

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Том 3. Математика

Сборник научных трудов
XXI Международной конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых

23–26 апреля 2024 г.

PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

Volume 3. Mathematics

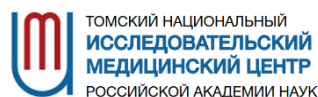
Abstracts

XXI International Conference of students, graduate students
and young scientists

April 23–26, 2024



Национальный
исследовательский
Томский
государственный
университет



Томск 2024

УДК 501:004(063)

ББК 72:32.81л0

П27

П27 **Перспективы развития фундаментальных наук** : сборник трудов XXI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 23–26 апреля 2024 г.) : в 7 томах. Том 3. Математика / под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2024. – 96 с.

ISBN 978-5-4387-1182-7 (т. 3)

ISBN 978-5-4387-1179-7

Сборник содержит труды участников XXI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук», представленные на секции «Математика».

Предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей, специализирующихся в области математического моделирования и анализа данных, математических методов в физике, химии, биофизике, биологии, экономике, медицине, психологии, математической логики и приложений, вычислительной математики, а также дифференциальных уравнений.

УДК 501:004(063)

ББК 72:32.81л0

Редакционная коллегия

И.А. Курзина, доктор физико-математических наук, доцент;

Г.А. Воронова, кандидат химических наук, доцент;

С.А. Поробова.

ISBN 978-5-4387-1182-7 (т. 3)

ISBN 978-5-4387-1179-7

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Алгоритм реидентификации по биометрическому шаблону лица человека <i>Р.Р. Исмагилов, С.Ю. Андреев</i>	5
Создание интеллектуального ассистента-помощника на основе RAG-системы <i>Д.А. Редько, Е.М. Сухова</i>	8
Сжатие изображений без потерь на основе методов комбинаторной генерации <i>А.А. Меринов, Ю.В. Шабля</i>	11
Прогнозирование ставок облигаций государственного долга моделями семейства HAR <i>А.В. Трофимова, О.Л. Крицкий</i>	14
Применение модифицированного метода прослеживаемости и идентификации на основе деревьев И/ИЛИ для учёта комплексной техники <i>А.В. Токарева</i>	17
Numerical analysis of marangoni natural convection of corium in a semi-cylindrical cavity in the presence of a boundary condition of the third kind on the bottom wall <i>S.A. Khatab</i>	20
Enhancing predictive accuracy in environmental data analysis: a hybrid LASSO-RFR approach for climatic analysis in Siberia <i>D.A. Akpuluma, J.I. Abam, C.A. Williams</i>	23
Реализация системы помощи руководителю проекта при обработке полученных замечаний от экспертизы <i>И.А. Истомин, Н.А. Злочевский</i>	26
Использование больших языковых моделей для формирования запросов к графовым базам данных <i>Р.А. Мамадалиев</i>	29
Программная реализация метода управления манипулятором щупальца, эксплуатируемого в экстремально сложных условиях <i>К.А. Пахомов</i>	32
Способ выделения полезного сигнала из зашумленного на основе цифрового фильтра и преобразования Фурье с применением программы MATLAB <i>С. Жуань, Т.Е. Мамонова</i>	36
Численное моделирование параметров нагревателя трубопровода в среде Логос <i>Ю.С. Чуманова</i>	39
Анализ влияния модели пористой среды на особенности теплообмена в полости при наличии пористого ребра <i>С.Х.К. Лэ</i>	42
Восстановление неравномерно освещенных изображений <i>А.А. Сапегин</i>	45
Автоматическая сегментация эпикардially жировой ткани и количественная оценка радиомических параметров при компьютерной томографии сердца <i>Д.С. Саматов, К.В. Завадовский</i>	48
Моделирование гемодинамики коронарной артерии человека <i>А.И. Андренков</i>	51
Прогнозирование трансферной стоимости футболистов с использованием различных регрессионных методов и алгоритмов машинного обучения <i>М.С. Коновалов</i>	54
Численное решение обратной задачи электроимпедансной томографии в круге по измерениям напряжения на электродах <i>А.А. Афанасьева</i>	57
Имитационная модель управления запасами со случайным спросом и периодичностью <i>И.В. Борисенко</i>	60
Математическое моделирование разрушения злокачественных новообразований с использованием гипертермии <i>Д.В. Акулова</i>	63
Обработка и сегментация снимков глазного дна с использованием сверточных нейронных сетей <i>Н.И. Малыгина</i>	66

Создание оптимальной информационной системы для решения задач теории фильтрации <i>М.А. Крайнов</i>	69
Естественная конвекция в замкнутой полости под действием двух источников магнитного поля <i>Е.П. Недоедоко, Б.Н. Сергеевна</i>	72
Математическое моделирование сопряженного теплообмена при обдуве цилиндра сверхзвуковым потоком газа <i>Д.О. Ларкин</i>	75
Численное исследование влияния биофильтра на процесс самоочищения сточных вод в двумерном приближении <i>А.В. Амзаракова</i>	78
Численное исследование плавления материала в цилиндрической области с источником объемного тепловыделения <i>К.И. Кириллова</i>	81
Численное исследование процесса плавления материала в стенках канала с оребрением <i>М.С. Ерошкина</i>	84
Диагностика лимфедемы методами оптической когерентной томографии и машинного обучения <i>Д.С. Амирханов, И.А. Тримасов</i>	87
Диффузионный перенос частиц газовой смеси через сверхтонкие мембраны <i>Р.Г. Кусаинов</i>	90
Математическое моделирование активной системы охлаждения с нагревательным элементом и рёберной системой теплоотвода <i>И.И. Сюй, Н.С. Гибанов</i>	93

УДК 004.93

Алгоритм реидентификации по биометрическому шаблону лица человека

Р.Р. Исмагилов^{1,2}, С.Ю. Андреев²

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. М.Е. Семенов^{1,3}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²ООО «Научно-производственная компания «Техника дела»»,
Россия, г. Томск, ул. Елизаровых, 93, 634021

³Научно-технологический университет «Сириус»
Россия, Краснодарский край, п. г. т. Сириус, пр. Олимпийский, д. 1, 354340
E-mail: ri10@tpu.ru

Re-identification algorithm based on face embeddings

R.R. Ismagilov^{1,2}, S.I. Andreev²

Scientific Supervisor: Ass. Prof., PhD, M.E. Semenov^{1,3}

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

²«SPC «Technika Dela»» LLC, Russia, Tomsk, Elivzarovikh str., 93, 634021

³Sirius University of Science and Technology, Russia, Sirius, Olimpiyskiy str., 1, 354340
E-mail: ri10@tpu.ru

Abstract. This article provided performance research of DBSCAN and agglomerative clustering algorithms on re-identification task based on face embeddings. Evaluation of algorithms performance was made using custom dataset containing 35 090 images of 20 people. Adjusted mutual information, Purity and Inverse Purity scores are equal to 0.9964, 1.0 and 0.9965 respectively for both algorithms using cosine distance threshold between samples of same cluster equal to 0.37.

Key words: re-identification, face recognition, DBSCAN, agglomerative clustering, biometrics.

Введение

Идентификация личности человека по изображению его лица — одна из классических задач компьютерного зрения. В общем случае она сводится к локализации лица на изображении, извлечению его биометрического вектора (шаблона) и его сопоставлению с базой данных зарегистрированных лиц. Однако зачастую возникает потребность в повторной идентификации незнакомых системе людей. Данная задача машинного обучения носит название задачи реидентификации.

Целью работы является решение задачи реидентификации людей методом кластеризации биометрических векторов.

Экспериментальная часть

Наивный алгоритм. Предположим, что в биометрической системе был обнаружен человек, который отсутствует в базе данных. Пусть X_1 — биометрический шаблон, полученный с помощью модели распознавания лиц при первом обнаружении человека в кадре; X_2 — при втором обнаружении и т. д.; X_{ref} — эталонный биометрический вектор данного человека, который хранится в базе данных для идентификации персоны. При первом обнаружении человека $X_{ref} = X_1$. Получим оценку качества $q(X_1)$ биометрического вектора с помощью алгоритма оценки качества [1]. Если при последующих обнаружениях человека $q(X_i)$ окажется больше $q(X_{ref})$, то эталонный вектор X_{ref} переопределяется и равен X_i .

Однако при использовании данного подхода нет гарантии, что в окрестность эталонного биометрического вектора попадут все случаи распознавания конкретного человека.

Алгоритмы кластеризации. Рассмотрим случай, когда задача реидентификации решается не в режиме реального времени; а мы имеем набор биометрических шаблонов,

снятых за определённый промежуток времени. Тогда задачу реидентификации можно рассматривать как задачу кластеризации, где каждый кластер соответствует одному человеку.

Главная проблема многих алгоритмов кластеризации — необходимость заранее задать число кластеров для разбиения. В рамках нашей задачи данная проблема становится критической, т. к. мы не знаем, сколько уникальных персон было детектировано системой.

С учётом требований к решению задачи мы выбрали алгоритм DBSCAN и алгоритм агломеративной кластеризации. В качестве параметров для алгоритма DBSCAN было задано максимальное расстояние между соседними точками кластера (0,33; 0,35; 0,37) и минимальное число объектов в одном кластере (один). Параметры алгоритма агломеративной кластеризации: пороговое расстояние между кластерами (0,33; 0,35; 0,37), а также метод одиночной связи для вычисления связи между экземплярами данных. В качестве метрики схожести было использовано косинусное расстояние.

Алгоритм получения биовектора. В качестве модели детектирования лиц на изображении мы взяли свёрточную нейронную сеть RetinaFace [2]. С её помощью мы получаем координаты ограничивающей рамки области, содержащей лицо человека. Далее мы выравниваем полученную область относительно ключевых точек лица (центры глаз, центр носа, уголки губ) и подаём на вход нейронной сети ResNet50, обученной методом ArcFace [3] на наборе данных WebFace600k. На выходе мы получаем биометрический шаблон — вектор размерностью 512.

Набор данных. В качестве набора данных для тестирования алгоритмов мы взяли серии записей с камер видеонаблюдения, расположенных в местах высокой проходимости. Видеозаписи были разделены на треки — фрагменты непрерывного присутствия человека в кадре. Разметку треков на уровне персон мы проводили с помощью алгоритма DBSCAN, а также ручной проверки и исправления содержимого кластеров.

Полный набор данных содержит 718 685 изображений лиц, 54 705 видео треков для 1003 человек. Сравнение алгоритмов мы провели на 35 090 изображениях 20 человек.



Рис. 1. Пример изображений набора данных

Результаты

Для сравнения качества работы алгоритмов были использованы следующие метрики: скорректированная мера взаимной информации (Adjusted mutual information score, AMI), Purity — точность содержимого кластеров, Inverse Purity — описание полноты кластеров и скорректированная F-мера для пар истинных и спрогнозированных меток изображений [4].

Таблица 1

Сравнение алгоритмов DBSCAN и агломеративной кластеризации (AC) на малой выборке данных

Показатель	DBSCAN@0,33	DBSCAN@0,35	DBSCAN@0,37	AC@0,33	AC@0,35	AC@0,37
AMI	0,9898	0,9933	0,9964	0,9898	0,9933	0,9964
Purity	1	1	1	1	1	1
Inverse purity	0,9915	0,9952	0,9975	0,9915	0,9952	0,9975
Время вычислений	65,43 с	64,51 с	67,30 с	452,7 с	454,91 с	450,25 с

Таблица 2

Сравнение наивного алгоритма (QA) и DBSCAN на полном наборе данных

Показатель	DBSCAN@0,3	DBSCAN@0,33	DBSCAN@0,35	QA@0,35	QA@0,4	QA@0,45
AMI	0,9898	0,9933	0,9964	0,9898	0,9933	0,9964
Purity	0,9996	0,9987	0,9920	0,9999	0,9999	0,9999
Inverse purity	0,9490	0,9763	0,9863	0,3136	0,3740	0,4428
F^{eq}	0,9860	0,9944	0,9885	0,4402	0,5182	0,5915

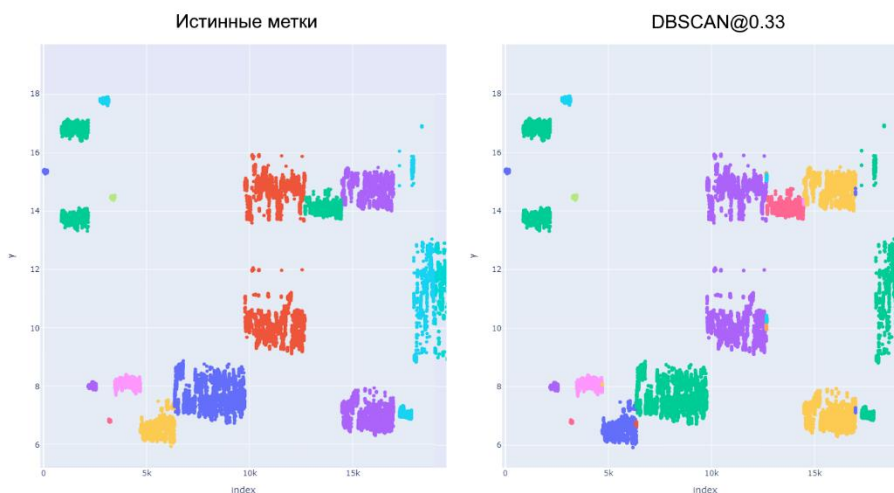


Рис. 2. Фрагмент визуализации кластеризованных данных: цвета соответствуют уникальной персоне

Заключение

Алгоритм агломеративной кластеризации (AC) и DBSCAN достигли одинаковых показателей качества при одинаковом значении максимального расстояния между ближайшими соседями одного кластера. Однако скорость работы алгоритма DBSCAN на малом наборе данных оказалась в среднем в 6,88 раз больше, чем скорость работы агломеративного алгоритма. Наиболее высокое значение Inverse Purity было достигнуто при радиусе окрестности 0,37. На полном наборе данных алгоритм показал себя значительно лучше, чем наивный подход. Наилучшее значение скорректированной F-меры было получено при радиусе окрестности 0,33.

Список литературы

1. Terhorst P. et al. SER-FIQ: Unsupervised estimation of face image quality based on stochastic embedding robustness // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2020. – P. 5651–5660.
2. Deng J. et al. Retinaface: Single-stage dense face localisation in the wild // arXiv preprint arXiv:1905.00641. – 2019.
3. Deng J., Guo J., Xue N. and Zafeiriou S. ArcFace: Additive Angular Margin Loss for Deep Face Recognition // Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2019. – P. 4685–4694.
4. Копылов А.В., Середин О.С. Новая F-мера качества бинарных классификаторов // Математические методы распознавания образов: тезисы докладов 21-ой Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 12–15 декабря 2023. – Москва : РАН, 2023 – С. 48–50.

УДК 51-74

Создание интеллектуального ассистента-помощника на основе RAG-системыД.А. Редько, Е.М. Сухова

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н., М.Е. Семенов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: dar27@tpu.ru, ems16@tpu.ru**Creating an intelligent assistant based on the RAG system**D.A. Redko, E.M. Suhova

Scientific Supervisor: Ass. Prof., PhD, M.E. Semenov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: dar27@tpu.ru, ems16@tpu.ru

Abstract. *This paper presents the development of an intelligent assistance system aimed at users, utilizing the Retrieval-Augmented Generation (RAG) model. The proposed project aims to provide personalized assistance in a specific domain, based on a knowledge base. By integrating RAG, the model improves the quality of responses by incorporating relevant information from external sources. The software implementation of the project has been carried out using the DeepSeek AI API.*

Key words: Retrieval Augmented Generation, Large Language Model, neural networks.

Введение

В современном информационном мире объем данных становится огромным, что создает проблему информационного шума и перегрузки. Стремление к освоению всей доступной информации становится нереалистичным. Поэтому возникает потребность в инструментах, способных агрегировать и фильтровать этот поток информации, предоставляя только самое важное и релевантное. Создание таких интеллектуальных систем, способных адаптироваться к потребностям конкретного пользователя и предоставлять персонализированную информационную поддержку, становится крайне важным.

В этой работе представлена разработка интеллектуальной системы помощи, ориентированной на студентов, с использованием генеративной модели, использующей дополнительно найденную релевантную информацию (Retrieval Augmented Generation, RAG) [1]. Используя комбинацию больших языковых моделей (LLM) и модели RAG, создан чат-бот, способный проводить диалог с пользователем на естественном языке и предоставлять информацию, учитывая контекст запроса и актуальные данные. Предложенный подход направлен на значительное улучшение пользовательского опыта и обеспечение максимально удобного взаимодействия с системой.

Цель работы – создание специализированного чат-бота, способного предоставлять пользователям актуальную информацию из базы знаний и внешних источников.

Экспериментальная часть

Для работы модели RAG была подготовлена база знаний, состоящая из информации, собранной с официального сайта Томского политехнического университета. Данный набор данных включает в себя разнообразную информацию (адреса корпусов, локально-нормативную документацию), необходимую для создания интеллектуального ассистента-помощника для студентов.

Для сбора данных были использованы техники парсинга веб-страниц, позволяющие извлекать информацию из HTML-кода сайта университета. Полученные данные были обработаны и структурированы в формате, пригодном для использования модели RAG.

Выбор модели. При выборе модели мы учитывали особенности предметной области и требования проекта. Из литературы известно множество LLM: LLaMA, GigaChat, GPT, SAIGA, DeepSeek AI. Мы сделали выбор в пользу предобученной модели DeepSeek AI [2], которая снабжена API.

Архитектура модели RAG

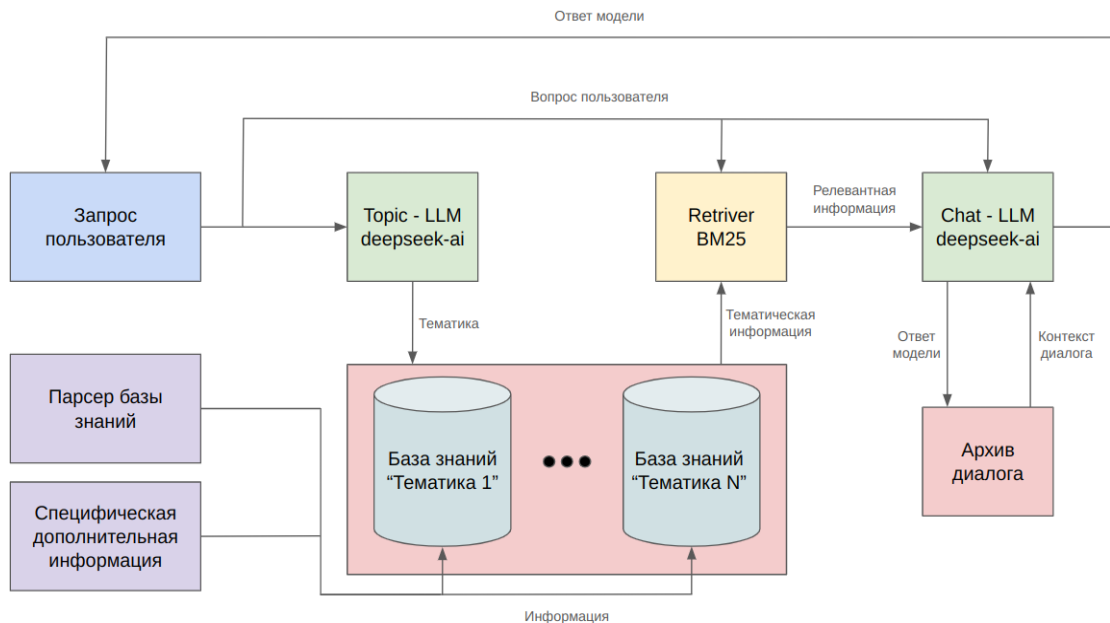


Рис. 1. Retrieval Augmented Generation

Предложенная модель (рис. 1) состоит из базы знаний, которая заранее пользователем разделена на тематики. Запрос пользователя попадает в LLM модель, которая возвращает из предложенного списка доступных тематик наиболее близкую. Далее полученная тематика попадает в ретривер, который при помощи метода BM25 [3] определяет наиболее близкие контекстуальные части из базы знаний. BM25 является вероятностной моделью информационного поиска, основанной на модели вероятности, которая оценивает релевантность документов по отношению к запросу пользователя.

Функция ранжирования BM25 вычисляется следующим образом:

$$BM25(D, Q) = \sum_{i=1}^n IDF(q_i) \frac{f(q_i, D)(k_1 + 1)}{f(q_i, D) + k_1(1 - b + b \frac{|d|}{avgdl})},$$

где $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – вектор слов, $TF(q_i)$ – частотность слова q_i в документе D , $f(q_i, D)$ – частота употребления слова q_i в документе D , $|D|$ – количество слов в документе (длина документа), $avgdl$ – средняя длина документа в коллекции, k_1 и b – свободные коэффициенты (чаще всего 2.0 и 0.75 соответственно),

$$IDF(q_i) = \log \left(\frac{N - f(q_i, D) + 0.5}{f(q_i, D) + 0.5} \right) - \text{обратная частота документа.}$$

Далее полученный контекст из базы знаний попадает на LLM модель, которая ведет диалог с пользователем. LLM модель генерирует ответ на основе переданного контекста, вопроса и истории диалога и возвращает ответ пользователю.

Результаты

В результате проведенных исследований мы разработали интеллектуального ассистента-помощника, на рис. 2 приведен иллюстративный пример, где продемонстрированы типичные

вопросы. В результате взаимодействия с ассистентом, в каждом из случаев, были получены релевантные ответы, удовлетворяющие запросы пользователей.

Интеллектуальный ассистент-помощник студенту ТПУ

User: Где находится ГК ТПУ
Bot: Главный учебный корпус Томского политехнического университета находится по адресу г. Томск, пр-кт. Ленина, д.30.
User: Какая у студентов стипендия
Bot: У студентов существует несколько видов стипендий, и их размер зависит от типа образовательной программы, формы обучения и других факторов. Например:

1. Стипендия Президента РФ для студентов, обучающихся по направлению "Высшее образование" - 2 200 руб.
2. Стипендия Правительства РФ для студентов, обучающихся по направлению "Высшее образование" - 1 440 руб.
3. Государственная академическая стипендия для студентов, обучающихся по очной форме обучения за счет средств федерального бюджета, осваивающих образовательные программы бакалавриата, специалитета, магистратуры: Государственная академическая стипендия - 3 693 руб. (без РК).
4. Государственная социальная стипендия - 4 220 руб. (без РК).

Есть также стипендии Президента и Правительства РФ для студентов, обучающихся по направлениям подготовки, соответствующим приоритетным направлениям развития российской экономики. Эти стипендии составляют 7 000 и 5 000 рублей соответственно.

User: Где находится 10 корпус тпу?
Bot: Учебный корпус № 10 Томского политехнического университета находится по адресу г. Томск, пр-кт. Ленина, д.2.
User: А где посмотреть расписание занятий, можешь скинуть ссылку?
Bot: Расписание занятий ТПУ для студентов доступно на официальном сайте университета по ссылке: <https://rasp.tpu.ru/>.

Введите ваше сообщение Отправить

Рис. 2. Пример использования чат-бота

Заключение

В рамках исследования был создан интеллектуальный ассистент-помощник для студентов на основе RAG-системы с использованием современных методов обработки естественного языка и глубокого обучения. Из недостатков можно выделить требование к обязательной лемматизации, а также размер документа также может плохо сказываться на производительности, так как большое количество слов в рассматриваемом тексте приводит к долгим вычислениям. Данное решение легко адаптируемо и может быть применено для любых компаний и организаций, обеспечивая персонализированную информационную поддержку и улучшая взаимодействие с клиентами на основе их запросов и потребностей. Для адаптации под конкретную компанию достаточно заменить базу знаний на соответствующую предметную область.

Список литературы

1. Lewis P., Perez E., Piktus A., Petroni F., Karpukhin V., Goyal N., Küttler H., Lewis M., Yih W., Rocktäschel T., Riedel S., Kiela D. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // Computer Science. Computation and Language. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2005.11401>
2. DeepSeek // URL: <https://www.deepseek.com/> (дата обращения: 22.02.2024).
3. Белова К.М., Судаков В.А. Исследование эффективности методов оценки релевантности текстов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2020. – № 68. – 16 с. – URL: https://keldysh.ru/papers/2020/prep2020_68.pdf

УДК 519.163

Сжатие изображений без потерь на основе методов комбинаторной генерации

А.А. Меринов, Ю.В. Шабля

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050

E-mail: merinovarsen@mail.ru

Lossless image compression based on combinatorial generation methods

A.A. Merinov, Y.V. Shablya

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, Tomsk, Lenin str., 40, 634050

E-mail: merinovarsen@mail.ru

Abstract. *This paper presents a general approach to lossless compression of images based on the theory of combinatorial generation. An image compression algorithm using the class of ranking algorithms is described. In addition, the effectiveness of such image compression is determined.*

Key words: *lossless image compression, combinatorial generation, AND/OR tree structure.*

Введение

Изображения имеют огромную ценность для многих сфер, например, они могут быть использованы для визуализации данных, для обучения нейронных сетей, для решения задач в области медицины, научных исследований и образования. Одной из важнейших проблем при работе с изображениями является их хранение, особенно в случаях, когда изображения должны быть сохранены на носителях с ограниченным пространством. В связи с этим, тема сжатия изображений является актуальной и требует нахождения новых подходов.

Часть задач требует сохранения исходного качества изображения, из-за этого появляется необходимость сжатия изображений без потерь. В данной статье рассматривается идея реализации сжатия изображений без потерь с использованием методов комбинаторной генерации [1]. Комбинаторная генерация – это научное направление, объединяющее информатику, программирование и комбинаторику, а также изучает алгоритмы, предназначенные для нумерации и генерации элементов комбинаторных множеств. Комбинаторное множество – это конечное множество элементов с определенной структурой, которые могут быть построены на основе заданного набора правил и ограничений.

Экспериментальная часть

Существуют различные методы получения алгоритмов комбинаторной генерации, такие как метод поиска с возвратом [1], ЕСО-метод [2], символьный метод [3], метод на основе деревьев И/ИЛИ [4] и другие. При этом каждый такой метод обладает своими уникальными особенностями и ограничениями на применимость. В данной работе статья предлагается рассмотреть применимость метод на основе деревьев И/ИЛИ к решению задачи сжатия изображений без потерь. Используемый метод основан на применении особого класса древовидных структур – деревья И/ИЛИ. Такая древовидная структура обладает узлами типа «ИЛИ» (соответствует объединению элементов подмножеств) и узлами типа «И» (соответствует декартову произведению элементов подмножеств). Также узлом структуры дерева И/ИЛИ может быть корень другого дерева И/ИЛИ, из-за этого может создаваться композиция древовидных структур, в том числе рекурсивная. Если в дереве И/ИЛИ для каждого ИЛИ-узла удалить все ребра, кроме одного, то получим один из возможных вариантов данного дерева И/ИЛИ. Если структура дерева И/ИЛИ была построена на основе выражения функции мощности некоторого комбинаторного множества, то количество вариантов такого дерева И/ИЛИ равно количеству элементов комбинаторного множества. Следовательно, каждый вариант дерева И/ИЛИ можно однозначно соотнести с определенным комбинаторным объектом.

Результаты

Идея реализации сжатия изображений без потерь с использованием методов комбинаторной генерации заключается в разбиении исходного изображения на блоки (рис. 1).

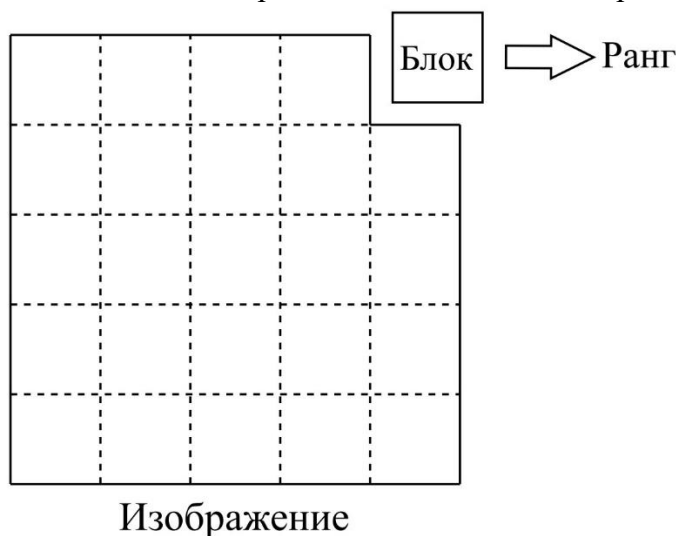


Рис. 1. Принцип разбиения изображения на блоки (пример)

Каждый такой блок изображения является одним из всех возможных комбинаций последовательности пикселей, то есть имеем комбинаторное множество всех возможных вариантов блоков и в изображении зафиксирован один из них. Поэтому для блока можно получить уникальный ранг путем применения алгоритма ранжирования, при этом из значения ранг в дальнейшем можно восстановить исходный блок путем применения алгоритма генерации по рангу.

Количество всех возможных вариантов блоков вычисляется по формуле $R=c^n$, где c – количество всех цветов в палитре изображения, а n – количество пикселей в блоке. Для данной формулы можно построить структуру дерева И/ИЛИ (рис. 2). Следовательно, исходный блок изображения может быть представлен вариантом построенного дерева И/ИЛИ.

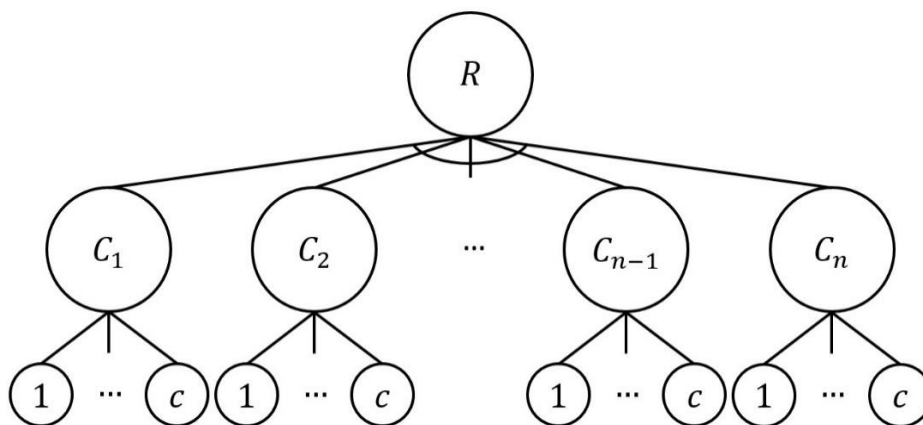


Рис. 2. Структура дерева И/ИЛИ по формуле $R = c^n$

При использовании такой схемы кодирования блока изображения ранг соответствующего варианта дерева И/ИЛИ вычисляется по формуле:

$$\text{Rank} = \sum_{i=1}^n c^{i-1} * m_i,$$

где n – количество пикселей в блоке, c – количество всех цветов в палитре изображения, m_i – порядковый номер (начиная с 0) цвета i -го пикселя в палитре среди всех c цветов.

После получения рангов для всех блоков изображения создается строка, которая записывается в бинарный файл. Бинарный файл содержит всю необходимую информацию об изображении. Информация в бинарном файле включает в себя высоту изображения, ширину изображения, размер палитры цветов, все цвета в изображении, а также все ранги для блоков в порядке их получения. Структура записываемой строки представлена на рис. 3.

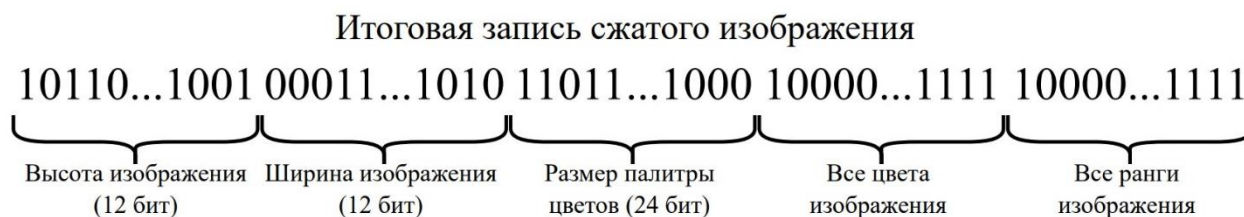


Рис. 3. Структура записываемой строки (пример)

При такой записи коэффициент сжатия k рассчитывается как отношение объема исходного несжатого изображения к объему сжатого, то есть:

$$k = \frac{\frac{p}{n} * \lceil \log_2 c^n \rceil + c * v + 48}{p * v},$$

где p – количество пикселей в изображении, n – количество пикселей в блоке, c – количество всех цветов в палитре изображения, v – требуемое число бит для кодирования одного цвета из палитры.

Исходя из представленной формулы можно сделать вывод, что количество цветов в палитре изображения обратно пропорционально эффективности его сжатия. Также можно сказать, что при увеличении количества пикселей в изображении для эффективного сжатия требуется увеличение средней встречаемости цвета из палитры.

Если рассматривать сжатие растрового изображения, размером 256x256 пикселей, для хранения цвета которого требуется 24 бит, то суммарный объем памяти для хранения исходного несжатого изображения будет равен 1572864 бит. Для сжатия данных при ранжировании будем использовать блок, состоящий из 64 пикселей, и для всего изображения будет составлена единая цветовая палитра. Для такого изображения сжатие будет считаться эффективным, если количество цветов в палитре будет меньше или равно 25542.

Заключение

Данная работа рассмотрена идея реализации сжатия изображений без потерь с использованием методов комбинаторной генерации, в частности, метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ. Описанный алгоритм сжатия требует дальнейшего исследования и развития.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-71-10052.

Список литературы

1. Kreher D.L., Stinson D.R. Combinatorial algorithms: Generation, enumeration, and search. – USA : CRC Press, 1999. – 329 p.
2. Barcucci E., Del Lungo A., Pergola E., Pinzani R. ECO: A methodology for the enumeration of combinatorial objects // J. Differ. Equ. Appl. – 1999. – Vol. 5. – P. 435–490.
3. Flajolet P., Zimmerman P., Cutsem B. A calculus for the random generation of combinatorial structures // Theoret. Comput. Sci. – 1994. – Vol. 132. – P. 1–35.
4. Shablya Y., Kruchinin D., Kruchinin V. Method for developing combinatorial generation algorithms based on AND/OR trees and its application // Mathematics. – 2020. – Vol. 8. – Art. 962.

УДК 519.6:336.763.3:336.275.3

Прогнозирование ставок облигаций государственного долга моделями семейства HARА.В. Трофимова, О.Л. Крицкий

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: avt75@tpu.ru**Forecasting public debt bond rates using HAR models**A.V. Trofimova, O.L. Kritski

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: avt75@tpu.ru

Abstract. While forecasting the dynamics of asset price volatility, such as stock and bond returns, the shock component is a fundamental factor. It should be determined whether it is necessary to include a jump component in the real-time volatility model.

Key words: forecasting, HAR model, volatility.

Введение

При прогнозировании динамики волатильности цен активов, таких как доходность акций и облигаций, компонент скачка является основополагающим фактором. Следует выяснить, необходимо ли включать компонент скачка в модель волатильности в реальном времени. Цель создания модели гетерогенной авторегрессии (HAR-модели) для прогнозирования процентной ставки однодневных межбанковских кредитов (RUONIA) и оценки будущей величины купонных выплат по облигациям ОФЗ-ПК.

Существует различное множество моделей для прогнозирования временных рядов, но далеко не все учитывают имеющиеся в них скачки. Большая часть исследований основана на разработке и оценке моделей прогнозирования волатильности. В работе [1] вводится модель HAR с добавлением показателя реализованной волатильности (RV), которую мы используем в своих расчетах.

Основная задача нашей работы – это использование модели скачков волатильности для обнаружения полезной для прогноза информации с переключением режимов. Наш интерес к теме подкреплен тем фактом, что проблемам прогнозирования цен финансовых активов с резким изменением их волатильности посвящена обширная зарубежная литература (см., например, обзор в [2]).

Существует стратегия, предложенная Я. Чжан, Ю. Ван, Ф. Ма и Ю. Вей [3], в которой учтено оптимальное переключение модели прогнозирования между гетерогенной авторегрессионной реализованной волатильностью (HAR-RV) и моделью скачка (HAR-CJ). Момент переключения зависит от величины параметров этих двух моделей в течение наблюдаемого периода прошлого времени.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим модель прогнозирования HAR:

$$RV_t = \sum_{j=1}^N r_{t,j}^2, \quad (1)$$

где RV – реализованная мера отклонения в торговый день t , $T = 1/\Delta$, Δ – интервал выборки доходностей, $r_{t,j}$ – это j -я доходность при изменении ставки RUONIA в течение дня t .

Добавим в модель HAR реализованную волатильность RV, чтобы более полно учесть в ней связь с прошлыми котировками цен, чем это было в первоначальной модели. Моделирование RV проводится в следующем виде [1]:

$$RV_{t+1;t+h} = \varphi_0 + \varphi_d RV_t + \varphi_w RV_{t-4:t} + \varphi_m RV_{t-21:t} + \varphi_{t+1;t+h}, \quad (2)$$

где $RV_{t+1;t+h} = (1/h)(RV_{t+1} + \dots + RV_{t+h})$ – выборочное среднее по интервалу наблюдения $[t+1;t+h]$. В частности, через RV_t , $RV_{t-4:t}$ и $RV_{t-21:t}$ обозначены ежедневные, еженедельные и ежемесячные значения RV_t .

В дальнейших HAR-моделях были использованы следующие вспомогательные показатели:

- Величина, оценивающая реализованную дисперсию при наличии «редких» скачков волатильности:

$$BPV_t = \sum_{j=1}^{N-1} r_{j,t} r_{j+1,t} \quad (3)$$

- Оценка дневной меры скачка волатильности в день t :

$$J_t = \max(RV_t - BPV_t, 0) \quad (4)$$

- Статистический тест обнаружения скачков волатильности:

$$Z_t = \Delta^{-1/2} \frac{(RV_t - BPV_t)/RV_t}{\sqrt{(k_1^{-4} + 2k_1^{-2} - 5) \max(1, TQ_t/BPV_t^2)}}, \quad (5)$$

где TQ_t – реализованная трехстепенная мера квартичности волатильности. Она выражается как

$$TQ_t = \Delta^{-1} k_{4/3}^{-3} \sum_{j=3}^N |r_{t,j}|^{4/3} |r_{t,j-1}|^{4/3} |r_{t,j-2}|^{4/3}, \quad (6)$$

где $k_{4/3} = 2^{2/3} \Gamma\left(\frac{7}{6}\right) \Gamma(0.5)$, $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

- «Значительный» скачок волатильности задается величиной SJ_t :

$$SJ_t = I(Z_t > \theta_\alpha)(RV_t - BPV_t), \quad (7)$$

где $I(x)$ – это индикаторная функция множества. Для того, чтобы сумма непрерывных и разрывных компонент равна первоначальному значению RV , вводят величину C_t :

$$C_t = I(Z_t \leq \theta_\alpha)RV_t + I(Z_t > \theta_\alpha)BPV_t. \quad (8)$$

Используем и модель HAR-CJ, впервые предложенную Андерсеном и др. в [2], а затем развитую в [4–6]:

$$RV_{t+1;t+h} = \varphi_0 + \varphi_{cd}C_t + \varphi_{cw}C_{t-4:t} + \varphi_{cm}C_{t-21:t} + \varphi_{sd}SJ_t + \varphi_{sw}SJ_{t-4:t} + \varphi_{sm}SJ + \varphi_{t+1;t+h} \quad (9)$$

Наконец, в работе использована модель скачка волатильности HAR-J, в которой учтен прогноз величины RV_t (см. подробнее в [2]). Она имеет следующий вид:

$$RV_{t+1;t+h} = \varphi_0 + \varphi_d RV_t + \varphi_w RV_{t-4:t} + \varphi_m RV_{t-21:t} + \varphi_J J_t + \varphi_{t+1;t+h}. \quad (10)$$

Результаты

Для расчета размера купонов по облигациям ОФЗ-ПК построен прогноз ежедневных ставок RUONIA, взятых с февраля 2021 г. по февраль 2024 г., на пятьдесят дней вперед (см. рис. 1).

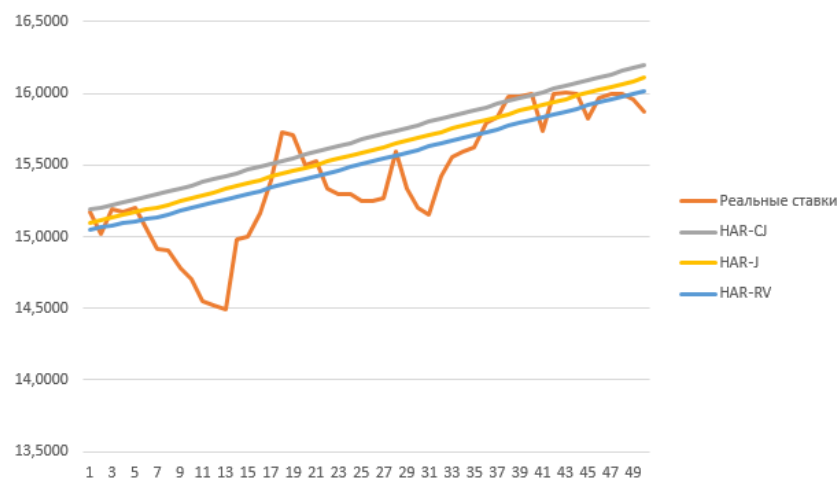


Рис.1 Сравнение ставок RUONIA

На рис. 1. представлены результаты расчетов по моделям HAR-RV (формула 2), HAR-J (формула 10) и HAR-CJ (формула 9). На основе спрогнозированных ставок RUONIA были рассчитаны ставки купонов по облигациям государственного долга ОФЗ-ПК, выплаченных в период наблюдения.

Таблица 1

Сравнение ставок ОФЗ-ПК

	Реальная ставка, %	Ставка по HAR- RV, %	Ставка по HAR-J, %	Ставка по HAR-CJ, %
29006	8,73	8,821	8,841	8,859
29022	14,97	14,965	15,026	15,085
29015	14,76	14,746	14,799	14,849
29016	13,96	13,454	13,477	13,502
29017	13,28	13,175	13,18	13,187
Ошибка MSE		0,011	0,012	0,014

Представим данные на рисунке 2.

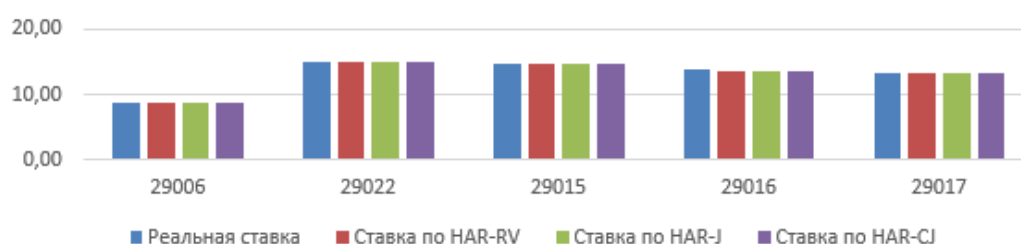


Рис. 2 Сравнение ставок ОФЗ-ПК

Из данных на рис. 2 видно, что модели семейства HAR сглаживают исходные данные и учитывают только незначительные по величине скачки волатильности.

Заключение

В результате проведенного исследования были рассчитаны ставки будущих купонов ОФЗ-ПК, для чего был построен прогноз величины межбанковской процентной ставки RUONIA тремя моделями из семейства HAR на пятьдесят суток вперед. При этом эконометрическим алгоритмам семейства HAR удалось верно определить наличие растущего тренда для значений RUONIA. Показано, что прогнозные ставки ОФЗ с переменным купоном имели небольшую ошибку MSE в сравнении с реализованными ставками. При этом лучше всего себя показала модель HAR-RV, для которой ошибка MSE отклонения прогнозных данных от реальных составила всего 0,011 % годовых.

Список литературы

1. Corsi F. A simple approximate long-memory model of realized volatility // Journal of Financial Econometrics. – 2009. – V. 7 (2). – P. 174–196.
2. T. Andersen, T. Bollerslev, F. Diebold. Roughing it up: including jump components in the measurement, modeling, and forecasting of return volatility // Review of Economics and Statistics. – 2007. – V. 89. – P. 701–720.
3. Zhang, Y., Wang, Y., Ma, F. et al. To jump or not to jump: momentum of jumps in crude oil price volatility prediction // Financ Innov. – 2022. – V. 8. – p. 56.
4. Sévi B. Forecasting the volatility of crude oil futures using intraday data // Eur J Oper Res. – 2014. – V. 235. – P. 643–659.
5. Prokopczuk M, Symeonidis L, Wese Simen C. Do jumps matter for volatility forecasting? Evidence from energy markets // J Futures Mark. – 2016. – V. 36. – P. 758–792.
6. Buncic D, Gisler KI. The role of jumps and leverage in forecasting volatility in international equity markets // J Int Money Financ. – 2017. – V. 79. – P. 1–19.

УДК 658.562.012.7

**Применение модифицированного метода прослеживаемости и идентификации
на основе деревьев И/ИЛИ для учёта комплексной техники**

А.В. Токарева

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Д.В. Кручинин
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050

E-mail: alina.v.tokareva@tusur.ru

**Application of a modified traceability and identification method based
on AND/OR trees to account for complex equipment**

A.V. Tokareva

Scientific Supervisor: Prof., Dr. D.V. Kruchinin
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, Tomsk, Lenin str., 40, 634050
E-mail: alina.v.tokareva@tusur.ru

Abstract. *Accounting for complex equipment is an important task for the employee responsible for it. This article discusses the use of mathematical apparatus based on AND/OR trees to model the process of identifying equipment and computers.*

Key words: *Combinatorial generation, complex equipment, AND/OR trees, accounting, management, structure model.*

Введение

Любая организация, независимо от организационно-правовой формы, заинтересована в повышении эффективности и в максимальной отдаче от материальных активов. Выделяя такие группы материальных активов, как компьютеры и оборудование, стоит отметить, что в большинстве случаев это комплексная техника, состоящая из совокупности самостоятельных элементов. При этом, ответственность за техническое обслуживание, мониторинг наличия, целостности и работоспособности данных типов материальных активов несёт материально ответственное лицо на предприятии или в отдельно взятом структурном подразделении. В связи с этим возникает необходимость организации автоматизированного процесса учёта составляющих комплексной техники для лиц, ответственных за неё.

Целью исследования является анализ применимости модифицированного метода прослеживаемости и идентификации сложных технических изделий с применением алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ для процесса учёта компьютеров и оборудования. В работе предлагается модель структуры автоматизированного рабочего места (АРМ) с использованием деревьев И/ИЛИ.

Материалы и методы исследования

Одним из обязательных методов учёта внутри предприятия является инвентаризация [1]. Именно благодаря этой форме контроля возможно оперативно получить информацию об имуществе предприятия, сырье и финансах. Говоря об инвентаризации компьютеров и оборудования, учёт реализуется по инвентарному номеру, сформированному через специализированное программное обеспечение [2]. Однако, информация о закупаемом оборудовании и компьютерах чаще всего передаётся из бухгалтерии и имеет экономический контекст, хотя для эффективного использования и обслуживания требуется понимание технических характеристик и состава. Возникает ситуация, при которой связь двух информационных потоков: описания технических характеристик и данных об оборудовании в бухгалтерском балансе отсутствует, и ответственным за технику лицам необходимо собирать информацию самостоятельно. Особенно проблема заметна в случаях, когда

инвентарные номера не присваиваются комплектующим, которые закупаются отдельно. Например, на балансе организации может находиться «автоматизированное рабочее место» с присвоенным инвентарным номером, в него уже включены дополнительные элементы (например, внешний жёсткий диск, компьютерная мышь), а информация о них может быть не отражена. Возникает проблема учёта такой техники, последствиями которой могут быть потеря либо подмена комплектующего элемента. Для решения проблемы предлагается использование модифицированного метода идентификации и прослеживаемости изделий на основе деревьев И/ИЛИ для оптимизации сбора информации и упрощения контроля за целостностью комплексной техники.

Результаты

Подробно сущность деревьев И/ИЛИ описана в работах В.В. Кручинина [3] и подразумевает под собой древовидную структуру представления множества, которая содержит узлы двух типов: И-узел и ИЛИ-узел. В свою очередь, вариантом дерева И/ИЛИ называется дерево, которое получается из данного путем отсечения всех дуг, кроме одной, у всех ИЛИ-узлов (рисунок 1).

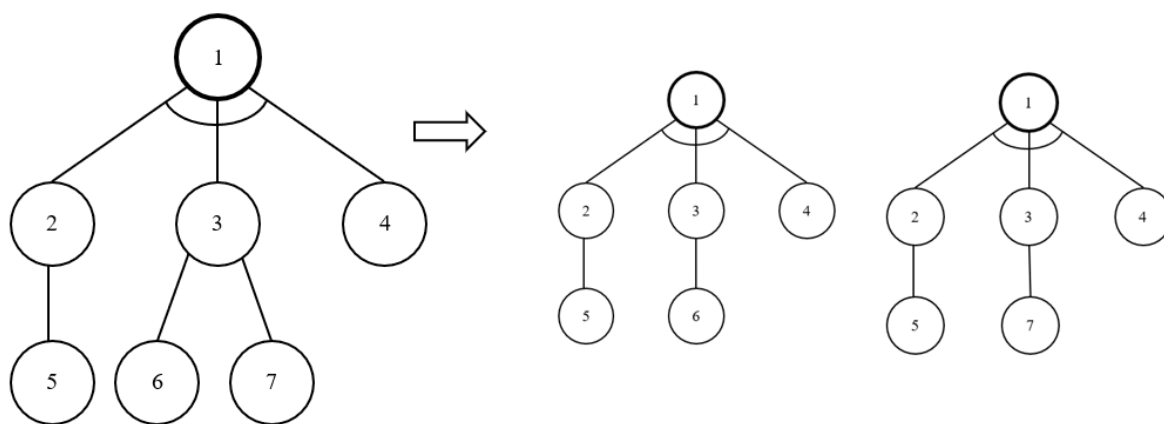


Рис. 1. Пример дерева И/ИЛИ и его вариантов (составлено автором)

Метод идентификации и прослеживаемости, описанный в работе [3], позволяет представить всю информацию об изделии в виде дерева И/ИЛИ и с помощью алгоритма Rank сгенерировать идентификационный номер, являющийся ссылкой на данные об изделии. В результате исследований были выявлены недостатки метода и выполнена модификация, отличительной особенностью которой является гибкость за счет предоставления возможности на заполнение информации о комплектующих предприятиях-поставщикам и определение резервных позиций в справочниках.

С точки зрения применения метода к процессу учёта, можно представить информацию в виде дерева И/ИЛИ, в котором комплексная техника декомпозирована на самостоятельные элементы, а они, в свою очередь, описаны с помощью необходимых характеристик. Представим применение данного метода на абстрактном автоматизированном рабочем месте (АРМ), то есть компьютер, в состав которого входят системный блок и устройства ввода/вывода. Тогда модель дерева представлена на рисунке 2.

Допустим, АРМ состоит из трёх элементов в верхнем И-узле. Рассмотрим дочерний И-узел «Системный блок». Представленный узел включает в себя три потомка, которые являются составными элементами (например, жёсткий диск). Потомками И-узла «Элемент 1» являются характеристики – то есть заданные параметры (производитель, объём памяти и др.). Каждый из узлов «Характеристика» имеет ИЛИ-потомков, из которых для конкретного элемента может соответствовать только один. При заданном дереве И/ИЛИ с информацией об АРМ, можно реализовать алгоритм Rank и получить идентификационный номер.

При имеющемся идентификаторе, с помощью обратного алгоритма Unrank строится вариант дерева с данными о конкретном АРМ.

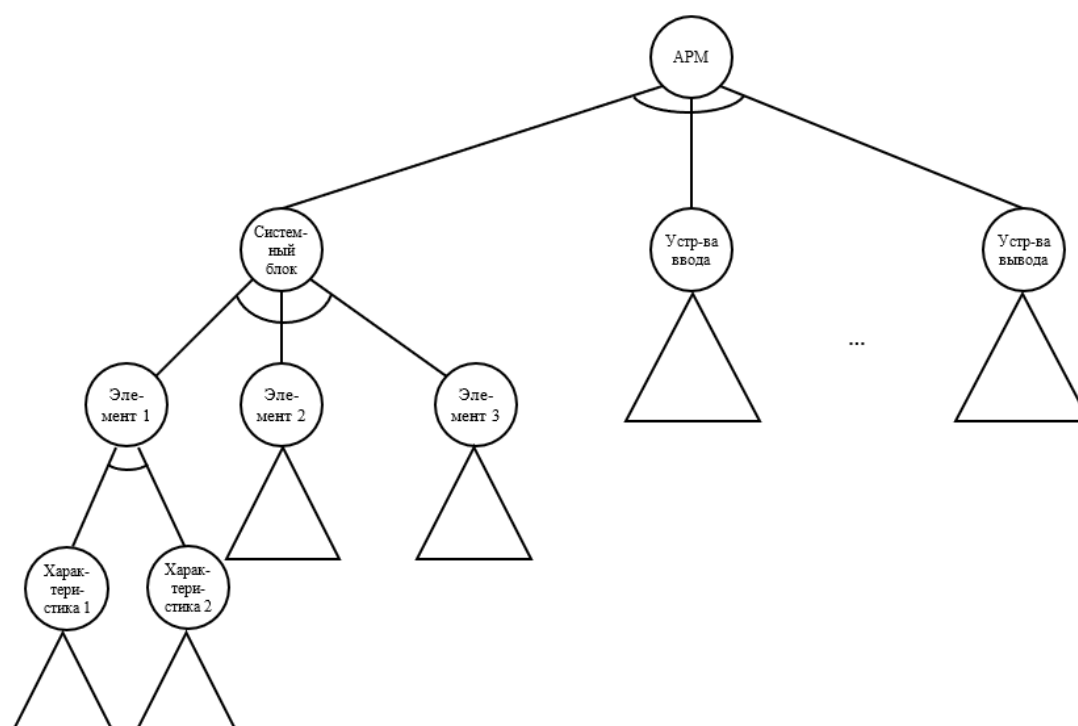


Рис. 2. Дерево И/ИЛИ для представления АРМ (составлено автором)

Заключение

Учёт оборудования и компьютеров, использующихся в организации, имеет свои особенности. Материально ответственное лицо не всегда может оперативно получить требуемую для работы и обслуживания техники информацию. Для решения данной проблемы предлагается применение модифицированного метода идентификации и прослеживаемости. В результате исследования была проанализирована возможность применения модифицированного метода, а также смоделирован вариант представления автоматизированного рабочего места с помощью дерева И/ИЛИ. Преимуществами являются универсальность, сокращение объема хранимой информации. В перспективе данный метод может использоваться в качестве основы для разработки модуля для информационно-управляющих систем.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 22-71-10052).

Список литературы

1. Самарина, Н.С., Курочкина А.В. Инвентаризация и ее значение в сохранности собственности организации // Актуальные вопросы современной экономики. – 2022. – № 7. – С. 267–272.
2. Пискарёва Ю.М. Учет у материально ответственных лиц. Прочие операции по основным средствам // Бухгалтерский учет в бюджетных и некоммерческих организациях. – 2005. – № 12 (132) – С. 5–21.
3. Кручинин В.В. Методы, алгоритмы и программное обеспечение комбинаторной генерации: дисс. ... д-ра техн. наук: спец. 05.13.11. – Томск, 2010. – 163 с.

УДК 519.6

Numerical analysis of marangoni natural convection of corium in a semi-cylindrical cavity in the presence of a boundary condition of the third kind on the bottom wallS.A. KhatabScientific Supervisor: Prof., Dr., M.A. Sheremet
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: shoroukabdelzaher@icloud.com

Abstract. *In this work we simulate Marangoni convection of heat generating corium in a semi-cylindrical cavity in the presence of an upper free boundary under the condition of convective cooling from the side of the lower wall of the corium. The Boussinesq model is used to describe the influence of the buoyant force inside the heat generating medium. To implement the problem formulated on the basis of transformed variables, the finite difference method is used. The results obtained reflect the influence of the governing parameters on the flow structure and heat transfer, as well as on the evolution of integral characteristics.*

Key words: Nuclear reactor, corium, natural convection, boundary condition of the third kind.

Introduction

The safety in nuclear energy is one of the most important issues in the operation of a nuclear power plant. One of the unlikely events for an operating reactor is the melting down of the core, which can lead to the formation of corium, and natural convection in a viscous fluid with Marangoni effect can occur, during this accident, which is considered severe. Therefore, it is very important to study the heat transfer performance for such severe accidents [1, 2].

Mathematical model

Natural convection of heat-generated corium in a cooling horizontal cylindrical cavity with a free upper surface under the Marangoni effect with radius R , and the bottom walls are being cooled with water from outside of the reactor vessel. At the initial moment, the corium is motionless, and the volumetric heat generation density of the corium is constant in this case [3].

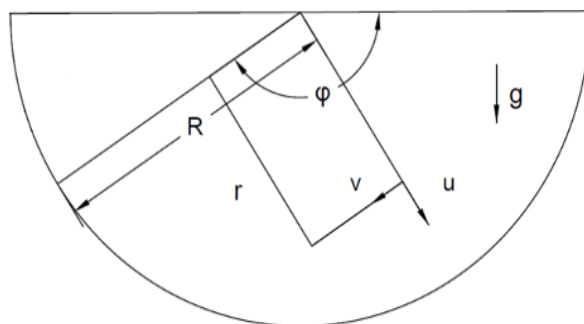


Fig. 1. The domain of interest

Governing partial differential equations formulated using non-primitive variables [4, 5] have the following non-dimensional form:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} = \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{V}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial \varphi} =$$

$$= \frac{\sqrt{Pr}}{\sqrt{Ra}} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \varphi^2} \right) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \cos \varphi - \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \frac{\sin \varphi}{R} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{V}{R} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = \frac{1}{\sqrt{Ra} \cdot Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + 1 \right) \quad (3)$$

It should be noted that the used non-primitive variables stream function Ψ and vorticity Ω can be defined as

$$U = \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi}, V = -\frac{\partial \Psi}{\partial R}, \Omega = \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \varphi} - \frac{V}{R} - \frac{\partial V}{\partial R} \quad (4)$$

Initial and boundary conditions for these governing equations can be written as follows

$$\tau = 0; \Psi = 0, U = V = 0, \Omega = 0, \theta = 0. \quad (5)$$

$$\tau > 0: \Psi = 0, \Omega = 0, \theta = 0, \quad \text{at } R = 0, \varphi \in [0, \pi];$$

$$\Psi = 0, \Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2}, \frac{\partial \theta}{\partial R} = Bi \cdot \theta, \quad \text{at } R = 1, \varphi \in [0, \pi]; \quad (6)$$

$$\Psi = 0, \Omega = \Omega = Ma \cdot f(\theta), \theta = 0, \quad \text{at } R \in (0, 1), \varphi = 0, \pi.$$

Definition of all parameters used in equations (1–3) combined with conditions (5) and (6) can be found in [3, 4]. Biot number was calculated using the correlation found in [6].

Numerical methods which were used

The formulated boundary-value problem was solved using the finite difference method [3–5]. The second order difference schemes were used for an approximation of derivatives relative to the space coordinates, while for the unsteady term the first order difference scheme was used. The obtained difference equations for the vorticity and temperature were solved by the Thomas algorithm, while for the stream function the successive over relaxation technique was used. It should be noted that for transformation of two-dimensional problem to the set of one-dimensional problems the locally one-dimensional Samarskii scheme was used.

Results

In the present work, numerical analysis was conducted to show an effect of Marangoni convection at the free surface of the corium in a semi-cylindrical cavity with Prandtl number Pr fixed at, $Pr = 0.8202$, and Rayleigh number which varies from 10^5 and 10^7 , Marangoni number which is equal to 0 and 1000, and Biot number Bi was obtained to be equal to $Bi = 12.05$ [7]. To represent the work, temperature profiles were used as was mentioned before to analyze the effect of Marangoni convection at the free surface. As obtained, the Marangoni convection is clearly visible around the side wall of the corium, but tends to be asymmetric when $Ra = 10^5$.

Conclusions

In this research, the numerical experiments for corium Marangoni natural convection study in a semi-cylindrical cavity were performed using the Java programming language to show the influence of the Marangoni effect along the free surface with the presence of third boundary condition (Newtonian cooling) with water as a working fluid. It was found that Marangoni effect characterizes a possible formation of additional flows near the upper free surface during an initial level of the convection development.

References

1. Zhnag L., Zhou Y., Tian W., Qiu S., Su G. Natural convection heat transfer in corium pools: A review work of experimental studies // *Progress in Nuclear Energy* – 2015. – Vol. 79. – P. 167–181.
2. Hengra N.H., Ilyas M., Inayat M.H. Severe accident analysis of the Qinshan Nuclear Power Plant and evaluation of boundary conditions for ex-vessel heat transfer // *Progress in Nuclear Energy*. – 2022. – Vol. 143. – P. 104032.
3. Kudrov A.I., Sheremet M.A. Numerical simulation of corium cooling driven by natural convection in case of in-vessel retention and time-dependent heat generation // *Computer Research and Modelling*. – 2021. – Vol. 13, № 4 – P. 807–822.
4. Sheremet M.A. Interaction of two-dimensional thermal “plumes” from local sources of energy under conditions of conjugate natural convection in a horizontal cylinder // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2012. Vol. 53, № 4 – P. 566–576.
5. Roache P.J. *Computational Fluid Dynamics*. Hermosa Publishers. –1976.
6. Rudraiah N., Venkatachalappa M., Subbaraya C. K. Combines surface tension and buoyancy driven convection in a rectangular open cavity in the presence of a magnetic field // *UGC-DSA Centre in Fluid Mechanics* – 1995. – Vol. 30, № 5 – P. 759–770.
7. Churchill S.W., Bernstein M.A. Correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow // *Journal of Heat Transfer*. – 1977. – Vol. 99. – P. 300–306.

УДК 620.91:004.89

**Enhancing predictive accuracy in environmental data analysis:
a hybrid LASSO-RFR approach for climatic analysis in Siberia**

D.A. Akpuluma, J.I. Abam, C.A. Williams

Scientific Supervisor: Prof., A.V. Yurchenko

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: aa06@tpu.ru, akpoebi@gmail.com

Abstract. *This study introduces a hybrid LASSO-RFR approach for photovoltaic energy forecasting, leveraging LASSO's feature selection with RFR's analytical strength to tackle weather-induced variability. It showcases improved forecast accuracy through simplified datasets and enhanced correlation analysis, resulting in superior model performance. With an MSE of 0.0060 and an R-squared of 85.7% for Model 2, the approach outperforms LASSO-only models, marking a significant advancement in renewable energy analytics and offering a potent forecasting tool for areas with extreme weather.*

Key words: *hybrid machine learning models, advanced statistical modelling, climate data analysis.*

Introduction

Amidst global population growth, the shift from traditional fossil fuels to clean energy is urgent, with photovoltaic (PV) power emerging as a key renewable source. [1] Yet, PV power's dependency on variable weather conditions like sunlight and wind speed necessitates advanced forecasting [2]. Forecasting methods range from statistical and time-series models, which consider weather and historical data, to more complex AI and hybrid models [3,4,6]. A hybrid approach, combining the LASSO and Random Forest Regression (RFR), shows promise for hour-ahead PV power predictions, especially in extreme climates [5]. RFR's strength lies in its ability to process non-linear patterns and large data sets, leading to improved efficiency and reliability in renewable energy forecasting when considering variables such as cloud cover and temperature [6].

This study aims to reveal Siberia's environmental dynamics using a LASSO-Random Forest hybrid model and enhance environmental data analysis methodologies. By integrating LASSO and RFR, it seeks to improve prediction accuracy and refine analytical techniques for complex datasets in extreme weather conditions.

Research methods

In the pursuit of enhancing solar power prediction, various methodologies can be employed, each with its unique strengths and weaknesses.

General methods

Statistical methods like ARIMA are robust for linear trends in historical data but struggle with non-linearities. Machine learning algorithms such as Random Forest and SVM detect non-linearities but can overfit without quality data. Artificial Neural Networks, including CNNs and RNNs, excel in complex pattern modelling but need substantial data and compute power. Physical models offer principled predictions but can oversimplify complex interactions. Hybrid models blend these approaches for improved accuracy but at the cost of increased complexity and computational resources [7].

LASSO-RFR hybrid framework

We present a hybrid LASSO-RFR model for enhanced environmental predictions. LASSO simplifies features, and RFR addresses non-linearity, offering superior forecasts and mitigating overfitting. Data from Tomsk's TOR station, covering solar radiation, temperature, humidity, and wind speed from January 1, 2021–January 23, 2024, served as the basis for our analysis [8].

Equation (1) shows the LASSO regression formula, which combines the OLS loss function with a penalty on the absolute values of coefficients, given as $|a_i|$, regulated by λ . Increasing λ enables LASSO to shrink less important feature coefficients to zero, performing feature selection, enhancing simplicity, and preventing overfitting, thus maintaining interpretability in various climates [7].

$$\text{Loss function} = \text{OLS loss function} + \lambda \sum_{i=1}^n |a_i| \quad (1)$$

The RFR algorithm, combining decision trees via an ensemble approach with bagging and the random subspace method, excels in classification, regression, and clustering tasks. It constructs multiple trees, each weak alone but collectively strong, to enhance machine learning performance [6].

Results

This paper's findings, derived from applying LASSO-RFR to three models, explore the impact of varying weather parameters on forecast sensitivity in extreme climates. Model 1 incorporates all weather conditions, Model 2 excludes temperature, and Model 3 omits humidity, highlighting the hybrid method's responsiveness to different climatic elements.

Model 1

In this model LASSO-RFR method is used to analyze Siberia's climatic features. LASSO, as a feature selection mechanism, zeroes out less significant parameters, identifying temperature, humidity, wind speed, and month as key predictors (Fig. 1). An RFR model is then trained on these selected features to accurately forecast.

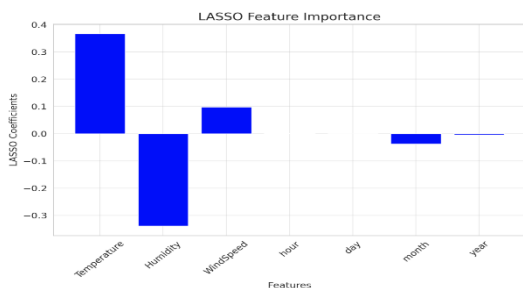


Fig. 1. Plot of Model 1 (normalized data)

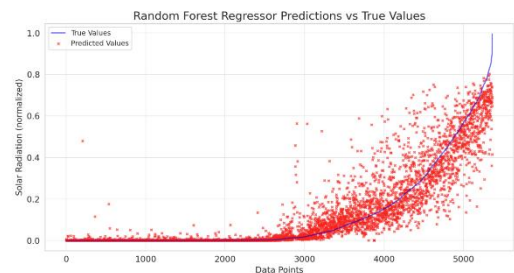


Fig. 2. RFR predictions vs true values (Model 1)

Fig. 2 illustrates RFR's accurate solar radiation predictions (red dots) against actual values (blue line), with an R-squared of 84.6 % and an MSE of 0.0065, showcasing superior performance to LASSO. The model's limitation in capturing peak solar radiation is noted by deviations at peaks.

Model 2

Here, one of the weather parameters is excluded from the analysis, which is temperature. Fig.3 is the chart showing the coefficient values of the features without temperature leaving humidity as the most important feature, while day is the least important feature. In this model there are no zero coefficient features.

Fig. 4 displays true solar radiation (blue line) against predicted values (red dots), showing variance in predictions. The model achieves an R-squared of 85.7 %, explaining most variance, with a reduced MSE of 0.0060, surpassing Model 1's performance.

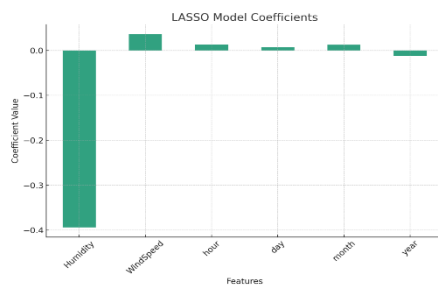


Fig. 3. LASSO feature importance plot of Model 2

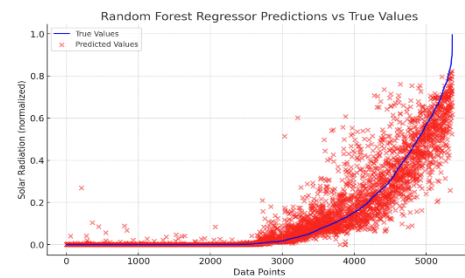


Fig. 4. RFR predictions vs true values (Model 2)

Model 3

In Model 3, excluding humidity, LASSO selected features for RFR analysis. This model yielded an R-squared score of 83.9 % and an MSE of 0.0068, differing slightly from prior models.

Conclusion

The study demonstrates the superior accuracy of a LASSO-RFR hybrid model over LASSO alone for predicting solar radiation in Siberia, significantly enhancing RFR's metrics through LASSO-based feature selection. Notably, Model 2, which excludes temperature from LASSO's input, outperforms other models with an R-squared of 0.857 (85.7 %) and a mean squared error of 0.0060, affirming its efficiency in capturing solar radiation variability. Future directions include refining these models for better performance and interpretability in similar climates. Integrating Explainable Artificial Intelligence (XAI) could further clarify the predictive process, marrying high accuracy with transparency in machine learning models' power output predictions [9].

References

1. Sher F., Curnick O., Azizan M.T. Sustainable conversion of renewable energy sources // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, № 5. URL: <https://doi.org/10.3390/SU13052940>.
2. Kumar D.S., Yagil G.M., Kashyap M., Srinivasan D. Solar irradiance resource and forecasting: a comprehensive review // IET Renewable Power Generation. – 2020. – Vol. 14, № 10 – P. 1641–1656. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1227>.
3. Akhter M.N., Mekhilef S., Mokhlis H., Shah N.M. Review on forecasting of photovoltaic power generation based on machine learning and metaheuristic techniques // IET Renewable Power Generation. – 2019. – Vol. 13, № 7 – P. 1009–1023. URL: <https://doi.org/10.1049/IET-RPG.2018.5649>.
4. Sobri S., Koochi-Kamali S., Rahim N. Abd. Solar photovoltaic generation forecasting methods: A review // Energy Conversion and Management. – 2018. – Vol. 156 – P. 459–497. URL: <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.11.019>.
5. Hengi T., Nussbaum M., Wright M.N., Heuvelink G.B.M., Gräler B. Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables // PeerJ. – 2018. URL: <https://doi.org/10.7717/peerj.5518>.
6. Khalyasmaa A., Eroshenko S.A., Chakravarthy T.P., Gasi, V.G., Bollu S.K.Y., Caire R., Atluri S.K.R., Karrolla S. Prediction of solar power generation based on random forest regressor model // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958063>.
7. Akpuluma D.A., Yurchenko A.V. Advancing Solar Irradiation Prediction in Extreme Climates: A LASSO Regression Analysis in Tomsk // Proceedings of International Conference on Applied Innovations in IT. – 2024. – Vol. 12, № 1 – P. 257–263. URL: (DOI:Under Indexing).
8. Belan B.D., Ivlev G.A., Sklyadneva T.K. Long-term monitoring of total and UV-B radiation in Tomsk // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2012. – Vol. 25, № 4 – P. 281–285.
9. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program // AI Magazine. – 2019. – Vol. 40, № 2. URL: <https://doi.org/10.1609/aimag.v40i2.2850>.

УДК 004.41

**Реализация системы помощи руководителю проекта
при обработке полученных замечаний от экспертизы**И.А. Истомин, Н.А. Злочевский

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н., Б.С. Мерзликин
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: iai12@tpu.ru**Implementation of a system to assist project managers
in handling feedback received from expertise**I.A. Istomin, N.A. Zlochevsky

Scientific Supervisor: Ass. Prof., PhD, B.S. Merzlikin
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: iai12@tpu.ru

Abstract. The paper is devoted to the study of registers of non-conformities (comments) generated on a based on expert organizations feedback. The development and implementation of software for corresponding analization for registers of comments is discussed.

Key words: Register, Text Comparison, Graph Databases.

Введение

В проектных организациях разрабатывается большое количество документации для сопровождения процесса строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства. Данная документация перед передачей в строительное производство должна пройти экспертную оценку в государственных или негосударственных экспертных организациях, в соответствии с требованиями Российского законодательства.

Наибольшее количество проектов проходят государственную экспертизу проектной документации объектов капитального строительства и результатов инженерных изысканий, выполняемых для подготовки такой проектной документации.

Результатом государственной экспертизы является заключение о соответствии (положительное заключение) результатов инженерных изысканий, проектной документации необходимым требованиям, а также заключение о достоверности (положительное заключение) определения сметной стоимости.

Положительное заключение на проект является необходимым документом для получения разрешения на строительство и действует на весь период строительства.

Прохождение экспертизы ответственный и жестко регламентированный по времени прохождения процесс, требующий отвлечения большого количества специалистов от текущей производственной деятельности. С целью оптимизации процесса работы с несоответствиями, сокращения замечаний и времени, при прохождении экспертизы по будущим проектам, целесообразно выполнить анализ ранее полученных замечаний и учесть их в работе над новыми проектами. Помимо временных затрат важным является сокращение трудовых, финансовых и репутационных издержек.

Всё вышесказанное подчёркивает особую актуальность решения задачи анализа получаемых от экспертных организаций несоответствий, автоматизации процесса работы с ними и учета их в текущей деятельности при реализации новых проектов.

Экспериментальная часть

В качестве исходных данных были взяты замечания двух реальных проектов. Замечания по проекту обычно приходят в виде официального письма, а сами замечания перечислены в

таблице из 4 столбцов (порядковый номер; вывод о несоответствии; ссылка на материал; основание). Данные необходимо предварительно преобразовать, чтобы они могли быть обработаны далее (рис. 1).

№ п/п	Вывод о несоответствии	Ссылка на материал	Основание
Инженерно-экологические изыскания			
1.	Не представлены сведения от уполномоченного органа власти о наличии и местоположении в районе размещения проектируемых объектов поверхностных и подземных источников водоснабжения и зон санитарной охраны источников водоснабжения. Для участка изысканий, расположенного в границах зон санитарной охраны источников водоснабжения не представлены сведения о содержании в почвенном покрове веществ, указанных в п. 2 ГОСТ 17.4.2.01-81 «Охрана природы. Почвы. Номенклатура показателей санитарного состояния» и прил. 3 к СанПиН 2.1.7.1287-03 «Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы».	-ИЭИ1, ТОМ 4.1, ИЭИ2, ТОМ 4.2	п. 8.5.3 СП 47.13330.2012; п. 2 ГОСТ 17.4.2.01-81 «Охрана природы. Почвы. Номенклатура показателей санитарного состояния», Приложение 3 к СанПиН 2.1.7.1287-03 «Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы».
2.	В материалах изысканий не представлены достоверные данные о структуре земельного фонда участков работ, изымаемых во временное и (или) постоянное пользование (данные о площадях временного и/или постоянного землепользования, кадастровые номера земельных участков, сведения о границах земель в виде их схема-	-ИЭИ1, ТОМ 4.1, ИЭИ2, ТОМ 4.2	п. п. 8.5.1-8.5.3 СП 47.13330.2012; п. 8.3.1.4 СП 47.13330.2016; п. 1 ст. 47 Градостроительного кодекса, подпункты а) и в) п. 14 «Основных положений о рекультивации земель...», утв. Поста-

Рис. 1. Фрагмент реестра замечаний

В процессе обработки исходных данных был выделен перечень атрибутивных свойств из исходных данных. В процессе общения с ГИПОм было принято решение добавить в перечень дополнительные свойства, который могут быть использованы при последующих манипуляциях. В итоге был получен следующий список: номер замечания по реестру; имя замечания (суть замечания); отношение к разделу проекта в проекте; имя раздела; ответственный за устранение; исполнитель; дата получения; фактическая дата получения; планируемая дата исправления; фактическая дата исправления; ответ; ссылка/указание на нормативную документацию; отметка о снятии замечания; критичность (важность) замечания; названия проекта; прочая информация). Этот список не конечен и его можно дополнять.

Из табличного формата документа Word Замечания, со всеми перечисленными полями выше, были преобразованы в табличный формат CSV. Такой формат выбран в связи с его распространенностью, многое программное обеспечение готово работать с ним «напрямую».

В качестве среды для хранения выбрана СУБД (Neo4j). Neo4j - это популярная система управления базами данных с открытым исходным кодом, которая основана на принципе графа [1, 2]. Она позволяет моделировать и работать с данными в виде связанных узлов и отношений, так же имеет свой собственный язык запросов Cypher.

Загрузка двух реестров замечаний была выполнена с помощью написанного скрипта на языке Cypher [3]. Скрипт построчно брал данные из таблицы CSV и выполнял создание нод с заданными атрибутами.

Далее, с использованием языка Python, был выполнен поиск схожих замечаний. Скрипт обращался за данными к базе данных, брал текст одного замечания и сравнивал с текстом других. Сравнение выполнялось путем преобразования текстов замечаний в вектор. Если степень схожести более 75 %, то между нодами строилась связь.

Для выборки данных был разработан ряд запросов к БД в виде хранимых функций, которые в будущем можно вызывать из внешних источников.

Поиск объединяющих факторов в замечаниях можно выполнять не только по степени схожести смысловой и текстовой части замечаний. Объединяющие факторы могут быть различными.

Результаты

В результате выполнения эксперимента модель показала свою работоспособность. Было выявлено, как полностью идентичные тексты замечаний, так и замечания с незначительными изменениями. В частности, суммарное количество замечаний по двум проектам составляет более шестисот. При этом схожих замечаний с заданным пороговым значением было выявлено более двухсот. Удалось выяснить, что схожие замечания существуют не только в различных проектах, но и в рамках одного проекта, но разных его частях.

В процессе работы было разработан ряд запросов, которые сохранены в базе данных.

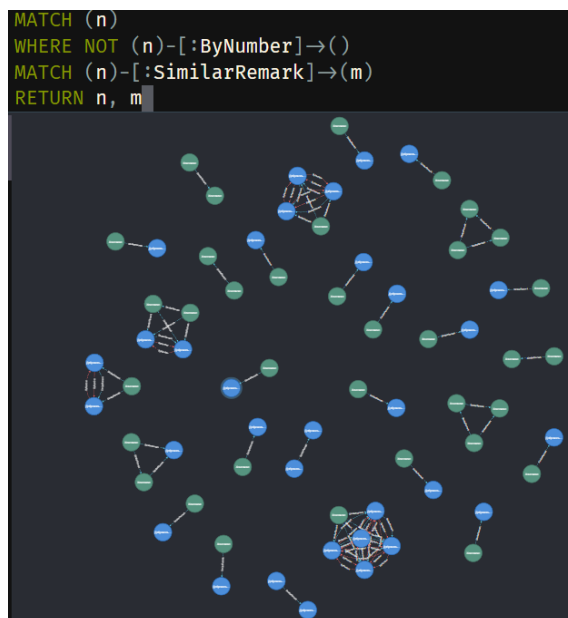


Рис. 2. Код запроса и результат. Выборка нод только с определенным типом связей

Заключение

В результате проведенного исследования описанная модель показала свою работоспособность. Накопление и обработка получаемых замечаний необходима. Это позволит учесть их в будущих работах и сократить издержки, как на ответы, так и на корректировку документации.

Решение в текущем виде уже может использоваться руководителем проекта для минимизации или исключения схожих замечаний. Но для комфортной работы необходимо отдельное полноценное приложение. Так же в качестве дальнейшего развития необходимо заменить текущий вариант сравнения текста замечаний на более совершенный алгоритм сравнения текстов. Библиотеки NLP содержат, как готовые языковые модели, так и поддерживают создание собственных, под различные бизнес задачи.

Подготовка собственной языковой модели улучшит точность сравнения смысла текстов замечаний, что положительно повлияет на общий результат работы системы.

Список литературы

1. Буркатовская Ю.Б. Теория графов. Часть 1: учебное пособие Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 200с.
2. Р.Уилсон. Введение в теорию графов. – М. : Мир, 1977. – 208с
3. Документация по языку запросов Cypher // Neo4j documentation. Cypher Manual 5: сайт – 2024. – URL: <https://neo4j.com/docs/cypher-manual/current/introduction/>

УДК 004.655.3, 004.652.3

**Использование больших языковых моделей
для формирования запросов к графовым базам данных**

Р.А. Мамадалиев

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. М.Е. Семенов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: ram17@tpu.ru

Using large language models for a graph database interaction

R.A. Mamadaliev

Scientific Supervisor: Ass. Prof., PhD M.E. Semenov
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: ram17@tpu.ru

Abstract. *This study investigates the application of large language models for formulating queries to graph databases. A knowledge graph was constructed based on data pertaining to users within a social network community. An analysis and comparison were conducted between queries generated using a large language model and those composed manually.*

Key words: *graph database, large language models, Neo4j.*

Введение

На сегодняшний день графовые системы управления базами данных вышли на первый план в области управления данными, предлагая уникальный подход к визуализации и запросам взаимосвязанных данных. В отличие от традиционных реляционных баз данных, графовые способны обрабатывать сложные отношения между данными, что в свою очередь позволяет представлять данные в виде графа знаний – структуры данных, где объекты или понятия представлены как узлы, а связи между ними – как ребра.

Одним из инновационных подходов к извлечению данных из графа знаний является использование больших языковых моделей (large language model, LLM) – моделей обработки естественного языка используемых для выполнения различных задач, таких как генерация и понимание текста. Преимуществом данного подхода является возможность написания запроса без знания языка обращения к конкретной базе данных.

Целью данной работы является исследование эффективности использования больших языковых моделей в формировании запросов к графу знаний.

Экспериментальная часть

В работе в качестве исходных данных для построения графа знаний мы использовали информацию о пользователях сообщества «Типичный ТПУ» (7500 подписчиков) [1]. Для реализации алгоритмов получения данных был использован язык программирования Python. В качестве графоориентированной системы управления базы данных (СУБД) мы выбрали Neo4j [2, 3]. Для написания запросов и визуализации данных применялась встроенная утилита Neodash. В качестве большой языковой модели использовалась модель – OpenAI [4].

Принцип работы формирования запросов с помощью LLM заключается в преобразовании инструкций для модели, изложенных на естественном языке (промпта) в запрос, написанный на языке запросов конкретной СУБД [5]. В нашем случае был использован язык Cypher. Иллюстративный пример формирования запроса с использованием LLM приведена на рис. 1.



Рис 1. Иллюстративный пример формирования запроса с использованием LLM

Принцип работы самой модели можно описать последовательностью этапов. Модель LLM загружает предварительно обученные параметры и конфигурации для обработки естественного языка и генерации запросов к графовой базе данных. Инициализация модели подготавливает ее к обработке входного текста и настройке внутренних состояний для работы с графовой структурой. Входной запрос на естественном языке токенизируется и преобразуется в числовое представление с использованием векторного пространства слов. Каждый токен кодируется в числовое представление, которое модель LLM может понимать и обрабатывать. Закодированный запрос подается на вход модели LLM для обработки. Модель анализирует контекст и синтаксические зависимости в запросе, используя свою архитектуру, в частности, модель Transformer, состоящую из двух компонентов – кодировщика и декодировщика.

Кодировщик принимает на вход последовательность токенов и преобразует их в скрытые представления. Важным составляющим является механизм самовнимания который позволяет модели фокусироваться на значимых элементах последовательности. Декодировщик принимает на вход скрытое представление и генерирует выходную последовательность. Декодировщик также содержит механизм самовнимания, который позволяет модели учесть ранее сгенерированные токены.

В процессе обработки модель извлекает ключевые элементы запроса и определяет его цель, например, поиск конкретных узлов или связей. Генерация происходит путем предсказания последовательности токенов, которые образуют запрос. Сгенерированные токены объединяются в итоговый запрос на языке Cypher.

Результаты

В результате исследования сформирован граф знаний сообщества социальной сети [1], проведен анализ и обработка данных на основе графового представления знаний сообщества (рис. 2). Также были исследованы основные характеристики графа знаний, вычислен эффективный диаметр графа.

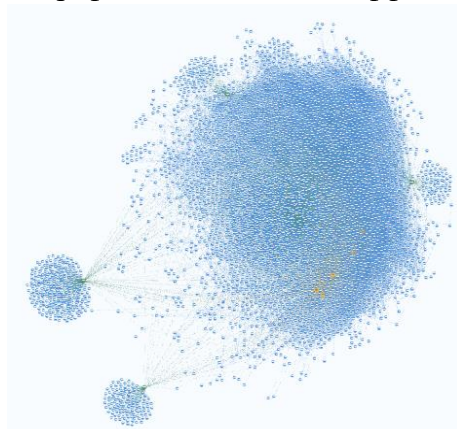


Рис. 2. Граф знаний сообщества: пользователи сообщества (синие маркеры), пять самых популярных городов среди пользователей (зеленые маркеры), пять самых популярных сообществ среди пользователей (желтые маркеры)

В рамках работы были проанализированы возможности LLM OpenAI для формирования запросов к графовой базе данных Neo4j. Проведены сравнение и анализ результатов написания запросов с помощью LLM OpenAI и традиционным подходом. Используемая языковая модель справляется с простыми запросами, более сложные запросы (в частности, с использованием методов топологического анализа данных) требуют верификации сгенерированного кода человеком. На рис. 2 приведен результат выполнения запроса: «show all users who live in Tomsk and have more than 50 friends and how they are connected to each other», на рис. 3 приведено визуализация результата запроса: «show the user with the highest betweenness rate and all his connections using graph data science function».

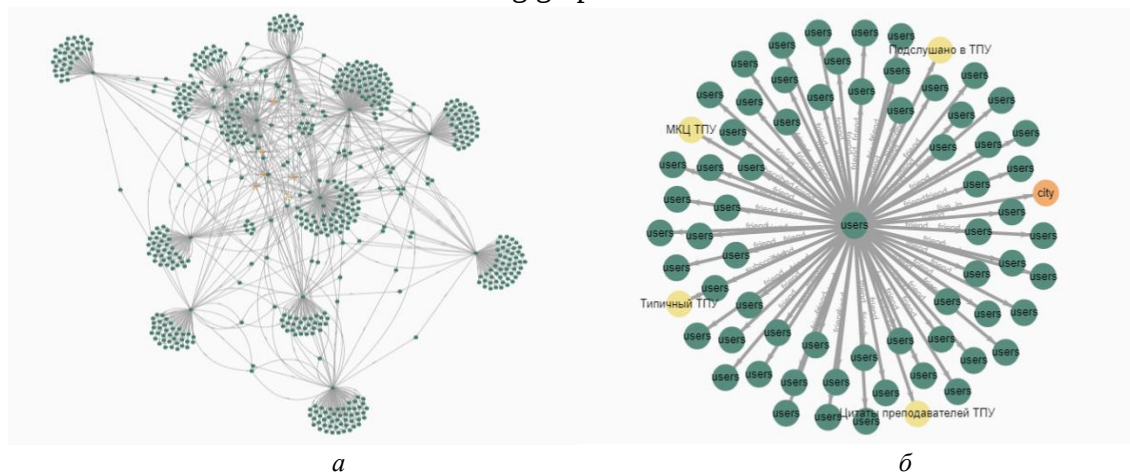


Рис. 3. Результаты выполнения запросов, сформированных с использованием LLM модели:
а – запрос без вычислений, б – запрос с вычислением характеристик графа

Таким образом, большие языковые модели способны формулировать как простые, так и сложные многоуровневые запросы с использованием методов графового анализа данных, что позволяет существенно сократить время написания запроса и его тестирования.

Заключение

Проведённое исследование показывает, что использование больших языковых моделей в формировании запросов к базе данных значительно проще и эффективнее по сравнению с традиционным (ручным) формированием запросов. Одним из ключевых преимуществ исследуемого подхода является возможность формирования запросов без знаний языка написания запросов. Это открывает новые возможности в сфере обработки и структуризации данных и делает процесс более интуитивным.

Список литературы

1. Сообщество «Типичный ТПУ» // URL: <https://vk.com/typicaltpu> / (дата обращения: 08.02.2024).
2. Ломов П.А. Применение графовых СУБД в задачах анализа данных // Труды Кольского научного центра РАН. – 2019. – № 9 (9). – С. 137–145.
3. Matasova E.A., Sabinin O.Yu. Research of efficiency of Oracle and Neo4j DBMS // Theoretical & Applied Science. – 2022. – № 5(109). – P. 742–752.
4. Михайлова С.С., Халмакшинов Е.А. Алгоритм анализа данных на графовых структурах /С.С. Михайлова, // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 4(130). – С. 25-28.
5. Объединение LLM и графов знаний для GenAI: примеры использования и лучшие практики // neo4j.com URL: <https://neo4j.com/blog/unifying-llm-knowledge-graph/> (дата обращения: 12.02.2024).

УДК 004.94

**Программная реализация метода управления манипулятором щупальца,
эксплуатируемого в экстремально сложных условиях**К.А. Пахомов

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н., М.Е. Семенов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: ivanov@tpu.ru**Software implementation of the method of manipulator-tentacle control,
operated in extremely difficult conditions**K.A. Pakhomov

Scientific Supervisor: Ass. Prof., Ph.D., M.E. Semenov
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: ivanov@tpu.ru

Abstract. In the present study, we have developed software for controlling the tentacle manipulator, using deep neural learning, object recognition technology and creating a formative one in the form of a cubic spline. In our work, we used a positioning pitch along the spline of 15 mm, positioning accuracy of 0.00001, while the length of the (i) segment reached 65 mm, and the distance from the axis of the spline to the actuator was 35 mm.

Key words: Neural networks, computer vision, cubic spline, manipulator, tentacles.

Введение

В современной робототехнике существует потребность в совершенствовании методов управления манипуляторами, способных работать в экстремально сложных условиях [1]. Задача управления манипулятором щупальца – одна из таких задач, которая требует особого внимания и инженерных решений.

Цель работы – выполнить программную реализацию метода управления манипулятором щупальца.

Экспериментальная часть

Основываясь на анатомии головоногих заметим, конечность осьминога может быть разделена на $(n-1)$ секторов, где n количество групп продольных мышц. Тогда сведем задачу к позиционированию n точек в пространстве [2]. На рисунке 1 представлена принципиальная модель манипулятора.

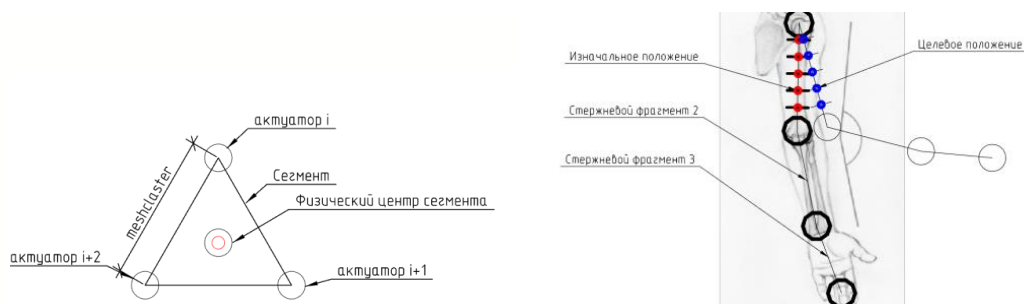


Рис. 1 Математическая модель манипулятора:
а) поперечное сечение, б) вид сбоку с 6-ю центрами сегментов

Для осуществления перемещения в заданную точку, каждому актуатору (мышце) сегмента необходимо передать такое количество энергии чтобы восполнить разницу между текущим положением и требуемым [3]. Предполагаем, что изначально все звенья

манипулятора находятся в нулевых координатах – звенья манипулятора направлены вертикально. Как следствие на все актуаторы сегментов действует равнонаправленное напряжение. Движения манипулятора описываются в двух плоскостях через интерполяцию кубического сплайна, где область определения разбита на конечное число отрезков через интерполяционные узлы (рис. 2).

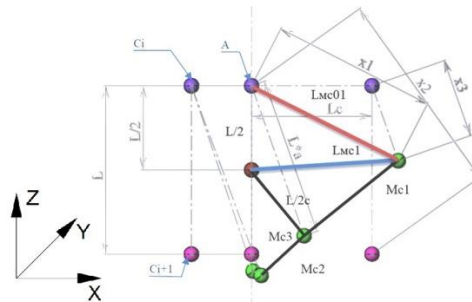


Рис. 2. Характерные точки математической модели сегмента $i, i+1$ (вид сбоку): $(i+1)$ -ый сегмент (розовый), i -ый сегмент (фиолетовый), $i+1$ сегмент новое положение (зеленый)

Отрезки с индексами M_{ci} и величина $L/2$ образуют прямоугольный треугольник, тогда определим величины $L_{mc(1)} = \sqrt{\frac{L^2}{2} + M_{c(1)}^2}$, при этом $M_{c(1)}$ – длина гипотенузы.

Для нахождения величины $L_{mc(0,1)}$ обратимся к теореме косинусов:

$$L_{mc(0,1)} = \sqrt{\frac{L^2}{2} + L_{mc(1)}^2 - 2 \frac{L^2}{2} L_{mc(1)}^2 - \cos(a)}, \quad (1)$$

где

a – угол между сторонами $\frac{L}{2}$ и L_{mc1} , который определяется как $180-55-38=87$, где 55° – константа, 38° – угол образованный между осью $L/2$ и вертикальной осью. Далее поставим задачу следующим образом: Пусть известны стороны $L_{mc1} = a$, $L_{mc01} = b$, $\frac{L}{2} = c$ треугольника ABC и координаты вершин A и B . По теореме косинусов координаты вершины C можно выразить через координаты вершины A :

$$\begin{cases} x_C = x_A + b \cdot \cos A \\ y_C = y_A + b \cdot \sin A \end{cases} \quad (2)$$

Результаты

В ходе работы алгоритма материал в формате «mp4» был проанализирован алгоритмами компьютерного зрения и нейронными сетями для получения координат положения реперов. Указанный массив данных будем именовать «DataframeHANDfiltr» в составе которого находятся координаты положения конечности оператора по всем кадрам. На рисунке 3 представлен пример работы алгоритма.

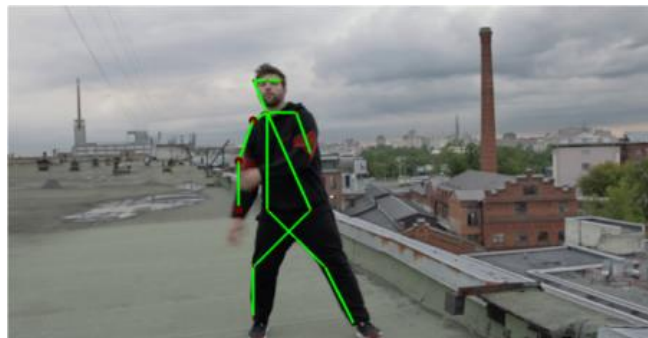


Рис. 3 Кадр 0 видео контента, движения оператора: красные точки – реперы

Используя поправочные коэффициенты получаем матрицу вида:

$$DF_{split0M} = \begin{pmatrix} DF_{split0M}[0][0] * Mas_{newproekt} & DF_{split0M}[cdf][0] * Mas_{newproekt} \\ DF_{split0M}[0][1] * Mas_{newproekt} & \dots & DF_{split0M}[cdf][1] * Mas_{newproekt} \\ \dots & \dots & \dots \\ DF_{split0M}[0][rdf] * Mas_{newproekt} & DF_{split0M}[cdf][rdf] * Mas_{newproekt} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Где, $Mas_{newproekt}$ – коэффициент отношения между фактической длиной конечности оператора и Евклидовой длиной точками $DF_{split0M}[0][0]$ и $DF_{split0M}[cdf][0]$

Итогом вычислений является Dataframe «DFsplit0M» с параметрами координат X,Y,Z из которого значения координат 5 точек присваиваются переменным x_{vhod} , y_{vhod} и $z_{vhod}(i)$, после чего применяем схему Горнера для построения кубического сплайна.

$$\varphi(x) = c_0 + x * (c_1 + x * (c_2 + x * (c_3 + x * (\dots + c_n + x) \dots))) \quad (4)$$

Расчетная схема определения $i + 1$ координаты z, x, y узла сегмента имеет вид пространственной трапеции (рисунок 4) с точками $B_{1(i)(z,x,y)}$, $B_{1(i+1)(z,x,y)}$, $A_{1(i)(z,x,y)}$, $A_{1(i+1)(z,x,y)}$. Так как изначально, значения точки $A_{1(i+1)(z,x,y)}$ неизвестно. Вводим дополнительную точку, как точку симметрии $M_{1(i+1)(z,x,y)}$ и определяем длину $|A_{(i)}A_{1(i+1)}|$, значение определяем как сторону треугольника:

$$|A_{(i)}A_{1(i+1)}| = \sqrt{|A_{(i)}M_{(i)(i+1)}|^2 + |A_{(i)}M_{(i)(i+1)}|^2 - 2|A_{(i)}M_{(i)(i+1)}| * \cos(betta3d)} \quad (5)$$

В свою очередь

$$betta3d = 180 - 2 * \sqrt{\frac{|A_{(i)}M_{(i)(i+1)}|^2 + |B_{(i)}M_{(i)(i+1)}|^2 - |B_{(i)}A_{(i)(i+1)}|^2}{2 * |A_{(i)}M_{(i)(i+1)}| * |B_{(i)}M_{(i)(i+1)}|}} \quad (6)$$

таким образом имея длину $|A_{(i)}A_{1(i+1)}|$, производим проход от $A_{(i)}$ до $A_{1(i+1)}$ и в случае если $|A_{(i)}A_{1(i+1)}| = |A_{(i)}A_{1(i+1)}|$ (шаговая) точке $A_{1(i+1)}$ присваиваются новые координаты.

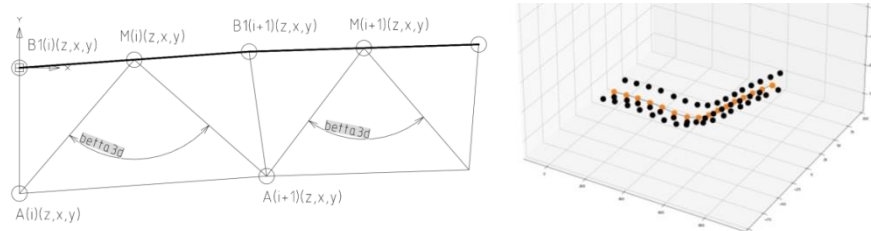


Рис. 4. Трапеция в плоскости точек $A(i)$, $B1(i)$, $B1(i+1)$.
Координаты точек кубического сплайна и вершин сегментов

Заключение

В результате получаем набор команд для актуаторов: «х_уу_zzz», где х – номер группы сегмента, «уу» принимает значение $1n, 1p, \dots, 3n, 3p$, в котором префикс 1–3 – номер актуатора, суффикс n/p – характер работы растяжение/сжатие, «zzz» – величина усилия актуатора. Команды в виде х_уу_zzz отправляются на главный контроллер типа Master, далее распределяются на котроллеры типа Slave с последующей адресацией на актуаторы.

Список литературы

1. Козлов А. Восемь умных ног // Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова. – Наука и жизнь. – 2019. – № 7. – С. 1.

2. Липовский Д.Д., Васильев А.В., Абаева К.С. Специальные требования к робототехническим комплексам войск радиационной, химической и биологической защиты. – Вольск, 2018. – С. 72–79.

3. Вабищевич А.Н., Восков Л.С. Беспроводная система захвата движения на основе платформы беспроводной сенсорной сети и инерциальных датчиков // Научные труды (Вестник МАТИ) – 2013. – Выпуск 20 (92). – С. 200–210.

УДК 004.383.3

**Способ выделения полезного сигнала из зашумленного на основе цифрового фильтра
и преобразования Фурье с применением программы MATLAB**С. Жуань, Т.Е. МамоноваНаучный руководитель: профессор, д.т.н., А.М. Малышенко
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050E-mail: sypen@tpu.ru**Investigation of signal processing of useful signal extraction from noisy signal**S. Ruan, T.E. MamonovaScientific Supervisor: Prof., Dr., A.M. Malysenko
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050E-mail: sypen@tpu.ru

Abstract. This paper investigates the method of extracting useful signal from noisy signal based on digital filter and Fourier transform using MATLAB programme.

Key words: Discretization, Fourier transform, amplitude-frequency response, digital filter, useful signal.

Введение

Система передачи информации представляет собой совокупность технических средств (передатчик, линия канал передачи сигналов и приемник), обеспечивающих возможность передачи информационных сообщений от источника информации к получателю. Задача системы передачи информации заключается в том, чтобы перенести данный сигнал на заданное расстояние к получателю. При распространении сигналов через систему передачи информации в сумме с основным сигналом одновременно регистрируются и мешающие – шумы и помехи самой различной природы. К помехам, прежде всего, относят влияние внешних электрических и электромагнитных воздействия на линии связи и в процессе измерений [1].

Оценка параметров синусоидальных сигналов на фоне шума является одной из наиболее распространенных проблем в области цифровой обработки сигналов, такие сигналы широко применяются в радиолокации, гидролокации, обработке биосигналов, энергетических системах, системах ядерной энергетики и др. [2].

Например, в технических процессах используется синусоидальный сигнал для выполнения следующих задач.

1. Для контроля уровня в резервуарах хранения нефти используется FM-радар непрерывной волны, где улавливается сигнал, отраженный от поверхности жидкости системой FM-радар, такой сигнал имеет синусоидальный вид с одной частотой.

2. В энергосистеме: контроль неисправностей, обеспечение качества и работа энергосистемы связаны с оценкой частоты синусоидальных сигналов.

3. При анализе вибрационных сигналов и диагностике неисправностей использование технологии оценки частоты синусоидального сигнала позволяет проводить диагностику неисправностей и анализ вибрации механического оборудования.

4. В исследованиях радиочастотного разряда с импульсной модуляцией процесс установившегося состояния сигнала напряжения может быть представлен синусоидальным сигналом, а переходные процессы, такие как нарастающий фронт перед входом в установившееся состояние и спадающий фронт в конце установившегося состояния, могут быть описаны синусоидальным сигналом, модулированным индексной функцией. Анализ спектра сигналов напряжения во время переходного процесса, можно получить такие важные параметры, как мгновенная мощность и сопротивление разряда.

В соответствии с вышеперечисленным, обработка синусоидального сигнала играет ключевую роль в современной промышленности, а решение вопроса выявления полезного сигнала из зашумленного несет важную теоретическую значимость и применение на практике.

Экспериментальная часть

Задача – разработать алгоритм выделения полезного сигнала из зашумленного в среде MATLAB. Вид сигнал можно представить в виде [3]:

$$y = A_m \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot t) + \eta, \quad (1)$$

где $A_m \cdot \sin(\pi \cdot f \cdot t)$ – полезный целевой сигнал; $\eta = \sin(\pi \cdot f_2 \cdot t) + \sin(\pi \cdot f_3 \cdot t)$ – шум; f – частота Гц; t – время, с.

Далее выполнено моделирование смешанного сигнала в среде MATLAB, для которого нужно выделить целевой сигнал.

Для того чтобы выделить полезный сигнал из зашумленного, необходимо составить алгоритм обработки информации.

Суть алгоритма заключается в следующем:

1. Производятся дискретизация сигнала, чтобы минимизировать помехи при высокой частоте.
2. Анализируется полученный сигнал после дискретизации, при этом определяется пик сигнала с целью получения параметров цифрового фильтра.
3. С помощью проектирования, и применения цифрового фильтра выделяется исходный полезный сигнал без шумов.

На рис. 1. представлены структурная схема обработки сигнала.

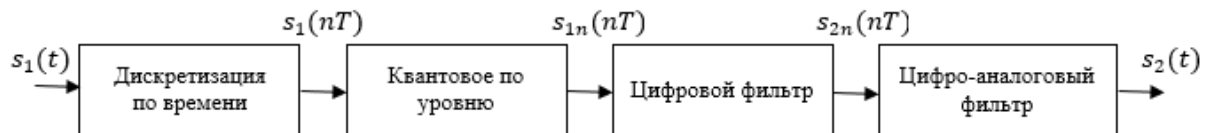


Рис. 1. Структурная схема выделения полезного сигнала,

$s_1(t)$ – исходный сигнал, $s_1(nT)$ – сигнал после дискретизации, где n – шаг, T – период;
 $s_{1n}(nT)$ – сигнал после квантования, $s_{2n}(nT)$ – фильтрующий сигнал, $s_2(t)$ – целевой сигнал

В качестве примера, рассмотрим наличие смешанного сигнала в виде:

$$y = 3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot t) + \sin(2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot t) + \sin(2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot t) \quad (2)$$

Поскольку в исходный сигнал входит зашумленный, поэтому необходимо производить обработку сигнала. в рассматриваемом примере существуют три разные сигнала, которые имеют частоты $f_1 = 10$ Гц, $f_2 = 40$ Гц, $f_3 = 200$ Гц. Далее для данного сигнала чтобы исключить помехи высокой частоты, требуется применить операцию дискретизации, то есть моделирование дискретизации. В качестве параметров поставим время дискретизации равно 1 с, и частоту дискретизации 100 Гц. Исходный сигнал после дискретизации показан на рис. 2. Как видно из рисунка, сигнал, который имеет частоту $f_3 = 200$ Гц не пропускается при частоте дискретизации 100 Гц.

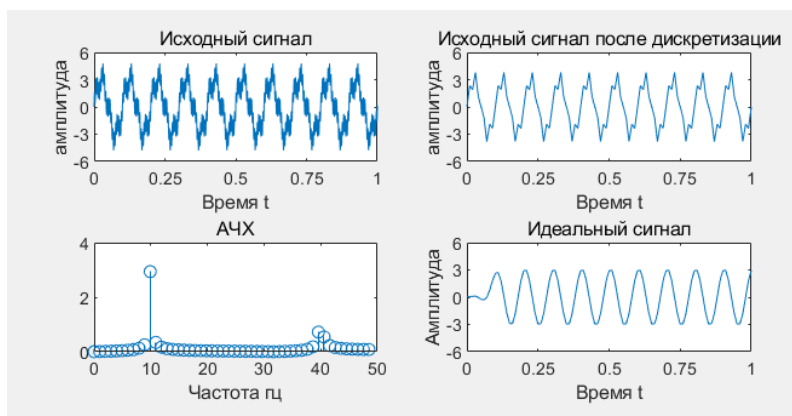


Рис. 2. Результаты общей процедуры обработки сигналов

Однако в исходном сигнале существует помехи сигнала, которые несет сигнал частоты 40 Гц, и трудно будет определить или выделить полезный сигнал, поэтому необходимо сделать преобразование Фурье для полученного сигнала. Преобразование Фурье позволяет разложить исходный сигнал на гармонические составляющие, что потребуется для выделения шумов. Производится преобразование Фурье в среде MATLAB, Амплитудно-частотная характеристика показана на рис. 2. В частоте 10 и 40 Гц имеет данное пиковое значение, что можно увидеть из исходного сигнала. Также по теореме Котельникова [4] можно точно восстановить сигнал с частотой дискретизации 100 Гц. Из рис. 2 видно, что максимальная частота равна 50 Гц.

Из амплитудно-частотной характеристики видно, что сигнал при частоте 40 гц является шумовом, поэтому необходимо проектировать цифровой фильтр чтобы выделить полезный сигнал. В данном случае поставим частоту дискретизации 100 гц, далее низкая частоту 12 гц, и конечную частоту 20 гц. Данный фильтр является фильтром низких частот, который пропускающий сигналы с частотой ниже выбранной частоты среза.

Заключение

В результате проведенных работ, был получен обобщенный алгоритм обработки цифрового сигнала с выделением его полезной составляющей из зашумленного. При использовании метода дискретизации, анализа амплитудно-частотной характеристики, преобразования Фурье было выполнено проектирование цифрового фильтра низких частот. Также при дискретизации сигнала была показана применимость теоремы Котельникова.

Список литературы

1. Новиков И.А., Мешков С.А. Методы и сигналы в информационных технологиях: учебное пособие – Санкт-Петербург : БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2022. – 175 с.
2. Landau I.D., Constantinescu A., Alma M. Adaptive regulation – rejection of unknown multiple narrow band disturbances (a review on algorithms and applications) // Control Engineering Practice. – 2011. – Vol. 19, № 10. – P. 237–252.
3. Xiaoyu Zh. et al. Cyclic correlation-based estimation of the rotation factor of weighted fractional-order Fourier transform signals // Journal of Military Engineering. – 2022. – V. 43, № 7. – P. 1646.
4. Ястребов И.П. Дискретизация непрерывных сигналов во времени. Теорема Котельникова // Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – № 11. – 16 с.

УДК 519.85(075)

Численное моделирование параметров нагревателя трубопровода в среде Логос

Ю.С. Чуманова

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. Б.С. Мерзликин
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: ysc12@tpu.ru

Numerical simulation of pipeline heater parameters in the Logos environment

J.S. Chumanova

Scientific Supervisor: Ass. Prof., Ph.D., B.S. Merzlikin
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: ysc12@tpu.ru

Abstract. *In the present study, we provide numerical simulation of heat-mass transport. We study the model of interacting pipes with square section. We consider the process of heat transport from the pipe with higher temperature to one filled with liquid water.*

Key words: *numerical modeling, heater, pipeline with technical liquid, heat and mass transfer.*

Введение

Исследование параметров нагревателя для поддержания в заданном диапазоне температуры технической жидкости в трубопроводе, проходящем в районах месторождения нефти, является крайне актуальным и значимым. Учитывая использование отечественного программного обеспечения для численного моделирования, исследование приобретает дополнительные аспекты актуальности:

1. Энергосбережение: оптимизация параметров нагревателя позволит снизить затраты на энергию, что является актуальной задачей в условиях повышения цен на энергоносители и стремления к уменьшению энергопотребления.

2. Эффективность системы: правильно подобранный нагреватель будет обеспечивать стабильное поддержание температуры технической жидкости в заданном диапазоне, что важно для сохранения работоспособности технических систем и исключения перегрева или остывания жидкости.

3. Безопасность: поддержание заданной температуры технической жидкости в трубопроводах имеет важное значение для предотвращения возможных аварийных ситуаций, связанных с перегревом или остыванием жидкости.

4. Независимость и конкурентоспособность: использование отечественного программного обеспечения подчеркивает научно-техническую независимость страны и способствует развитию отечественных технологий.

При транспортировке технической жидкости (нефтепродукты и вода) в условиях Крайнего Севера (низкие температуры воздуха) возникает проблема, связанная с её охлаждением. Охлаждение жидкости приводит к увеличению её вязкости, что влечёт за собой увеличение гидравлических потерь, что оказывает негативное влияние на работу насосных станций. В случае с прохождением по трубопроводам воды, необходимой как для собственных нужд, так и при добыче нефтепродуктов, возникают аварийные ситуации, когда происходит останов системы, что приводит к промерзанию трубопровода и нарушению его целостности. Для решения этой проблемы широко применяются подогреватели различных типов [1].

Физический процесс передачи тепла от нагревателя к текучей среде недостаточно изучен и использование нагревателя может привести к большим энергозатратам, которые можно снизить с помощью методов математического моделирования процессов теплопереноса в трубопроводе, проходящем на поверхности земли, позволяющих оценить тепловой эффект

от работы нагревателя и определить его параметры для бесперебойной и безаварийной работы трубопровода в условиях низких температур [2, 3].

Цель: исследовать влияние параметров нагревателя (нагревательного кабеля или нагревательного элемента) различного типа на температуру трубопровода с технологической жидкостью с помощью численного моделирования для обеспечения бесперебойной работы трубопровода в условиях низких температур.

Материалы и методы исследования

В качестве метода исследования параметров нагревателя, оказывающих влияние на температуру трубопровода с технологической жидкостью взят численный метод моделирования, основанный на методе конечных объемов в программном комплексе Логос Препост Тепло.

С целью оценки влияния работы нагревателя на температурное состояние трубопровода с технологической жидкостью был рассмотрен вертикальный участок трубопровода диаметром 159 мм, толщиной стенки 6 мм и длиной 0,1 м. В качестве технологической жидкости взята вода. Вдоль трубопровода проложен нагреватель сечением 32 мм и длиной равной длине трубопровода. Вся конструкция изолирована теплоизоляцией 50 мм из минеральной ваты.

Для упрощения реализации модели и снижения нагрузки и системных требований к аппаратной части в работе были сделаны следующие допущения: задача стационарная, симметричная; жидкость однофазная, несжимаемая; теплофизические свойства твердых элементов постоянны; многослойная конструкция нагревателя заменена в качестве упрощения на границу, излучающую тепло.

Процесс распространения тепла в твердой изотропной среде при отсутствии деформаций описывается уравнением теплопроводности, которое в векторном виде записывается в следующем виде:

$$\partial \rho C_v T / \partial t = \text{div} \chi \text{grad} T + \rho Q_T,$$

где

$\rho = \rho(T)$ – плотность;

$C_v = C_v(T)$ – удельная теплоемкость;

$\chi = \chi(T)$ – изотропный коэффициент теплопроводности;

Q_T – мощность внутренних источников теплоты.

Так как задача стационарная, то уравнение теплопроводности принимает вид:

$$0 = \text{div}(\chi \text{grad} T) + \rho Q_T$$

Результаты

При расчете задачи с применением комплекса структурного математического моделирования была построена расчетная геометрически подобная модель обогреваемого объекта, были заданы все необходимые граничные условия и характеристики всех блоков (слоев), участвующих в теплообмене.

На начальном этапе построена геометрия моделируемого объекта и построена расчётная сетка (рис. 1).

Для оценки влияния нагревателя на распределение температуры в трубопроводе с технической жидкостью, температура которых составляет 0 °С (273 К) и температурой окружающей среды равной –30 °С (243 К), было проведено численное моделирование при максимальной температуре нагрева нагревательного элемента, составляющей 80 °С (353 К).

В результате были получены температурное поле и график распределения средней температуры в обогреваемом изолированном трубопроводе (рис. 2).

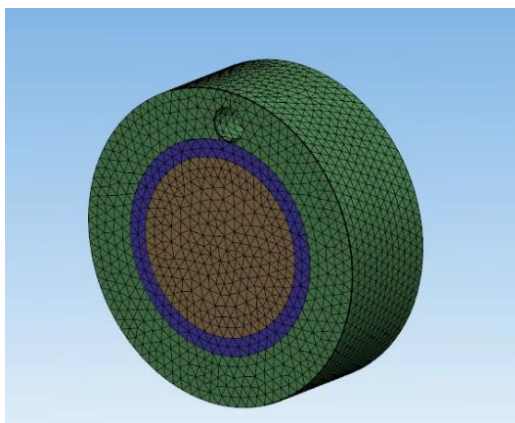


Рис. 1. Разбиение исследуемой области на конечные объемы

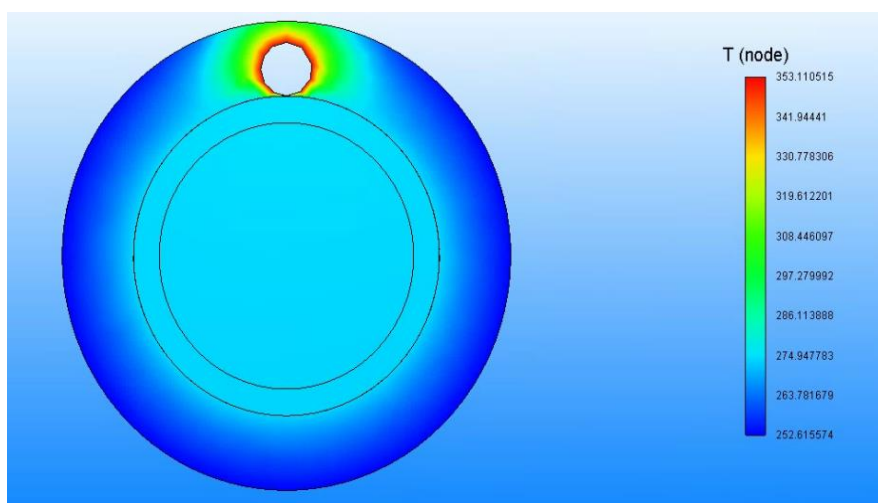


Рис. 2. График распределения температуры в обогреваемом изолированном трубопроводе

Заключение

В результате проведенного исследования было получено поле распределения температур в трубопроводе с технической жидкостью при работе нагревателя в максимальном режиме. Температура технической жидкости внутри трубопровода находится в требуемом диапазоне (более 5 °С), которая соответствует температуре необходимой в трубопроводе в аварийных ситуациях (останов системы) при низких температурах окружающей среды.

Список литературы

1. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли // Настольная книга специалиста по электрообогреву: справочник 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 525 с.
2. Костарев Н.А., Труфанова Н.М. Применение численного моделирования для анализа эффективности греющего кабеля при добыче // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – Томск, 2023. – Т. 334, № 2. – С. 99–110.
3. Павлов А.Б., Плохов И.В. Моделирование тепловых процессов при попутном электрическом подогреве трубопроводов. – Текст: электронный // Серия «Экономические и технические науки». 2014. – № 5. – URL: <https://reader.lanbook.com/journalArticle/865529>.

УДК 536.2

**Анализ влияния модели пористой среды на особенности теплообмена
в полости при наличии пористого ребра**С.Х.К. Лэ

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. М.А. Шеремет
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: lexuanhoangkhoa@gmail.com

**Analysis of the influence of a porous medium model on the features of heat transfer
in a cavity in the presence of a porous fin**X.H.K. Le

Scientific Supervisor: Prof. Dr., M.A. Sheremet
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: lexuanhoangkhoa@gmail.com

Abstract. The objective of this study is to compare the three models used for describing the flow of fluid inside porous fins attached to the heated wall of a differentially-heated square cavity: Darcy, Brinkman and Brinkman-Forchheimer models. A wide range of Rayleigh and Darcy numbers were investigated while the fin length, position and relative thermal coefficient were kept constant. Finite-difference method was used for solving governing equations. It was found that the Brinkman and Brinkman-Forchheimer models yield almost the same results at any Darcy numbers while the Darcy model is unstable at high Darcy numbers.

Key words: natural convection, porous fin, Darcy, Brinkman and Brinkman-Forchheimer models.

Введение

Реберная структура как развитая поверхность теплообмена является эффективным методом для интенсификации теплообмена и часто встречается во многих инженерных системах, таких как теплообменники, солнечные коллекторы и элементы системы охлаждения реакторов и т.д. Однако, при использовании твердых ребер для улучшения теплообмена возникают сложности, вызванные низкой эффективностью и высокой стоимостью изготовления твердых ребер. Переход от твердых ребер к пористым является лучшим решением этой проблемы, так как расход материала уменьшается в $1/(1-\varepsilon)$ раз [1], где ε – пористость ребер, в то же время положительный эффект для интенсификации теплообмена существенно повышается [2]. Во многих опубликованных работах используется модель Бринкмана для описания движения и распределения температуры внутри пористых ребер. В данной работе будем сравнивать три модели: Дарси, Бринкмана и Форхгеймера для описания гидродинамики внутри пористого ребра, расположенного на левой стенке квадратной дифференциально-обогреваемой полости.

Физико-математическая постановка задачи

Область решения представляет собой квадратную полость размера L с твердыми непроницаемыми стенками. Две противоположные вертикальные стенки имеют постоянные температуры T_h (при $y = 0$) и T_c (при $y = L$), причем $T_h > T_c$. Другие горизонтальные стенки являются теплоизолированными. Сила тяжести направлена вертикально вниз по оси y . На нагретой стенке устанавливается одно пористое ребро, которое находится на высоте d от нижнего основания полости и имеет длину l , толщину h и пористость ε . Ребро изготавливается из медной пены.

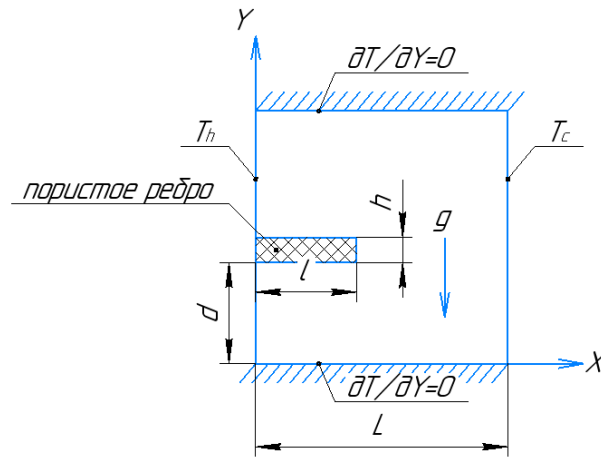


Рис. 1. Область решения задачи

Дифференциальные уравнения, описывающие процесс нестационарного конвективного теплопереноса в приближении Буссинеска в безразмерных преобразованных переменных «функция тока – завихренность», имеют следующий вид:

– внутри воздушной полости:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial x},$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right),$$

– внутри пористых ребер:

Для трех моделей уравнение энергии является общим:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\lambda_{eff} / \lambda_f}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right).$$

Уравнение дисперсии завихренности в случае модели Бринкмана имеет вид:

$$\varepsilon \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \varepsilon \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \frac{\varepsilon^2}{Da} \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \omega + \varepsilon^2 \frac{\partial \theta}{\partial x}.$$

Уравнение дисперсии завихренности в случае модели Форхгеймера выражается как:

$$\varepsilon \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \varepsilon \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \varepsilon^2 \left(\frac{1}{Da} \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} + \frac{C|\bar{V}|}{\sqrt{Da}} \right) \omega - \frac{C}{\sqrt{Da}} \left(v \frac{\partial |\bar{V}|}{\partial x} - u \frac{\partial |\bar{V}|}{\partial y} \right) + \varepsilon^2 \frac{\partial \theta}{\partial x}.$$

Уравнение Пуассона для функции тока в случае моделей Бринкмана и Форхгеймера является общим:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega.$$

В модели Дарси инерционные эффекты жидкости не учитываются. Вследствие этого, уравнение Пуассона для функции тока в случае модели Дарси принимает вид:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -Da \sqrt{\frac{Ra}{Pr}} \frac{\partial \theta}{\partial x}.$$

Безразмерные начальные и граничные условия для системы дифференциальных уравнений имеют вид: $\tau = 0 \rightarrow u = v = \psi = \omega = 0, \theta = 0,5$.

При $\tau > 0$ имеем:

– на твердой стенке $x = 0$: $u = v = 0$, $\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0, \theta = 1$

– на твердой стенке $x = 1$: $u = v = 0$, $\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0, \theta = 0$

– на твердых стенках $y = 0$ и $y = 1$: $u = v = 0$, $\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0, \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0$

– на поверхности пористого ребра:

- для моделей Бринкмана и Форхгеймера:

$$\psi_p = \psi_f, \omega_p = \omega_f, \theta_p = \theta_f, \frac{\partial \psi_p}{\partial n} = \frac{\partial \psi_f}{\partial n}, \frac{\partial \omega_p}{\partial n} = \frac{\partial \omega_f}{\partial n}, \frac{\partial \theta_p}{\partial n} = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} \frac{\partial \theta_f}{\partial n},$$

- для модели Дарси:

$$u_f = u_p, \frac{\partial v_f}{\partial x} = \frac{\bar{\alpha}}{\sqrt{Da}} (v_f - v_p), \omega_f = \frac{\partial v_f}{\partial x} - \frac{\partial u_f}{\partial y}.$$

Система дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями решалась методом конечных разностей. Разработанный алгоритм решения был протестирован на модельных задачах в сравнении с экспериментальными и численными данными других авторов.

Результаты

Результаты показывают, что модели Бринкмана и Форхгеймера дают похожие результаты при всех числах Дарси и Рэлея. При этом модель Дарси хорошо работает при малых числах Дарси (при высоких числах Дарси она дает грубые результаты).

Заключение

В ходе решения задачи было проведено сравнение трех моделей: Дарси, Бринкмана и Форхгеймера, предназначенных для описания гидродинамики внутри пористого ребра, расположенного на нагретой стенке в дифференциально-обогреваемой квадратной полости. Была определена возможность использования этих трех моделей при низких числах Дарси ($Da < 10^4$). При больших числах Дарси подходят только модели Бринкмана и Форхгеймера, так как модель Дарси дает грубые результаты. Также было замечено, что необходимо варьировать коэффициент Биверса–Джозефа в модели Дарси в зависимости от числа Дарси, что приводит к неудобству применения данной модели.

Список литературы

1. Kiwan S., Al-Nimr. M.A. Using porous fins for heat transfer enhancement // J. Heat Transfer. – 2001. – V. 123. – P. 790–795.
2. Asl A.K., Hossainpour S., Rashidi M.M., Sheremet M.A., Yang Z. Comprehensive investigation of solid and porous fins influence on natural convection in an inclined rectangular enclosure // Int. J. Heat Mass Transf. – 2018. – V. 133. – P.729–744.

УДК 519.688

Восстановление неравномерно освещенных изображений

А.А. Сапегин

Научный руководитель: А.Д. Брагин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: aas271@tpu.ru

Restoration of unevenly illuminated images

A.A. Sapegin

Scientific Supervisor: A.D. Bragin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: aas271@tpu.ru

Abstract. *In this paper, we will look at one of the ways to solve the problem of restoring unevenly illuminated images by using convolutional neural network. The article describes the algorithm for preparing data for model training and the process of evaluating the visual quality of images.*

Key words: *convolutional neural network, brightness normalization, image enhancement*

Введение

Одной из главных проблем изображений, полученных при естественном освещении, является неравномерное распределение яркости и теней. Это может привести к потере деталей в темных или светлых областях изображения, искажению цветов и контраста, а также затруднить обработку изображения и его анализ.

Целью данной работы является разработка алгоритма по нормализации яркостных характеристик неравномерно освещенного изображения.

Экспериментальная часть

В качестве подхода к поставленной задаче было выбрано использование сверточной нейронной сети архитектуры SRCNN (Super Resolution Convolution Neural Network) [1]. Модель используется для увеличения разрешения изображения и имеет особенность в виде того, что сеть обрабатывает изображение, которое уже было увеличено при помощи бикубической интерполяции. Обработку изображения нейросетью можно условно разделить на три этапа: извлечение признаков (преобразование фрагментов изображения в многомерные вектора), нелинейное преобразование (нелинейное отображение каждого многомерного вектора на другой многомерный вектор), реконструкция (получение значения яркости центрального пикселя на основе полученных признаков).

Работу сети с признаками, которые она извлекает, можно адаптировать под различные задачи, в том числе и под задачу выравнивания яркости и контраста изображения.

Одной из основных проблем данного подхода, является отсутствие данных для обучения модели. При решении задачи повышения разрешения на вход сети подавалась уменьшенное и снова увеличенное изображение, а результат сравнивался с исходным. В случае же нормализации яркости возникают трудности с подбором эталонов, в виду того, что эталон должен быть правильно проэкспонирован, то есть в кадре не должно быть сильно темных или же сильно светлых областей.

Помимо этого необходимо подобрать правильные методы аугментации эталона, для формирования сета, который будет подаваться на вход сети во время обучения. Изначально предполагалось, что на вход будет подаваться низкоконтрастная версия эталона с пониженной либо повышенной яркостью. Подготовленная таким образом сеть лишь слегка увеличивала яркость и резкость изображения.

Итоговым решением стало использование датасета, рассчитанного на обучение нейросетей по удалению теней. На вход подавалось изображение с тенью, а в качестве эталона – фото без тени. Данный подход также решал проблему возможной неправильной экспозиции в кадре, т.к. для подобных задач кадр выстраивается определенным образом, чтобы на входных изображениях тень могла быть четко идентифицирована. Как и в предыдущем подходе к входным данным применялась корректировка яркости и контраста для их ухудшения (далее эти изображения будут называться «условный оригинал»).

Однако, даже если по аналогии с предыдущим подходом применять яркостную аугментацию для входных данных, то результирующие изображения сильно теряли в четкости. Было принято решение применить к эталону метод выравнивания гистограммы CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) [2]. Благодаря данному подходу удалось повысить резкость обработанного моделью изображения.

Также в рамках экспериментов был опробован подход, который заключается в подаче на вход нескольких изображений: условного оригинала и его обработанные версии. Модификация SRCNN, которая обрабатывает два изображения, называется 2DSRCN, три – 3DSRCN [3]. В качестве методов обработки были выбраны упомянутый выше CLAHE, а также Single-Scale Retinex (SSR) [4]. Для обучения 3DSRCN использовались все три версии изображений, а в случае архитектуры 2DSRCN было подготовлено две версии сети, которым на вход подавался условный оригинал и одна из его обработанных версий.

Результаты

Для оценки качества работы моделей использовалась оценка Мунтеану-Роса [5], которая вычисляется по следующей формуле:

$$f_{MR} = \ln(\ln(E + e)) + \frac{\tau}{MN} + e^H,$$

$$H = - \sum_{i=0}^{255} l_i \ln(l_i),$$

где E – суммарная интенсивность пикселей на контурах изображения; e – число Эйлера; τ – количество пикселей на контурах; N и M – соответственно ширина и высота изображения; l_i – доля пикселей с i -м уровнем яркости. Контур изображения определяется с помощью оператора Собеля [6]. Оценка Мунтеану-Роса основана на том свойстве, что для человеческого восприятия большее значение имеет перепад яркости в соседних пикселях, чем значение яркости в каждом пикселе. В то же время равномерность гистограммы изображения также положительно сказывается на восприятии изображения.

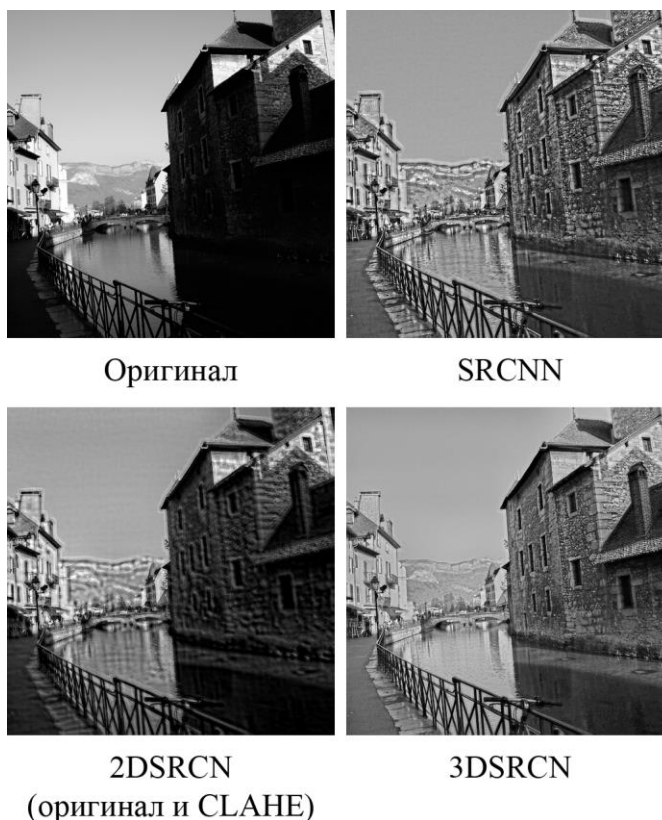
Помимо результатов работы обученных моделей производилась оценка стандартных методов улучшения контраста изображений, таких как глобальное выравнивание гистограммы (GHE) [6] и Multi-Scale Retinex (MSR) [4]. Итоговые результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Оценка Мунтеану-Роса

Оригинал	GHE	MSR	SRCNN	2DSRCN (оригинал и SSR)	2DSRCN (оригинал и CLAHE)	3DSRCN
218	400	373	660	425	477	469

Как можно видеть из таблицы, простая версия SRCNN имеет самое высокое значение целевой метрики. Однако при визуальной оценке результатов можно заключить, что сильное повышение различимости объектов сопровождается появлением артефактов в виде ступенчатых перепадов [6], что продемонстрировано на рисунке 1.



Оригинал

SRCNN

2DSRCN

3DSRCN

(оригинал и CLAHE)

Рис. 1. Примеры работы моделей

Заключение

В результате проведенных исследований был выявлен оптимальный подход к нормализации яркостных характеристик с помощью использования архитектуры сверточной нейронной сети 3DSRCN. Данный способ позволяет добиться высокой степени различимости объектов при достаточно низком риске возникновения артефактов, свойственных изображениям после процедуры нормализации яркости.

Список литературы

1. Dong, C., Loy, C.C., He, K., Tang, X. Image super-resolution using deep convolutional networks // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2015. – P. 295–307.
2. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Новичихин Е.П. Модификация метода CLAHE для компенсации влияния гидрометеоров // Журнал Радиоэлектроники [электронный журнал], – 2017. – Т.10. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/10/text.pdf>.
3. Hayat K. Super-Resolution via Deep Learning // arXiv.org [электронный архив] – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1706.09077v1>.
4. Jobson D.J., Rahman Z., Woodell G.A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes // IEEE Trans. Image Process. – 1997. – Vol. 6, № 7. – P. 965–976.
5. Munteanu C., Rosa A. Gray-scale image enhancement as an automatic process driven by evolution // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics – part B: Cybernetics. – 2004. – Vol. 34, № 2.
6. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – Москва : Техносфера, 2005. – 1072 с.

УДК: 004.8

Автоматическая сегментация эпикардially жировой ткани и количественная оценка радиомических параметров при компьютерной томографии сердцаД.С. Саматов, К.В. Завадовский

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. Б.С. Мерзликин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: denissamatov470@gmail.com**Automatic segmentation of epicardial adipose tissue and quantitative assessment of radiomic parameters in computed tomography of the heart**D.S. Samatov, K.V. Zavadovsky

Scientific Supervisor: Ass. Prof., PhD., B.S. Merzlikin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: denissamatov470@gmail.com

Abstract. This paper presents a computerized tool for automatic segmentation of epicardial adipose tissue (EAT) on CT heart images, aiding in cardiovascular disease diagnosis. Manual quantification methods suffer from time consumption and variability. Our tool combines automated segmentation with manual adjustments, enhancing accuracy and efficiency. It utilizes basic image processing, ensuring computational simplicity. The proposed algorithm improves diagnostic support, offering potential for personalized therapy. Additionally, the work includes analysis of Region of Interest (ROI) using radiomic analysis, enabling texture analysis of images to further study EAT. The paper also features a segmentation algorithm and a prototype application integrating semi-automatic segmentation mechanisms.

Key words: Epicardial adipose tissue, personalized therapy, segmentation algorithm, computed tomography, radiomic analysis.

Введение

Радиомика является относительно молодой областью радиологии [1], которая ставит своей целью извлечение количественных признаков из медицинских изображений [2]. Методы машинного обучения и искусственного интеллекта в широком смысле представляют собой набор вычислительных алгоритмов, которые изучают закономерности в предоставленных данных и позволяют делать прогнозы на основе этих закономерностей. Радиомика, в сочетании с методами машинного обучения и искусственного интеллекта, позволяет не только извлекать численные характеристики медицинских изображений, но и обрабатывать большие объемы полученных данных, которые затруднительны для анализа традиционными статистическими методами [3].

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются основной причиной смертности в мире, составляя треть всех смертей. В последнее время возрос интерес к изучению эпикардially жировой ткани (ЭЖТ) как значимого индикатора сердечно-сосудистых и цереброваскулярных заболеваний, независимо от других факторов риска. Распространенные патологии, такие как кальцификация коронарных артерий, ишемическая болезнь сердца и аритмия, связаны с жировыми отложениями вблизи сердца.

В клинической практике количественная оценка ЭЖТ часто производится вручную, требуя много времени и подверженная вариативности результатов. Это вызывает необходимость в разработке компьютерных инструментов, автоматизирующих этот процесс.

Данная работа представляет компьютерный инструмент, автоматически сегментирующий ЭЖТ и оценивающий радиомические параметры, поддерживая ручную корректировку. Таким образом, человеческое вмешательство повышает эффективность и

точность диагностики. Предлагаемый алгоритм обладает низкой вычислительной сложностью и интуитивно понятным интерфейсом, что делает его потенциально применимым в клинической практике.

Цель работы – разработка компьютерного инструмента, который автоматически выполняет сегментацию эпикардиальной жировой ткани (ЭЖТ) и количественную оценку радиомических параметров на медицинских КТ изображениях сердца.

Экспериментальная часть

В ходе выполнения работы была решена задача сегментации ЭЖТ. При выполнении работы был подготовлен набор КТ-изображений рис.1(а). На языке программирования Python был создан алгоритм обработки полученного набора изображений в формате dicom. Алгоритм представляет собой комплексный процесс обработки медицинских изображений сердца, начиная от предобработки и сегментации до выделения ROI и постобработки. Он использует методы машинного обучения и анализа изображений для автоматической обработки КТ-изображений сердца. Схема алгоритма представлена на рис.2.

1. Входные данные: Алгоритм принимает в качестве входных данных DICOM-файлы, содержащие медицинские изображения сердца.

2. Предобработка: Процесс предобработки включает применение фильтр сглаживания, основанного на уравнении диффузии кривизны, для удаления шума и метода Оцу для бинаризации изображения. После этого осуществляется пороговая сегментация для выделения области интереса, представляющей собой ЭЖТ.

3. Сегментация: Сегментация ЭЖТ осуществляется через сопоставление шаблонов для поиска соответствующих областей на изображении. Затем используется анализ связных компонент для объединения пикселей, принадлежащих ЭЖТ. Кроме этого, применяются морфологические операции для удаления мелких объектов и заполнения отверстий в области ЭЖТ.

4. Выделение ROI: Определение границы ЭЖТ выполняется с использованием выпуклой оболочки, а затем производится уточнение области интереса для удаления возможных артефактов.

5. Постобработка: В конечном этапе алгоритма производится вычисление радиомических параметров, а также количественных характеристик ЭЖТ.

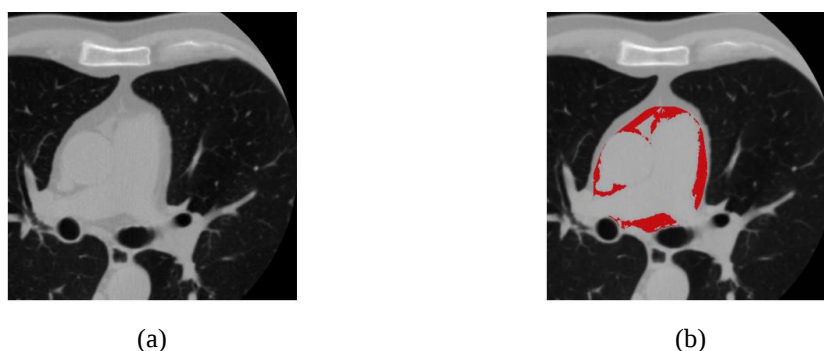


Рис. 1. Срез КТ-изображения сердца. Сегментация ROI

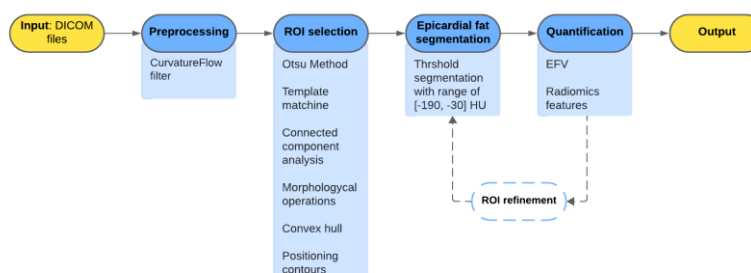


Рис. 2. Схема алгоритма

Результаты

Для оценки сегментации *EFV*, рис.1(b), использовались *accuracy*: 0.954 и *Коэффициент схождения Дайса*: 0.155. Кроме того, для оценки эффективности количественного определения *EVF* было рассчитано сравнение Бланда-Альтмана.

В результате сегментации автоматическим методом, рис.3(b), в среднем *EVF* выше на 67.11 мл, чем при сегментации ручным методом. Ожидается, что 95 % различий в объеме между двумя методами будут находиться в диапазоне от -183.29 мл до 49.07 мл.

На рис.3(a) представлено оценочное изображение, полученное путем сравнения ручной и автоматической сегментации.

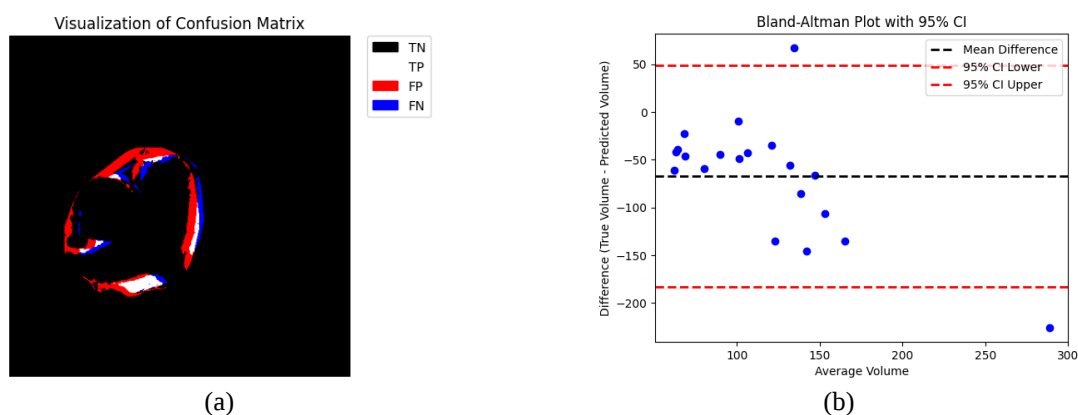


Рис. 3. Матрица ошибок. График Бланда-Альтмана

Заключение

В ходе разработки алгоритма автоматической сегментации было создано приложение, оснащенное инструментом ручной корректировки области интереса, основанным на кривых Безье.

Список литературы

1. Kocak B., Durmaz E.S., Ates E., Kilickesmez O. Radiomics with artificial intelligence: a practical guide for beginners // Affiliation: Department of Radiology Istanbul Training and Research Hospital, İstanbul, Turkey. – 2019 – № (6). – P. 485–495.
2. Mayerhoefer M.E., Materka A., Langs G., Häggström I., Szczypiński P., Gibbs P., Cook G. Introduction to Radiomics // Citation: Journal of Nuclear Medicine. – 2020. – V. 61(4). – P. 488–495.
3. Varghese B.A. , Cen S.Y. , Hwang D.H. , Duddalwar V.A. Texture Analysis of Imaging: What Radiologists Need to Know // Citation: American Journal of Roentgenology. – 2019. – V. 212. – P. 520–528.

УДК 539.3

Моделирование гемодинамики коронарной артерии человека

А.И. Андренков

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н., Б.С. Мерзликин, д.м.н. К.В. Завадовский
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: aia21@tpu.ru

Modeling of human coronary artery hemodynamics

A.I. Andrenkov

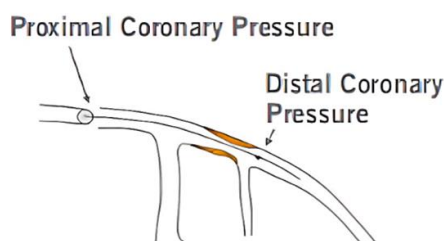
Scientific Supervisor: Ass. Prof., Dr., B.S. Merzlikin, Dr., K.V. Zavadovskiy
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: aia21@tpu.ru

Abstract. *The study explores non-invasive methods, particularly computational fluid dynamics (CFD), for assessing fractional flow reserve (FFR) in ischemic heart disease. By simulating blood flow without invasive procedures, it addresses challenges in modeling stenosis-induced turbulence and emphasizes viscosity considerations.*

Key words: *hemodynamic, Navier-Stokes equations, numerical modeling.*

Введение

В настоящее время ишемическая болезнь сердца (ИБС) представляет собой наиболее распространенное и смертельно опасное сердечное заболевание [1], связанное с образованием в сосудах бляшек, частично преграждающих кровотоки, что называется стенозом. Оценкой степени значимости стеноза служит фракционный резерв кровотока (FFR) – отношение максимального кровотока в пораженной коронарной артерии к теоретическому максимальному кровотоку в нормальной коронарной артерии. Идеальное значение этого параметра – 1.0. Значения FFR менее 0.75–0.80 могут свидетельствовать о наличии ишемии. Наглядное представление данного параметра представлено на рисунке 1.



$$FFR = \frac{\text{Proximal Coronary Pressure}}{\text{Distal Coronary Pressure}}$$

Рис.1. Наглядное представление параметра FFR

Методы определения FFR делятся на две основных группы – инвазивные и неинвазивные. Первые предполагают собой вмешательство в тело человека, когда цель вторых – обойтись без него. Именно неинвазивные методы представляют наибольший интерес.

Один из неинвазивных (не требующих вмешательства в тело человека) методов определения FFR – моделирование потока крови в коронарных артериях при помощи вычислительной гидродинамики. Динамика вязкой несжимаемой жидкости моделируется системой, состоящей из уравнений Навье-Стокса и уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\eta}{\rho} \Delta \mathbf{v},$$

$$\nabla \mathbf{v} = 0$$

где ρ – плотность жидкости, t – время, $\mathbf{v}$ – вектор скорости, p – давление, η – динамическая вязкость жидкости. Динамическая вязкость жидкости определяет меру ее сопротивления внешней деформации.

Возникновение явления турбулентности тесно связано с числом Рейнольдса. Для цилиндрической геометрии оно рассчитывается по формуле

$$R = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta}$$

где v – модуль скорости потока, d – диаметр цилиндра (сосуда), ρ – плотность жидкости, η – динамическая вязкость. Считается, что явление турбулентности возникает при значениях больше 2000 [2].

Для граничных условий можно выделить три основных типа:

1. Вход (Inlet). Определяет поведения системы на входе. Чаще всего задается профиль скоростей;
2. Выход (Outlet). Определяет поведения системы на выходе. Чаще всего задается давление;
3. Стенка (Wall). Для вязкой жидкости задается равенство нулю всех компонент скорости в пристеночном слое.

Применение прямого численного моделирования к уравнениям Навье-Стокса приводит к неоправданно большим затратам вычислительных мощностей. Поэтому, активно применяются различные модели турбулентности.

Одна из таких моделей – LES (Large Eddy Simulation). В рамках данной модели полагается, что большие вихри потока зависят от геометрии, в то время как вихри меньших масштабов более универсальны. Фильтрация обычно производится с помощью свертки. Переменные течения делятся на разрешимую и подсеточные части. Для разрешимой части решается немного видоизмененное уравнение Навье-Стокса

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + (\nu + \nu_t) \Delta \mathbf{v}$$

где ν_t – вихревая вязкость. Подсеточная часть моделируется различными модели, основанными зачастую на гипотезе Буссинеска.

В рамках RANS-модели (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) переменные течения, делятся на усредненную и флуктуационные части. Уравнение Навье-Стокса преобразуется к следующему виду:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v'_i v'_j} \right)$$

Здесь штрихом обозначены флуктуационные части, а черта сверху означает усреднение по времени. Уравнения теперь имеют еще два дополнительных неизвестных члена, известные как напряжения Рейнольдса. Смысл моделей RANS-семейства дополнить систему дополнительными уравнениями, чтобы она стала замкнутой. Самыми известными моделями данного семейства являются модели k-epsilon и k-omega, основанные на турбулентной кинетической энергии и диссипации [3].

Экспериментальная часть

В качестве набора данных были взяты анонимные результаты КТ-исследований пациентов, предоставленные томским НИИ Кардиологии. Исследование производилось в несколько этапов:

1. Сегментация коронарной артерии по КТ-снимкам пациента;

2. Коррекция полученной геометрии;
3. Подготовка расчетной модели, выбор модели турбулентности, задание граничных и начальных условий, создание сетки;
4. Проведение расчетов и анализ результатов.

В рамках данной работы для сегментации коронарной артерии применялось ПО 3D Slicer, с последующей корректировкой геометрии в программе Blender. Оба программных обеспечения являются открытыми. Моделирование гемодинамики производилось в отечественном ПО ЛОГОС [4].

Чтобы корректно произвести сегментацию, исследование должно быть достаточно хорошего качества – на нем должно присутствовать минимум шумов и должны отсутствовать различные артефакты (например, смещение снимков). В данной работе использовались результаты обследования пожилого мужчины.

Для проведения расчетов была выбрана k-ε модель турбулентного течения. Параметры крови: плотность – 1080 г/см^3 ; молекулярная вязкость – $0.0035 \text{ Па}\cdot\text{с}$ [5].

Результаты

На рисунке 2 приведена итоговая карта распределения давлений.

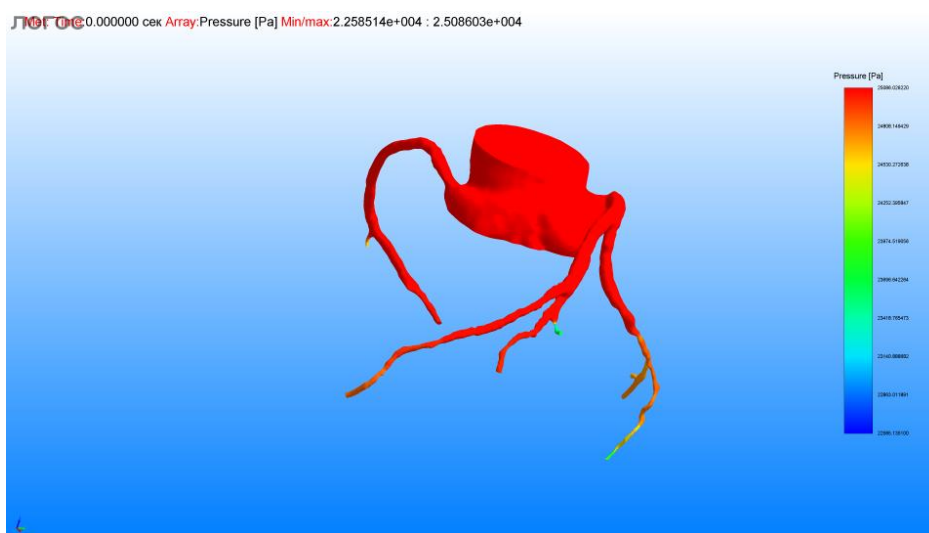


Рис.2. Карта распределения давлений

Работы выполнены в рамках проекта № ПИШ-НИР-2023-006.

Список литературы

1. Timmis A, Townsend N, Gale CP, Torbica A, Lettino M, Petersen SE et al. European Society of Cardiology: Cardiovascular Disease Statistics 2019 // European Heart Journal. – 2020. – V. 41(1). P. 12–85. DOI: 10.1093/eurheartj/ehz859
2. Murgo JP. Systolic ejection murmurs in the era of modern cardiology: What do we really know? // J. Am Coll Cardiol. – 1998. – V. 32 (6). – P. 1596–602.
3. Kornev N., Chernova I. Lectures of computational fluid dynamics and heat transfer with application to human thermodynamics // 1-е изд. – Rostok. – 2013. – 230 с.
4. Пакет программ ЛОГОС // ЛОГОС Росатом URL: <https://logos-support.ru/logos/> (дата обращения: 29.02.2024).
5. Загатина А.В., Журавская Н.Т., Неинвазивная оценка параметров коронарного кровотока во время тестов с физической нагрузкой в популяции здоровых лиц // Медицинская визуализация. – 2016. – № 1. – С. 25–30.

УДК 004.89

**Прогнозирование трансферной стоимости футболистов с использованием различных
регрессионных методов и алгоритмов машинного обучения**М.С. Коновалов

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. Т.В. Емельянова
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: maks-konovlov18@mail.ru**Forecasting the transfer value of football players using various
regression methods and machine learning algorithms**M.S. Konovalov

Scientific Supervisor: Ass. Prof., PhD., T.V. Yemelyanova
Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: maks-konovlov18@mail.ru

Abstract. A study was conducted on the transfer cost of football players depending on various factors. To solve this problem, methods such as linear regression, nonlinear regression and random forest were used. The least squares method was used to estimate the coefficients of the model parameters in linear regression, and the Levenberg-Marquardt method was used in nonlinear regression. The comparative analysis showed that the random forest algorithm turned out to be the most effective.

Key words: linear regression, nonlinear regression, random forest.

Введение

Футбол – это одна из самых популярных и прибыльных индустрий в современном мире, где трансферные сделки, в том числе покупка и продажа игроков, являются неотъемлемой частью ее функционирования. В связи с этим, прогнозирование трансферной стоимости футболистов является важной задачей для клубов, агентов и инвесторов, стремящихся оптимизировать свои трансферные операции.

Актуальность данной темы обусловлена растущими суммами трансферов, увеличением конкуренции на рынке игроков, а также значительным влиянием неопределенности на процесс принятия решений в футбольной индустрии. В этом контексте целью настоящего исследования является разработка моделей прогнозирования трансферной стоимости футболистов с использованием регрессионных методов и алгоритмов машинного обучения.

На основе анализа и обработки объемов данных о прошлых трансферных сделках, о статистике игроков и других факторов в работе предлагаются модели, способные более точно оценивать стоимость игроков на трансферном рынке. Это позволит заинтересованным сторонам принимать обоснованные решения при планировании и проведении трансферов, оптимизируя затраты и повышая эффективность инвестиций.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования были собраны данные игроков линии атаки с сайта Transfermarkt [1] об игроках из топ-5 ведущих лиг Европы: Английской Премьер-лиги, Испанской Ла Лига, Итальянской Серии А, Немецкой Бундеслиги и французской Лиги 1.

После того как данные были собраны, была проведена процедура предварительной обработки данных: в данных не было выявлено недопустимых и пропущенных значений, но были дубликаты, которые были успешно удалены.

В качестве основных методов анализа стоимости футболистов были использованы следующие методы:

1. Линейная регрессия: этот метод был применен для выявления линейных закономерностей между различными факторами (например, возраст, количество голов/передач, популярность игрока и др.) и трансферной стоимостью футболистов [2, 3]. Линейная регрессия позволяет оценить влияние каждого из предикторов на зависимую переменную.

Для оценки коэффициентов параметров модели был использован метод наименьших квадратов:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y,$$

где X – матрица признаков, а Y – вектор значений зависимой переменной

2. Нелинейная регрессия: этот метод использовался для выявления нелинейных взаимосвязей между факторами и трансферной стоимостью игроков [2, 3]. Нелинейная регрессия позволяет учесть нестандартные зависимости, которые линейная модель не способна уловить.

Для получения численной оценки параметров в модели $y_i = f(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k) + \varepsilon_i$, $i = 1, \dots, n$ использовался метод Левенберга-Марквардта: он представляет собой итерационный процесс минимизации суммы квадратов отклонений, в котором каждое следующее приближение задается по формуле:

$$a^{k+1} = a^k + (P_k^T P_k + \mu_k I)^{-1} P_k^T (y - f(a^k)), \quad k = 0, 1, 2, \dots; \quad \mu_k > 0,$$

где $P_k = \frac{\partial f}{\partial \beta} \Big|_{\beta=a^k}$, I – единичная матрица.

Так как процесс итерационный, то ему нужно задать начальное приближение. В работе было задано начальное приближение: $a^0 = 0$.

Процесс итерации заканчивается, когда выполняется следующее условие:

$$|a^{k+1} - a^k| < \delta$$

На практике значения δ выбирают равным 10^{-5} .

3. Случайный лес [4, 5]: данная методика является ансамблевым методом машинного обучения, который строит несколько деревьев решений на случайной подвыборке данных и объединяет их для получения точного прогноза. Случайный лес обычно хорошо подходит для задач прогнозирования трансферной стоимости.

Алгоритм случайного леса состоит в следующем:

1. Определим, как прогнозируемое значение может быть вычислено отдельным деревом решений. Пусть n_l обучающих примеров (x_i, y_i) с индексами из множества R_l , то есть $i \in R_l$, попадает в l -ую вершину (лист) дерева. Тогда прогнозируемое значение $g = f(x)$ нового примера, который попал в эту же вершину вычисляется как

$$g = f(x) = \frac{1}{n_l} \sum_{i \in R_l} y_i$$

2. Пусть T – число обученных деревьев. Тогда прогнозируемое значение случайного леса вычисляется по формуле $g_{\text{сл}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T g^{(t)}$

Для расчета ошибки между реальными и полученными значениями используется функция потерь.

В качестве функции потерь была выбрана сумма квадратов остатков.

Точность полученного прогноза может рассматриваться в различных метриках. В работе для оценки качества модели были выбраны такие показатели, как коэффициент детерминации, рассчитанный по формуле: $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ и среднеквадратический риск:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2.$$

Данные были разделены на две выборки: обучающую, которая составляет 80 % от общего объема данных, и тестовую, которая составляет 20 %. Это сделано для того, чтобы оценить способность модели к прогнозированию после завершения процесса обучения.

Результаты

В таблице 1 приведены результаты значений MSE и R^2 для обрабатываемых данных.

Таблица 1

Сравнение моделей

	MSE	R^2
Линейная регрессия	0.2031	0.69
Нелинейная регрессия (метод Левенберга-Марквардта)	0.2042	0.69
Случайный лес	0.1916	0.71

Для обеих выбранных характеристик качества модели видно, что алгоритм случайного леса показывает лучшее качество, сравнимое, однако и с другими методами.

На рисунке 1 представлены графики предсказанной трансферной стоимости (оранжевым цветом) и истинных ее значений (синий цвет) с помощью алгоритма случайного леса.

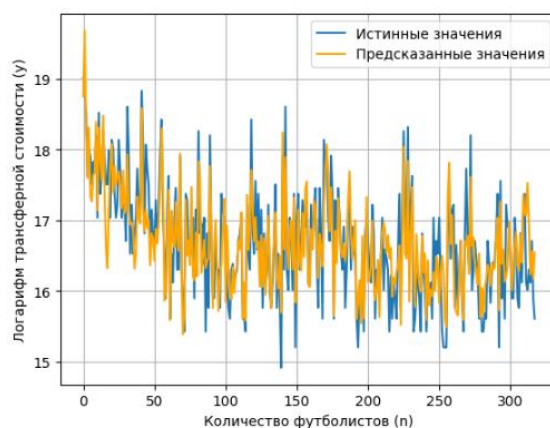


Рис. 1. Сравнение предсказанной и истинной стоимости футболистов

Заключение

Проведенный анализ данных о футболистах из топ-5 лиг Европы позволил выявить значимые факторы, влияющие на их трансферную стоимость. Методы регрессионного анализа, такие как линейная и нелинейная регрессия, метод машинного обучения - случайный лес, показали свою эффективность в прогнозировании стоимости игроков. Сравнительный анализ показал, что модель случайного леса оказалась самой эффективной в предсказании трансферной стоимости футболистов, хотя, в прочем точность и других моделей не значительно отличается от лучшей. Полученная модель способна предсказывать цену игрока с хорошей точностью, что может быть полезно как для клубов, так и для агентов игроков при проведении трансферных сделок.

Дальнейшие исследования по данной теме могут включать в себя более глубокий анализ влияния других факторов на трансферные стоимости футболистов, а также улучшение модели с учетом новых данных и развитие методов прогнозирования.

Список литературы

1. Демиденко Е.З. Оптимизация и регрессия. Изд-во Наука, 1989. – 296 с.
2. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессия. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 297 с.
3. Breiman L. Random forests // Machine learning. – 2001. – V. 45, № 1. – P. 5–32.
4. Breiman L. Bagging predictors // Machine learning. – 1996. – V. 24, № 2. – P. 123–140.
5. Transfermarkt. – URL: <https://www.transfermarkt.world>.

УДК 519.6, 517.95

**Численное решение обратной задачи электроимпедансной томографии
в круге по измерениям напряжения на электродах**

А.А. Афанасьева

Научный руководитель: профессор, д.-ф.-м.н. А.В. Старченко
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050
E-mail: anna.afanaseva@stud.tsu.ru

**Numerical solution of the inverse problem of electrical impedance tomography
in a circle based on electrode voltage measurements**

A.A Afanasyeva

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.V. Starchenko
Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050
E-mail: anna.afanaseva@stud.tsu.ru

Abstract. *The inverse problem of electrical impedance tomography (EIT) is to determine the distribution of electrical conductivity, knowing the distribution of potential (voltage) and current on the electrodes. The work uses the complete electrode model (CEM) - this is a practical model in EIT, which most realistically models electrodes. As a numerical reconstruction method, an iterative method based on the Levenberg-Marquardt algorithm was considered. The method is implemented numerically for the two-dimensional case, and the algorithm is tested on a model with 16 electrodes with two inserts.*

Key words: *electrical impedance tomography, Levenberg-Marquardt method, complete electrode model.*

Введение

Электроимпедансная томография (ЭИТ) представляет собой метод медицинской визуализации, который обладает многими преимуществами и большим потенциалом для развития. Сам метод является безрадиационным, компактным и экономически эффективным для восстановления электрических свойств в закрытой области на основе поверхностных измерений. Процесс включает подачу электрического тока на набор электродов для измерения напряжения на гладкой поверхности объекта. Ограниченность использования ЭИТ на практике связана с некорректной нелинейной постановкой обратной задачи, в связи с чем сложно восстановить четкие и достоверные изображения электропроводности по измерениям. Тем не менее на практике обратная задача ЭИТ решается разными методами: итерационными методами, методами машинного обучения и другими.

Целью данной работы является численный расчет приближенного распределения электрической проводимости с помощью итерационного метода для модели с шестнадцатью электродами.

Материалы и методы исследования

В работе рассматривается двумерный случай и предполагается, что процесс стационарен (т.е. не зависит от времени). В двумерном виде уравнение для электрического потенциала запишется следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0, (x, y) \in D. \quad (1)$$

На электродах $E_l \in \Gamma$ рассматриваются граничные условия, учитывающие сопротивление электродов, так называемая полная электродная модель [1, 2]:

$$u + z_l \sigma \frac{\partial u}{\partial n} = U_l, \quad \int_{E_l} \sigma \frac{\partial u}{\partial n} = I_l, \quad l = 1, \dots, L. \quad (2)$$

где u – электрический потенциал (напряжение), σ – электропроводимость, z_l – сопротивление l -го электрода (импеданс), E_l – поверхность электрода, I_l – известная сила тока на электроде, U_l – напряжение на электроде, L – количество электродов.

На границе, контактирующей с воздухом, вследствие отсутствия тока справедливо:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad (x, y) \in \Gamma \setminus \bigcup_{l=1}^L E_l. \quad (3)$$

Для существования и единственности решения этой задачи требуется выполнение условий [2]:

$$\sum_{l=1}^L I_l = 0, \quad \sum_{l=1}^L U_l = 0. \quad (4)$$

Предположим, также, что известными являются и значения электрического сопротивления электродов z_l . Представленная задача является прямой задачей ЭИТ, суть которой заключается в нахождении напряжения на электродах $\vec{U}$ при известном распределении $\sigma(x, y)$, токовой конфигурации $\vec{I}$ и импеданса $\vec{z}$. Цель обратной задачи ЭИТ – найти распределение $\sigma(x, y)$ при известных $\vec{U}^{\mu}$, $\vec{I}^{\mu}$, $\vec{z}$, где $\mu = 1, \dots, M$ – количество рассматриваемых токовых конфигураций.

В данной работе искомое распределение электрической проводимости $\sigma^*(x, y)$ внутри области D должно удовлетворять минимуму функции:

$$\Phi(\sigma^*) = \arg \min_{\sigma > 0} \left(\frac{1}{2} \sum_{\mu=1}^M (\vec{r}^{\mu}(\sigma), \vec{r}^{\mu}(\sigma)) \right).$$

Здесь $\vec{r}^{\mu}(\sigma) = \vec{U}^{\mu}(\sigma) - \vec{U}^{*\mu}$, $\mu = 1, \dots, M$. – вектор невязки; $\vec{U}^{\mu}$ – рассчитанное из численного решения прямой задачи (1)-(4) при некотором распределении значений сеточной функции σ_h и μ -й токовой конфигурации $\vec{I}^{\mu}$ значения напряжения на электродах.

Для решения этой задачи воспользуемся итерационным алгоритмом Левенберга-Маркварда [2]. Приведем его краткое описание. Нужно составить итерационную процедуру для нахождения такого распределения σ_h , когда целевая функция $\Phi(\sigma_h)$ имеет глобальный минимум. Заметим, что во время итерационной процедуры $\sigma_h > 0$.

В соответствии с итерационным методом Левенберга-Маркварда новое $(k+1)$ -е приближение электрической проводимости получается по следующей формуле:

$$\sigma_h^{(k+1)} = \sigma_h^{(k)} - (H + \lambda_k B)^{-1} J_h, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

где k – номер итерации, $B \in R^{T \times T}$ – единичная матрица, $H \in R^{T \times T}$ – матрица Гессе, $J_h = \left(\frac{\partial \Phi(\sigma)}{\partial \sigma_1}, \dots, \frac{\partial \Phi(\sigma)}{\partial \sigma_T} \right)^t$, T – количество треугольников неструктурированной конечно-объемной сетки, использующей для решения прямой задачи ЭИТ (1)-(4).

Для обеспечения сходимости итерационного процесса значение параметра метода λ_k рассчитывалось по следующей формуле: $\lambda_k = \frac{\lambda_{k-1}}{2}$, если факторизация Холецкого для симметричной положительной матрицы $H + \lambda_k B$ может быть реализована численно, иначе $\lambda_k = 4\lambda_{k-1}$.

Рассмотрим применение разработанного итерационного алгоритма решения обратной задачи ЭИТ на следующем примере. Пусть исследуемый объект, для которого нужно найти значения электрической проводимости, имеет форму круга и к нему на границе прикреплены шестнадцать электродов размером 0.2, значения сопротивления которых известны: $z_l, l = 1, \dots, L$. Внутри области исследования размещены две неоднородности – круглой формы, с неизвестными размерами и значениями электрической проводимости.

Для получения «измеренных» синтетических значений напряжений на электродах было рассмотрено 120 вариантов численного решения прямой задачи ЭИТ с различными способами парного подключения электродов с известной силой тока. Вставка с меньшим радиусом имела электрическую проводимость равную 0.75, а с большим – 0.5 и вся окружающая область обладала проводимостью равную 1.

В эксперименте использовались две сетки со сгущением на границе: в первом случае сетка имела 761 узел и 1392 треугольника и на каждом электроде было расположено пять узлов, а во втором случае – 1581 узел и 2920 треугольников и на каждом электроде было девять узлов.

На рис. 1 представлена реконструкция электрической проводимости для этих сеток. По результатам реконструкции видно, что электрическая проводимость, в целом, совпадает с исходно заданной. В таблице 1 приведены две метрики, которые используются для количественной оценки значений проводимости, полученных для каждой сетки.

Таблица 1

Среднеквадратичная ошибка (RMSE) и средняя абсолютная

	MAE	RMSE
1 сетка	0,00013	0,00499
2 сетка	0,00005	0,00275

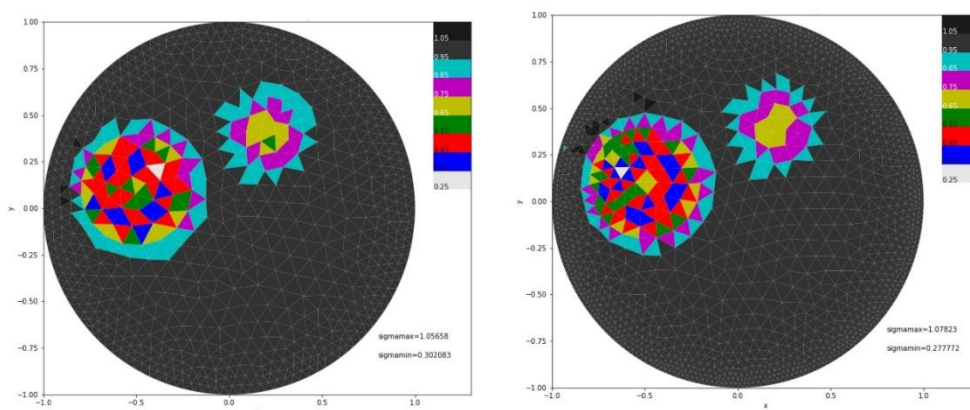


Рис. 1. 2D реконструкция электрической проводимости

Заключение

В данной работе представлен итерационный метод, основанный на алгоритме Левенберга-Марквардта для двумерного случая и протестирован с помощью искусственных измерений на модели круга с 16 электродами.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Borcea L. Electric Impedance Tomography. Topical Review // Inverse Problems. – 2002. – Vol. 18. – P. R99–R136.
2. Somersalo E., Cheney M., Isaacson D. Existence and uniqueness for electrode models for electric current computed tomography // SIAM J. Appl. Math. 1992. – Vol. 52. – P. 1023–1040.

УДК 303.094.7

Имитационная модель управления запасами со случайным спросом и периодичностьюИ.В. Борисенко

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.А. Мицель
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
 Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
 E-mail: ivb25@tpu.ru

Simulation model of inventory management with random demand and frequencyI.V. Borisenko

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.A. Mitsel
 Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
 E-mail: ivb25@tpu.ru

Abstract. In this study, we build a simulation model with random demand and frequency of supply. The frequency of delivery will be determined by two random variable distribution laws: normal and uniform. In the article, the frequency of supply of materials is calculated using a deterministic Mitsel model.

Key words: simulation model, inventory management, random demand.

Введение

В наше время управление запасами на предприятии очень важная составляющая логистики. Целью управления запасами является обеспечение предприятия запасами, которые необходимы для поддержания производственного процесса, с минимальными затратами на их приобретение и доставку. Целью данного исследования является создание имитационной модели управления запасами со случайным спросом и периодичностью.

Экспериментальная часть

В качестве материалов использовались данные по приходу сырья и материалов на предприятии ООО «МК Купинский» в ноябре 2021 г, расположенные в таблице 1.

Таблица 1

Данные сырья и материалов на предприятии ООО «МК Купинский» в ноябре 2021 г

№ п/п	Сырье и материалы	Количество	Сумма, руб.
1	Гофроящик 295*210*210, шт.	10 545	197 458, 05
2	Прокладка 290*145, шт.	76 405	134 402, 65
3	Крышка д-95 2160/кор ГМЗ, шт.	66 960	62 272, 8
4	Стакан 390 95*99, 5-380, БЕЛЫЙ, шт.	112 320	737 107, 2
5	Гофролист 1150*750, шт.	6 038	197 342, 4
6	Крышка прозрачная D95 нахлобучка, тыс. шт.	304, 500	278 603, 5
7	Закваска FD DVS XMT-3 (25*250ед), шт.	98 000	158 099, 03
8	Сахар-песок*50 ГОСТ, кг	1 100	67 062, 5

Рассмотрим имитационную модель управления запасами с периодической стратегией подачи заявок [1]. Данная имитационная модель будет немного модифицирована и периодичность поставки будет являться случайной величиной, задаваемая двумя законами распределения — это нормальное и равномерное.

В модель для нормального закона распределения добавляется два параметра — это среднее значение периодичности поставки и среднеквадратическое отклонение периодичности поставки вместо параметра периодичность поставки [2].

В модель для равномерного закона распределения параметр периодичности поставки заменяется на два других параметра таких, как нижняя граница периодичности поставки и верхняя граница периодичности поставки.

Воспользуемся многопродуктовой моделью управления запасами Мицеля для расчёта периодичности поставки, в которой пополнение недостающих ресурсов производится в объёме, равном дефициту данного ресурса [3].

Результаты

Для расчета по модели Мицеля возьмем данные из Таблицы 1. Из расчетов по модели Мицеля предполагается периодичность поставок. Это позволяет сэкономить оборотные средства.

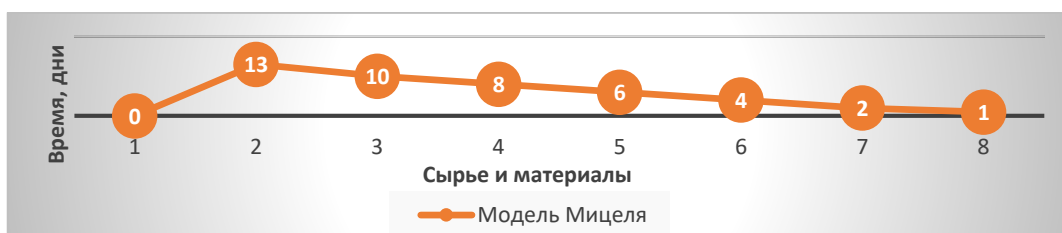


Рис. 1. Периодичность поставок каждого вида товара за ноябрь 2021 г.

Для расчета по данной модели воспользуемся периодами поставки по модели Мицеля и Таблицей 1, а также расчет будет произведен только для второго материала.

Реализуем имитационную модель, где спрос и периодичность поставки являются случайной величиной с нормальным законом распределения. Имитационная модель строится для каждого материала отдельно, начиная со второго по убыванию стоимости материала, так как первый материал закупается полностью в начале цикла. Берем цикл реализации равный 13 дням. Именно через столько дней прибудет следующая партия материала. Значит, среднее значение периодичности поставки 13 дней, а среднеквадратическое отклонение равно 1 дню, так как партия может прийти раньше срока или позже срока, или вовремя. Переведем эти 13 дней в периоды по часам, где 1 период равен 4 часам. Тогда 1 день – это 6 периодов или 24 часа, а 13 дней – это 78 периодов. Реализуем модель 100 раз и смотрим как меняются остаток на складе и издержки. На рисунках 2 и 3 изображены все остатки на складе и издержки, и как они менялись в зависимости от периодичности поставки.



Рис. 2. Остаток на складе при периодичности поставки, заданной нормальным законом распределения



Рис. 3. Издержки при периодичности поставки, заданной нормальным законом распределения

Как видим, от периодичности поставки зависит сколько остатков получится на складе. Иногда поставки приходят вовремя, иногда рано, но бывает и позже, из-за чего возникает дефицит материалов, и производитель уходит в минус. Поставки позже происходят в 3 случаях

из 100, то есть возникает 3 % вероятность нехватки материалов. В таких случаях производителю приходится платить штраф за дефицит.

Реализуем имитационную модель, где спрос является случайной величиной с нормальным законом распределения, а периодичность поставки является случайной величиной с равномерным законом распределения. Берем цикл реализации равный 13 дням. Значит, берем нижнюю границу периодичности поставки равной 12 дней и верхнюю границу равную 14 дням, так как партия может прийти раньше срока или позже срока, или вовремя. Переведем эти дни в периоды по часам 12 дней – это 72 периода и 14 дней – это 84 периода. Производим такие же расчёты, как и с нормальным законом распределения. На рисунках 4 и 5 изображены все остатки на складе и издержки, и как они менялись в зависимости от периодичности поставки.



Рис. 4. Остаток на складе при периодичности поставки, заданной равномерным законом распределения



Рис. 5. Издержки при периодичности поставки, заданной равномерным законом распределения

Как видим, при равномерном законе распределения периодичности поставки не возникает таких случаев, как дефицит материалов.

Заключение

Были проведены расчеты по складским данным производственного предприятия ООО «МК Купинский» за ноябрь 2021 г. детерминированной моделью Мицеля.

Проведено имитационное моделирование по складским данным производственного предприятия ООО «МК Купинский». Построена имитационная модель со случайным спросом и периодичностью поставки, где случайность периодичности поставки задавалась двумя законами распределения: нормальным и равномерным. При использовании периодичности поставки с нормальным законом распределения возникают случаи дефицита материала из-за чего приходится платить штраф. В периодичности поставки с равномерным законом распределения такого не возникает, но бывают случаи большого остатка, который можно использовать если возникнет проблема. Также так как периодичность задавалась случайной величиной, то имитационное моделирование приближено к реальности.

Список литературы

1. Мицель А.А., Грибанова Е.Б. Имитационное моделирование экономических процессов в Excel. – Томск: Изд-во ТГУ, 2016. – 115 с.
2. Леонова Н.Л. Компьютерное моделирование: учебно-практическое пособие // ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб. : 2018. – Часть 1. – 45 с.
3. Мицель А.А., Алимханова Д.А. Многопродуктовая модель управления запасами с равной периодичностью поставок // Экономический анализ: теория и практика. – 2015. – № 40 (439). – С. 55–66.

УДК 536.2

Математическое моделирование разрушения злокачественных новообразований с использованием гипертермии

Д.В. Акулова

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. М.А. Шеремет
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: akulova@math.tsu.ru

Mathematical modeling of malignant tumor destruction using hyperthermia

D.V. Akulova

Scientific Supervisor: Prof. Dr. M.A. Sheremet
Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: akulova@math.tsu.ru

Abstract. This paper presents a numerical analysis of unsteady heat transfer in a multilayer biological system in the presence of a malignant neoplasm, the mammary gland was chosen as the model. Temperature profiles were studied under the influence of volumetric thermal heating at the outer boundary. The degree of tissue destruction under the influence of temperature was calculated using the Arrhenius integral.

Key words: Pennes model, multilayer biological system, hyperthermia process, mathematical modeling.

Введение

Среди злокачественных опухолей рак молочной железы является одним из наиболее широко изученных, в первую очередь из-за его высокой ежегодной заболеваемости и смертности. С медицинской точки зрения гипертермия стала одним из наиболее перспективных методов лечения. Это метод, основанный на повышении температуры опухоли с целью уничтожения опухолевых клеток.

Гипертермия как клинический метод лечения рака основывается на принципе теплового воздействия на опухолевую ткань. Повышение температуры в определенной области тела приводит к повреждению опухолевых клеток. Этот процесс также стимулирует кровоток, что способствует улучшению поступления кислорода в опухоль, что также может увеличить эффективность радиационной терапии.

Для реализации гипертермической терапии используются различные методы, включая воздействие электромагнитных волн, лазерную терапию, введение магнитных наночастиц и применение ультразвука. Однако необходимо учитывать, что термические методы могут вызывать повреждения не только опухоли, но и окружающих здоровых тканей.

В данной работе мы предлагаем решение, основанное на непрерывном воздействии тепла на поверхность кожи с последующим расчетом степени разрушения тканей с использованием интеграла Аррениуса. Этот подход позволяет более точно контролировать процесс гипертермии и минимизировать возможные побочные эффекты на окружающие ткани.

Математическая модель

Для исследования нагрева злокачественной опухоли в процессе гипертермии выбрана одномерная модель биологической ткани, представленная на рис. 1.

На рис. 1 представлена область, состоящая из шести слоев ткани (эпидермиса ($m = 1$), сосочковой дермы ($m = 2$), сетчатой дермы ($m = 3$), гиподермы ($m = 4$), железистой ($m = 5$) и мышечной тканей ($m = 6$)) и слоя злокачественной опухоли ($m = 0$). Предполагается, что злокачественное новообразование развивается в железистой ткани. На поверхности кожи ($x = 0$) происходит теплообмен с окружающей средой, рассматривается фиксированная

температура $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$. В центре тела ($x = H$) поддерживается постоянная температура равная $T_c = 37^{\circ}\text{C}$, кроме того, начальная температура устанавливается равной $T_0 = 37^{\circ}\text{C}$. На границах контакта слоев предполагаются условия равенства температур и тепловых потоков.

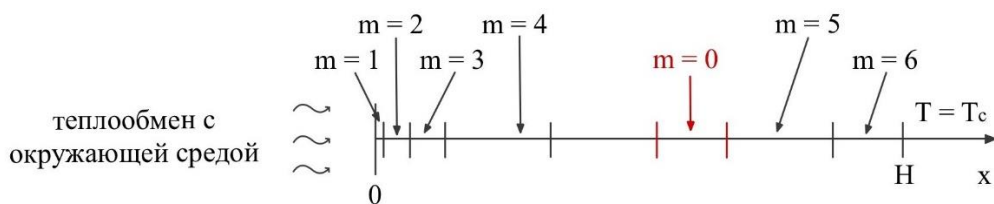


Рис. 1. Размеры рассматриваемой области, положение злокачественной опухоли, границы слоев

Математическая модель задается уравнением Пеннеса [1], дифференциальная запись которого для поставленной задачи имеет следующий вид

$$\rho_{t,m} c_{t,m} \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \rho_b c_b \omega_{b,m} (T_a - T_m) + Q_m + Q_r(x, t),$$

где $\rho_{t,m}$, $c_{t,m}$ и λ_m являются плотностью, удельной теплоемкостью и теплопроводностью слоев ткани ($m = \overline{0,6}$) соответственно, ρ_b и c_b – плотность и удельная теплоемкость крови, $\omega_{b,m}$ – скорость перфузии крови в каждом слое ($m = \overline{0,6}$), T_a – артериальная температура, Q_m – объемное внутреннее тепловыделение, $Q_r(x, t) = \eta P_0(t) \exp(-\eta x)$ – объемный тепловой нагрев [2], η – коэффициент рассеяния, $P_0(t)$ – временная зависимость для мощности нагрева на поверхности биологической ткани.

Для рассматриваемой модели были сформулированы следующие краевые условия.

Начальное условие ($t = 0$):

$$T(t, x) = T_0.$$

Граничные условия ($t > 0$):

$$-\lambda_1 \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} = \alpha_{\infty} (T_{\infty} - T(t, x)), x = 0,$$

$$T(t, x) = T_c, x = H.$$

Температура и тепловой поток между слоями:

$$T_m(x) = T_{m+1}(x),$$

$$\lambda_m \frac{\partial T_m(x)}{\partial x} = \lambda_{m+1} \frac{\partial T_{m+1}(x)}{\partial x},$$

где λ_m и λ_{m+1} – теплопроводность соседних слоев.

Геометрические параметры и теплофизические свойства, имеющие отношение к лечению рака молочной железы, обсуждаемые в этой работе, приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1

Геометрические параметры и теплофизические свойства для различных слоев ткани

№ п/п	Ткань	H (м)	λ (Вт/м · °С)	ρ (кг/м ³)	c (Дж/кг · °С)	ω (1/с)	Q (Вт/м ³)
1	Эпидермис	1.0e-04	0.235	1200	3589	0	0
2	Сосочковая дерма	7.0e-04	0.445	1200	3300	0.0002	368.1
3	Сетчатая дерма	8.0e-04	0.445	1200	3300	0.0013	368.1
4	Гиподерма	–	0.185	1000	2674	0.0001	368.3
5	Железистая ткань	–	0.480	1080	3000	0.00018	450.0
6	Мышечная ткань	1.0e-02	0.510	1085	3800	0.0027	684.0
7	Опухоль	1.0e-02	0.480	1080	3500	0.0090	7767.4
8	Кровь	–	–	1060	4200	–	–

Основной целью данной работы является оценка термического повреждения клеток тканей при наличии теплового воздействия. Математически этот тепловой ущерб может быть оценен количественно путем вычисления интеграла, основанного на законе Аррениуса [3, 4]:

$$\Omega(x) = \int_0^t A_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT(\tau, x)}\right) d\tau,$$

где $\Omega(x)$ – тепловой ущерб, $A_{0,m} = 2.94 \cdot 10^{40} \text{ (с}^{-1}\text{)}$, $m = \overline{1,6}$ и $A_{0,m} = 1.18 \cdot 10^{48} \text{ (с}^{-1}\text{)}$, $m = 0$ – фактор частоты (фактор вероятности), $\Delta E_m = 2.59 \cdot 10^5 \text{ (Дж/моль)}$, $m = \overline{1,6}$ и $\Delta E_m = 3.02 \cdot 10^5 \text{ (Дж/моль)}$, $m = 0$ – энергия активации денатурации белка, R – универсальная газовая постоянная ($R = 8.314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{°C)}$)).

Интеграл повреждения Аррениуса Ω указывает на необратимое повреждение клеток ткани. $\Omega = 1$ интерпретируется как 64 % клеток погибших, тогда как 99,6 % клеток повреждаются, когда Ω достигает значения 4, 6 [5].

Заключение

В работе представлено математическое описание одного из подходов к лечению злокачественных новообразований гипертермией. Представленная математическая модель учитывает пространственный нагрев на внешней границе молочной железы. Более того, работа включает ограничение, связанное с разрушением тканей, т.е. были учтены требования к уничтожению опухоли и порогу ожога кожи. Таким образом, цель состояла не только в том, чтобы приложить максимум тепла для уничтожения новообразования, но и в том, чтобы гарантировать, что разрушение тканей находится в допустимых пределах.

Список литературы

1. Pennes H.H., Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm // J. Appl. Physiol. – 1948. – V. 1 (2). – P. 93–122.
2. Deng Z.S., Liu J. Analytical study on bioheat transfer problems with spatial or transient heating on skin surface or inside biological bodies // J Biomech Eng. – 2002. – V. 124 (6). – P. 638–49. doi: 10.1115/1.1516810.
3. Mahesh N., Singh N., Talukdar P. Investigation of a breast cancer magnetic hyperthermia through mathematical modeling of intratumoral nanoparticle distribution and temperature elevations // J Thermal Science and Engineering Progress. – 2023. – Vol. 40. – P. 101756. doi: 10.1016/j.tsep.2023.101756.
4. Lobato F.S., Filho J.E.A., Libotte G.B., Platt G.M. Optimizing breast cancer treatment using hyperthermia: A single and multi-objective optimal control approach // J Applied Mathematical Modelling. – 2024. – Vol. 127. – P. 96–118. doi: 10.1016/j.apm.2023.11.022.
5. Singh G., Kumar N., Avti P.K. Computational evaluation of effectiveness for intratumoral injection strategies in magnetic nanoparticle assisted thermotherapy // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 220. – Vol. 148. – P. 119129. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119129.

УДК 617.713-089.843

**Обработка и сегментация снимков глазного дна с использованием
сверточных нейронных сетей**Н.И. Малыгина

Научный руководитель: Е.О. Филиппова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050E-mail: nim8@tpu.ru**Processing and segmentation of fundus images using convolutional neural networks**N.I. Malygina

Scientific Supervisor: E.O. Filippova

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: nim8@tpu.ru

Abstract. *The purpose of the study is the processing and segmentation of fundus images with different stages of diabetic retinopathy using convolutional neural networks. As a result, a trained neural network was obtained that allows segmenting fundus images with some accuracy. The accuracy of the determination is sufficient to verify the pathological processes of the retina with diabetic retinopathy.*

Key words: *segmentation, fundus images, diabetic retinopathy.*

Введение

В настоящее время разработка алгоритмов определения и анализа патологических процессов сетчатки является одной из актуальных задач современной офтальмологии, в особенности – для ранней диагностики препролиферативной и пролиферативной стадий диабетической ретинопатии. Диабет является серьезной проблемой для систем здравоохранения во всем мире [1]. Распространенность диабета неуклонно растет, особенно у взрослых трудоспособного возраста [2]. Приблизительно у половины людей с диабетом со временем развивается диабетическая ретинопатия (ДР) [3]. Диагностика ДР основывается в большей мере на исследованиях глазного дна с помощью офтальмоскопии и цифровых фундус-камер. Из-за ручного исследования изображений глазного дна сетчатки выявление таких морфологических аномалий как микроаневризмы, экссудаты, кровоизлияния, межретинальные микрососудистые аномалии, пролиферативные процессы является очень сложным и трудоемким процессом. Кроме того, текстурные характеристики сетчатки на цифровых изображениях глазного дна трудно оценить в количественном соотношении: размер и диаметр сосуда, площадь занимаемой пролиферации или экссудативных процессов. Следовательно, сложнее спрогнозировать значимость изменений сетчатки в аспекте неблагоприятного исхода диабетической ретинопатии. Кроме того, офтальмоскопические методы исследования глазного дна являются трудоемкими процедурами, выполняемыми вручную, а результаты субъективны и зависят от опыта врача, что формирует некоторую потенциальную предвзятость. Разработка алгоритмов определения и анализа патологических процессов сетчатки может улучшить диагностику, спрогнозировать развитие неблагоприятных исходов ДР, что поможет врачу-офтальмологу в принятии различных врачебных решений.

Цель исследования – обработка и сегментация снимков глазного дна с различными стадиями диабетической ретинопатии с использованием сверточных нейронных сетей.

Материалы и методы исследования

Для обработки и сегментации снимков глазного дна с различными стадиями диабетической ретинопатии были использованы данные с DIAREDB1, 2-e-Ophtha. Каждое

изображение сегментировано на фрагменты, аннотированные вручную и использовано для обучения сверточной нейронной сети.

Обработка каждого снимка глазного дна проводилась следующим образом.

Брались изображения нормы и изображения с патологией глазного дна (рис. 1):

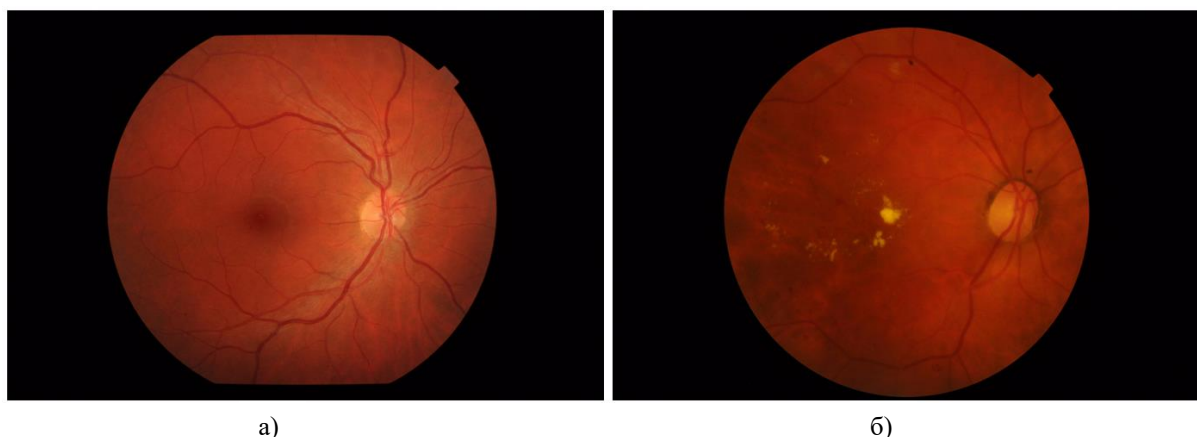


Рис. 1. а) снимок глазного дна без патологий; б) снимок глазного дна с патологией

После этого каждое изображение разделялось на цветовые каналы. Для датасета был оставлен только зеленый канал, так как он обладает наибольшей контрастностью. Таким образом, участки с патологией становились видны лучше (рис. 2).

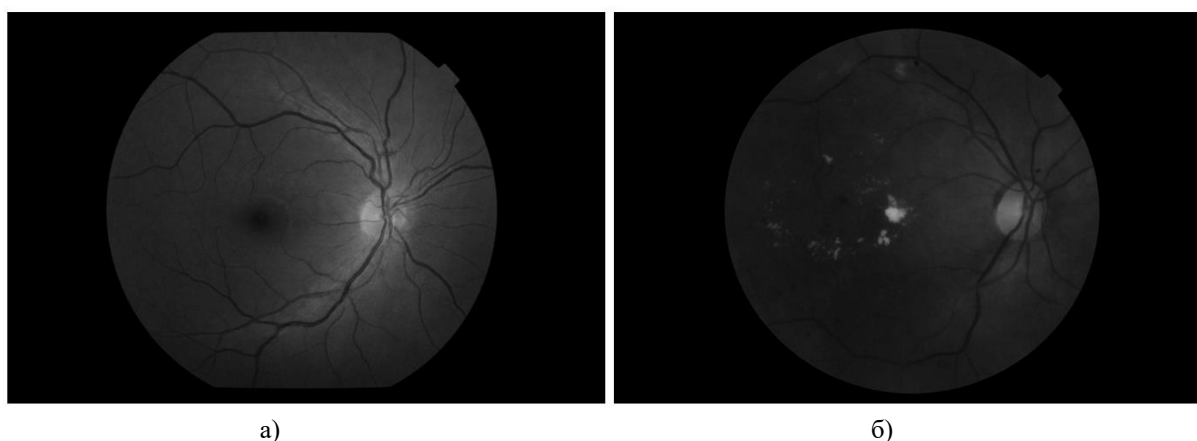


Рис. 2. а) зеленый канал снимка глазного дна без патологий;
б) зеленый канал снимка глазного дна с патологией

Помимо этого, идея выделения зеленого канала будет полезна при сегментировании изображений, при удалении сосудов с изображения для увеличения точности работы программы.

Обучение сверточных нейронных сетей проводилось следующим образом.

Имея уже размеченные вручную изображения, в программе каждому изображению присваивалась метка, к какой категории оно принадлежит: к норме или к снимку с патологией. Каждое изображение было преобразовано в массив пикселей. Массивы были преобразованы в тензоры, которые подавались на вход обучающейся модели (рис. 3).

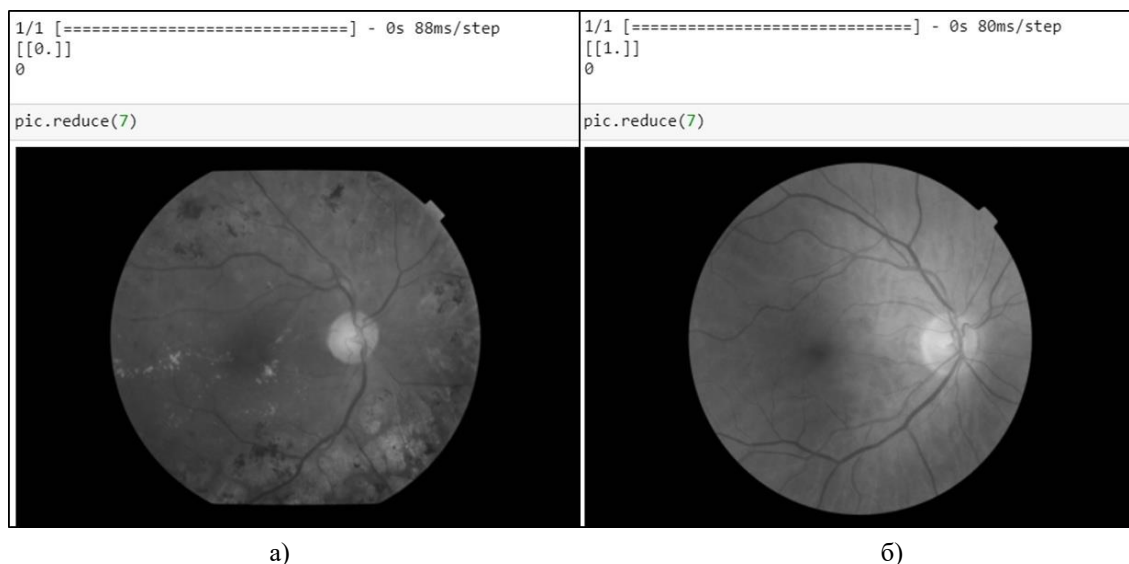


Рис.3. а) тестовое изображение глазного дна без патологии: модель отнесла к снимку без патологии;
б) тестовое изображение глазного дна с патологией модель отнесла к снимку с патологией

Результаты

Модель обучалась 5 эпох, после второй эпохи она стала переобучаться. Это связано с небольшим количеством изображений для обучения.

Наименьшая ошибка, которая была достигнута: 0.6932. Ошибка вычислялась как «binary_crossentropy» библиотеки sklearn python.

Наибольшая точность, которая была достигнута: 0.7091. Метрика вычислялась как «ассурасу» библиотеки sklearn python.

Заключение

В результате получена обученная нейросеть, позволяющая сегментировать изображения глазного дна с некоторой точностью. Точность определения достаточна для верификации патологических процессов сетчатки с диабетической ретинопатией.

Список литературы

1. Eshaq R.S., Aldalati A.M., Alexander J.S., Harris N.R. Diabetic retinopathy: breaking the barrier // Pathophysiology. – 2017. – № 24 (4). – P. 229–241.
2. Fowler M.J. Microvascular and macrovascular complications of diabetes // Clin. Diabetes. – 2008. – № 26. – P. 77–82.
3. Karadeniz S., ZimmetInternational P. Diabetes Federation and The Fred Hollows Foundation, Diabetes Eye Health: A Guide for Health Care Professionals. – Brussels, Belgium: International Diabetes Federation, 2015.

УДК 51-3

Создание оптимальной информационной системы для решения задач теории фильтрации

М.А. Крайнов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, Томск, пр. Ленина, 36, 634050

Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, Томск, пл. Соляная 2, 634003

E-mail: mikhailkraynov@mail.ru

Creation of an optimal information system for solving problems of filtration theory

M.A. Krainov

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia, Tomsk, Solyanaya str., 2, 634003

E-mail: mikhailkraynov@mail.ru

Abstract. In connection with the development of computational problems and the increasing demands placed to convenience and optimization of calculations, the need arose to create new domestic computing packages to solve a number of scientific problems. One of the highest priority solutions to optimization problems is the use of fast and controlled computation. This article describes information display systems that will be optimal for solving theory of filtration problems, the first version of which is well suited for training and quickly obtaining results for its subsequent analysis.

Key words: filtration theory, Information system, single-phase filtration, two-phase filtration.

Введение

Для описания всех процессов, происходящих внутри системы, будем использовать методологию IDEF0 [1], постепенно детализируя каждый процесс до нужного уровня. В программе содержится встроенная база данных, содержащая физические характеристики среды, используемые для последующих вычислений. Управление процессами вычисления происходит в результате нажатия кнопки, активирующей процесс расчёта, который согласуется с включением или выключением соответствующих параметров в данный расчёт.

Материалы и методы исследования

Уравнение Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости для трёхмерного случая. В переменных $\omega - \Psi$:

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega}{\partial t} + v_x \frac{\partial \omega}{\partial x} + v_y \frac{\partial \omega}{\partial y} + v_z \frac{\partial \omega}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial F}{\partial t} \\ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = -\omega \end{cases} \quad (1.1)$$

Течение однофазной жидкости в пористой среде описывается законом сохранения массы (уравнение неразрывности) и законом Дарси:

$$\frac{\partial(\rho \rho)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{w}) = 0, \quad \vec{w} = -\frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho \vec{g}) \quad (1.2)$$

Математическая модель процесса двухфазной фильтрации представлена как закон сохранения массы для каждой фазы:

$$\frac{\partial \rho_w \varphi s}{\partial t} + \text{div}(\rho_w \vec{W}_w) = 0, \quad \frac{\partial \rho_o \varphi (1-s)}{\partial t} + \text{div}(\rho_o \vec{W}_o) = 0 \quad (1.3)$$

Численное решение уравнения Навье-Стокса в системе представляется двумя методами. Метод конечных разностей для решения уравнения Навье-Стокса заключается в нахождении для каждого дифференциального оператора его конечно-разностного аналога [2]. Метод конечных объёмов для решения уравнения (1.1) реализуется следующим образом. Для производной по времени используем стандартный простейший метод Эйлера [3]. На первом шаге задаются как начальные условия, так и граничные.

$$\frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{\tau} V_i + \sum_{i=1}^{n=6} \frac{\omega_{i+1} - 2 \cdot \omega_i + \omega_{i-1}}{h^2} S_i = \mu \sum_{i=1}^{n=6} \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{2h} S_i \quad (1.4)$$

Методом конечных разностей решим уравнение двухфазной фильтрации. В предположение, что плотность является функцией, а не постоянной, решим систему уравнений двухфазной фильтрации для воды, подставив в уравнение неразрывности скорость фильтрации, и в дальнейшем расщепления по компонентам. Затем, заменим частные производные на их конечно-разностные аналоги.

Метод конечных объёмов для решения уравнения двухфазной фильтрации реализуется аналогично ему применению к уравнению Навье-Стокса. Проинтегрируем по объёму уравнение неразрывности (1.2). По теореме Остроградского-Гаусса, заменим объёмный интеграл с дивергенцией поверхностным.

Результаты

Основной целью создания данной системы является удобство и объединение выбора граничных условий, задание размера расчётной сетки, выбор типа фильтрации, метод решения и т. д. Так выглядит основное окно приложения, в котором и происходит настройка расчёта (рис. 1).

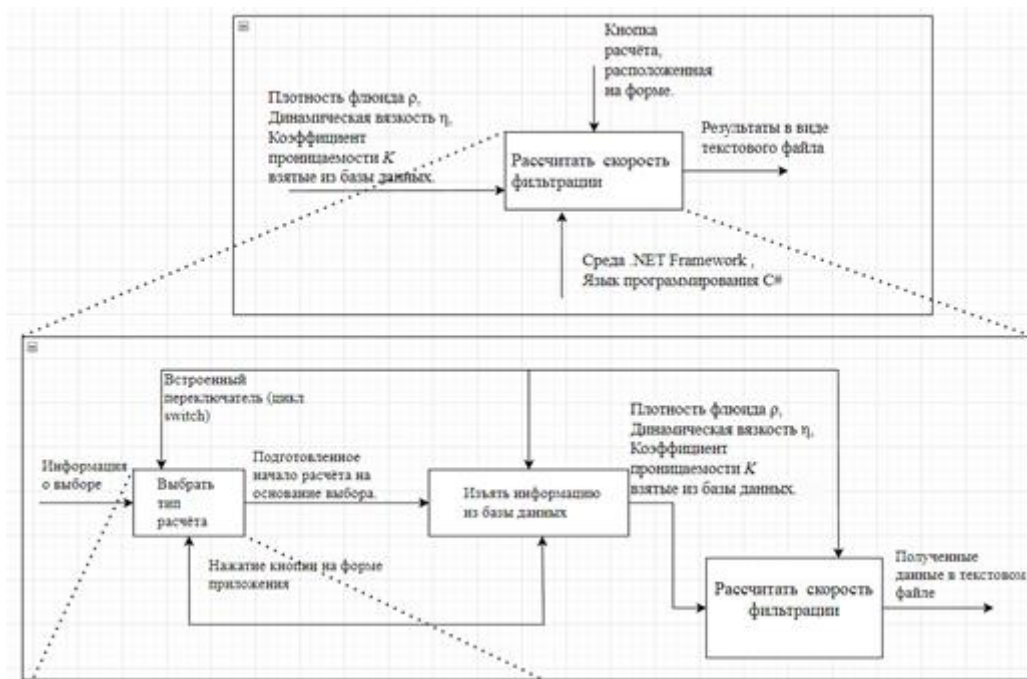


Рис. 1. Описание одного из процессов в нотации IDEF0

Выбирается размер расчётной сетки, задаются граничные условия и выбирается метод решения. Результаты появляются в виде текстового документа или в виде графика функции (рис. 2, 3).

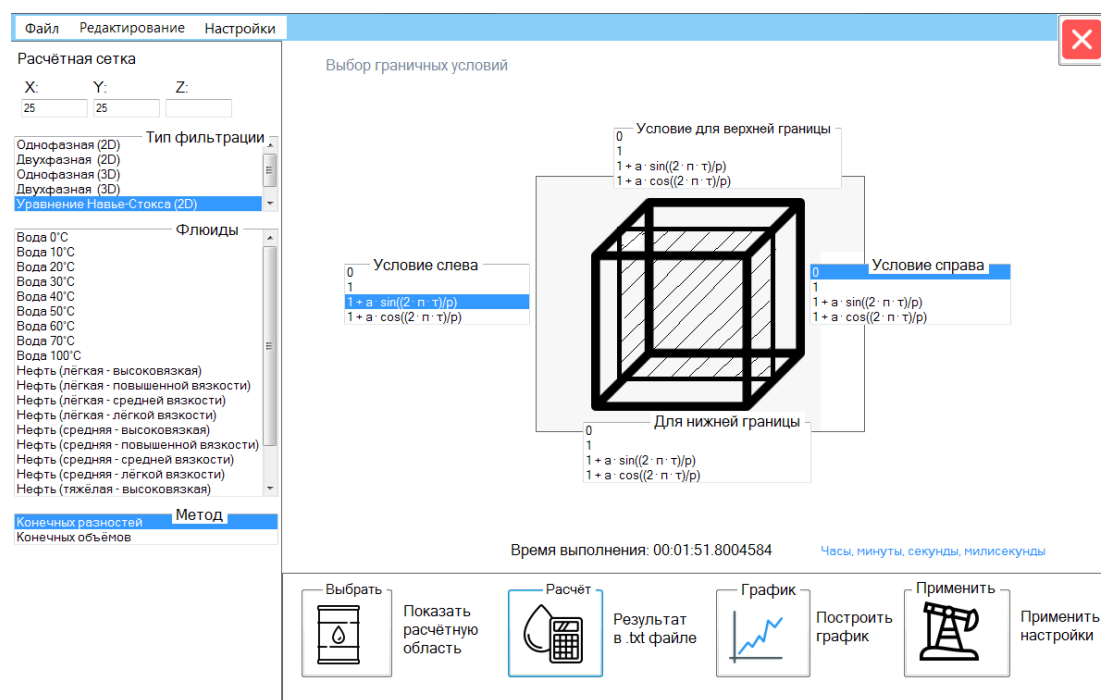


Рис. 2. Интерфейс основного окна приложения

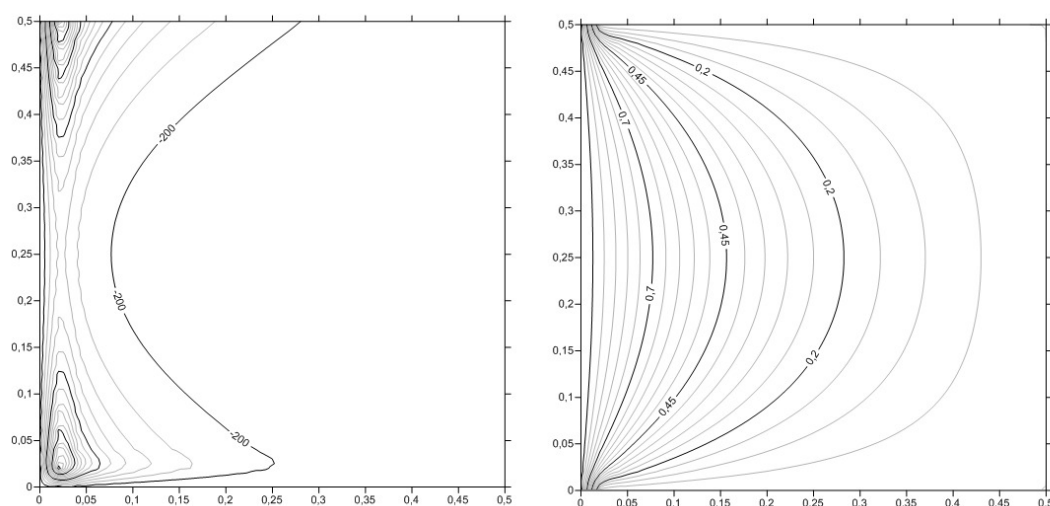


Рис. 3. Вихрь и линии тока для плоского течения

Заключение

Предложенная информационная система объединяет в себе возможности выбора методов расчёта, выбора физических характеристик флюида и граничные условия, что делают её удобной как для расчётов, так и для обучения. Стоит отметить, что некоторые функции ещё находятся в разработке.

Список литературы

1. SADT, Нотация IDEF0 [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/sandbox/31234/> (Дата обращения: 01.02.24)
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М. Наука, 1977. – 656 с.
3. Никитин К.Д. Нелинейный метод конечных объёмов для задач двухфазной фильтрации // Институт вычислительной математики РАН. – 2010. – Т. 22, № 11. – С. 131–147.

УДК 621.31

**Естественная конвекция в замкнутой полости под действием
двух источников магнитного поля****Е.П. Недоедко, Б.Н. Сергеевна**

Научный руководитель: к.ф.-м.н., Б.Н. Сергеевна

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050E-mail: nedoedko.katy@gmail.com**Natural convection in a closed cavity under the influence of two magnetic field sources****E.P. Nedoedko, N.S. Bondareva**

Scientific Supervisor: Ph.D., N.S. Bondareva

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: nedoedko.katy@gmail.com

Abstract. This study examines a square cavity filled with a liquid with high electrical conductivity properties under the influence of two point sources of magnetic field. Part of the bottom wall was maintained at a constant high temperature, while the region was cooled from the top wall in the same interval, maintained at a constant cold temperature. The remaining walls are thermally insulated. The magnetic field sources were located at different points. It was assumed that the flow developing in the cavity is laminar, and the density difference is due to the temperature gradient was described by the Boussinesq approximation. The influence of Rayleigh and the effect of the magnetic field on heat and mass transfer at different positions of the source were investigated.

Key words: magnetic field source, natural convection, heat transfer, mass transfer, Rayleigh number.

Введение

Естественная конвекция является важным механизмом теплопередачи и играет ключевую роль в различных научных исследованиях и инженерных системах, таких как охлаждение устройств, солнечные и ядерные коллекторы, отопительные системы, вентиляция, проектирование энергоэффективных зданий, водонагреватели, термосифоны [1, 2]. В современном мире существует постоянная потребность в улучшении эффективности теплообмена и контроля над потоками жидкости или газа в замкнутых системах. Одним из методов контроля естественной конвекции является использование магнитного поля [3-6]. Использование магнитного поля на производстве имеет множество преимуществ. Прежде всего, экономическая эффективность. Магнитное поле позволяет более точно и быстро обрабатывать материалы, что увеличивает производительность и снижает затраты на производство. Магнитные поля являются экологически безопасными и не загрязняют окружающую среду, они не требуют использования вредных химических веществ или энергии, что делает их более устойчивыми и эффективными для производства. Еще одним преимуществом является повышение качества продукции. Они позволяют исключить наличие посторонних частиц или примесей, что обеспечивает высокую степень чистоты и безопасности продукции. В металлургии магнитные поля активно используются для очистки расплава от примесей и включений, что позволяет получить более чистый и качественный металл. Кроме того, они могут быть использованы для управления и контроля металлической структуры при отжиге, что улучшает свойства материалов.

Экспериментальная часть

В данном исследовании рассматривалась квадратная полость высоты H (рис. 1.), заполненная жидкостью с высокой электропроводимостью, находящейся под влиянием двух источников постоянного магнитного поля. Область нагревалась от нижней стенки, имеющей

постоянную температуру T_H на промежутке $0.25 H < x < H 0.75$, и охлаждалась от верхней стенки с температурой T_C на промежутке $0.25 H < x < H 0.75$, остальные границы области являлись теплоизолированными. Источники магнитного поля P_1 и P_2 были расположены по разные стороны области. Течение в полости предполагалось ламинарным и разность плотностей, обусловленная градиентом температур, описывалась приближением Буссинеска.

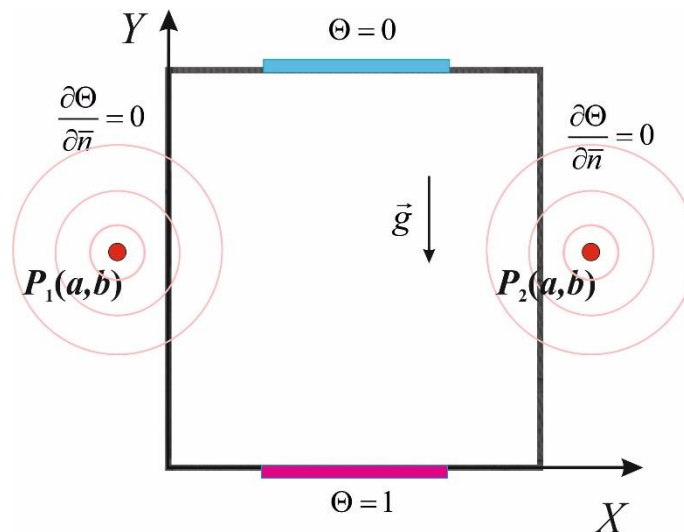


Рис. 1. Область решения

Для исследования процессов естественной конвекции была построена вычислительная модель на основе преобразованных переменных функция тока и завихренность. Дифференциальные уравнения с соответствующими начальными и граничными условиями решались методом конечных разностей. Для решения уравнений функций тока использовался метод последовательной верхней релаксации, а уравнения энергии и завихренности решались с применением локально-одномерной схемы А.А. Самарского.

Результаты

В данной работе были исследовано влияние числа Гартмана и Релея при различных положениях источников магнитного поля на режимы термогравитационной конвекции. В зависимости от интенсивности и положения источников магнитного поля менялась картина течения. Значения чисел Гартмана варьировались от 50 до 300. На рисунке 2 представлены температурные поля для случая $Ra = 10^6$ и разных значений мощности источников, расположенных у боковых стенок области.

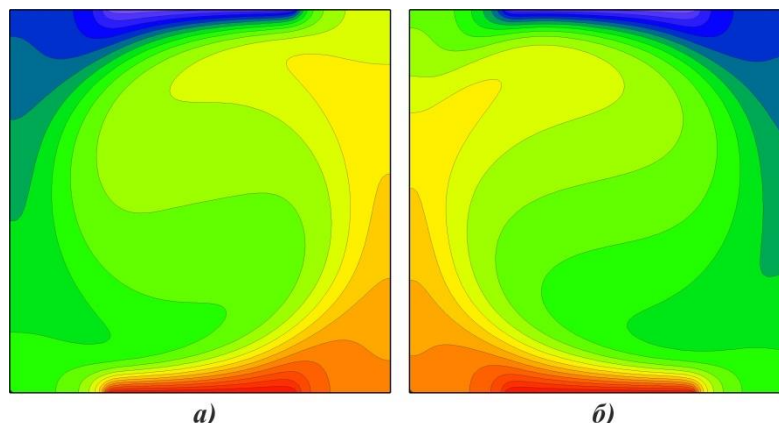


Рис. 2. Поля температур для случая $Ra = 10^6$ и интенсивности магнитного поля:
а) $Ha_1 = 100$ и $Ha_2 = 100$; б) $Ha_1 = 300$ и $Ha_2 = 100$

При таком расположении P_1 и P_2 происходит смещение температурного факела к стенке, при этом при разных мощностях источников, смещение в сторону большего значения числа Гартмана. Для значений Гартмана $Ha_1 = 300$, $Ha_2 = 100$ и $Ha_1 = 200$, $Ha_2 = 100$ температурные поля практически одинаковы. В то время как линии тока претерпевают небольшие изменения, а именно при значении $Ha_1 = 200$ в средней части полости течение интенсивнее, чем при значении $Ha_1 = 100$. Также было показано, что при расположении источников вблизи горизонтальных границ происходит закручивание факела к середине полости. С увеличением значения числа Гартмана интенсивность циркуляции падает, максимальные значения функции тока снижаются на 30 %, в связи с этим высота температурного факела снижается. При более низких числах Рэлея $Ra = 10^4$ происходит более равномерный прогрев полости, в центре наблюдается небольшой симметричный температурный факел, охлажденная жидкость при этом опускается вдоль вертикальных стенок.

Заключение

Была разработана вычислительная модель для исследования процессов теплопереноса в квадратной полости под воздействием двух источников магнитного поля. Было показано, что повышение интенсивности магнитного поля приводит к снижению циркуляции жидкости в полости, а расположение источников и разница индукций может существенно влиять на поведение нагретых и охлажденных течений. Наклон температурного факела может быть скорректирован повышением интенсивности определенного источника магнитного поля, а закручивание может быть достигнуто расположением источников рядом с изотермическими стенками.

Исследование выполнено в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 22-79-10341).

Список литературы

1. Sathiyamoorthy M. Chamkha Ali. Effect of magnetic field on natural convection flow in a liquid gallium filled square cavity for linearly heated side wall // International Journal of Thermal Sciences. – 2010. – V. 49. – P. 1856–1865.
2. Sarris I.E. Zikos G.K., Grecos A.P., Vlachos N.S. On the Limits of Validity of the Low Magnetic Reynolds Number Approximation in MHD Natural Convection Heat Transfer // Numerical Heat Transfer, Part B. – 2006. – V. 50. – P. 157–180.
3. Battira M., Bessaih R. Magnetohydrodynamic Damping of Natural Convection Flows in a Rectangular Enclosure // New Trends in Technologies, Blandna ramov (Ed.). – 2010. – P. 77–88.
4. Pishkar I. Ghasemi B., Raisi A., Aminossadati S.M. Simulation of Variabl Magnetic Field Effect on Natural Convection Heat Transfer of Fe_3O_4 // Graphite Slurry based on Experimental Properties of Slurries // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2022. – Vol. 15, № 1. – P. 1–14.
5. Jalal M. Jalil., Kays A.Al-Tae'y. The Effect of Nonuniform Magnetic Field on Natural Convection in an Enclosure // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology. – 2007. – P. 899–917.
6. Korei, Z., Bentoumi L. The Impact of a Non-Uniform Magnetic Field on Mixed Convection in a Lid-Driven Cavity Filled with Fe_3O_4 //Water Nanofluid. Comput. Sci. Math. Forum – 2023. – V. 7 (1). – P. 23.

УДК 533

**Математическое моделирование сопряженного теплообмена
при обдуве цилиндра сверхзвуковым потоком газа**

Д.О. Ларкин

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. И.В. Еремин
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634035
E-mail: mister.larkin.dima@mail.ru

**Mathematical modeling of conjugate heat transfer
in the interaction of a cylinder with a supersonic gas flow**

D.O. Larkin

Scientific Supervisor: Ass. Prof., PhD., I.V. Eremin
Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050
E-mail: mister.larkin.dima@mail.ru

Abstract. *The paper presents the results of mathematical modeling of conjugate heat transfer in a supersonic flow of an ideal, viscous, compressible gas. The Navier-Stokes equations averaged over Favre together with the SST turbulence model were used to model the gas. The equation of thermal conductivity was solved for a solid body. The simulation was performed using OpenFOAM. A good agreement was obtained with experimental data for a single-material plate. Calculations for two-layer and single-layer plates were also compared. It is found that a two-layer plate has a greater thermal resistance than a single-layer one.*

Key words: *conjugate heat transfer, mathematical modeling, OpenFOAM*

Введение

Изучение сопряженного теплообмена в сверхзвуковом потоке газа имеет большое практическое значение при проектировании самолетов или ракет. Продолжительный сверхзвуковой полет в атмосфере приводит к аэродинамическому нагреву, который представляет серьезную проблему для тепловой защиты летательных аппаратов. Для увеличения сопротивления тепловым нагрузкам используют многослойные стенки из различных материалов. При этом для слоя, который непосредственно контактирует с внешней средой используют материалы с низкой теплопроводностью и высокой теплоемкостью (например, стеклопластик). Для определения характеристик требуемой тепловой защиты в зависимости от действующих тепловых потоков необходимо решать сопряженную задачу в нестационарной постановке.

Целью данной работы является математическое моделирование сопряженного теплообмена при обдуве цилиндра сверхзвуковым потоком газа.

Материалы и методы исследования

Рассматривается натекание идеального вязкого сжимаемого газа на цилиндр в двухмерной постановке. Для описания течения используются уравнения Навье-Стокса осредненными по Фавру [1], для замыкания системы используется модель турбулентности SST. В твердом теле решается уравнение теплопроводности [2]. На границе между твердым телом и газом должно выполняться условие равенства тепловых потоков.

Расчетная область показана на рисунке 1. На границе Г1 задавались параметры набегающего потока, на границе Г2 – мягкие граничные условия, на границе Г3 – условие симметрии, на границе Г4 теплоизоляция, а на границе Г5 – условие сопряженного теплообмена для температуры T , условие не протекания для давления P , условие прилипания для скорости U и пристеночные функции для параметров турбулентности. В случае с

многослойной стенкой добавляется граничное условие для сопряженного теплообмена между слоями в твердом теле. Реализация поставленной задачи выполнена в программном комплексе OpenFOAM. Использовался модульный решатель foamMultiRun основанный на итерационном алгоритме PIMPLE [3].

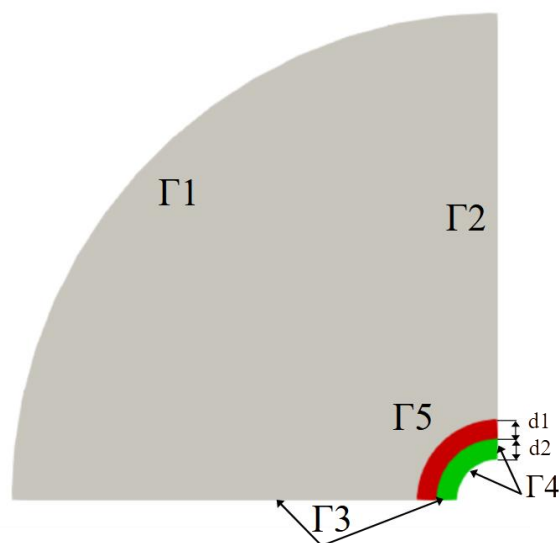


Рис. 1. Геометрия расчетной области

Результаты

Для тестирования методики расчета использовался стальной цилиндр с физическими свойствами: теплоемкость $C = 502,48$ Дж/(кг·К), плотность $\rho = 8030$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 16,27$ Вт/(м·К) и толщиной $d = 12,7$ мм [4]. Параметры набегающего потока: $M = 6,47$, $T = 241,5$ К, $P = 648,1$ Па. Температура цилиндра в начальный момент времени $T_w = 294,4$ К. На рисунках 2 и 3 показано распределение относительного теплового потока q/q_0 и температуры вдоль внешней границы цилиндра, где q_0 – тепловой поток в точке торможения. Видно хорошее качественное согласование с экспериментальными данными [4].

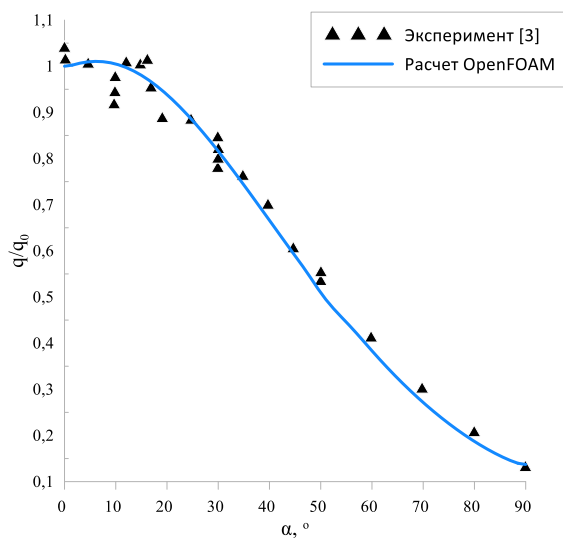


Рис. 2. Распределение относительного теплового потока на стенке в момент времени $t = 4$ с

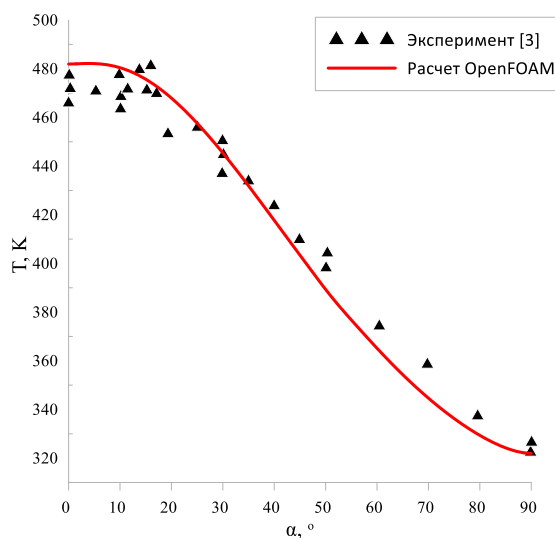


Рис. 3. Распределение температуры на стенке в момент времени $t = 4$ с

Для моделирования сопряженного теплообмена в цилиндре, состоящем из двух слоев в качестве внутреннего материала была выбрана медь с физическими свойствами: теплоемкость $C = 380$ Дж/(кг·К), плотность $\rho = 8900$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 400$ Вт/(м·К)

и толщиной $d_1 = 10,16$ мм. Для уменьшения тепловых нагрузок внешний слой был из стеклопластика с физическими свойствами: теплоемкость $C = 1385$ Дж/(кг·К), плотность $\rho = 1200$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,189$ Вт/(м·К) и толщиной $d_2 = 2,54$ мм. Общая толщина оболочки $d = d_1 + d_2 = 12,7$ мм. Начальные и граничные условия такие же как при тестировании. На рисунках 4 и 5 показано сравнение распределения температур по линии симметрии для однослойного (медного) и двухслойного цилиндра в моменты времени 20 с и 100 с. Видно, что цилиндр состоящий только из меди прогревается практически равномерно по всей толщине. У двухслойного цилиндра за счет добавления менее теплопроводного внешнего слоя сопротивление тепловым нагрузкам возрастает и температура во внутреннем слое примерно в два раза ниже чем у однослойного цилиндра.

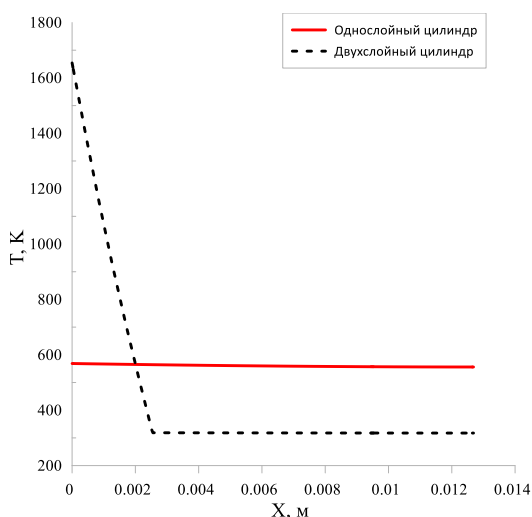


Рис. 4. Распределение температуры в области симметрии для момента времени 20 с

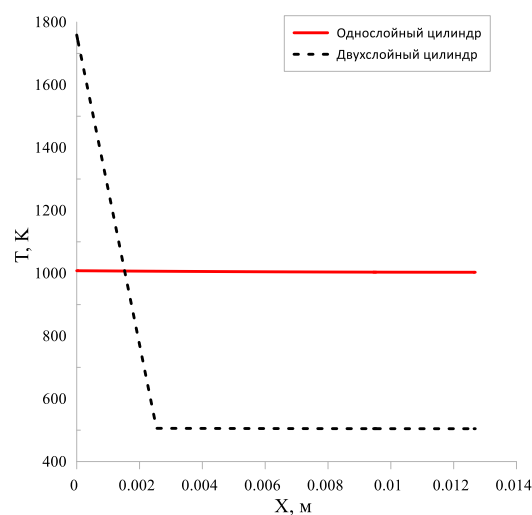


Рис. 5. Распределение температуры в области симметрии для момента времени 100 с

Заключение

В работе представлены результаты обрабатывания методики решения сопряженного теплообмена в сверхзвуковом потоке газа с использованием OpenFOAM. Показано что результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными полученными другими авторами.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.

Список литературы

1. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence model // Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence. Heat and Mass Transfer. Begell House Inc., West Redding. – 2003. – P. 625–632.
2. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса: учеб. пособие. – Томск: STT, 2016. – 92 с.
3. Holzmann T. Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM // Holzmann CFD, Inc, 2019. –155 p.
4. Wieting A.R., Holden M.S., Experimental shock-wave interference heating on a cylinder at Mach 6 and 8 // AIAA J. – 1989. – Vol. 27 (11) – P. 1557–1565.

УДК 519.6

**Численное исследование влияния биофильтра на процесс самоочищения сточных вод
в двумерном приближении**А.В. Амзаракова

Научный руководитель: М.Д. Михайлов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050E-mail: nastya.amzarakova.00@mail.ru**Computational study of the effect of a biofilter on the process of wastewater self-purification
process in a two-dimensional approximation**A.V. Amzarakova

Scientific Supervisor: M.D. Mikhailov

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: nastya.amzarakova.00@mail.ru

Abstract. In the present study, we investigate a modification of the Streeter-Phelps, Monod, Dobbins-Driesnek and Kemp mathematical models using a high-load biofilter. The influence of a biofilter on the wastewater treatment process is investigated based on the results of numerical calculations. An implicit difference method is used.

Key words: biofilter, mathematical model, self-purification, pollution.

Введение

В настоящее время актуальна проблема очистки сточных вод. В связи с антропогенным воздействием на малые реки (притоки) в большие реки и озера поступают недостаточно очищенные сточные воды, загрязненные, в частности, нефтепродуктами.

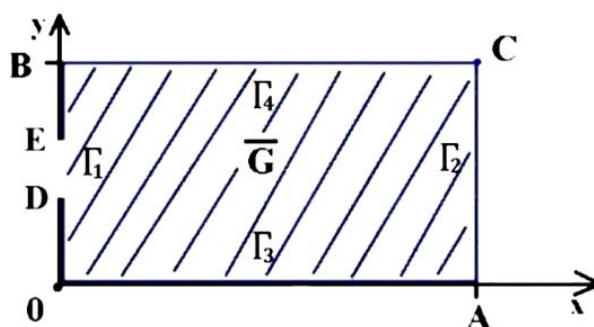
Материалы и методы исследования

В работе рассматривается двумерная модификация моделей Стритера-Фелпса, Моно, Доббинса-Дриснека и Кемпа. Русло реки представляет собой канал прямоугольной формы, по которому течет идеальная несжимаемая жидкость. Сброс в реку Томь органического вещества происходит в течении двух суток, начиная с $t = 0,5$ сут.

Процесс очистки сточных вод описывается названной модификацией моделей с учетом влияния процесса аэрации, окисления субстрата кислородом, микроорганизмов и потока загрязнений из донных отложений [1].

При численной реализации математической модели используется неявный разностный метод [2]. Показана сходимость используемого численного метода (рис. 1.).

Рассматривается участок реки Томь длиной 20 км и шириной 0,8 км.

Рис. 1. Расчетная область $\bar{G}$

Вводятся следующие обозначения:

$$\mathbf{W} = (L, X, D)^T, \mathbf{S} = (S_1, S_2, S_3)^T, S_1 = -k_1 L - k_3 L - kL - \frac{\mu_{\max} XL}{Y(K_L + L)} + J_B,$$

$$S_2 = \frac{\mu_{\max} XL}{K_L + L}, S_3 = k_1 L - k_2 D - \frac{\mu_{\max} XL}{K_L + L} + J_1 + J_2 - J_3.$$

В области $\bar{G} = G \cup \Gamma, G = \{(x, y) | 0 < x < A, 0 < y < B\}, t \in [0, T];$

$$\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4, \Gamma_1 = \Gamma_1^{(1)} \cup \Gamma_1^{(2)} \cup \Gamma_1^{(3)},$$

где

$$\Gamma_1^{(1)} = \{(x, y) | x = 0, 0 \leq y < D\}, \Gamma_1^{(2)} = \{(x, y) | x = 0, D \leq y \leq E\},$$

$$\Gamma_1^{(3)} = \{(x, y) | x = 0, E < y \leq B\}; \Gamma_2 = \{(x, y) | x = A, A < y < C\},$$

$$\Gamma_3 = \{(x, y) | 0 < x \leq A, y = 0\}, \Gamma_4 = \{(x, y) | B < x \leq C, y = B\}$$

ищется решение $\mathbf{W} \in C_1^{2,2}(\bar{G})$ исходной задачи, удовлетворяющее уравнению

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + U \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} + V \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial y} = \mathbf{S} + D_f \left(\frac{\partial^2 \mathbf{W}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{W}}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

с соответствующим начальным

$$\mathbf{W}(x, y, 0) = \mathbf{W}^0(x, y), (x, y) \in \bar{G} \quad (2)$$

и граничными условиями

$$\frac{\partial \mathbf{W}(0, y, t)}{\partial x} = \mathbf{W}^{left}, y \in \Gamma_1, 0 < t \leq T;$$

$$\frac{\partial \mathbf{W}(A, y, t)}{\partial x} = \bar{0}, y \in \Gamma_2, 0 < t \leq T;$$

$$\frac{\partial \mathbf{W}(x, 0, t)}{\partial y} = \bar{0}, x \in \Gamma_3, 0 < t \leq T;$$

$$\frac{\partial \mathbf{W}(x, B, t)}{\partial y} = \bar{0}, x \in \Gamma_4, 0 < t \leq T; \quad (3)$$

где

$$\mathbf{W}^0(x, y) = (0, 0, 1; 0)^T,$$

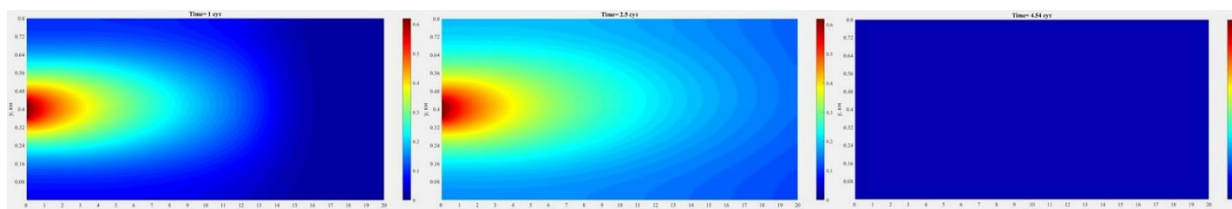
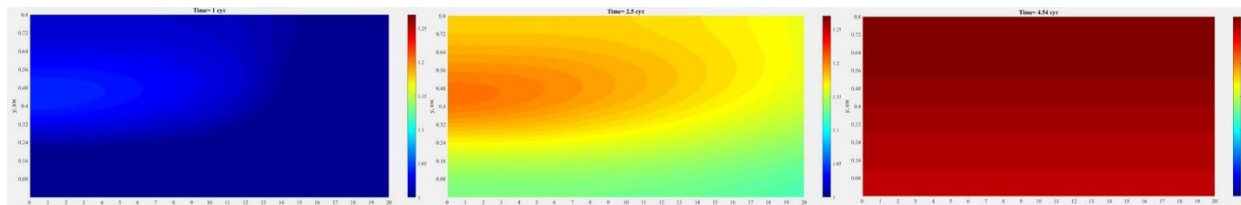
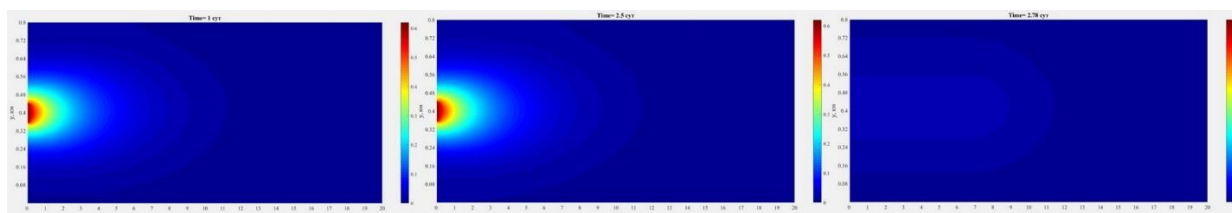
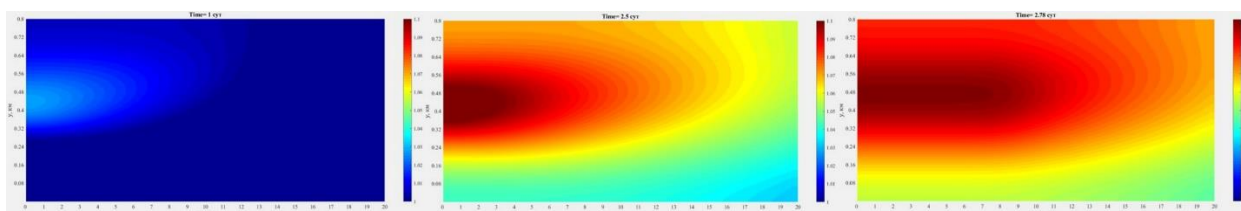
$$\mathbf{W}^{left} = \begin{cases} L(0, y, t) = 0,619, y \in \Gamma_1^{(2)}, 0,5 < t \leq 2,5; \\ \bar{0}. \end{cases}$$

k – константа скорости изъятия органического вещества (в качестве очистного сооружения используется высоконагружаемый биофильтр [3]). Смысл остальных параметров из (1)–(3) приводятся в [1].

Результаты

Результаты численных расчетов представлены на рис. 2–5 в виде графиков изменения концентрации субстрата и биомассы микроорганизмов. Рассмотрены случаи: без использования (скорость изъятия органических загрязнений $k = 0,0 \frac{1}{сут}$; $t = 1; 2,5; 4,54$ сут) и с использованием биофильтра ($k = 7,08 \frac{1}{сут}$; $t = 1; 2,5; 2,78$ сут). Загрязнение поступает с момента времени $t = 0,5$ сут и со скоростью 28,512 км/сут распространяется по данному участку реки, уменьшаясь с течением времени от 0,619 мг/л до 0,1 мг/л (рис.2; $t = 2,5$ сут, $k = 0,0$) по мере удаления от источника загрязнения. За промежуток времени 0–2,5 сут концентрация микроорганизмов возрастает от 1 мг/л до 1.2 мг/л (рис.3).

В случае использования высоконагружаемого биофильтра наблюдается аналогичная картина течения процесса самоочищения с соответствующими данными для $t = 2,5$ сут: L меняется от 0,619 мг/л до 0,05 мг/л (рис. 4), X возрастает от 1 мг/л до 1.1 мг/л (рис.5).

Рис. 2. Распределение концентрации субстрата L (мг/л) без использования биофильтраРис. 3. Распределение концентрации биомассы микроорганизмов X (мг/л) без использования биофильтраРис. 4. Распределение концентрации субстрата L (мг/л) с использованием высоконагружаемого биофильтраРис. 5. Распределение концентрации биомассы микроорганизмов X (мг/л) с использованием высоконагружаемого биофильтра

Заключение

Применение высоконагружаемого биофильтра ускоряет очистку поступающего субстрата в 1,63 раза. Это связано с тем, что концентрация загрязнения, поступающее в Томь, уменьшается за счет биофильтра, скорости реки, процессов окисления, поедания органики микроорганизмами и оседания субстрата на дно реки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-71-10020, <https://www.rscf.ru/project/23-71-10020/>.

Список литературы

1. Амзаракова А.В. Численное моделирование процесса самоочищения сточных вод с использованием капельного биофильтра // Сборник научных трудов XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук»: в 7 т. Т. 3: Математика. – Томск : Изд-во ТПУ, 2023. – С. 59–61.
2. Меркулова Н.Н., Михайлов М.Д. Методы приближенных вычислений: учебное пособие. – Томск : Издательский Дом ТГУ, 2014. – 764 с.
3. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Биологические фильтры. – М. : Стройиздат, 1982. – 121 с.

УДК 519.6

**Численное исследование плавления материала в цилиндрической области
с источником объемного тепловыделения**

К.И. Кириллова

Научный руководитель: к.ф.-м.н., Н.С. Бондарева

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина 36, 634050

E-mail: ksukirill3@gmail.com

**Numerical study of material melting in a cylindrical domain with
a volume heat generation source**

K.I. Kirillova

Scientific Supervisor: Ph.D. N.S. Bondareva

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: ksukirill3@gmail.com

Abstract. This work is dedicated to the numerical investigation of the melting of stabilized paraffin in the outer shell of a cylinder under axial heating from a constant heat source. The partial differential equations were formulated in non-dimensional variables "stream function – vorticity – temperature" and solved using the finite difference method. Distributions of temperature fields and stream function isolines were obtained for various power levels of the heat source (from 10 to 100 Watts) and Rayleigh numbers. The impact of the heat source on the temperature field inside the paraffin-filled region was analyzed.

Key words: PCM, cylindrical coordinates, melting, numerical modeling.

Введение

Технологический процесс позволяет модифицировать вычислительные устройства, делая их более мощными и компактными. Однако системы теплоотведения для подобных разработок должны обладать высокой теплопроводностью на месте контакта с нагреваемым элементом, а для улучшения отвода тепла необходимо обеспечить эффективное рассеивание и высокую теплоемкость. Так, терморегулирование становится важнейшим фактором при проектировании электронных устройств, таких как мобильные телефоны, цифровые фотоаппараты, ноутбуки и т.д. Материалы с фазовым переходом используются в различных областях применения в качестве теплоаккумулирующих решений, поскольку имеют высокую скрытую теплоту плавления, высокую удельную теплоемкость, предсказуемую стабильность температуры и небольшое изменение объема при фазовом переходе, что может быть полезно при их использовании в пассивных системах охлаждения электронных устройств [1, 2].

Проведено достаточно много исследований плавления материала с изменяемым фазовым состоянием в двумерной квадратной замкнутой области, одна из стенок которой нагревалась при постоянной температуре, а остальные – теплоизолированы [3–5]. Однако, цилиндрические оболочки на основе материалов с изменяемым фазовым состоянием широко применяются для повышения эффективности литий-ионных аккумуляторов, и эта тема еще недостаточно изучена. Настоящая работа посвящена исследованию процессов плавления лауриновой кислоты в оболочке вертикального цилиндра с осевым нагревом от источника энергии с постоянной плотностью объемного тепловыделения, во внутренней емкости которого развивается конвективный теплоперенос.

Физическая и математическая постановка

Рассматривается задача нестационарной сопряженной естественной конвекции в замкнутом цилиндре с осевым сечением размерами $R \times H$. Внутренняя область нагревается от источника объемного тепловыделения мощностью от 10 до 100 Ватт. Внешний слой цилиндра заполнен форм-стабилизированным материалом с изменяемым фазовым состоянием, это значит, что расплав является неподвижной средой. Пространство между слоем материала и нагревающим элементом заполнено жидкостью (рис.1). В начальный момент времени температура во всей области была ниже температуры плавления материала, а жидкость была неподвижна. На всех границах среднего слоя выполняются условия прилипания. Предполагается, что течение жидкости, вызванное массовыми силами, имеет ламинарную природу и соответствует моделированию по приближению Буссинеска.

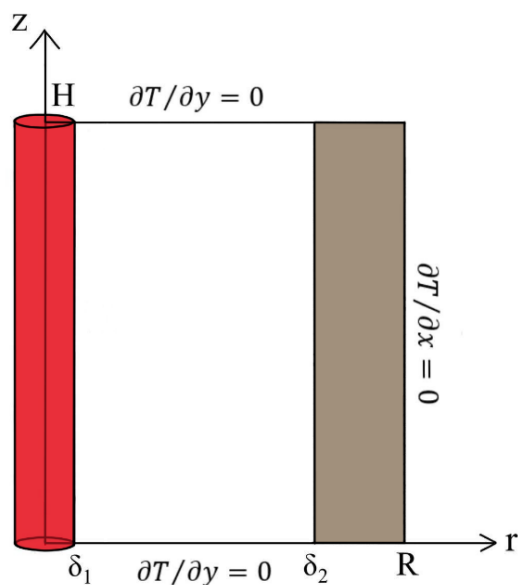


Рис. 1. Область решения задачи

Для данной постановки система уравнений Обербека-Буссинеска была представлена в безразмерных переменных «функция тока - завихренность – температура» в цилиндрических координатах. Уравнение теплопроводности в стенке было записано в энтальпийной форме, движение межфазной границы описывалось условием Стефана $\left[k \frac{\partial T}{\partial n} \right] = -L_F V_n$. Для сглаживания разрыва энтальпии в зависимости от температуры на границе между средами была использована функция, изменяющаяся от 0 до 1 при переходе от твердого материала к расплаву, что позволяет учесть переходную зону вблизи границы между фазами и, таким образом, перейти от уравнения энтальпии к уравнению температуры, без необходимости разделения областей жидкой и твердой фазы. Внутри источника рассматривается уравнение теплопроводности с учетом слагаемого, характеризующего плотность объемного тепловыделения.

Сформулированная краевая задача с соответствующими начальными и граничными условиями решалась методом конечных разностей. Разностное уравнение Пуассона для функции тока было решено методом последовательной нижней релаксации. Аппроксимация уравнений завихренности и энергии была проведена с использованием локально-одномерной схемы Самарского. Полученные разностные уравнения разрешались методом прогонки.

Результаты

В данном исследовании были проанализированы термодинамические и гидродинамические параметры плавления материала с течением времени. Установленная общая мощность источника варьировалась от 10 до 100 Ватт для различных чисел Рэлея.

Расчёты проводились для числа $Ste = 1.3$ и числа $Pr = 7$, что соответствует характеристикам воды. Логично, что с увеличением мощности тепловыделения увеличивается скорость прогрева источника и, соответственно, прогрева цилиндрической области, тем самым ускоряя процесс плавления материала. При различных числах Остроградского возникновение интенсификации конвекции происходит примерно при одном и том же объеме расплава материала. Уменьшая общую мощность источника, объем расплава материала, при котором усиливается конвекция в области, несколько увеличивается. Данный эффект следует из того, что при одном и том же объеме расплава температура источника увеличивается с ростом числа Остроградского. Кроме того, повышение числа Рэлея приводит к увеличению характерного размера области и интенсификации конвекции, вследствие чего уменьшается скорость расплава материала в стенке. Также была рассмотрена зависимость локального числа Нуссельта от времени с повышением общей мощности источника. С ростом числа Остроградского значительно увеличивается значение числа Нуссельта, а с течением времени наблюдается скачок в момент начала расплава материала и выход на стационар после.

Заключение

Было проведено численное исследование нестационарного процесса тепломассопереноса в цилиндрической области с материалом с изменяемым фазовым состоянием, содержащей источник энергии постоянной плотности объемного тепловыделения. Рассматривались широкие диапазоны изменения числа Остроградского, числа Рэлея. Были получены изолинии функции тока и поля температур в зависимости от времени для различных случаев рассматриваемого процесса. Показано, что увеличение общей мощности источника способствует интенсификации конвекции и повышению скорости плавления материала в области. Похожий эффект наблюдается и при увеличении числа Рэлея. Также была получена зависимость локального числа Нуссельта от времени при различных числах Остроградского.

Исследование выполнено в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 22-79-10341).

Список литературы

1. Dhaidan N.S., Khodadadi J.M. Melting and convection of phase change materials in different shape containers: a review // Renew Sustain Energy. – 2015. – Vol. 43. – P. 449–77.
2. Ma T. Yang H, Zhang Y, Lu L, Wang X. Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: a review and outlook // Renew Sustain Energy. – 2015. – Vol. 43. – P. 1273–84.
3. Gong Z.X., Mujumdar A.S. Flow and heat transfer in convection-dominated melting in a rectangular cavity heated from below // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1997. – Vol. 41. – P. 2573–2580.
4. Gong Z.X. Devahastin S., Mujumdar A.S. Enhanced heat transfer in free convection-dominated melting in a rectangular cavity with an isothermal vertical wall // I Applied Thermal Engineering. – 1999. – Vol. 19. – P. 1237–1251.
5. Shyy W. Chen M.-H. Steady-state natural convection with phase change // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1990. – Vol. 33. – P. 2545–2563.

УДК 532.5; 536.2

Численное исследование процесса плавления материала в стенках канала с оребрениемМ.С. Ерошкина

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Н.С. Бондарева

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: eroshkinamaria03@mail.ru**Numerical study of PCM melting in the finned channel walls**M.S. Eroshkina

Scientific Supervisor: Ph.D. N.S. Bondareva

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: eroshkinamaria03@mail.ru

Abstract. *The present study deals with a numerical analysis of the effect of the number of vertical metallic fins on heat transfer and the melting rate in the channel walls. The axisymmetric problem of fluid flow in a channel bounded by solid heat-conducting walls was considered. Initially, the temperature in the area was below the melting point. A liquid with a constant temperature above the melting point was supplied on the left. The external solid boundaries were thermally insulated. The two-dimensional mathematical model was formulated in the equations of conservation of mass, momentum and energy. The system of equations was written in dimensionless variables and approximated by a finite difference method. The Poisson equation for the stream function was solved by the Seidel method. A locally one-dimensional Samarsky scheme was used for solving the vorticity equation. As a result, the effect of involving different amounts of fins in the channel walls on the phase transition was studied. Local and integral thermal characteristics were obtained. In addition, the dependence of the melting rate on the variation of the Reynolds number was revealed.*

Key words: *heat transfer, phase transition, latent heat, flow in the channel.*

Введение

Поиск эффективной замены традиционным системам охлаждения и управления энергией в помещении является актуальной задачей на сегодняшний день. Материалы с изменяемым фазовым состоянием, применяемые в пассивных накопителях, имеют высокую плотность запасаемой энергии плавления, характерную температуру фазового перехода и ряд других преимуществ по сравнению с привычными нам материалами, используемыми в проектировании зданий и сооружений [1, 2]. Аккумулирование скрытого тепла позволяет значительно сократить затраты на энергопотребление и поддерживать комфортную температуру в помещении без дополнительного оборудования путем поглощения или выделения тепловой энергии материалом в зависимости от внешних условий [3–5]. Системы хранения энергии и теплоотведения на основе фазовых превращений имеют высокий показатель энергоэффективности, так как поглощение и выделение энергии происходит практически при постоянной температуре. Такое поведение позволяет удерживать систему в определенных тепловых условиях достаточно длительное время, поддерживая интенсивность теплоотдачи на высоком уровне.

Данная работа посвящена численному исследованию зависимости интенсивности плавления материала с изменяемым фазовым состоянием в стенках канала от количества металлических ребер и режима вынужденной конвекции.

Экспериментальная часть

Рассматривается плоская осесимметричная задача плавления лауриновой кислоты в стенках канала длиной L и шириной H . Твердые теплопроводные стенки имеют толщину δ_1 . Между каналом и материалом расположены медные пластины толщиной δ_2 . В начальный момент времени жидкость и стенки имеют одинаковую температуру ниже точки плавления T_m . Слева подается жидкость с температурой $T_H > T_m$. Внешние твердые границы считаются теплоизолированными. На медных пластинах расположены вертикальные металлические ребра высотой δ_1 и шириной δ_2 , уходящие в материал с изменяемым фазовым состоянием. Геометрическая постановка задачи представлена на рисунке 1.

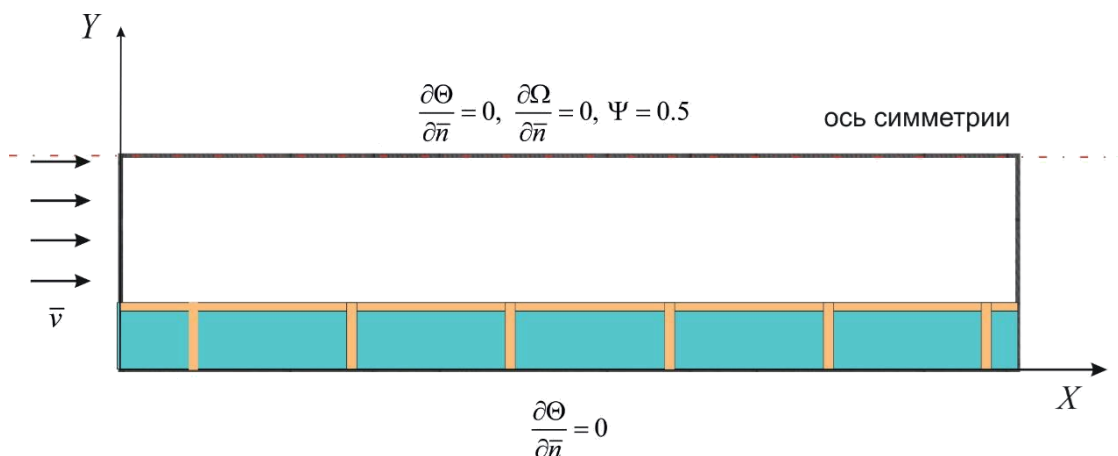


Рис. 1. Рассматриваемая область решения

Двумерная математическая постановка сопряженного тепломассопереноса и фазовых переходов в твердых стенках была сформулирована в виде безразмерных уравнений сохранения массы, количества движения, энергии. Поля функции тока, завихренности и температуры были рассмотрены в качестве исследуемых термогидродинамических характеристик. Уравнение энергии в стенках канала решалось методом сквозного счета. Переход энтальпии и теплофизических характеристик на границе из одного фазового состояния в другое осуществлялся со сглаживанием и был выражен дополнительными функциями температуры. Для аппроксимации и решения полученной системы уравнений была использована конечно-разностная схема. Уравнение Пуассона для функции тока решалось итерационным методом Зейделя. Для решения уравнения завихренности была применена локально-одномерная схема Самарского.

В качестве материала с изменяемым фазовым состоянием внутри стенок использовалась лауриновая кислота с температурой плавления $T_m = 319,5$ К и скрытой энергией фазового перехода $L_f = 1,87 \cdot 10^5$ Дж/кг. В качестве жидкости использовалась вода с теплоемкостью 4200 Дж/(кг·°С). Интенсификация теплопереноса в стенках канала осуществлялась путем добавления медной пластины и оребрения.

Результаты

В результате проведенных вычислений были получены распределения температуры в области с течением времени при включении в стенки канала разного количества ребер, а также построены графики зависимости объемной доли расплава материала от их количества. На рисунке 2 представлены поля температуры для числа Рейнольдса равного 250 в случаях одного и трех медных ребер. Видно, что процесс плавления вблизи ребер происходит быстрее. В углах области наблюдаются слои нерасплавленного материала одинаковой толщины. В результате анализа было установлено, что с увеличением добавляемых ребер

при фиксированном числе Рейнольдса скорость плавления лауриновой кислоты увеличивается на начальном этапе, однако время полного расплава материала во всех случаях практически одинаково. Например, при наличии 3 ребер в стенке половина материала расплавилась быстрее на 37 %, 28 % и 17 %, по сравнению со случаями без ребер, с одним ребром и двумя ребрами соответственно. Это связано с тем, что медь обладает высоким коэффициентом теплопроводности и ускоряет распространение тепла. Равное время расплава всего материала можно объяснить большим расстоянием между ребрами, поэтому для более эффективного плавления имеет смысл увеличить их количество. С ростом числа Рейнольдса ускоряется и процесс фазового превращения. Чем выше число Рейнольдса, тем интенсивнее теплообмен между жидкостью и материалом.

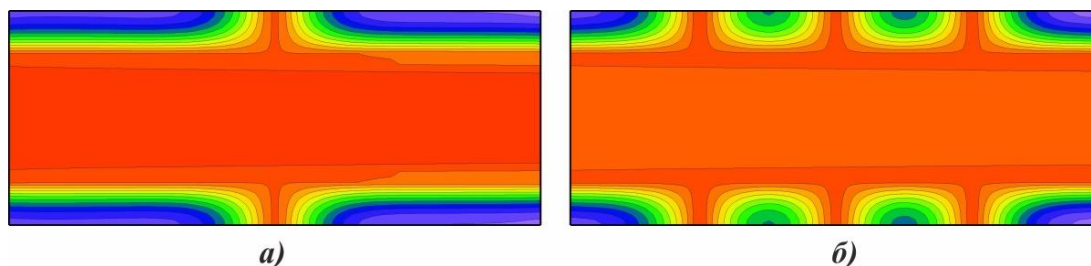


Рис. 2. Распределения температуры в момент времени $\tau = 400$ для $Re = 250$ и разного количества ребер

Заключение

Таким образом, в рамках данной работы была исследована зависимость времени плавления лауриновой кислоты в стенках канала от количества медных ребер, а также от числа Рейнольдса. Были получены локальные и интегральные тепловые характеристики процесса и сделаны следующие выводы: в начале процесса скорость плавления материала растет с увеличением числа ребер, так как у меди высокая теплопроводящая способность, однако ближе к завершению процесса полного расплава материала наблюдается практически одинаковое время; с ростом безразмерного числа Рейнольдса фазовый переход ускоряется.

Исследование выполнено в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 22-79-10341).

Список литературы

1. Chung O., Jeong S.-G., Kim S. Preparation of energy efficient paraffinic PCMs/expanded vermiculite and perlite composites for energy saving in buildings // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2015. – Vol. 137. – P. 107–112.
2. Jeong S.-G., Chung O., Yu S., Kim S., Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nanoplatelets // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2013. – Vol. 117. – P. 87–92.
3. Gracia De A., Cabeza L.F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 103. – P. 414–419.
4. Kalnaes S.E., Jelle B.P. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 94. – P. 150–176.
5. Khedher N.B. Numerical Study of the Thermal Behavior of a Composite Phase Change Material (PCM) Room // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2018. – Vol. 8. – P. 2663–2667.

УДК 004.85

**Диагностика лимфедемы методами оптической когерентной томографии
и машинного обучения**

Д.С. Амирханов, И.А. Тримасов

Научный руководитель: к.ф.-м.н. В.В. Николаев

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: denis.amirhanov@yandex.ru

Diagnosis of lymphedema using optical coherence tomography and machine learning

D.S. Amirkhanov, I.A. Trimasov

Scientific supervisor: Ph.D. V.V. Nikolaev

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: denis.amirhanov@yandex.ru

Abstract. *Optical coherence tomography (OCT) is a modern non-invasive method for studying biological tissues. This method allows one to obtain two-dimensional and three-dimensional images of the test sample with micrometer resolution. OCT in combination with machine learning methods is a promising method for diagnosing diseases. This study examines the use of OCT for the diagnosis of lymphedema. As a result, based on the OCT signal intensity distribution in the skin, a machine learning algorithm was developed to identify areas of normal and lymphedematous tissue. The accuracy of this algorithm exceeds 95 %, which allows it to be used for in vivo monitoring of lymphedema.*

Key words: *lymphedema diagnosis; optical coherence tomography; support vector machine.*

Введение

За последние три десятилетия метод оптической когерентной томографии (ОКТ) получил широкое распространение в медицине в виду его потенциала для неинвазивной диагностики заболеваний в офтальмологии (макулодистрофии, центральной серозной хориоретинопатии, диабетической ретинопатии, внутриглазных опухолей) [1], дерматологии (базальноклеточной и плоскоклеточной карциномы) [2, 3] и стоматологии (идентификации кариозного поражения) [4]. ОКТ основан на явлении интерференции и заключается в регистрации излучения, отраженного от образца. Классическая схема ОКТ включает интерферометр Майкельсона и суперлюминесцентный диод. Последний обладает сравнительно широким спектром излучения (до 100 мкм), что обеспечивает низкую длину когерентности (от нескольких микрометров), что, в свою очередь, дает возможность получать интерференционную картину в высоком разрешении. Достоинствами данного метода являются возможность получения изображений тканей в микрометровом разрешении на глубине до 3 мм, неинвазивность и скорость сканирования [5].

В данной работе проведено исследование применимости метода ОКТ для диагностики лимфедемы. Лимфедема – заболевание, вызванное плохим лимфотоком, приводящим к отекам и дальнейшей хронической трансформации ткани [6]. Данная патология прогрессирует и при отсутствии лечения может привести к полной инвалидности. На данный момент на практике почти нет методов, которые позволили бы количественно оценить состояние ткани на ранних стадиях заболевания. В работе показано, что ОКТ может быть использован для неинвазивного анализа ткани и количественной оценке ее состояния.

Цель данной работы заключается в применении ОКТ для оценки состояния лимфедематозной ткани с использованием методом машинного обучения.

Экспериментальная часть

Исследование проведено на крысах, всего 16 животных. Модель лимфедемы создавалась за счет хирургической резекции лимфатического узла с рентгенолучевой терапией, повторяемой в течение длительного периода времени. В исследовании использовалось ОКТ-устройство GANYMEDE-II с рабочей длиной волны 930 ± 50 нм и разрешением порядка 6 мкм. ОКТ измеряет профиль интенсивности обратно рассеянного света по глубине ткани. Далее в тексте под А-сканом называется профиль в одной точке, В-сканом – профиль по поверхности, а С-сканом – профиль в объёме.

Измерения проводились для здоровой и лимфедематозной ткани. Всего в ходе исследования было получено 45 С-сканов. Каждый С-скан разделялся на 20 В-сканов. Предварительная обработка В-сканов включала «удаление воздуха» так, чтобы первый элемент массива соответствовал положению рогового слоя. А-сканы получали как усредненные В-сканы после удаления некачественных или дефектных участков. В итоге было получено 450 А-сканов для здоровой ткани и 450 для лимфедематозной. Для полученных усредненных А-сканов мы можем оценить различия в затухании сигнала.

Разделение двух выборок решалась в рамках задачи бинарной классификации, в которой один класс соответствовал здоровой ткани, а другой – лимфедематозной. Для бинарной классификации использовался метод опорных векторов на основе нелинейного ядра с радиальной базисной функцией (RBF), параметр регуляризации $c = 1$, коэффициент ядра $\gamma = 88.73$.

Разделение выборки происходило следующим образом: в качестве обучающей выборки использовались 25 %, 50 % и 75 % А-сканов из каждого набора данных после фильтрации. Оставшиеся данные использовались в качестве тестовой выборки. Обучение для выборок каждого из объемов проводилось 1000 раз, в результате чего рассчитывалась средняя точность работы алгоритма, среднееквадратичное отклонение. Точность рассчитывалась как отношение верных прогнозов алгоритма к общему числу прогнозов.

Результаты

По описанной выше методике оценивалась зависимость интенсивности сигналов ОКТ от глубины (А-скана, полученного усреднением). Результаты приведены на рисунке 1.

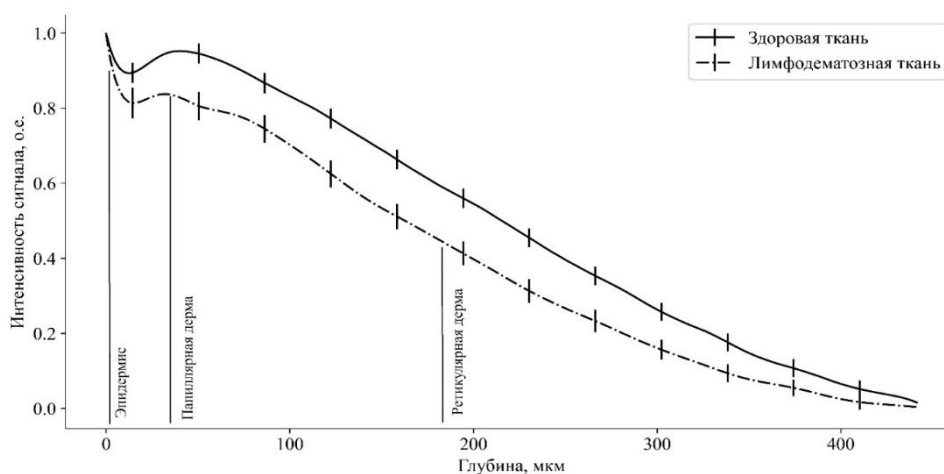


Рис. 1. А-сканы здоровых и лимфедематозных тканей после первого и второго рентгеновского облучения

На усредненном А-скане положение локального минимума интенсивности соответствует концу рогового слоя и началу эпидермиса, а положение второго максимума соответствует началу дермы; поэтому сигнал после второго пика принимался за сигнал от дермы. Можно заметить, что затухание сигнала в здоровой ткани происходит медленнее, чем в лимфедематозной.

Далее проводилась проверка применимости разработанной модели машинного обучения для диагностики лимфедемы. Результаты работы алгоритма представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты обучения алгоритма с использованием А-сканов лимфедематозной ткани

Объем обучающей выборки, %	25	50	75
Средняя точность алгоритма, %			
Чувствительность (без МГК), %	84,15±0,45	90,65±0,67	98,1±0,56

Как видно, результаты обучения алгоритма весьма перспективны для диагностики лимфедемы по данным ОКТ.

Заключение

Полученные результаты позволяют неинвазивно диагностировать лимфедему на ранних стадиях, что важно для ранней и эффективной терапии. Математические подходы к анализу ОКТ-изображений, основанные на количественных параметрах, позволяют проводить экспресс-диагностику лимфедемы, которую в дальнейшем можно внедрить в клиническую практику.

Список литературы

1. Adhi M, Duker JS. Optical coherence tomography--current and future applications // Curr Opin Ophthalmol. – 2013. – Vol. 24, № 3. – P. 214–219.
2. Imamura Y, Fujiwara T, Margolis R, Spaide RF. Enhanced depth imaging optical coherence tomography of the choroid in central serous chorioretinopathy // Retina. – 2009. – Vol. 29, № 10. – P. 1470–1472.
3. Sattler E, Käßle R, Welzel J. Optical coherence tomography in dermatology // J Biomed Opt. – 2013. – Vol.18, № 6. – P. 61224-2–61224-3.
4. Hsieh YS, Ho YC, Lee SY, Chuang CC, Tsai JC, Lin KF, Sun CW. Dental optical coherence tomography // Sensors (Basel). – 2013. – Vol. 13, № 7. – P. 8934–8939.
5. Ishikawa H., Stein D.M., Wollstein G., Beaton S., Fujimoto J.G., Schuman J.S. Macular Segmentation with Optical Coherence Tomography // Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. – 2005. – Vol. 46, № 6. – P. 2012–2017.
6. Warren A.G., Brorson H., Borud L.J., Slavin S.A. Lymphedema: A Comprehensive Review // Ann. Plast. Surg. – 2007. – Vol. 59, № 4. – P. 464–472.

УДК 51-72

Диффузионный перенос частиц газовой смеси через сверхтонкие мембраныР.Г. Кусаинов

Научный руководитель: А.С. Челнокова

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: rasulkusainov3@gmail.com**Diffusion transfer of gas mixture particles through ultrathin membranes**R.G. Kussainov

Scientific Supervisor: A.S. Chelnokova

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: rasulkusainov3@gmail.com

Abstract. *This study is devoted to the problem of interaction of the components of a gas mixture in a selected volume with a graphene-like membrane. Using the molecular dynamics modeling method, the nature of the interaction and dynamics of gas particles is determined. We will be interested in the nature of diffusion and adsorption of gas particles by ultrathin monoatomic graphene layers.*

Key words: *molecular dynamics simulation, gas diffusion, graphene.*

Введение

Наноструктуры на основе углерода, такие как графен [1–3] и углеродные нанотрубки и фуллерены, привлекли широкое внимание исследователей по всему миру благодаря своим уникальным свойствам. В наномасштабе одним из устоявшихся подходов к изучению подобных структур является молекулярно-динамическое моделирование. Оно особенно полезно для количественной оценки основных взаимодействий и динамических процессов, определяющих коэффициенты адсорбции или диффузии [4, 5]. Результаты исследований процесса адсорбции находят широкое применение в мембранных технологиях разделения жидкостей и газовых смесей на компоненты, например, при опреснении воды.

В настоящее время в качестве перспективного фильтрующего материала рассматриваются графеноподобные мембраны [6], и существует необходимость в разработке теоретических подходов для изучения диффузии, которые включают межчастичные взаимодействия для предоставления точной информации о массопереносе.

На начальном этапе наших исследований мы предлагаем простую и эффективную математическую модель взаимодействия газовой смеси с графеновой стенкой. В качестве примера мы рассмотрели моно компонентную смесь, состоящую из атомов гелия.

Материалы и методы исследования

Пусть в некотором представительном объеме V газовой среды находятся N частиц газа, одна грань объема выполнена из графена, имеющего $M - N$ атомов углерода. Тогда уравнения движения газовых частиц будут иметь вид:

$$m \frac{du_i}{dt} = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \frac{\partial U_1(\rho_{ik})}{\partial x_k} - \sum_{k=N+1}^M \frac{\partial U_2(\rho_{ik})}{\partial x_k}, \quad (1)$$

$$m \frac{dv_i}{dt} = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \frac{\partial U_1(\rho_{ik})}{\partial y_k} - \sum_{k=N+1}^M \frac{\partial U_2(\rho_{ik})}{\partial y_k}, \quad (2)$$

$$m \frac{dw_i}{dt} = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \frac{\partial U_1(\rho_{ik})}{\partial z_k} - \sum_{k=N+1}^M \frac{\partial U_2(\rho_{ik})}{\partial z_k}, \quad (i=1, \dots, N). \quad (3)$$

Здесь u_i, v_i, w_i – проекции скорости i -ой частицы газа; m – масса частицы газа; U_1 – потенциал парных взаимодействий для частиц газа; U_2 – потенциал взаимодействия частиц газа с атомами углерода в имеющихся структурах; x_k, y_k, z_k – декартовы координаты k -ой частицы; $\rho_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}$ – расстояние между двумя силовыми центрами.

В принципе каждый из упомянутых потенциалов может иметь свою функциональную зависимость от расстояния между силовыми центрами. Однако в представленных здесь расчетах используется форма потенциала Леннарда–Джонса для всех парных взаимодействий.

Поскольку все потенциалы зависят от расстояний между силовыми центрами (атомами и простыми молекулами газовой фазы), а интегрирование уравнений (1–3) дает лишь скорости этих частиц, то для замыкания уравнений движения газовых частиц необходимо выписать следующие кинематические соотношения:

$$\frac{dx_k}{dt} = u_k, \quad \frac{dy_k}{dt} = v_k, \quad \frac{dz_k}{dt} = w_k \quad (k=1, \dots, N). \quad (4)$$

Уравнения (1)–(4) дополнены следующими начальными условиями:

$$\begin{aligned} t=0, \quad x_k &= x_k^0, \quad y_k = y_k^0, \quad z_k = z_k^0; \\ u_k &= u_k^0, \quad v_k = v_k^0, \quad w_k = w_k^0, \quad (k=1, \dots, N). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь индексом ноль вверху обозначены начальные значения координат и скоростей атомов рассматриваемой системы перемещающихся частиц газа.

В рассматриваемом случае наша система должна удовлетворять закону сохранения полной механической энергии, который записан в виде:

$$\sum_{k=1}^N \frac{mv_k^2}{2} + \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=k+1}^N U_1(\rho_{ik}) + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{M-N} U_2(\rho_{ik}) = \text{const}. \quad (6)$$

Результаты

Выполнена численная реализация модели взаимодействия газовой смеси с графеновой пластиной. На рисунке 1 приведена траектория и одна из проекций вектора скорости для одного представительного атома гелия.

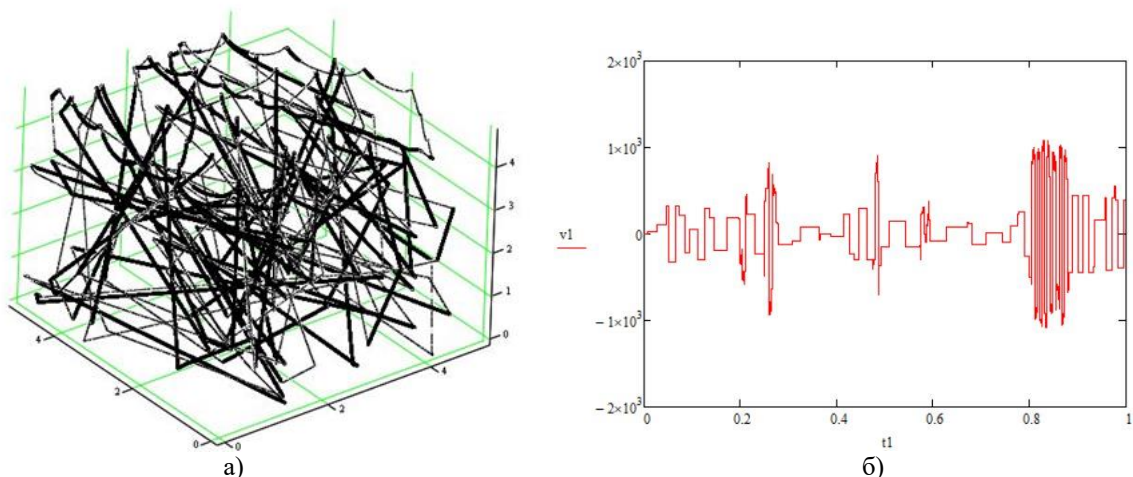


Рис. 1. а) Траектория пробной частицы гелия в выделенном кубе с ребром 5 нм;
б) Проекций вектора скорости пробной частицы гелия на ось O_y

Газовые частицы не выходят из рассматриваемого объема. Отражаются от всех граней и попадают внутрь рассматриваемой области. Зеркальные отражения частиц от условно свободных граней имитируют переходы из смежных объемов, заполненных газом. При этом вся смесь газа, имеющая изначально неоднородные распределения компонент, полностью перемешивается. Расчеты показывают, что распределение Максвелла по модулю вектора скорости для частиц газа достигается уже на первой наносекунде процесса.

В процессе расчетов проверяется баланс полной энергии системы (6). Поскольку для решения эволюционных уравнений использованы пошаговые методы, для которых погрешность вычислений растет с увеличением времени счета, то на последний момент времени мы имеем относительную погрешность вычислений порядка 10^{-11} безразмерных единиц (рисунок 2).

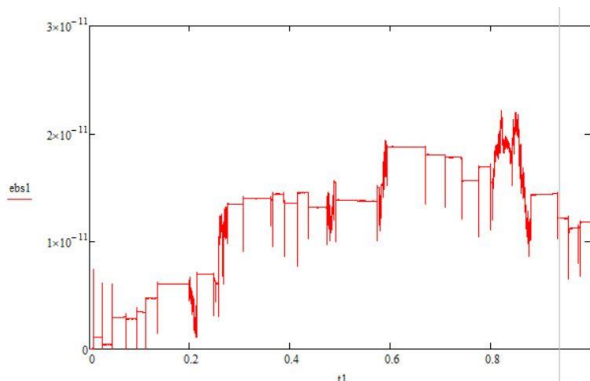


Рис. 2. Относительная погрешность полной механической системы для 1 частицы газа

Заключение

В результате проведенных исследований нами был определен характер взаимодействия газовых компонент на основе атомов гелия с графеновой пластинкой. Представленное математическое описание позволяет непосредственно по найденному расчетному закону движения частиц (координатам и скоростям) определить характер диффузии газа. Указанные расчеты будут использованы в дальнейших исследованиях для определения сорбционных свойств графеноподобных мембран.

Список литературы

1. Vekeman J., Faginas-Lago N., Lombardi A., Meras A.S.D., Cuesta I.G., Rosi M. Molecular dynamics of CH₄/N₂ mixtures on a flexible Graphene layer adsorption and selectivity case study // *Frontiers in Chemistry*. – 2019. – Vol. 7. – Article number: 386.
2. Wang W., Motuzas J., Zhao X.S., Diniz da Costa J.C. 2D/3D assemblies of amine-functionalized graphene silica (templated) aerogel for enhanced CO₂ sorption // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2019. – Vol. 11 (33) – P. 30391–30400.
3. Tomanek D. Guide through the nanocarbon jungle: Buckyballs, nanotubes, graphene and beyond. – Morgan & Claypool Publishers, 2014. – 163 p.
4. Lindsey R.K., Rafferty J.L., Eggimann B.L., Siepmann J.I., Schure M.R. Molecular simulation studies of reversed-phase liquid chromatography // *Journal of chromatography A*. – 2013. – Vol. 1287. – P. 60–82.
5. Rybka J., Holtzel A., Melnikov S.M., Seidel-Morgenstern A., Tallarek U. A new view on surface diffusion from molecular dynamics simulations of solute mobility at chromatographic interfaces // *Fluid Phase Equilibria*. – 2016. – Vol. 407. – P. 177–187.
6. Зотов Н.С. Новое применение графена: графеновый фильтр // *Молодой ученый*. – 2019. – № 1 (239). – С. 41–43.

УДК 532.5, 536.21

**Математическое моделирование активной системы охлаждения
с нагревательным элементом и рёберной системой теплоотвода**

Ш. Сюй, Н.С. Гибанов

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. Н.С. Гибанов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: Gibanov@mail.tsu.ru

**Mathematical modeling of an active cooling system
with a heating element and a finned heat sink system**

S. Xu, N. Gibanov

Scientific Supervisor: Ass. Prof., Dr. N.S. Gibanov

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 36, 634050

E-mail: Gibanov@mail.tsu.ru

Abstract. *This paper presents the results of numerical simulation of conjugate mixed convection in a rectangular channel with a source of constant volumetric heat release and a system of heat-conducting fins located above it. The processes of heat and mass transfer in the channel have been described using a system of partial differential equations using transformed variables in a dimensionless form. The problem has been solved by the finite difference method. The analysis of the influence of the intensity of the flow of the cooling medium into the channel, the material of the heat-removing fins and the material of the heat-conducting walls of the channel has been carried out.*

Key words: *numerical simulation, system of heat-conducting fins, sink system.*

Введение

В последние десятилетия наблюдается активное развитие сферы энергетики и радиоэлектронной техники – появляются новые приборы и управляющие блоки, меняется архитектура и растёт производительность тех или иных энергетических или электронных блоков. В связи с этим появляются новые задачи и потребность в их решении. Одной из наиболее актуальных задач является задача эффективного охлаждения нагревательных элементов [1–3], находящихся под постоянной тепловой нагрузкой. В представленной работе рассматривается система активного охлаждения тепловыделяющего элемента методом конечных разностей на равномерной разностной сетке. Проведена оценка влияния скорости течения несжимаемой ньютоновской жидкости, высоты h_f теплоотводящих рёбер и высоты h_w теплопроводных стенок канала на интенсивность охлаждения нагревательного элемента.

Материалы и методы исследования

На рисунке 1 схематически изображена область решения задачи. В плоском канале с длиной L и высотой H , на внутренней поверхности нижней стенки располагаются теплоотводящие рёбра из материала с высокой теплопроводностью. В начальный момент времени предполагается что среда (несжимаемая ньютоновская жидкость с неизменными теплофизическими свойствами) внутри канала неподвижна и ее температура равна T_0 . Под нижней теплопроводной стенкой канала, на расстоянии l_1 от входа, располагается тепловыделяющий источник длиной l_{hs} и высотой h_{hs} . Верхняя и нижняя теплопроводные стенки канала считаются теплоизолированными. На входе в канал поступает поток охлаждающей среды со скоростью V_0 (в горизонтальном направлении) и температурой T_0 .

Результаты и заключение

При решении представленной задачи была проведена верификация разработанного численного алгоритма на тестовых задачах – сравнение с результатами других авторов [6], а также проведён анализ влияния размерности вычислительной сетки на точность получаемых данных. Задача была решена методом конечных разностей на равномерной разностной сетке. Был проведён детальный анализ влияния скорости входящего в канал потока хладагента ($50 \leq Re \leq 10^3$), различных сред, охлаждающих нагреватель ($Pr = 6.62$, $Pr = 0.7$), количества и высоты теплоотводящих рёбер на эффективность охлаждения тепловыделяющего элемента, а также на особенности развития гидродинамики и процессов теплообмена в полости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-79-00291.

Список литературы

1. Steinberg D.S. Cooling Techniques for Electronic Equipment, 2nd Edition // John Wiley & Sons Inc. – 1992. – P. 512.
2. Kim S.G., Lee S.W. Air Cooling Technology for Electronic Equipment // CRC Press. – 1996. – P. 260.
3. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th Edition // John Wiley & Sons Inc. – 2007. – P. 1071.
4. Astanina M.S., Sheremet M.A., Umavathi J.C. Unsteady natural convection in a partially porous cavity having a heat-generating source using local thermal non-equilibrium model // International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. – 2019. – Vol. 11 (1). – P. 95–107.
5. Tang, G.H., Tao, W.Q., He, Y.L. Simulation of fluid flow and heat transfer in a plane channel using the lattice Boltzmann method // International Journal of Modern Physics B. – 2003. – Vol. 17. – P. 183–187.

Научное издание

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Том 3. Математика

Сборник научных трудов
XXI Международной конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых

Компьютерная верстка *С.А. Поробова*

Зарегистрировано в Издательстве ТПУ
Размещено на корпоративном портале ТПУ
в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ