спецификаций для программы, выводе условий корректности программы и доказательстве условий корректности. Если условия корректности доказаны, то программа соответствует своим спецификациям.

Для генерации условий корректности используется набор правил вывода. В системе C-lightVer условия корректности порождает специальный модуль, называемый метагенератором условий корректности. Метод метагенерации условий корректности предложили Морикони и Шварц [2]. Метагенератор принимает в качестве входных данных программу и правила вывода условий корректности, заданные на специальном языке, называемом языком задания шаблонов [3].

Важной проблемой на пути к автоматизации дедуктивной верификации является проблема локализации ошибок. Для решения данной проблемы Денни и Фишер предложили генерировать тексты, объясняющие недоказанные условия корректности [4]. Для этого при выводе условий корректности их подформулы снабжаются семантическими метками. Типам семантических меток соответствуют текстовые шаблоны. Семантические метки хранят номера строк исходной программы, которые могут подставляться в текст, соответствующий метке. При анализе недоказанного условия корректности из него извлекаются семантические метки. Далее список извлеченных меток последовательно обходится и для каждой метки выписывается соответствующий текст. В результате получается текст о соответствии недоказанных условий корректности и конструкций исходной программы.

Но Денни и Фишер предложили использовать только ограниченное число типов семантических меток. Новыми типами семантических меток можно снабжать определенные конструкции языка программирования. Это позволяет генерировать более подробные объяснения недоказанных условий корректности для упрощения задачи локализации ошибок. Для задания произвольных типов семантических меток мы представляем расширение языка за-

дания шаблонов конструкцией для задания семантических меток и язык для задания текстовых шаблонов для типов семантических меток. Предлагаемое решение позволяет избежать модификации программного кода системы C-lightVer при задании семантических меток, пользователю нужно только описать правила вывода с семантическими метками и задать текстовые шаблоны для всех типов семантических меток на представленном языке.

*Научный руководитель — к.ф.-м.н. Промский А. В.*

#### Список литературы

- [1] KONDRATYEV D. A., NEPOMNIASCHY V. A. Automation of C program deductive verification without using loop invariants // Programming and Computer Software. 2022. Vol. 48. N. 5. P. 331–346.
- [2] MORICONI M., SCHWARTZ R. L. Automatic construction of verification condition generators from hoare logics // Lecture Notes in Computer Science. 1981. Vol. 115. P. 363–377.
- [3] КОНДРАТЬЕВ Д. А. Расширение системы C-light символическим методом верификации финитных итераций // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22. Спецвыпуск 1. С. 44–59.
- [4] DENNEY E., FISCHER V. Explaining verification conditions // Lecture Notes in Computer Science. 2008. Vol. 5140. P. 145–159.

#### 4.15. Кононов М.Н., Парыгина Ю.В., Новикова М.К. Математическая каскадная модель квадрокоптера

Рассмотрим математическую модель квадрокоптера, основанную на теории каскадного моделирования с использованием пассивного управляющего решения [1, 2]. Каскады вращения и перемещения сначала разделяются, моделируются математически и моделируются отдельно для проверки отдельных решений управления и стабильности, после чего выполняется моделирование и симуляции всей системы для проверки решений управления и стабильности всей системы. Как отдельные системы, так и система в целом могут отслеживать как фиксированные положения, так и положения, меняющиеся со временем, например, отслеживание по кругу, спирали и путевой точке. Результаты моделирования для отслеживания спиральной траектории показывают рост ошибки позиционирования по мере увеличения радиуса окружности, что свидетельствует о том, что управляющие решения борются с увеличением ускорения, но исправляются дополнительными условиями компенсации.

Представленную математическую каскадную модель квадрокоптера с пассивным управлением, можно рассматривать как вращательный каскад и поступательный каскад, где вращение кватерниона от каркаса тела к кадру NED в каскаде вращения генерирует матрицу вращения, который служил входом в каскад перемещения, позволяя квадрокоптеру направлять тягу в нужном направлении

и заставляя квадрокоптер принимать необходимое положение. Контроллеры вращения и поступательного движения разработаны в соответствии со схемой пассивного управления GAS PD+. Сначала каскады были разделены, чтобы можно было проверить индивидуальную стабильность двух каскадов в соответствии с теориями устойчивости каскадов, прежде чем они были объединены вместе и была проверена вся каскадная система.

Результаты моделирования для разделенных каскадов вращения и перемещения, а также математические описания и результаты систем показывают, что вращение и перемещение стабильны. В каскаде вращения квадрокоптер быстро и стабильно вращается в направлении желаемого кватерниона, а в каскаде перемещения квадрокоптер быстро и надежно достигает желаемого положения, используя как контроллер высоты, так и контроллер вектора.

Были получены результаты численного моделирования для проверки модели управления динамикой квадрокоптера. На основе динамической модели квадрокоптера разработана модель управления квадрокоптером в среде MATLAB Simulink. В ходе тестового моделирования квадрокоптер полетел из начального местоположения в заданное местоположение и завис в заданной точке.

Модель управления была дополнительно протестирована на задаче перемещения квадрокоптера из состояния покоя по пути, заданному множеством точек и приземления в конце пути.

Предложенное численное моделирование продемонстрировало, что квадрокоптер может перемещаться в любые желаемые точки пути и следовать любой желаемой траектории.

#### Список литературы

- [1] МОИСЕЕВ В. С., ГУЩИНА Д. С. Основы теории создания и применения информационных беспилотных авиационных комплексов / Казань: Издательство МОиН, 2010. 196 с.
- [2] ПАВЛУШЕНКО М. И., ЕВСТАФЬЕВ Г. М. БПЛА: история, применение, угроза распространения и перспективы развития / М.: Права человека, 2015. 612 с.

#### 4.16. Королёв С.П., Сорочкин А.А. Детектирование пепловых облаков на фотоснимках вулканов

В докладе рассматривается задача детектирования и сегментации пепловых колонн от извержений вулканов, зафиксированных на фотоснимках с камер видеонаблюдения, снимающих в оптическом диапазоне. Данный класс задач сегодня относительно успешно решается с применением нейронных сетей различных архитектур с использованием предварительно размеченной обучающей выборки. Экспериментальные расчеты показали, что существующие наборы снимков с размеченным дымом от пожаров или техногенных объектов не позволяют в полной мере применить их в решении указанной

задачи. Создание целевого датасета является актуальной нерешенной проблемой, которая во многом открывает возможности по детектированию пепловых облаков, как важной составляющей современных информационных систем оперативного мониторинга вулканов.

В работе исследуются методы создания выборки фотоснимков, позволяющей обучить нейронную сеть для нахождения на изображении признаков активности вулкана в виде пепловых колонн. С точки зрения зрительного восприятия пепловой колонны человеком, она определяется на снимке по характерному для пепла цвету и текстуре — турбулентным завихрениям пепла при выходе из кратера. Поэтому на первом этапе выполняется предварительная сегментация снимка на суперпиксели методом SEEDS [1], учитывающем схожесть пикселей по цветовым характеристикам. Далее для каждого суперпикселя вычисляется размерность Минковского — Булиганда, которая позволяет получить формализованную оценку «сложности» текстуры суперпикселя. Для полученного набора размерностей каждого суперпикселя выполняется кластеризация по алгоритму K-means, на два класса, из которых экспериментальным путем выбирается тот, в который попадают суперпиксели с пепловой колонной. Предложенным способом было размечено и вручную проверено более 300 снимков вулкана Ключевской. На основе подготовленного размеченного набора снимков проведено обучение нейронной сети с архитектурой U-Net [2] с гиперпараметрами: число эпох — 100, размер батча — 1. В качестве метрики был использован Dice Coefficient, который в результате обучения достиг значения 0.65.

Проведенные исследования показывают перспективность использования нейронных сетей в решении рассматриваемых задач. В то же время, для получения более значимых результатов, необходима оптимизация архитектуры нейронной сети, а также увеличение обучающей выборки и поиск более эффективных алгоритмов ее создания.

#### Список литературы

- [1] VAN DEN BERGH M., VOIX X., ROIG G., VAN GOOL L. SEEDS: Superpixels extracted via energy-driven sampling // Computer Vision and Pattern Recognition. arXiv:1309.3848.
- [2] RONNEBERGER O., FISCHER P., BROX T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // Computer Vision and Pattern Recognition. arXiv:1505.04597.

#### 4.17. Кулясов Н.В. Платформа для анализа данных в области интернета вещей

Автоматизация различных процессов в современном обществе привела к глобальному росту количества устройств интернета вещей (IOT) и объёмов информации, генерируемых ими. Исходя из этого, задачи организации процессов сбора хранения

и обработки данных является актуальной в области IOT.

В рамках работы представлена платформа для осуществления полного цикла исследований данных в области IOT, отражающая эталонную модель функционирования интернета вещей. Основой платформы выступает кластер Kubernetes и распределённая файловая система GlusterFS, которые развёрнуты на базе виртуальных машин Nupur-V [1]. Сенсорный уровень модели представлен четырьмя датчиками мониторинга параметров окружающей среды промышленного исполнения, размещённых в серверных помещениях. Уровень коммуникации развёрнут на базе информационной сети ФИЦ КИЦ СО РАН. Сервисный уровень реализован несколькими конфигурациями MQTT-брокера Eclipse Mosquitto, в качестве холодного хранилища данных выступает MySQL и горячего — ClickHouse (в перспективах ELK). На прикладном уровне развёрнуты: phpMyAdmin, Grafana, R-Studio, Jupiter-Notebook.

Представленный набор технологий и инструментов позволит эффективно проводить исследования в области анализа данных интернета вещей, а также стать платформой для подготовки квалифицированных специалистов в данных областях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Красноярского математического центра, финансируемого Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (соглашение № 075-02-2022-873).*

#### Список литературы

- [1] ERMOLENKO D., KILICHEVA S., MUTHANNA A. ET AL. Internet of Things services orchestration framework based on kubernetes and edge computing // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg, 2021. P. 12–17.

#### 4.18. Лебедев Р.К., Корякин И.А. Метод защиты программ при помощи переключения режимов исполнения архитектуры x86

Одним из основных методов обратной разработки программного обеспечения является дизассемблирование, являющееся также одним из шагов в других видах анализа: например, символьном исполнении и декомпиляции. В связи с этим, задача противодействия ему является актуальной, так как может помочь защитить программы от обратной разработки и ее нежелательных последствий.

Для многих процессорных архитектур дизассемблирование — достаточно простой и однозначный процесс, что делает задачу противодействия ему без использования самомодифицирующегося кода практически неразрешимой. Однако для архитектуры x86, широко используемой в персональных компьютерах и серверах, это не так: машинные коды x86 позволяют записывать идентичные инструк-



ции разными способами, некоторые машинные коды вовсе не имеют представления в виде инструкций [1], а также код может динамически переключаться между 32-битным и 64-битным режимами исполнения в одной программе [2].

В данной работе предложен метод защиты, использующий динамическое переключение между 32-битным и 64-битным режимами и несоответствия между машинными кодами в данных режимах. Эксплуатируется неспособность дизассемблера в рамках статического анализа надежно определить, в каком режиме исполняется конкретный участок кода, что может привести к ложному восприятию кода дизассемблером и использующими его вывод инструментами.

Предложенный метод основан на добавлении в программу конструкций, являющихся корректным машинным кодом как в 32-битном, так и в 64-битном режиме, но исполняющихся по-разному в зависимости от режима исполнения. Хотя большинство машинных кодов не потеряли своего значения с переходом к 64-битной версии архитектуры x86 (с точностью до размера регистра), есть и исключения, например пара из инструкции INC EAX (32-битный режим) и префикса REX (64-битный режим). Они кодируются одним шестнадцатеричным байтом 40, однако имеют совершенно разный смысл: INC EAX увеличивает регистр на единицу, а REX влияет на размер используемого следующей инструкцией регистра, причем если инструкция не использует регистры, он просто игнорируется. Соответственно, если разместить после данной инструкции условный переход, зависящий от значения флага ZF, изменяемого (или нет) соответствующей инструкцией или префиксом, осуществление перехода будет зависеть от режима исполнения, что при несовпадении ожиданий дизассемблера с реальностью отправит его по ложному следу.

Метод был реализован на уровне ассемблерных преобразований и показал свою эффективность против декомпиляторов Ghidra и IDA, а также инструмента символьного исполнения angt, вызвав ложную декомпиляцию и исполнение ими кода программы соответственно. Значимой особенностью метода является отсутствие самомодифицирующегося кода, что делает его применимым для операционных систем с самыми строгими политиками безопасности, не позволяющих динамическую модификацию исполняемого кода.

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

#### Список литературы

- [1] XLOGICX Assembly language is too high level // DEF CON 25. 2017.
- [2] The 0x33 segment selector (heavens gate). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.malwaretech.com/2014/02/the-0x33-segment-selector-heavens-gate.html> (дата обращения 01.09.2022).

#### 4.19. Ликсонова Д.И. О некоторых особенностях лавинообразных процессов, возникающих в многомерных системах

В настоящем докладе рассматривается задача моделирования процессов, изменяющихся скачкообразно при плавном изменении внешних условий. Такие многомерные процессы будем называть лавинообразными [1]. Лавинообразные процессы тесно связаны с теорией катастроф [2]. Не вдаваясь в истоки этой теории, укажем лишь, что она появилась в результате обобщения французским математиком Р. Тома теории особенностей Х. Уитни и теории устойчивости и бифуркации динамических систем А. Пуанкаре, А. М. Ляпунова и А. А. Андронова.

Лавинообразные процессы, происходящие в многомерных системах, объединяет с процессами, изучаемыми в теории катастроф, то, что при определенном соотношении плавно изменяющихся внешних воздействий система реагирует на них скачкообразным образом. Отличает же их то обстоятельство, что число возмущающих внешних воздействий в лавинообразных процессах может быть очень велико.

Поэтому следует отметить, что наибольший акцент делается как на высокую размерность исследуемых процессов, так и на типы априорной информации. Различные варианты априорной информации были первоначально предложены А. А. Фельдбаумом [3]. Несколько позже Я. З. Цыпкин рассматривал задачи параметризации адаптивных систем [4]. Очевидно, что моделирование по различным каналам может предполагать наличие различной априорной информации. Это приводит к необходимости объединять в единое целое методы как параметрической, так и непараметрической идентификации.

Задачи, касающиеся реальных процессов, всегда являются многомерными. Априорная информация по различным каналам связи всегда присутствует, но тоже различная. Это касается как реальных (цунами, вулканы, сели), так и технологических процессов (например, электролиз). Наибольший интерес представляют именно лавинообразные процессы, как наименее изученные. Можно сказать, что у многомерного процесса идет плавное изменение значений входных переменных, а выходные могут иметь резкие скачки. В докладе приводятся непараметрические алгоритмы моделирования лавинообразных процессов, а также некоторые результаты многократных численных исследований, которые показывают достаточно эффективное моделирование процессов, изменения которых носит скачкообразный характер.

#### Список литературы

- [1] МЕДВЕДЕВ А. В. Основы теории непараметрических систем. Идентификация, управление, принятие решений / Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2018. 732 с.

- [2] Арнольд В. И. Теория катастроф / М.: Наука, 1990. 128 с.
- [3] Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем / М.: Физматгиз, 1963. 553 с.
- [4] Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах / М.: Наука, 1968. 400 с.

#### 4.20. Малышева А.В., Гуськов А.Е., Косяков Д.В. Систематизированный подбор публикаций для обзоров, уменьшающий риски пропуска релевантных статей

Обзоры являются важной компонентой исследовательского процесса и служат, в том числе, для выявления пробелов в исследованиях. Одной из наиболее часто встречающихся проблем является отбор подходящих публикаций: включение всех достаточно значимых и исключение наименее релевантных [1]. Большие по объёму результаты поисковых запросов не позволяют исследователям тщательно изучить содержимое всех публикаций. Требуются дополнительные манипуляции, среди которых самым популярным является уточнение поискового запроса, которое приводит к уменьшению исходной выборки. Но, при этом велика вероятность упустить значимые исследования.

В последние годы был предпринят ряд попыток разработать подходы, которые бы позволили при поиске охватить все релевантные публикации. Для этого применялись как методы машинного обучения [2], так и наукометрические подходы, например, на основе «каскадного» расширения цитирования [3], но они не получили широкого распространения в научной среде.

В докладе представлена методика систематизированного подбора публикаций для обзоров, уменьшающего риски пропуска релевантных статей и пример ее применения. Использование методики позволяет значительно сократить число случайных ошибок и субъективных отклонений с помощью алгоритмизированного поиска. Отбор релевантных публикаций производится как с помощью наукометрических показателей, так и экспертной оценки. Такой методологический подход упорядочивает процедуры подготовки стартовой выборки, её расширения, усечения и анализа, которые выполняются в несколько итераций по результатам которых формируется финальная выборка, её аналитические характеристики и формальный протокол её подготовки.

Предложенный методологический подход с высокой степенью вариативности в подходах к отбору публикаций позволяет значительно снизить риск пропуска важных релевантных статей, сохраняя при этом определенную гибкость для адаптации к специфике различных научных дисциплин. Методика может применяться в целях развития сервисов для информационного сопровождения исследовательской деятельности.

*Научный руководитель — к.т.н. Гуськов А. Е.*

#### Список литературы

- [1] Yu Z., MENZIES T. FAST2: An intelligent assistant for finding relevant papers // *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 120. P. 26–46.
- [2] BUCHKREMER R., DEMUND A., EBENER S. ET AL. The application of artificial intelligence technologies as a substitute for reading and to support and enhance the authoring of scientific review articles // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 6526365276.
- [3] CHEN C. Cascading citation expansion // *Journal of Information Science Theory and Practice*. 2018. Vol. 72. N. 6. P. 6–23.

#### 4.21. Назаров Н.А. Обработка PIV при помощи графических ускорителей

Происходящие в мире кардинальные технологические перемены, сопоставимые с эпохами промышленных революций и научных открытий, требуют постоянного совершенствования научного оборудования и соответствующего программного обеспечения. Одним из примеров прорывного оборудования последних 30 лет является метод PIV (Particle Imaging Velocimetry или лазерная анемометрия по изображениям частиц). Он заключается в определении скорости течения среды по вычислению перемещения групп специальных трассеров на последовательных изображениях при помощи корреляционного анализа. Метод используется как в промышленности, например, диагностике обтекания реальных и модельных объектов в авиации и автомобилестроении, так и в научных исследованиях, например, аэродинамике, горении, изучении миграции раковых клеток [1], прогнозе солнечной радиации с помощью индекса адвекции и диффузии облаков [2] и пр. На сегодняшний день во всем мире проводятся исследования по применению различных алгоритмов расчета PIV с использованием графических ускорителей.

Целью работы является создание простых в использовании хорошо задокументированных библиотек, позволяющих наиболее эффективно обрабатывать экспериментальные данные и обладающих поддержкой графических ускорителей.

В ходе работы проведено исследование возможных вариантов анализа данных системы PIV. Проведено количественное сравнение скорости вычислений главных алгоритмов метода PIV (расчет кросс-корреляции методом FFT) с использованием различных Python библиотек, обладающих поддержкой CUDA. При помощи сравнения с результатами других экспериментальных методов, открытыми базами данных для валидации PIV [3] и коммерческими продуктами для анализа PIV была установлена достоверность разработанного алгоритма. Разработана программная библиотека TorchPIV, основанная на библиотеках языка Python с поддержкой вычислений на GPU (PyTorch, Cython). Разработан-

ная библиотека может выполняться как на ЦПУ, так и на ГПУ, в зависимости от выбора пользователя.

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

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

#### Список литературы

- [1] STICHEL D., MIDDLETON A. M., MÜLLER B. F. ET AL. An individual-based model for collective cancer cell migration explains speed dynamics and phenotype variability in response to growth factors // *Npj Syst. Biol. Appl.* 2017. Vol. 3. N. 5. P 1–10.
- [2] ARBIZU-BARRENA C., RUIZ-ARIAS J. A., RODRÍGUEZ-BENÍTEZ F. J. ET AL. Short-term solar radiation forecasting by advecting and diffusing MSG cloud index // *Sol. Energy.* 2017. Vol. 155. P. 1092–1103.
- [3] NEAL D. R., SCIASCITANO A., SMITH B. L. ET AL. Collaborative framework for PIV uncertainty quantification: the experimental database // *Meas. Sci. Technol.* 2015. Vol. 26. N. 7. P 074003.

#### 4.22. Никулин В.С. Методический подход к оценке эксплуатационной надежности вычислительных комплексов

Вычислительные комплексы имеют большое значение при решении целого ряда задач, таких как математическое моделирование физических процессов, обучение нейронных сетей и создание цифровых двойников [1]. Цена отказа таких комплексов зачастую может быть крайне высока, что обуславливает предъявление повышенных требований к надежности их функционирования и отказоустойчивости.

Целью работы является разработка методического подхода к оценке эксплуатационной надежности вычислительного комплекса, включающей сбор и подготовку данных из эксплуатации, а также учет их цензурирование. Разработанный методический подход состоит из двух методик:

- 1) методика автоматизированной подготовки данных, полученных в процессе эксплуатации вычислительных комплексов [2];
- 2) методика экспериментального расчета показателей надежности вычислительных комплексов на основе метода Розенблатта — Парзена.

В процессе работы решены следующие задачи:

- 1) выполнен анализ непараметрических методов с целью их внедрения в разрабатываемый методический подход;
- 2) разработан метод автоматизированного сбора и подготовки данных, полученных в процессе эксплуатации вычислительных комплексов, для оценки показателей надежности в режиме реального времени;
- 3) разработан программный комплекс для мониторинга состояния вычислительных комплексов с возможностью оценки показателей надежности по данным из эксплуатации.

В рамках данной работы использован аппарат теории надежности и математической статистики, методы теории надежности сложных технических систем, технологии структурного и объектно-ориентированного программирования.

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

#### Список литературы

- [1] ЗАХАРОВ Д. Н., НИКУЛИН В. С. Анализ методов статистической оценки эксплуатационной надежности вычислительных комплексов // *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли.* 2020. Т. 12. № 1. С. 64–69.
- [2] Никулин В.С. Методика подготовки данных для интеллектуального анализа надежности вычислительных комплексов // *Вестник СибГУТИ.* 2020. № 3 (51). С. 26–37.

#### 4.23. Павлова У.В. Оптимизация 10-ти головочного ДКА для распознавания последовательностей ограниченной длины

В настоящее время большая часть данных записывается в режиме реального времени и имеет огромные объемы, соответственно, нужны надежные и эффективные средства для их обработки и анализа. В рамках работы был выявлен высокопроизводительный метод, позволяющий выявлять сложные паттерны во временных рядах в режиме реального времени. Метод базируется на конечном детерминированном автомате с десятью считывающими головками, который предназначен для распознавания мультилинейных последовательностей бесконечной длины [1].

В процессе исследования автомата были выявлены существенные недостатки, ограничивающие работу со строками конечной длины. Главной целью является изменение автомата таким образом, чтобы он мог применяться для реальных практических задач. Для этого необходимо изменить его структуру, сохранив при этом логику работы.

Путем добавления различных методов в структуру автомата [2], а также тестирования на реальных и сгенерированных последовательностях, было выявлено, что некоторые головки привязаны исключительно к позиции элемента во временном ряду без учета его содержимого. В рамках работы был разработан новый автомат, в котором модифицирован процесс обработки ошибок. Перед началом работы все головки находятся в нулевой позиции. Сначала головка, отвечающая за правую границу паттерна, сдвигается на единицу, а остальные в процессе сдвигаются вправо по последовательности. В случае, если во время работы автомата возникла ошибка, все головки кроме одной, возвращаются в начало, а головка, отвечающая за правую границу паттерна, увеличивает свое значение на единицу относительно предыдущей стартовой позиции.

Таким образом, модифицированный автомат гораздо лучше выделяет паттерн на последовательностях ограниченной длины по сравнению с первоначальным автоматом.

*Научный руководитель — к.т.н. Ракитский А. А.*

#### Список литературы

- [1] SMITH T. Prediction of infinite words with automata // Theory of Computing Systems. 2018. Vol. 62. N. 3. P. 653–681.
- [2] ПАВЛОВА У. В., РАКИТСКИЙ А. А. Применение специализированных детерминированных конечных автоматов для прогнозирования временных рядов // Вестник СибГУТИ. 2022. № 2 (60). С. 12–22.

#### 4.24. Папков В.Д., Шадьмов Н.А. CFD-моделирование аэродинамики с использованием средств автоматизации, написанных в Python

В нашей работе решалась задача аэродинамики в Ansys Fluent с использованием средств автоматизации, написанных Python. Задача аэродинамики заключалась в том, что турбулентный поток под разными углами атаки обдувает крыло NASA 0018. Цель состояла в получении достаточно точных аэродинамических данных о коэффициентах подъема и сопротивления, а также в автоматизации получения этих аэродинамических данных.

CFD-моделирование является одной из самых быстро растущих отраслей в наше время. Все больше внимания уделяется автоматизации задач CFD-моделей, во главе этого ставится задача снизить затрачиваемые ресурсы на получение и обработку результатов, полученных в ходе расчета.

Реализация программы автоматизации выполнена на языке программирования Python. Хорошая читаемость кода позволяет редактировать количество и набор задаваемых параметров, их обработку и какие выходные данные мы хотим получить. Данное средство автоматизации может быть адаптировано и под более сложные проекты. Python позволяет вести подсчет времени на выполнение задачи и дает возможность отслеживать эффективность той или иной автоматизации, что обеспечивает гибкость настройки программы.

Расчет и автоматизация производились в коммерческой программе Ansys Fluent, код написан на языке Python. В данной работе решались уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \\ \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + f_{turb,x}, \\ \rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + f_{turb,y}, \\ \frac{\mu \tau}{\rho} &\approx \frac{C_\mu k^2}{\epsilon}, \quad Re = \frac{\rho v l}{\mu}. \end{aligned}$$

С помощью средств автоматизации были рассчитаны коэффициенты подъема и сопротивления, которые хорошо согласуются с эталонными результатами. Результаты показали, что данное средство автоматизации позволило снизить скорость расчета в среднем на 17% по сравнению с ручным вводом-запуском.

*Научный руководитель — к.т.н. Пащенко Д. И.*

#### 4.25. Перышкова Е.Н. Структурно-ориентированный алгоритм формирования подсистем выполнения MPI-программ

Одним из важнейших архитектурных свойств современных вычислительных систем (ВС) с распределенной памятью является глубокая иерархия средств доступа к оперативной памяти процессорных ядер [1]. Коммуникационные сети большинства ВС списка Top500 имеют как минимум двухуровневую организацию: коммуникационная сеть связи между элементарными машинами (ЭМ): Cray Gemini, IBM PERCS, Fujitsu Tofu, Gigabit Ethernet, InfiniBand; оперативная память, разделяемая процессорными ядрами одной ЭМ.

Если принять во внимание использование коммуникационных сетей на базе составных коммутаторов (например, топология fat tree), а также наличие внутрисистемных шин для объединения процессоров в ЭМ с архитектурой NUMA, то количество уровней в иерархической структуре увеличивается. Конфигурация подсистемы ЭМ и начальное распределение процессов по процессорным ядрам системы в значительной степени определяет время выполнения MPI-программ [2]. В системах управления ресурсами ВС при формировании подсистем ЭМ возникает задача формирования подсистемы из  $P$  процессорных ядер. В ВС на базе многопроцессорных узлов данная задача имеет множество решений [3]. Поэтому практический интерес представляет разработка структурно-ориентированных алгоритмов формирования подсистем ЭМ, учитывающих структуру информационных обменов целевой программы.

Разработан структурно-ориентированный алгоритм формирования подсистем ЭМ, учитывающий падение производительности каналов связи при одновременном использовании канала связи множеством процессов. Эффективность алгоритма исследована на вычислительном кластере с SMP/NUMA-архитектурой вычислительных узлов при выполнении параллельных MPI-программ, использующих шаблон информационных обменов типа All-to-All.

Создана система прогнозирования времени выполнения коллективных операций в стандарте MPI на заданной подсистеме ЭМ по результатам предварительной экспериментальной оценки падения производительности операций MPI-Send/MPI-Recv при одновременном использовании канала связи множеством процессов. Выработаны рекомендации

выбора оптимального размещения процессоров параллельной программы с учетом размеров сообщений и разделения каналов связи. Разработанные в данной работе алгоритмические и программные средства расширяют функциональные возможности инструментария параллельного мультипрограммирования.

*Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 20-07-00039).*

#### Список литературы

- [1] Хорошевский В. Г. Распределенные вычислительные системы с программируемой структурой // Вестник СибГУТИ. 2010. № 2. С. 3–41.
- [2] BALAJI P., GROPP W. MPI on millions of cores // Parallel Processing Letters. 2011. Vol. 21. Is. 1. P. 45–60.
- [3] СТЕПАНЕНКО С. А. Мультипроцессорные среды суперЭВМ. Масштабирование эффективности / М.: Физматлит, 2016. 312 с.

#### 4.26. Плаксин А.Р., Миргородский Н.В. Адаптивный шаг дискретизации в алгоритмах обучения с подкреплением при решении задач оптимального управления

В последние годы теория обучения с подкреплением [1] стала основой для развития большого количества алгоритмов, способных решать сложные задачи принятия решений (шахматы, Го, игры Atari, StarCraft II и т. д.). При этом, один из основных подходов в обучении с подкреплением является Q-learning, в котором оптимальное действие выбирается по Q-функции, являющейся решением уравнения Беллмана. В работе [2], был предложен алгоритм Deep Q-Networks (DQN), в котором Q-функция аппроксимируется нейронной сетью, что позволяет использовать подход Q-learning для задач с бесконечным (многомерным) пространством состояний. Отметим, что алгоритм DQN, также как и другие алгоритмы обучения с подкреплением, может быть использован для решения дискретных по времени задач оптимального управления. Если же изначально задача является непрерывной по времени, то ее необходимо дискретизировать. При этом, как было исследовано в [3], работа алгоритма существенно зависит от шага дискретизации и, в основном, становится хуже при уменьшении этого шага.

В данной работе предлагается модификация алгоритма DQN способная преодолевать эти сложности путем нахождения оптимального шага дискретизации. Для этого в алгоритм добавляется еще одна нейронная сеть, которая по текущему состоянию назначает длину следующего шага. Предложенный алгоритм сравнивается с DQN и, с одной стороны, показывает сравнимые с DQN результаты при большом шаге дискретизации, а с другой стороны, при малом шаге является намного более эффективным, чем DQN алгоритм.

*Работа выполнена в рамках исследований, проводимых в Уральском математическом центре*

*при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер соглашения 075-02-2022-874).*

#### Список литературы

- [1] SUTTON R. S., BARTO A. G., Reinforcement learning an introduction (second edition) / Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2018. 526 p.
- [2] MNIN V., KAVUKCUOGLU K., SILVER D. ET AL. Human-level control through deep reinforcement learning // Nature. 2015. Vol. 518. N. 7540. P. 529–533.
- [3] TALLEC C., BLIER L., OLLIVIER Y. Making deep q-learning methods robust to time discretization // Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning. 2019. Vol. 97. P. 6096–6104.

#### 4.27. Рудов М.С., Харлампенков И.Е., Потанов В.П. Поточковая обработка данных с датчиков IoT

Решение задачи контроля концентраций пылевого аэрозоля на территории предприятия требует непрерывного мониторинга в автоматическом режиме. Измерительное устройство регулярно отправляет данные IoT. Принимающая сторона должна работать в режиме постоянной готовности, поэтому возникает потребность в системе потокового сбора данных.

На данный момент нет полностью готового средства для получения данных с датчика IoT, но его можно реализовать на базе ETL (extract-transform-load) решений из числа Apache Airflow, Apache NiFi, StreamSets и т. д. [1] Важно отметить, что создаваемая процедура обработки данных должна быть ориентирована на поддержку нескольких типов датчиков и поддерживать преобразование данных к общему для системы формату.

Выбран Apache NiFi [2], так как он позволяет запускать процедуры обработки не только по расписанию, но и по факту получения данных (поточковый режим). К плюсам Apache NiFi относится и возможность в графической форме быстро создать ETL-процесс, множество готовых процессоров (получение данных по протоколам MQTT, S7, PLC4X и т. д. [3]), отправка в очереди сообщений, преобразования данных, выполнение запросов к базе данных), экспорт и импорт схемы решения, возможность реализовать свой процессор на Java.

Схема работы представлена следующим образом. Замеры принимаются по протоколу MQTT (ConsumeMQTT), данные конвертируются в JSON (ConvertRecord), из JSON по Jolt спецификации выделена и приведена к удобному виду именно та часть, которая нам необходима (JoltTransformJSON). В зависимости от типа пришедшего сообщения данные отправляются в очередь сообщений AMQP, сообщения, которые не прошли проверку по типу, удаляются. Данные сохраняются в базу данных и используются для дальнейшей обработки в системе.

В результате с помощью ETL-средства Apache

NiFi реализован приём данных с датчика IoT по протоколу MQTT, данные преобразованы к требуемому виду и отправлены в очередь сообщений.

#### Список литературы

- [1] ARTEM BARMIN Top 5 Enterprise ETL tools. [Электронный ресурс]. URL: <https://freshcodeit.com/freshcode-post/top-5-enterprise-etl-tools> (дата обращения 20.08.2022).
- [2] Apache NiFi. [Электронный ресурс]. URL: <https://nifi.apache.org/docs.html> (дата обращения 25.08.2022)
- [3] Language support for protocols. [Электронный ресурс]. URL: <https://plc4x.apache.org/users/protocols> (дата обращения 25.08.2022)

#### 4.28. Рылов С.А. Структуры данных для сеточной кластеризации мультиспектральных изображений

Алгоритмы кластеризации (разбиение данных на непересекающиеся подмножества по некоторой мере схожести) удобно использовать при решении многих прикладных задач. Сеточные алгоритмы кластеризации позволяют обрабатывать большие объемы данных и при этом способны выделять кластеры сложной, заранее неизвестной формы [1]. В связи с этим сеточные алгоритмы хорошо подходят для сегментации мультиспектральных спутниковых изображений. Однако на практике встает проблема применения сеточных алгоритмов кластеризации к данным высокой размерности, возникающая из-за экспоненциальной зависимости объема сеточной структуры от размерности пространства признаков [2].

В докладе предлагается новая структура данных для хранения многомерной сеточной структуры, позволяющая существенно сократить зависимость объема занимаемой памяти от размерности с помощью перехода к хранению информации только о непустых ячейках сеточной структуры. Кроме того, были реализованы многомерные сеточные структуры на основе использования хеш-таблиц HashMap из Java.Util и LongLongHashMap из библиотеки Eclipse Collections. Все разработанные структуры данных были внедрены в сеточный алгоритм кластеризации НСА [3].

Проведенные экспериментальные исследования реализованных подходов на мультиспектральных спутниковых изображениях показывают, что они позволяют проводить сеточную кластеризацию данных высокой размерности (от 5 до 10) при адекватных затратах памяти. При этом предложенная структура данных демонстрирует наилучшие результаты. Можно отметить, что, начиная с размерности 9, хорошо наблюдается эффект «проклятия размерности». Таким образом, проведенное исследование позволяет расширить возможности применения сеточных алгоритмов кластеризации к данным высокой размерности.

*Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 22-17-20012) при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.*

#### Список литературы

- [1] СИДОРОВА В. С. Гистограммный иерархический алгоритм и понижение размерности пространства спектральных признаков // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 6. С. 714–722.
- [2] ПЕСТУНОВ И. А., РЫЛОВ С. А., БЕРИКОВ В. Б. Иерархические алгоритмы кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений // Автоматика. 2015. Т. 51. № 4. С. 12–22.
- [3] RYLOV S. A., PESTUNOV I. A. Fast hierarchical clustering of multispectral images and its implementation on NVIDIA GPU // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1096. Art. 012039.

#### 4.29. Спасибко А.Б., Кривель С.М. Методика и программное обеспечение моделирования функционирования систем и определения их характеристик надежности

Работа посвящена решению актуальной задачи по созданию методики и унифицированного программного обеспечения, предназначенных для определения параметров функционирования систем с учетом характеристик их надежности. Целью работы является разработка программного комплекса, позволяющего эффективно создавать компьютерные модели функционирования систем с учетом их надежности и обоснование методических принципов использования этих моделей на этапах сопровождения эксплуатации систем и их проектирования. Методика основана на использовании метода структурных схем надежности. Базовым показателем надежности, позволяющим определить основные параметры функционирования системы, является вероятность безотказной работы системы и ее элементов. В качестве исходных данных моделирования используются характеристики надежности элементов системы. Программное обеспечение построено по идеологии унифицированного приложения (Toolbox) к системе динамического моделирования Simulink пакета Matlab. Представляет собой набор стандартных процедур определения характеристик надежности отдельных элементов и групп элементов, а так же блоков определения характеристик функционирования системы в целом и ее подсистем. Рассматриваются невосстанавливаемые и восстанавливаемые элементы систем. Приложение позволяет наглядно реализовать и изменять структурную схему надежности системы путем использования графических блоков и связей между ними в среде Simulink. Каждая элементарная операция расчета вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы надежности на основе заданных исходных данных и математических моделей элементов представлена в виде набора стан-

дартных блоков Simulink. Программное обеспечение обладает возможностью решать ряд оптимизационных задач на этапе проектирования систем с заданным уровнем надежности.

*Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Иркутского государственного университета для молодых ученых №091-22-304 «Методика, программный комплекс и исследование надежности систем на этапе проектирования на основе метода структурных схем».*

#### **4.30. Тен А.С., Сорокин А.А., Шестаков Н.В. Применение методов машинного обучения для поиска ковулканических ионосферных возмущений по данным ПЭС**

Использование данных полного электронного содержания (ПЭС), полученных на основе наблюдений глобальных навигационных спутниковых сетей (ГНСС-сетей) для исследования таких опасных природных явлений как землетрясения, цунами, геомагнитные бури, активно рассматривается все большим количеством исследователей. В последние годы начинают появляться работы, связанные с использованием данных ГНСС-сетей в исследованиях ответной реакции ионосферы на извержения вулканов. В них реконструируются значения ПЭС, представленные в виде временного ряда, которые затем исследуются на наличие ковулканических ионосферных возмущений. Большой объем инструментальной информации усложняет ее обработку. Одним из подходов к решению указанной проблемы является применение методов машинного обучения — искусственных нейронных сетей. На сегодняшний день не существует готовых эффективных автоматизированных систем для обнаружения ионосферных ковулканических возмущений, ассоциированных с извержениями вулканов, по данным ПЭС.

Для решения указанной задачи авторами рассматривается работа алгоритма на основе процедуры скользящего окна и классификатора. В качестве классификатора применяется нейронная сеть, обученная классифицировать входящие сегменты временного ряда, содержащие или не содержащие искомые ковулканические возмущения. В исследовании рассмотрена применимость некоторых популярных архитектур нейронных сетей на архивных инструментальных данных в задаче классификации ковулканических возмущений, проведен анализ точности классификации.

В качестве экспериментальных данных был использован архив за 15 и 16 июня 2009 г. с 18958 записями временных рядов ПЭС от 317 станций японской GEONET. Проведена разметка данных — выделены сегменты с ковулканическими возмущениями, затем с помощью процедуры скользящего окна сгенерировано пять наборов данных — с размерами образцов 5, 10, 20, 30 и 50 временных отметок двух классов: 1) нет возмущений (шум) и 2) есть

возмущения. На полученных наборах данных обучены и протестированы нейронные сети нескольких популярных архитектур с целью поиска ковулканических возмущений, ассоциированных с извержением вулкана Пик Сарычева в 2009 г. [1]. Вычислены значения метрики точности (ассигасы) оценки классификации, понимаемой как доля правильных ответов классификатора для каждой нейронной сети: полносвязный многослойный перцептрон (MLP) — 0.80, 0.82, 0.86, 0.88 и 0.90; полносвязная сверточная сеть (FCN) — 0.78, 0.79, 0.89, 0.92 и 0.97; остаточная нейронная сеть (ResNet) — 0.82, 0.82, 0.91, 0.94 и 0.96; InceptionTime — 0.81, 0.84, 0.90, 0.94 и 0.97; TSTransformer — 0.81, 0.81, 0.83, 0.86 и 0.86. Для сравнения, значение метрики точности алгоритмов Random Forest и HIVE-COTE на выборке с образцами размером 30 составляют 0.88 и 0.92, соответственно. Точность классификации отличается в зависимости от размера окна — для датасета с окном большего размера точность классификации выше. Большой размер окна более пригоден для сканирования архивов ПЭС, однако для использования в алгоритмах реального времени требуется окно меньшего размера.

По результатам проведенного исследования, можно сделать следующие выводы. В задаче классификации на экспериментальных данных рассмотренные архитектуры нейронных сетей, в целом, оказались применимы, но показали недостаточную точность и для дальнейшего использования в разрабатываемом универсальном алгоритме нуждаются в усовершенствовании. При достижении достаточной точности нейронные сети вполне пригодны для поиска ковулканических возмущений по данным ПЭС, в том числе в режиме реального времени для организации систем оперативного мониторинга вулканической активности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-27-00599).*

*Научный руководитель — к.т.н. Шестаков Н. В.*

#### **Список литературы**

- [1] SHESTAKOV N. ORLYAKOVSKIY A. PEREVALOVA N. ET AL. Investigation of ionospheric response to June 2009 Sarychev Peak volcano eruption // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. N. 4. P. 638.

#### **4.31. Третьяков Г.Н. Исследование модели MapReduce в сравнении с библиотекой MPI**

В последнее время среди технологий Big Data популярен Hadoop — свободно распространяемый набор утилит, библиотек и фреймворков для разработки и выполнения распределенных программ, работающих на кластерах из сотен и тысяч узлов. Среди основных характеристик Hadoop выделяют отказоустойчивость, масштабируемость и работу с распределенными вычислениями. Подобными характеристиками обладает и программный ин-

терфейс MPI (Message Passing Interface, библиотека, добавляющая поддержку механизма передачи сообщений в стандартные языки программирования), разработанный для обмена данными между процессами в параллельном программировании.

Как правило, MPI наиболее распространён для обмена данными в параллельном программировании и применяется при разработке программ для кластеров и суперкомпьютеров, а также при решении задач, связанных с научным моделированием. MapReduce — это модель программирования, которая абстрагирует параллельные программы с помощью двух операторов — Map и Reduce. При больших наборах данных и невозможности обработки на одном компьютере применяются такие реализации MapReduce, как Hadoop.

Модель программирования MapReduce можно понимать, как подмножество функциональной части MPI, так как она представляет из себя стандартный функционал MPI с пользовательскими операциями. Таким образом, можно использовать MPI вместо MapReduce, но не наоборот, так как MPI описывает гораздо больше операций. Основным преимуществом же MapReduce и технологии Hadoop, в которой эта модель используется, является концентрация на единой параллельной концепции, что позволяет изучить ее в сроки, гораздо более короткие, чем MPI.

В данный момент функционал Hadoop и его применение в научном моделировании изучено не в полной мере, т. к. технология считается относительно новой. Отсюда вытекает и последующая проблема — свойства Hadoop, требующие дальнейшего исследования, и их особенность по сравнению с MPI.

В работе было проведено исследование отказоустойчивости и масштабируемости для параллельных задач с использованием инструментов и утилит Hadoop. Определены направления для дальнейшего его развития.

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

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

#### **4.32. Урманов И.П., Сорокин А.А., Дутчина А.И. Развитие алгоритмов для обнаружения термальных аномалий на изображениях вулканов**

В докладе представлены результаты исследований, связанные с разработкой алгоритмов обнаружения термальных аномалий на фотоснимках вулканов. Речь идет об изображениях, снятых в широком диапазоне, включающем видимый и ближний инфракрасные спектры. На таком изображении яркие области могут соответствовать не только высокотемпературным объектам (термальным аномалиям), но и антропогенным или солнечным засветкам, облакам, снежному покрову и т. п. Цель работы создать эффективные решения для анализа изображений

и фиксации на них термальных аномалий с последующей оценкой их базовых характеристик.

Коллективом авторов из ВЦ ДВО РАН был разработан алгоритм обнаружения термальных аномалий [1]. Он состоит из трех последовательных действий: поиск аномалий, вычисление их признаков и классификация аномалий. В основе поиска аномалий на снимке лежит детектор особых точек SIFT, который позволяет определять центры аномалий. Далее вокруг найденных центров поиском в ширину вычисляются области аномалий. Чтобы отделить «термальные» аномалии от «не термальных» по каждой области вычисляется 7 признаков аномалий, которые затем используются для классификации аномалий методом опорных векторов. Предварительно набор признаков нормализуется и преобразуется методом главных компонент. Для обучения алгоритма использовались 40 снимков на которых вручную размечено 29 «термальных» аномалий и 412 «не термальных».

Апробация алгоритма была проведена на снимках вулкана Шивелуч за 2021 г. Основная цель этой работы заключалась в проверке эффективности алгоритма в различных условиях освещения и внешнего вида вулкана, которые меняются в зависимости от времени года и суток. Снимки с обнаруженными термальными аномалиями были проверены вручную. Выявлена ложная классификация областей снежного покрова в зимний период времени и областей, образуемых облаками на фоне засветки во время восхода и заката. Для устранения указанных проблем были проведены работы по расширению обучающей выборки, вычислению дополнительных признаков аномалий, подбору гиперпараметров алгоритма. На первом этапе была подготовлена обучающая выборка из 74 снимков, содержащих 43 термальных и 865 не термальных аномалий. Включая 8 снимков со снежным покровом, 14 с термальными аномалиями, 12 с облаками на фоне засветки.

Далее были сформированы дополнительные признаки, позволяющие выделить термальные аномалии среди остальных светлых областей: среднее и стандартное отклонение значений пикселей области аномалии, высота, ширина и отношение высоты к ширине описывающего прямоугольника.

На следующем этапе в обучение алгоритма добавлена процедура отбора признаков на основе распределения Хи-квадрат, позволяющих наилучшим образом классифицировать аномалии. В ходе исследования отобрано 10 признаков из 12, отброшены: коэффициент асимметричности и ширина описывающего прямоугольника.

Представленный алгоритм и алгоритм из работы [1] были протестированы на новой обучающей выборке с применением кросс-валидации и разбиением набора данных на 5 частей, для оценки каче-



ства алгоритмов использовалась F1-мера. Точность алгоритмов составила 94% и 63% соответственно.

Дальнейшая работа направлена на вычисление характеристик термальных аномалий, таких как площадь, интенсивность аномалии и т. п.

#### Список литературы

- [1] УРМАНОВ И. П., КОРОЛЁВ С. П., КАМАЕВ А. Н. Компьютерная система для поиска и оценки термальных аномалий на снимках вулканов // Системы высокой доступности. 2021. № 4. С. 55–65.

#### 4.33. *Фереферов Е. С., Спасько А. Б.* Информационная система поддержки геоархеологических исследований

Геоархеологические исследования — сложный процесс, требующий использования современных методов обработки данных, информационных технологий и инструментов. Объем получаемой информации часто приближается к большим данным, что предъявляет повышенные требования к используемым системам управления базами данных и техническим средствам хранения данных. Формирование новых стандартов описания геоархеологических исследований и разработка на их основе информационных систем (ИС) требуют использования инструментальных средств, которые обеспечивают гибкий процесс модернизации систем на протяжении всего жизненного цикла.

Для автоматизации геоархеологических исследований предложена архитектура «Виртуального геоархеологического репозитория Байкальской Сибири». На сервере под управлением ОС Windows Server развернута основная полнофункциональная часть репозитория, в состав которого входят базы данных и подсистемы ИС «Геоархеология», спецификации подсистем и инструментальная система «ГеоАРМ». Надежность хранения данных достигается за счет зеркалирования баз данных и файлов репозитория в сетевую систему хранения данных. Под управлением Ubuntu развернут геопортал, предназначенный для презентации законченных результатов исследований.

Для повышения скорости создания и гибкости сопровождения подсистем использован подход, ориентированный на модель, содержащую достаточную информацию для автоматического создания пользовательских интерфейсов приложений БД, обеспечивающих поддержку выполнения CRUD-функций, построения запросов и взаимодействия с пространственными данными. В качестве средства хранения и представления моделей приложений БД используются декларативные спецификации [1, 2], которые обеспечивают достаточно детальное и компактное описание необходимых элементов подсистем. Готовые спецификации могут быть использованы для автоматического создания как настольных, так и web-систем.

Для автоматизации разработки подсистем используется инструментальная система «ГеоАРМ» [3]. «ГеоАРМ» обеспечивает интерактивное формирование всех элементов моделей приложений БД и динамическое создание подсистем в результате интерпретации созданных спецификаций. Каждый стандарт, разработанный сотрудниками НИЦ «Байкальский регион», содержит уже готовый набор атрибутов, связей между ними и является основой для разработки структур таблиц баз данных и моделей конкретных подсистем.

Разработанная ИС предоставляет пользователям доступ к картографическим, фотографическим базам данных, инструментам для визуализации и анализа данных. Предполагается два режима взаимодействия с репозиторием: полнофункциональный (закрытый) и общий (презентационный). Инструментальная система «ГеоАРМ» поддерживает взаимодействие с внешними подсистемами, что позволяет расширять функциональность приложений без изменения кода самой системы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ (грант № 075-15-2019-866 «Байкальская Сибирь в каменном веке: на перекрестке миров»).*

#### Список литературы

- [1] ФЕРЕФЕРОВ Е. С., БЫЧКОВ И. В., ХМЕЛЬНОВ А. Е. Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 5. С. 85–100.
- [2] BYCHKOV I. V., HMELNOV A. E., FEREFEROV E. S. ET AL. Methods and tools for automation of development of information systems using specifications of database applications // Proc. of the 3rd Russian-Pacific Conf. on Computer Technology and Applications (RPC 2018). Vladivostok, 2018. P. 1–6.
- [3] HMELNOV A. E., FEREFEROV E. S. Development of cross-platform problem-oriented systems using specifications of database applications // CEUR Workshop Proceedings. 2019. Vol. 2463. P. 59–69.

#### 4.34. *Черных В. Ю., Степнов А. А., Сорокин А. А.* Автоматизация рутинной обработки сейсмических данных методами машинного обучения

Основной вид инструментальных данных в сейсмологии — это непрерывные записи движения грунта (смещения, скорости, ускорения), регистрируемые сейсмическими станциями, как правило, объединёнными в сети наблюдений на определенной территории. Получаемая таким образом информация является основой для детектирования и комплексного исследования землетрясений. С активным развитием сетей наблюдений и возможностей приборной базы происходит кратный рост объема данных, что создает большие сложности в обработке информации, основанной, как правило, на ручном труде специалистов. В связи с этим, существует

актуальная задача, связанная с разработкой современных масштабируемых методов и технологий обработки инструментальных данных, способных оперативно производить анализ сейсмологических данных по различным направлениям. Наиболее перспективным и востребованным подходом в решении рассматриваемых задач являются методы машинного обучения, обеспечивающие баланс между точностью и скоростью работы алгоритмов.

В рамках исследования был разработан метод машинного обучения, классифицирующий небольшие фрагменты данных на участки, содержащие вступления сейсмических волн, и на прочие (шум). Созданная нейросеть Seismo-Performer [1] анализирует спектрограммы сейсмограмм и не имеет в своем составе сверточных слоев. Нейросеть состоит из небольшого, по сравнению с аналогами, количества обучаемых параметров — 57 тыс. (популярный аналог — GPD включает в себя 1.742 млн. параметров). Небольшое число параметров позволяет достичь высокой производительности: Сканирование 24-часовой трехканальной сейсмограммы созданная нейросеть выполняет в среднем на 47.3% быстрее самого быстрого аналога и на 119.9% быстрее самого медленного ( $56.2 \pm 0.3$  с против  $82.8 \pm 0.3$  с и  $123.6 \pm 0.4$  с). Схожие преимущества наблюдаются и в скорости обучения нейросети.

Seismo-Performer демонстрирует лучшую способность к обобщению. Оценка была проведена с использованием массивов сейсмограмм из двух разных источников: Сахалин, Дагестан и Северная Калифорния, в ходе которой Seismo-Performer продемонстрировал стабильное преимущество при распознавании сейсмических волн на данных из источника, отличного от того, на котором была обучена нейросеть. Среднее преимущество в точности оценки (над GPD) в таких условиях составило 4.58%.

Проведенное обучение и оценка эффективности нейросетей требовали сбора большого массива сейсмических данных. Требования к подготовке и составу данных зависят от особенностей их дальнейшего применения и могут определять методы предварительной обработки, типы разрешенных сейсмических инструментов и т. д. Для автоматизации процесса сбора таких массивов был разработан настраиваемый алгоритм, развертываемый на содержащих архивы сейсмических наблюдений машинах, и автоматизирующий решение задачи выборки данных для обучения и оценки методов машинного обучения. Полученный комплекс программ затем использовался для сбора массива данных с о. Сахалин (9.8 тыс. сейсмограмм) и с р. Дагестан (28.1 тыс. сейсмограмм). В ходе выработки алгоритма также был проведен анализ различных методов предварительной обработки сейсмических данных и их влияние на эффективность применения нейросетей.

Использование методов машинного обучения

для пособия рутинной ручной обработке сейсмических данных предполагает разработку автоматизирующего алгоритма. Алгоритм, выработанный для решения данной задачи, исследует поступающие в реальном времени (или собранные архивы) данных выбранным методом машинного обучения, используя процедуру скользящего окна. Разработанное решение уже находится в ежедневной эксплуатации на сети сейсмических наблюдений о. Сахалин.

Дальнейшим направлением развития является интеграция методов машинного обучения в сейсмический блок автоматизированной информационной системы «Сигнал».

#### Список литературы

- [1] STEPNOV A., CHERNYKH V., KONOVALOV A. The Seismo-Performer: generally based and efficient machine learning approach for recognition seismic phases from local earthquakes in real time // Sensors. 2021. Vol. 21 (18). P. 6290.

#### 4.35. Чирко Р.А., Урманцева Н.Р. Система анализа результатов неинвазивных исследований нижней полой вены пациента на базе сверточной нейронной сети

Тенденции нашего времени заключаются в бурном росте информатизации почти абсолютно во всех областях человеческой деятельности. В результате появляется потребность в системах, способных хранить и обрабатывать большие объемы данных. В наше время искусственный интеллект, а именно нейронные сети, широко используются в системах в области медицины.

СППР (система поддержки принятия решений) построена на базе сверточной нейронной сети. Ее задачей является анализ DICOM снимков пациентов и присвоения кода классификации заболевания по CEAP (Clinical-Etiological-Anatomical-Pathophysiological). Значимость работы заключается в том, что на данный момент отсутствуют системы, реализующие подобный функционал. Система поможет в процессе принятия решений врачу — флебологу и снизит его загруженность. Для создания алгоритма был выбран язык программирования Python, так как в нем есть все необходимые библиотеки для работы с нейронными сетями [1].

На вход в СППР подается результат неинвазивного исследования пациента — DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) снимок, задача алгоритма распознать случай заболевания нижней полой вены и поставить класс заболевания согласно CEAP [2]. Анализ осуществляется с помощью сверточной нейронной сети. Именно сверточная нейронная сеть способна дать более точный результат распознавания [3]. Алгоритм состоит в следующем: загруженный в программу DICOM снимок обрезается, наносится фильтр контрастности, загружается в нейронную сеть и затем выводится

результат на экран пользователя. Параметры контрастирования подбирались опытным путем. Метод контрастности помог добиться более высокой результатов распознавания, так точность распознавания находится в пределах 80–99%. Усредненная вероятность распознавания клинических классов хронических заболеваний вен нижних конечностей получилась равной 92.6%. На основе полученной вероятности можно сделать вывод, что нейронная сеть с высокой точностью определяет класс патологии.

В дальнейшем планируется продолжить разработку программы, расширение функционала, переход на web-приложение в связи с тем, что для вычислений результатов нейронной сетью требуются ресурсы ПК (персональный компьютер). Переход на web-приложение поможет существенно снизить нагрузку на рабочий ПК врача-флеболога.

#### Список литературы

- [1] ТАРШХОВЕВА Ж. Т. Язык программирования Python. Библиотеки Python // Молодой ученый. 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.
- [3] MISHRA M. Сверточная нейронная сеть (CNN). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.helenkapatsa.ru/sviortochnaia-neironnaia-siet> (дата обращения 01.09.2022).

#### 4.36. Шакин В.Ю., Сухов Ф.В. Разработка модуля идентификации для системы роботизированной маркировки образцов керн

Ручная маркировка образцов керн занимает длительное время, из-за чего существенно затягивается процесс лабораторных исследований, поэтому внедрение автоматизированной системы маркировки очень актуально для крупных нефтегазовых компаний. Основной целью представленной работы является разработка модуля идентификации текста на образце керн для системы роботизированной маркировки, над созданием которой работает новосибирская компания АО «Геологика». Модуль идентификации текста необходим для проверки качества маркировки, произведённой системой. Он представляет собой клиент-серверное приложение, написанное на языке Python. В разработке используется следующий стек технологий:

- Python 3.9 — язык программирования;
- Roboflow — приложение для разметки данных и создания выборок, использующихся для обучения нейронной сети [1];
- YOLOv5 — современный алгоритм глубокого обучения, который широко используется для обнаружения объектов [2];
- Tesseract-OCR — библиотека для распознавания текста, написанная на языке C++ [3];
- Docker — платформа для разработки, доставки и запуска контейнерных приложений [4].

Процесс идентификации текста был разделён на два этапа: на начальном этапе фото (скан) образца обрабатывается с помощью нейронной сети, которая определяет участки, на которых содержится текст и вырезает их с основного фото, на основном этапе происходит распознавание текста на каждом из кусочков с помощью Tesseract-OCR. Применение комбинации нейронной сети и Tesseract-OCR позволило существенно повысить точность распознавания текста на образце керн.

Работа клиент-серверного приложения происходит следующим образом: оператор вводит номер фото (скана) образца, после чего происходит отправка данных на сервер в формате «json». Сервер при помощи нейронной сети и Tesseract-OCR определяет текст на образце керн и отправляет оператору json-файл с результатами работы: номером запроса, текстом. С помощью Docker был создан контейнер, содержащий все необходимые зависимости для корректной работы приложения на ПК стороннего пользователя. На данный момент происходит интеграция модуля идентификации в разрабатываемую систему.

*Научный руководитель — к.т.н. Ланграф С.В.*

#### Список литературы

- [1] Roboflow documentation. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/opencv-ai/roboflow> (дата обращения 01.07.2022).
- [2] YOLOv5 documentation. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.ultralytics.com> (дата обращения 05.07.2022).
- [3] Tesseract-OCR documentation. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract> (дата обращения 06.07.2022).
- [4] Docker, official site. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.docker.com> (дата обращения 08.07.2022).

#### 4.37. Щеголева А.И. Использование теоретико-информационного метода, основанного на сжатии данных, для исследования проблем перевода

Литературоведы при анализе переводов делают выводы о том, насколько исследуемая работа близка к оригинальному произведению. Но также существует другая точка зрения, изложенная К.И. Чуковским в работе «Высокое искусство»: «Перевод — это автопортрет переводчика». Таким образом, существует задача определения «качества перевода», которая привлекает большое внимание читателей, критиков, текстологов и литературоведов, а значит и существует потребность в количественной оценке вкладов переводчиков в переведенные произведения, которая в свою очередь требует применения современных компьютерных технологий и подходов из других дисциплин, например, математической статистики.

Цель данной работы — разработать количественную оценку степени сохранения переводчиком ори-

гинального стиля автора и создать метод, позволяющий объективно определять степень точности и близости перевода к оригиналу. А также реализовать программы для проведения исследования различных переводов литературных произведений. Для достижения этого был адаптирован теоретико-информационный метод [1], предложенный для атрибуции литературных текстов, а также были проанализированы различные переводчики и созданы их обучающие выборки.

С помощью выбранного метода, который не использовался ранее для анализа переводов, были рассмотрены переводы литературных произведений с английского языка на русский и получены статистически обоснованные результаты относительно сохранения различными переводчиками стилей авторов оригинальных произведений. Также реализованное решение можно использовать для анализа переводов на другие языки. По итогам работы был разработан метод определения качества перевода, считая, что перевод тем лучше, чем больше сохраняется стиль писателя и чем меньше проявляется стиль переводчика. Разработанное программное решение позволяет быстро определять некачественные опубликованные ранее переводы.

*Научный руководитель — д.т.н. Рябко Б. Я.*

#### Список литературы

- [1] RYABKO B., SAVINA N. Using data compression to build a method for statistically verified attribution of literary texts // *Entropy*. 2021. Vol. 23. N. 10. Art. 1302.

#### 4.38. Щирый А.О. Пересчет максимальных наблюдаемых частот различных мод ионосферного распространения коротковолнового радиосигнала с использованием регрессионного анализа

Короткие радиоволны (КВ) могут распространяться на многие тысячи километров путем многократных последовательных отражений от ионосферы и земной поверхности. Максимальной наблюдаемой частотой (МНЧ) данной моды ионосферного распространения КВ-радиосигнала называется верхняя граница частотного диапазона распространения данной моды. Например, МНЧ2F это МНЧ моды распространения КВ двукратным отражением от слоя F (строго говоря, слоя F2, но т.к. отражения от слоев E, Es, F1 наблюдаются достаточно редко на трассах длиной 2500-5700 км, далее рассматриваются только моды F2).

Так радиолиния Хабаровск — Йошкар-Ола — «двухскачковая» (более 7000 км), т. е. на ионограммах наблюдаются моды, начиная с 2F2. А радиолинии Кипр—Й.-Ола или (субарктическая) Диксон — Москва — «односкачковые», наблюдаются моды, начиная с 1F2. При радиозондировании ионосферы, в частности, при наклонном зондировании ионосферы (НЗИ), МНЧ мод могут оказаться за пределом

(выше) диапазона частот зондирования, однако иногда оценить эти МНЧ нужно [1].

Известные методы расчета МНЧ достаточно сложны, например, в методе [2] для такого расчета нужно знать критические частоты ионосферных слоев, которые нельзя определить по ионограмме НЗИ (для этого нужны данные вертикального зондирования). Возникла идея для расчета МНЧ мод, выходящих за пределы ионограммы, использовать МНЧ мод более высоких порядков. Действительно, исследования показали наличие сильной корреляции (более 0.9) между МНЧ мод 1-го и 2-го порядков (по ионограммам с обеими МНЧ).

Таким образом, ионограммы, содержащие МНЧ мод 1-го и 2-го могут быть использованы для нахождения коэффициентов уравнения линейной регрессии, что позволит для ионограмм не содержащих МНЧ моды 1-го порядка, рассчитывать эту МНЧ по МНЧ моды 2-го порядка. В итоге получены простые выражения для расчета МНЧ мод, выходящих за пределы частотного диапазона ионограммы, по МНЧ мод более высоких порядков.

#### Список литературы

- [1] Щирый А. О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербургский гос. ун-тет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, СПб., 2007. 19 с.
- [2] АГАРЫШЕВ А. И. Метод расчета максимальных наблюдаемых частот при двухскачковом распространении декаметровых радиоволн // *Радиотехника*. 1985. № 4. С. 67–70.

#### 4.39. Яковлев Г.А. Алгоритмы защиты данных в облачной СУБД

В докладе представлены результаты анализа алгоритмов обеспечения безопасности в облачной системе управления базами данных (СУБД) в недоверенной среде, лежащие в основе решений ZeroDB, CryptDB [1], Arx с использованием разного рода криптографических алгоритмов: PHE, FHE (гоморфное шифрование), OPE (сохраняющие порядок шифрование). Приведено сравнение и описание особенностей алгоритмов для линейного поиска, поиска со сравнением, вычисления функций агрегирования и объединения запросов.

Выявлены следующие проблемы: 1) детерминированное шифрование (DE) сохраняет частоты открытых текстов в шифротекстах (что позволяет проводить частотный анализ); 2) схема OPE является детерминированной, и в случае, если данные открытого текста плотные (встречается каждый возможный открытый текст), тогда злоумышленник с моментальным снимком (копия диска с БД) может узнать соответствующие открытые тексты (т. е. просто упорядочить шифротексты и получить открытые тексты); 3) при использовании OPE происхо-

дит утечка информации об открытом тексте, поэтому следует изучить последствия для конфиденциальности; 4) для вычислений над данными безопасность зависит от выбранной схемы гомоморфного шифрования и предоставленных гарантий безопасности (например безопасность аналогично симметричному шифрованию со 128-битным ключом); 5) схемы шифрования с возможностью поиска (SSE) раскрывают количество ключевых слов и могут раскрывать количество повторений каждого ключевого слова (в некоторых конфигурациях).

В докладе будут приведены результаты сравнения алгоритмов по уровню безопасности, используемых в современных защищенных СУБД, представлены известные алгоритмы защиты данных и описаны потенциальные проблемы предлагаемых архитектур и алгоритмов для реализации в защищенных СУБД. Результаты работы будут полезны при анализе безопасности СУБД, оценке возможных потерь производительности, а также могут быть использованы с целью определения наиболее подходящих алгоритмов защиты данных для реализации в собственной защищенной СУБД.

#### Список литературы

- [1] DE CAPITANI DI VIMERCATI S., FORESTI S., LIVRAGA G., SAMARATI P. Practical techniques building on encryption for protecting and managing data in the cloud / The New Codebreakers. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. P. 205–239.

## Алфавитный указатель

### Абгарян Гарник Владимирович

*Казанский (приволжский) федеральный университет (Казань), Россия*

*g.v.abgaryan@gmail.com*

Стр. 6

### Акинъшин Андрей Александрович

*Huawei Research (Санкт-Петербург), Россия*

Стр. 21

### Али Мохаммад Фуркан

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*

*ali89@tpu.ru*

Стр. 43

### Аносова Елизавета Петровна

*Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа), Россия*

*elizavetaanosova.0809@gmail.com*

Стр. 7

### Аношин Сергей Александрович

*Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия*

*s.anoshin@g.nsu.ru*

Стр. 37

### Апарин Александр Александрович

*Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Иваново), Россия*

*aparin.ivanovo-37@yandex.ru*

Стр. 47

### Архипов Егор Дмитриевич

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*

*eda6@tpu.ru*

Стр. 7

### Афанасенков Александр Александрович

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск), Россия*

*afanasenkov4@gmail.com*

Стр. 43

### Бабенко Михаил Александрович

*Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия*

*m.babenko@g.nsu.ru*

Стр. 7

**Бакиров Виктор Александрович**

ООО «СитиЭйр» (Новосибирск), Россия

bakirov\_viktor@vk.com

Стр. 47

**Башмаков Р. А.**

Стр. 39

**Белоногов Владимир Андреевич**

Югорский государственный университет (Ханты-Мансийск), Россия

vladimir.belonogow@yandex.ru

Стр. 8

**Богданов Никита Максимович**

Сколковский институт науки и технологий (Москва), Россия

Стр. 22

**Болдаков Валерий Сергеевич**

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Новосибирск), Россия

valboldakov@gmail.com

Стр. 48

**Бородина Анжелика Алексеевна**

Томский государственный университет (Томск), Россия

anzhelika.borodina.00@bk.ru

Стр. 9

**Ботороева Мария Николаевна**

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН (Иркутск), Россия

masha888888@mail.ru

Стр. 10

**Будникова Ольга Сергеевна**

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН (Иркутск), Россия

osbud@mail.ru

Стр. 10

**Булавская Ангелина Александровна**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия

Стр. 35, 41

**Буравлева М. Э.**

Стр. 53

**Буяков А. С.**

Стр. 17

**Ван Ли**

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

l.van3@g.nsu.ru

Стр. 11

**Васильев Егор Вадимович**

Дальневосточный федеральный университет (Владивосток), Россия

vasilev.eva@dvvfu.ru

Стр. 11

**Вирц Рудольф Александрович**

Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия

virtsrudolf@gmail.com

Стр. 12

**Воробьева Вера Павловна**

Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ), Россия

Стр. 12

**Воробьева Диана Александровна**

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия

d.vorobeva@g.nsu.ru

Стр. 13

**Воропаева Екатерина Сергеевна**

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Новосибирск), Россия

kate.voropaeva@gmail.com

Стр. 14

**Галиакбарова Эмилия Вильевна**

Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа), Россия

emi.galiakbar@yandex.ru

Стр. 14

**Гарбузов Дмитрий Николаевич**

Томский государственный университет (Томск), Россия

dmitrij.garbuzov.98@mail.ru

Стр. 15

**Гатиятуллина Диана Дамировна**

Томский государственный университет (Томск), Россия

gdiana0510@gmail.com

Стр. 15

**Глухов Илья Викторович**

Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет) (Долгопрудный), Россия

ilya.v.glukhov@gmail.com

Стр. 48

**Голубев Роман Андреевич**

*Институт вычислительного моделирования  
СО РАН (Красноярск), Россия*  
roma\_golubev1999@bk.ru  
Стр. 16

**Голубничий Егор Николаевич**

*Томский государственный университет (Томск),  
Россия*  
golubnichii\_egor@mail.ru  
Стр. 16

**Гондюл Елена Александровна**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им.  
А.А. Трофимука СО РАН (Новосибирск), Россия*  
gondyulea@gmail.com  
Стр. 16

**Городилов Даниил Владимирович**

*Федеральный исследовательский центр информа-  
ционных и вычислительных технологий (Новоси-  
бирск), Россия*  
dealenx@yandex.ru  
Стр. 49

**Горынин Арсений Глебович**

*Новосибирский государственный университет  
(Новосибирск), Россия*  
arsgorynin@yandex.ru  
Стр. 17

**Григорьев Александр Сергеевич**

*Институт физики прочности и материаловедения  
СО РАН (Томск), Россия*  
grigoriev@ispms.ru  
Стр. 17

**Григорьева Анна Анатольевна**

*Национальный исследовательский Томский поли-  
технический университет (Томск), Россия*  
a.grig.work@gmail.com  
Стр. 18, 35, 41

**Гуань Сюэлинь**

*Новосибирский государственный университет  
(Новосибирск), Россия*  
s.guan@g.nsu.ru  
Стр. 18

**Губанов Сергей Александрович**

*Санкт-Петербургский филиал АО «Конструктор-  
ское бюро «Луч» (Санкт-Петербург), Россия*  
segubanov@mail.ru  
Стр. 50

**Гуськов Андрей Евгеньевич**

*Российский научно-исследовательский инсти-  
тут экономики, политики и права в научно-  
технической сфере (Новосибирск), Россия*  
guskov.andrey@gmail.com  
Стр. 58

**Данилов Максим Николаевич**

*Новосибирский государственный архитектурно-  
строительный университет (Сибстрин) (Новоси-  
бирск), Россия*  
daniilov@sibstrin.ru  
Стр. 50

**Долгая Анна Андреевна**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
(Петропавловск-Камчатский), Россия*  
adolgaya@kscnet.ru  
Стр. 51

**Дутчина Анастасия Игоревна**

*Вычислительный центр ДВО РАН (Хабаровск),  
Россия*  
adutchina@gmail.com  
Стр. 64

**Дымнич Екатерина Михайловна**

*Институт физики прочности и материаловедения  
СО РАН (Томск), Россия*  
Стр. 9

**Егоров Никита Михайлович**

*Саратовский государственный технический уни-  
верситет им. Гагарина Ю.А. (Саратов), Россия*  
egorovnm@sstu.ru  
Стр. 44

**Емельянова Евгения Сергеевна**

*Томский государственный университет (Томск),  
Россия*  
emelianova@ispms.ru  
Стр. 19, 29

**Ефимов Евгений Александрович**

*Институт вычислительного моделирования  
СО РАН (Красноярск), Россия*  
eugene6467@mail.ru  
Стр. 44

**Ефремова Инна Сергеевна**

*Федеральный исследовательский центр информа-  
ционных и вычислительных технологий (Красно-  
ярск), Россия*  
efremovais00@mail.ru  
Стр. 52

**Зеленая Анна Эдуардовна**

*Институт физического материаловедения  
СО РАН (Улан-Удэ), Россия*  
Стр. 12

**Зиновьева Ольга Сергеевна**

*UNSW Canberra Australian Defence Force Academy  
(Канберра), Австралия*  
Стр. 28

**Индуцкая Татьяна Сергеевна**

*Институт динамики систем и теории управления  
им. В.М. Матросова СО РАН (Иркутск), Россия*  
indutskaya.tat@yandex.ru  
Стр. 10, 10, 20

**Исаева Екатерина Максимовна**

*Поволжский государственный университет теле-  
коммуникаций и информатики (Самара), Россия*  
sadusaaduu@gmail.com  
Стр. 52

**Истомина Виктория Олеговна**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
(Петропавловск-Камчатский), Россия*  
lil\_schulz@mail.ru  
Стр. 51

**Кагенов Ануар Магжанович**

*Томский государственный университет (Томск),  
Россия*  
Стр. 24

**Кайгородцева Анастасия Андреевна**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
СО РАН (Новосибирск), Россия*  
nastyakaig@gmail.com  
Стр. 20

**Кармушин Степан Романович**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
СО РАН, Новосибирский государственный универ-  
ситет (Новосибирск), Россия*  
stepan.karmushin@yandex.ru  
Стр. 21

**Карпенко А. А.**

Стр. 37

**Касымов Д. П.**

*Томский государственный университет (Томск),  
Россия*  
Стр. 16

**Кириллова Наталья Евгеньевна**

*Новосибирский государственный университет  
(Новосибирск), Россия*  
n.kirillova@g.nsu.ru  
Стр. 21

**Кликно Давыд Денисович**

*Сибирский федеральный университет (Красно-  
ярск), Россия*  
kliknodavid@mail.ru  
Стр. 53

**Клименко Александра Игоревна**

*Институт цитологии и генетики СО РАН (Но-  
восибирск), Россия*  
Стр. 13

**Ключанцев Владислав Сергеевич**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
СО РАН (Новосибирск), Россия*  
vsklyuchantsev@gmail.com  
Стр. 22

**Козлова Софья Владимировна**

*Институт вычислительного моделирования  
СО РАН (Красноярск), Россия*  
sofiya\_cohen@mail.ru  
Стр. 53

**Козьмин Артём Дмитриевич**

*Новосибирский государственный университет  
(Новосибирск), Россия*  
a.kozmin@g.nsu.ru  
Стр. 54

**Колганова Александра Олеговна**

*Московский государственный технический универ-  
ситет им. Н.Э. Баумана (Москва), Россия*  
kolganchik@gmail.com  
Стр. 45

**Кондратьев Дмитрий Александрович**

*Институт систем информатики им. А.П. Ершо-  
ва СО РАН (Новосибирск), Россия*  
apple-66@mail.ru  
Стр. 54

**Кононов Михаил Николаевич**

*Северо-Кавказский федеральный университет  
(Ставрополь), Россия*  
mikhail\_kononov\_2014@mail.ru  
Стр. 55

**Корнеева Анастасия Александровна**

*Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева  
(Самара), Россия*  
korneeva2002@mail.ru  
Стр. 32



**Коробова Ирина Александровна**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН (Москва), Россия  
i-soldatova@bk.ru  
Стр. 46

**Король Алена Олеговна**

Дальневосточный федеральный университет (Владивосток), Россия  
Стр. 11

**Королёв Сергей Павлович**

Вычислительный центр ДВО РАН (Хабаровск), Россия  
serejk@febras.net  
Стр. 55

**Корякин Илья Алексеевич**

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия  
Стр. 56

**Костюченко Татьяна Сергеевна**

Сколковский институт науки и технологий (Москва), Россия  
Tatiana.Kostiuchenko@skoltech.ru  
Стр. 22

**Косяков Денис Викторович**

Российский научно-исследовательский институт экономики, политики и права в научно-технической сфере (Новосибирск), Россия  
Стр. 58

**Кривель Сергей Михайлович**

Иркутский государственный университет (Иркутск), Россия  
krivel66@mail.ru  
Стр. 62

**Кузнецов Кирилл Сергеевич**

Дальневосточный федеральный университет (Владивосток), Россия  
kuznetsovks17@gmail.com  
Стр. 23

**Кулясов Никита Владимирович**

Институт вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск), Россия  
razor@icm.krasn.ru  
Стр. 53, 56

**Лапшина А. А.**

Стр. 17

**Ларкин Дмитрий Олегович**

Томский государственный университет (Томск), Россия  
mister.larkin.dima@mail.ru  
Стр. 24

**Лебедев Роман Константинович**

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия  
n0n3m4@gmail.com  
Стр. 56

**Левшин Михаил Артемович**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия  
mal23@tpu.ru  
Стр. 7

**Лемешев Виталий Сергеевич**

Дальневосточный федеральный университет (Владивосток), Россия  
vitalya.lemeshev.97@mail.ru  
Стр. 24

**Ли Хаоянь**

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия  
russianmlhy@mail.ru  
Стр. 25

**Ликсонова Дарья Игоревна**

Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия  
LiksonovaDI@yandex.ru  
Стр. 57

**Луцык Василий Иванович**

Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ), Россия  
Стр. 12

**Мальшева Александра Валерьевна**

Российский научно-исследовательский институт экономики, политики и права в научно-технической сфере (Новосибирск), Россия  
a.bagirova@riep.ru  
Стр. 58

**Мельников Константин Алексеевич**

Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ), Россия  
umka18@yandex.ru  
Стр. 12

**Мерзоева Лема Руслановна**

Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия  
l.merzhoeva@g.nsu.ru  
Стр. 25

**Мешкова Виктория Дмитриевна**

*Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия*  
Стр. 41

**Милойчикова Ирина Алексеевна**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*  
Стр. 18, 35

**Миргородский Николай Владимирович**

*Институт математики и механики УрО РАН (Екатеринбург), Россия*  
mrhomka.com@gmail.com  
Стр. 61

**Михаханова Татьяна Сергеевна**

*Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия*  
t.mikhakhanova@g.nsu.ru  
Стр. 26

**Мищенко Евгения Васильевна**

*Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия*  
e.mishchenko@g.nsu.ru  
Стр. 18

**Моисеева Татьяна Владимировна**

*Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт проблем управления сложными системами РАН (Самара), Россия*  
Стр. 52

**Мошкин Дмитрий Андреевич**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*  
dam41@tpu.ru  
Стр. 26

**Мятишкин Юрий Владимирович**

*Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт проблем управления сложными системами РАН (Самара), Россия*  
Стр. 52

**Нагаева Зилия Мунировна**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа), Россия*  
Стр. 7

**Назаров Никита Андреевич**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск), Россия*  
nazarov.nik.an@gmail.com  
Стр. 58

**Найденова Кристина Евгеньевна**

*Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия*  
kristina-akulova00@mail.ru  
Стр. 27

**Нехорошева Ольга Андреевна**

*Томский государственный университет (Томск), Россия*  
olga0810.00@mail.ru  
Стр. 28

**Никулин Владимир Сергеевич**

*Новосибирский государственный университет экономики и управления (Новосибирск), Россия*  
nikulin-94@inbox.ru  
Стр. 59

**Новиков Иван Сергеевич**

*Сколковский институт науки и технологий (Москва), Россия*  
Стр. 22

**Новикова Мария Константиновна**

*Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь), Россия*  
Стр. 55

**Павлова Ульяна Владимировна**

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Новосибирск), Россия*  
uljana.pavlova2012@yandex.ru  
Стр. 59

**Павский Кирилл Валерьевич**

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Новосибирск), Россия*  
Стр. 31

**Папков Вячеслав Дмитриевич**

*Самарский государственный технический университет (Самара), Россия*  
parkov.vd@gmail.com  
Стр. 60

**Парфенова Мария Дмитриевна**

*Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ), Россия*  
Стр. 12

**Парыгина Юлия Викторовна**

*Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь), Россия*  
Стр. 55

**Патрин Георгий Андреевич**

Новосибирский государственный университет  
(Новосибирск), Россия  
g.patrin@g.nsu.ru  
Стр. 28

**Пержу Александр Васильевич**

Дальневосточный федеральный университет  
(Владивосток), Россия  
Стр. 11

**Перминов Владислав Валерьевич**

Томский государственный университет (Томск),  
Россия  
ya.vladperminov2013@yandex.ru  
Стр. 16

**Перышкова Евгения Николаевна**

Институт физики полупроводников им. А.В.  
Ржанова СО РАН (Новосибирск), Россия  
e.peryshkova@gmail.com  
Стр. 60

**Писарев Максим Александрович**

Томский государственный университет (Томск),  
Россия  
pisarev@ispms.ru  
Стр. 19, 29

**Плаксин Антон Романович**

Институт математики и механики УрО РАН  
(Екатеринбург), Россия  
a.r.plaksin@gmail.com  
Стр. 61

**Полеся Виталий Александрович**

Дальневосточный федеральный университет  
(Владивосток), Россия  
polesia.va32@gmail.com  
Стр. 34

**Поляева Наталья Юрьевна**

Самарский федеральный исследовательский центр  
РАН, Институт проблем управления сложными  
системами РАН (Самара), Россия  
Стр. 52

**Пономаренко Владимир Иванович**

Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет им. Н.Г. Черны-  
шевского (Саратов), Россия  
Стр. 44

**Попов Андрей Юрьевич**

Московский государственный технический универ-  
ситет им. Н.Э. Баумана (Москва), Россия  
andreypopov@bmstu.ru  
Стр. 29

**Постникова У. С.**

Федеральный исследовательский центр информа-  
ционных и вычислительных технологий (Красно-  
ярск), Россия  
Стр. 52

**Потапов Вадим Петрович**

Федеральный исследовательский центр информа-  
ционных и вычислительных технологий (Новоси-  
бирск), Россия  
Стр. 61

**Прохоров Дмитрий Игоревич**

Институт математики им. С.Л. Соболева  
СО РАН (Новосибирск), Россия  
d.prokhorov@alumni.nsu.ru  
Стр. 30

**Рудин Сергей Алексеевич**

Институт физики полупроводников им. А.В.  
Ржанова СО РАН (Новосибирск), Россия  
rudin@isp.nsc.ru  
Стр. 31

**Рудов Михаил Сергеевич**

Федеральный исследовательский центр информа-  
ционных и вычислительных технологий (Новоси-  
бирск), Россия  
sanctumdeus@yandex.ru  
Стр. 61

**Рыбков Михаил Викторович**

Сибирский федеральный университет (Красно-  
ярск), Россия  
mixailrybkov@yandex.ru  
Стр. 31

**Рылов Сергей Александрович**

Федеральный исследовательский центр информа-  
ционных и вычислительных технологий (Новоси-  
бирск), Россия  
rylovs@mail.ru  
Стр. 62

**Савватеева Татьяна Александровна**

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
СО РАН (Новосибирск), Россия  
Стр. 37

**Сактоева Ксения Петровна**

Иркутский государственный университет (Ир-  
кутск), Россия  
saktoeva33@gmail.com  
Стр. 31

**Салтыков Илья Евгеньевич**

*Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия*  
saltikov42@gmail.com  
Стр. 49

**Семенова Ирина Владимировна**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самара), Россия*  
semenirina@list.ru  
Стр. 32

**Сибирякова Татьяна Андреевна**

*Алтайский государственный университет (Барнаул), Россия*  
sibiriakova.tatiana@mail.ru  
Стр. 33

**Симонов Евгений Владимирович**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия*  
simon\_nsk@mail.ru  
Стр. 33

**Скиба Василий Савельевич**

*Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия*  
vassiliyskiba@gmail.com  
Стр. 34

**Скопецкий Анатолий Григорьевич**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург), Россия*  
P0wderGang3r@yandex.ru  
Стр. 34

**Сметанников Михаил Андреевич**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самара), Россия*  
ssmetannikoff@gmail.com  
Стр. 35

**Соловарова Л. С.**

Стр. 10

**Сорокин Алексей Анатольевич**

*Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН (Хабаровск), Россия*  
Стр. 55, 63, 64, 65

**Сорокина Аида Арсеновна**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*  
sorokina.ajda@ya.ru  
Стр. 35

**Сотсков Вадим Евгеньевич**

*Сколковский институт науки и технологий (Москва), Россия*  
vadiksotkov@yandex.ru  
Стр. 35

**Спасибко Александра Борисовна**

*Научно-исследовательский центр «Байкальский регион» Иркутского государственного университета (Иркутск), Россия*  
alekspbbr@gmail.com  
Стр. 62, 65

**Спиридонова Ольга Николаевна**

*Казанский (приволжский) федеральный университет (Казань), Россия*  
spiridonowa.c2016@yandex.ru  
Стр. 36

**Степнов Андрей Александрович**

*ООО «Геофизические технологии» (Владивосток), Россия*  
Стр. 65

**Стояновская Ольга Петровна**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия*  
Стр. 37

**Стучебров Сергей Геннадьевич**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*  
Стр. 18, 41

**Сутормин Игорь Витальевич**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*  
douelprofessor@gmail.com  
Стр. 7

**Сухов Фёдор Вячеславович**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*  
fvs2@tpu.ru  
Стр. 67

**Сысоев Илья Вячеславович**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов), Россия*  
Стр. 44

**Сысоева Марина Вячеславовна**

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. (Саратов), Россия*  
Стр. 44

**Тен Александр Сергеевич**

*Вычислительный центр ДВО РАН (Хабаровск), Россия*

alexander.s.ten@yandex.ru

Стр. 63

**Тихвинский Денис Вячеславович**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия*

atillagod98@gmail.com

Стр. 37

**Третяков Глеб Николаевич**

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск), Россия*

g.tretyakov@g.nsu.ru

Стр. 63

**Трифонова Галина Олеговна**

*Казанский (приволжский) федеральный университет (Казань), Россия*

galina\_trifonov@mail.ru

Стр. 38

**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@yandex.ru

Стр. 39

**Ульянов Михаил Васильевич**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва), Россия*

muljanov@mail.ru

Стр. 6

**Урманов Игорь Павлович**

*Вычислительный центр ДВО РАН (Хабаровск), Россия*

uir1@mail.ru

Стр. 64

**Урманцева Нелли Руслановна**

*Сургутский государственный университет (Сургут), Россия*

Стр. 66

**Фереферов Евгений Сергеевич**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН (Иркутск), Россия*

fereferov@icc.ru

Стр. 65

**Фокеева Нина Олеговна**

*Институт механики Уфимского научного центра РАН (Уфа), Россия*

ffoxnina@gmail.com

Стр. 39

**Хакимова Зульфия Разифовна**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа), Россия*

Стр. 14

**Харлампов Иван Евгеньевич**

*Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия*

ivan87kharlampenkov@gmail.com

Стр. 61

**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*

smotca1595@gmail.com

Стр. 40

**Чепеленкова Вероника Дмитриевна**

*Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия*

v.chepelenkova@g.nsu.ru

Стр. 40

**Черепенников Юрий Михайлович**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*

Стр. 18

**Чернова Ольга Сергеевна**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*

osc6@tpu.ru

Стр. 41

**Черных Владимир Юрьевич**

*Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН (Хабаровск), Россия*

syler1983.9@gmail.com

Стр. 65

**Чеховской Игорь Сергеевич**

*Новосибирский государственный университет (Новосибирск), Россия*

Стр. 6, 28

**Чирко Роман Анатольевич**

*Сургутский государственный университет (Сургут), Россия*  
chirko-99@mail.ru  
Стр. 66

**Чупахин Александр Павлович**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Россия*  
Стр. 37

**Чуприков Александр Иванович**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*  
chuprikovalexandr@gmail.com  
Стр. 41

**Шадымов Никита Алексеевич**

*Самарский государственный технический университет (Самара), Россия*  
nikshadhs@mail.ru  
Стр. 60

**Шакин Владислав Юрьевич**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*  
vladshakin@tpu.ru  
Стр. 67

**Шапеев Александр Васильевич**

*Сколковский институт науки и технологий (Москва), Россия*  
Стр. 22

**Шестаков Николай Владимирович**

*Дальневосточный федеральный университет, Институт прикладной математики ДВО РАН (Владивосток), Россия*  
Стр. 63

**Штырина Ольга Владимировна**

*Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск), Россия*  
Стр. 28

**Шульженко Полина Дмитриевна**

*Сибирский федеральный университет (Красноярск), Россия*  
shulzhenko.polina@yandex.ru  
Стр. 41

**Шумкова Евгения Алексеевна**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Россия*  
evgenia\_shumkova@mail.ru  
Стр. 7

**Щеголева Ангелина Ивановна**

*Huawei (Новосибирск), Россия*  
a.shshegoleva1@g.nsu.ru  
Стр. 67

**Щирый Андрей Олегович**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва), Россия*  
andreyschiriy@gmail.com  
Стр. 68

**Якимов А. С.**

*Томский государственный университет (Томск), Россия*  
Стр. 16

**Яковлев Григорий Алексеевич**

*Томский государственный университет (Томск), Россия*  
yakovlev-grisha@mail.ru  
Стр. 42, 68

#### **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., Рылов С. А.

#### **Компьютерная верстка в системе $\LaTeX$**

Гусев О.И., Синявский Ю.Н., Рылов С.А.,  
Городилов Д.В., Горынин А.Г.,  
Кузнецова И.В., Михаханова Т.С.,  
Скиба В.С., Цгоев Ч.А.