

Правительство Калужской области
Российская академия наук
ФГУ ФНЦ «Научно-исследовательский институт системных
исследований РАН»
Обнинский институт атомной энергетики — филиал ФГАОУ ВО
НИЯУ МИФИ

Международная математическая конференция
«Современные математические модели в
энергетике», посвящённая памяти профессора,
д.ф.-м.н. В. А. Тупчиева

Сборник тезисов научной конференции

International Mathematical Conference “Modern
Mathematical Models in Power Engineering”
Dedicated to the Memory of Professor, Doctor of
Physical and Mathematical Sciences
V. A. Tupchiev

Conference Proceedings. Short Papers

УДК 51(063)+53(063)+622.3(063)+004(063)+658:622.3(063)

ББК 22+32.97+65.304

М 431

Печатается по решению
Оргкомитета конференции

Редакционная коллегия:

академик В. Б. Бетелин;

В. А. Галкин, д.ф.-м.н., профессор (отв. редактор);

Д. А. Моргун, к.ф.-м.н., доцент.

М 431 **Международная математическая конференция «Современные математические модели в энергетике», посвящённая памяти профессора, д.ф.-м.н. В. А. Тупчиева** (Обнинск, 25–26 октября 2024 г.): Сборник тезисов научной конференции / Под ред. акад. В. Б. Бетелина. — М.: НИЯУ МИФИ, 2024. — 92 с. — ISBN 978-5-7262-3115-0. — DOI: 10.51790/tupchievconf-2024

Конференция проведена при финансовой поддержке:
ООО «Креативный институт идей и новых профессий»,
генеральный директор Каратаева Галина Евгеньевна
ООО «МАТЭК», заместитель директора Гинкин Владимир Павлович
«Моделирующие системы», директор Левченко Валерий Алексеевич

ISBN 978-5-7262-3115-0

© Авторы, 2024

© Компьютерная вёрстка — Д. А. Моргун, 2024

© НИЯУ МИФИ, 2024



Профессор, доктор физ.-мат. наук Виль Асадулаевич Тупчиев (1934–2013)

V. A. Tupchiev (26.10.1934–16.9.2013),
Dr., Prof., belonged to Academician's A. N. Tikhonov scientific school

Программный комитет конференции:

Председатель — Шевченко Владимир Игоревич — ректор Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ», д.ф.-м.н., профессор;

Сопредседатель — Галкин Валерий Алексеевич — директор Сургутского филиала федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», д.ф.-м.н., профессор;

Члены программного комитета конференции:

Абакумов Евгений Михайлович — директор по информационной структуре ГК «Росатом», д.т.н.;

Бетелин Владимир Борисович — научный руководитель ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, академик РАН, д.ф.-м.н.;

Гимранов Ринат Дамирович — начальник управления ИТ ПАО «Сургутнефтегаз», к.э.н.;

Кудряшов Николай Алексеевич — заведующий кафедрой прикладной математики Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ», д.ф.-м.н., профессор;

Лаврентьев Михаил Михайлович — декан факультета информационных технологий «Новосибирского национального исследовательского государственного университета», д.ф.-м.н., профессор;

Нагорнов Олег Викторович — первый проректор Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ», д.ф.-м.н., профессор;

Петров Игорь Борисович — заведующий кафедрой «Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)», член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.;

Старков Сергей Олегович — профессор Обнинского института атомной энергетики — филиала Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ», начальник отделения интеллектуальных кибернетических систем, д.ф.-м.н.

Шагалиев Рашит Мирзагалиевич — первый заместитель директора ИТФМ РФЯЦ-ВНИИЭФ, начальник математического отделения, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.;

Шевченко Анатолий Иванович — Вице-адмирал.

Организационный комитет конференции:

Председатель Осипова Татьяна Андреевна — заместитель директора Обнинского института атомной энергетики — филиала Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ»;

Заместители председателя:

Старков Сергей Олегович — профессор Обнинского института атомной энергетики — филиала Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ», начальник отделения интеллектуальных кибернетических систем, д.ф.-м.н.;

Чуркин Евгений Геннадьевич — заместитель директора Обнинского института атомной энергетики - филиала Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ»;

Члены:

Гавриленко Тарас Владимирович — заместитель директора Сургутского филиала федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», к.т.н., доцент;

Ермаков Сергей Владимирович — доцент Обнинского института атомной энергетики — филиала Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ», к.ф.-м.н.;

Мирзеабасов Олег Ахмедбекович — доцент Обнинского института атомной энергетики — филиала Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ», к.т.н.;

Моргун Дмитрий Алексеевич — заведующий отделом аппаратно-программных комплексов Сургутского филиала федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», к.ф.-м.н., доцент;

Непомнящих Георгий Александрович — старший преподаватель отделения ЯФиТ (О) Обнинского института атомной энергетики — филиала Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ»;

Самохин Дмитрий Сергеевич — доцент Обнинского института атомной энергетики — филиала Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ», к.т.н., начальник отделения ЯФиТ (О);

Уварова Анастасия Алексеевна — старший преподаватель кафедры ОиСФ ИОПП (О) Обнинского института атомной энергетики — филиала Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ».

СОДЕРЖАНИЕ | CONTENTS

Профессор Виль Асадулаевич Тупчиев	11
--	----

Пленарные доклады

Галкин В. А.

К 90-летию профессора В. А. Тупчиева: энергетика и современные задачи математической физики	16
---	----

Galkin V. A.

To the 90th anniversary of Professor V. A. Tupchiev: Energetics and Modern Problems of Mathematical Physics	17
---	----

Кабанихин С. И.

Математическое моделирование взаимосвязанных эпидемиологических, экономических и социальных процессов в регионе	18
---	----

Нагорнов О. В., Леонов А. С., Тюфлин С. А.

Моделирование волн COVID-19 на основе решения обратных задач	19
--	----

Nagornov O. V., Leonov A. S., Tyufin S. A.

Modelling COVID-19 Waves Based on the Inverse Problem Solutions	20
---	----

Математическое моделирование сложных систем

Нестеров А. В.

Асимптотика решения одной задачи Коши для системы жестко связанных гиперболических уравнений	21
--	----

Хохлов Н. И.

Применение сеточно-характеристического метода для моделирования разномасштабных динамических процессов с использованием иерархических и наложенных сеток	22
--	----

Khokhlov N. I.

Application of the Grid-Characteristic Method to the Modelling of Multi-Scale Dynamic Processes Using Hierarchical and Overset Meshes	23
---	----

Чеповский А. А., Чеповский А. М.

Неявные сообщества в сетях и информационное воздействие	24
---	----

Гавриленко Т. В.

Интуитивные логические системы и большие языковые модели	25
--	----

Акобян Т. С.

Сравнение современных технологий по распознаванию образов	26
---	----

Akobyants T. S.

Comparison of Modern Image Recognition Technologies	27
---	----

Камынин В. Л.

Обратные задачи определения младшего коэффициента в многомерном параболическом уравнении	28
--	----

Штанов Ю. Н., Кощеев В. П.	
Компьютерное моделирование полной энергии двухатомной молекулы кремния в первом порядке теории возмущений	28
Секованов В. С., Шапошникова И. В.	
Гладкие множества Жюлиа одного семейства рациональных функций	29
Sekovanov V. S., Shaposhnikova I. V.	
Smooth Julia Sets of a Family of Rational Functions	31
Мышев А. В.	
Фрактальные методы обработки и анализа больших потоков экспериментальных данных	32
Мышев А. В.	
Метод построения решений «размытых» задач на виртуальных решетках	33
Замятин Н. В., Смирнов Г. В., Маковкин В. И.	
Модель лазерного уровнемера для резервуаров	34
Кожемяченко А. А., Фаворская А. В.	
Применение сеточно-характеристического метода для расчета нагрузки от проходящего железнодорожного состава	35
Kozhemyachenko A. A., Favorskaya A. V.	
Application of the Grid-Characteristic Method for Calculating the Load From the Passing Train	36
Моргун Д. А.	
Применение программного обеспечения Blender для моделирования оптических эффектов и иллюзий	37
Morgun D. A.	
Using Blender Software to Model Optical Effects and Illusions	38
Деев Г. Е., Ермаков С. В.	
Искусственный интеллект и перспективы его реализации на В-компьютерах	39
Deev G. E., Ermakov S. V.	
Artificial Intelligence and Perspectives for its Realization on B-computers	40
Кречетников В. В., Титов И. Е., Спиридонов С. И., Карпенко Е. И., Соломатин В. М.	
Оценка и прогнозирование радиационного воздействия на человека в районе расположения ОДЭК и представление результатов с применением цифрового двойника	42
Поспелов Д.	
Чистота данных в аналитике и машинном обучении: современные подходы и технологии очистки данных	42
Pospelov D.	
Data Cleanliness in Analytics and Machine Learning: Modern Approaches and Data Cleansing Technologies	43
Белоусов П. А., Диденко В. И., Марухина О. В., Аксенов С. В., Шлапак Н. В., Моисеева А. К., Молчанова М. В., Замков Д. В., Лихоманов А. А.	
Разработка математических моделей для определения характеристик лесов с использованием данных дистанционного зондирования земли	44
Belousov P. A., Didenko V. I., Marukhina O. V., Aksenov S. V., Shlapak N. V., Moiseeva A. K., Molchanova M. V., Zamkov D. V., Likhomanov A. A.	
Development of Mathematical Models for Determining Forest Characteristics Using Remote Earth Sensing Data	45

Дифференциальные уравнения (волновые процессы, нелинейная динамика, динамические системы)

Голубев В. И.

Прогнозирование скалярных параметров трещиноватых геологических включений с помощью сверточных нейронных сетей 47

Golubev V. I.

Scalar Parameters Prediction of Fractured Geological Inclusion with the Convolutional Neural Networks 48

Фаворская А. В., Голубев В. И.

Расчет сейсмостойкости многоэтажных зданий на сваях, эксплуатирующихся в условиях крайнего севера 49

Favorskaya A. V., Golubev V. I.

Calculation of Seismic Resistance of Multi-Storey Buildings on Piles Operating in the Conditions of the Far North 50

Галкин В. А., Дубовик А. О.

Точные решения уравнений Навье–Стокса в цилиндре 51

Galkin V. A., Dubovik A. O.

Exact solutions of the Navier–Stokes equations in the cylinder 52

Бухенский К. В., Дюбуа А. Б., Конюхов А. Н., Кучерявый С. И., Сафoshкин А. С.

Распространение поверхностного поляритона в структурах с графеновым слоем . . . 53

Bukhensky K. V., Dubois A. B., Konukhov A. N., Kucheryavy S. I., Safoshkin A. S.

Surface Polariton Propagation in Structures With a Graphene Layer 54

Рассадин А. А., Ряховский А. В.

Моделирование турбулентного течения на примере задачи об обтекании профиля крыла 55

Rassadin A. A., Ryakhovskiy A. V.

Turbulence Modeling Using the Example Problem of Flow Around an Airfoil 56

Губайдуллин А. А., Пяткова А. В.

Акустическое течение и теплоперенос в прямоугольном вибрирующем канале при наличии перепада температур горизонтальных стенок 57

Gubaidullin A. A., Pyatkova A. V.

Acoustic Streaming and Heat Transfer in a Rectangular Vibrating Channel With a Temperature Difference Between Horizontal Walls 58

Бычин И. В., Гореликов А. В.

Численное исследование эффекта усиления начального магнитного поля в модели геодинamo 59

Bychin I. V., Gorelikov A. V.

Numerical Study of the Effect of Amplification of the Initial Magnetic Field in the Geodynamo Model 60

Глазов С. Ю., Подгорная И. А.

Эффект Сасаки-Шибуйа в двумерной графеновой сверхрешетке 61

Glazov S. Yu., Podgornaya I. A.

The Sasaki-Shibuya Effect in a Two-Dimensional Graphene Superlattice 62

Ермаков С. В., Ляпаев А. Ю.

Классическая проблема Томсона и ее обобщение 63

Yermakov S. V., Lyapaev A. Y.

The Classical Thomson Problem and its Generalization 64

Никулин Е. И., Орлов А. О., Левашова Н. Т., Волков В. Т.	
Решения вида фронта в математическом моделировании явлений переноса	65
Левашова Н. Т., Левашов П. А., Сидорова А. Э., Ерофеев Д. Н.	
Проблема деструкции породы в хранилищах углекислого газа: микроскопическая модель	66
Даник Ю. Э., Дмитриев М. Г., Макаров Д. А.	
Приближенное решение возмущенных задач оптимального управления	66
Danik Yu. E., Dmitriev M. G., Makarov D. A.	
Approximate Solution of Perturbed Optimal Control Problems	68

Математическое моделирование в задачах атомной энергетики

Гуляев Д. Ю.	
Модель учета термической неоднородности подстилающей поверхности в расчётах атмосферного переноса и рассеяния радиоактивных выбросов	69
Gulyaev D. Y.	
The Model of Accounting for Thermal Surface Heterogeneity for Calculations of Atmo- spheric Transport and Dispersion of Radioactive Emissions	70
Никитченко И. А., Воробьев Ю. Б., Аванов А. В.	
Нейросетевая модель для прогнозирования роста дефекта в корпусе реактора	71
Nikitchenko I. A., Vorobyov Yu. B., Avanol A. V.	
Neural Network Model for Predicting Defect Growth in a Reactor Vessel	72
Дудкин К. О., Марков П. В.	
Сравнение результатов моделирования раздаточно-коллекторной системы с дискрет- ным подводом теплоносителя в расчетных комплексах Ansys FLUENT и OpenFOAM	73
Dudkin K. O., Markov P. V.	
Comparing Ansys FLUENT and OpenFOAM Simulations of Discrete Distributing Header Systems	74
Увакин М. А., Николаев А. Л., Антипов М. В., Дарьин Н. А., Рябов Г. А.	
Применение методов искусственного интеллекта в задачах предикативного анализа динамики реакторов ВВЭР	75
Uvakin M. A., Nikolaev A. L., Antipov M. V., Daryin N. A., Ryabov G. A.	
Artificial Intelligence Methods Application in the Tasks of Vver Reactor Dynamics Pred- icative Analysis	76
Любимов А. Ю., Тихоновский В. Л.	
Применение цифровых моделей объектов использования атомной энергии, роботизи- рованных комплексов сбора инженерных и радиационных данных и цифровой плат- формы Digital Decommissioning для снижения затрат на вывод из эксплуатации . . .	77
Lyubimov A. Y., Tihonovsky V. L.	
The use of Digital Models of Nuclear Energy Facilities, Robotic Systems for Collecting Engineering and Radiation Data and a Digital Decommissioning Platform to Reduce Decommissioning Costs	78
Авдеенков А. В., Ачаковский О. И.	
Моделирование жидкометаллической коррозии на дефектах поверхности в среде свинцового теплоносителя	79

Avdeenkov A. V., Achakovskiy O. I.	
Modeling of Liquid Metal Corrosion on Surface Defects in a Lead Coolant Environment .	80
Горяев Р. А., Пожидаев А. Р.	
Влияние выбора корреляций для коэффициентов теплоотдачи на результаты расчётов с применением электротепловой аналогии	81
Goryaev R. A., Pozhidaev A. R.	
Influence of the Choice of Correlations for Heat Transfer Coefficients on the Results of Calculations Using Electrothermal Analogy	82
Фонтали́на Е., Заволженский В., Пивень Н., Щепалов С., Сергиенко Н.	
Персонализированный подход к формированию индивидуальных стратегий обучения рабочего персонала тепловых электростанций	83
Годес А. И., Шаблов В. Л.	
Расчетные исследования в обоснование характеристик термоядерных установок на основе малорадиоактивного D- ³ He топлива	84
Godes A. I., Shablov V. L.	
Computational Studies in the Foundation of the Characteristics of Thermonuclear Installations Based on Low-Radioactive D- ³ He Fuel	85
Данилюк Ю. С., Зюзикова А. А., Терехова А. М.	
Решение частного случая уравнения кинетики и его анализ	86
Терехова А. М., Трухачев А. А.	
Аналитическое решение уравнения диффузии для кольцевого реактора	87
Зыонг Куанг Хыонг, Авдеенков А. В.	
Верификация CFD-модели рекомбинатора водорода RBK500 на стенде БМ-П	87

ПРОФЕССОР ВИЛЬ АСАДУЛАЕВИЧ ТУПЧИЕВ

Виль Асадулаевич Тупчиев родился 26 октября 1934 г. в гор. Махачкале в интеллигентной семье. Окончив школу, поступил на физический факультет МГУ и выбрал себе научное направление, связанное с кафедрой математики, возглавляемой тогда ещё членом-корреспондентом АН СССР Андреем Николаевичем Тихоновым. А. Н. Тихонов привлёк юного Вилия Асадулаевича к своим научным интересам по методам малого параметра для сингулярно возмущённых уравнений, находившихся в области его исследований. Непосредственное руководство исследовательской работой В. А. Тупчиева на кафедре осуществляла А. Б. Васильева, ученица А. Н. Тихонова. После защиты дипломной работы она же стала его руководителем в аспирантуре.

Обучаясь в аспирантуре физфака МГУ, Виль Асадулаевич подружился с Б. Л. Рождественским и его учеником Н. Н. Кузнецовым. Эта творческая дружба сохранилась на всю жизнь. Область научных интересов: теория квазилинейных гиперболических уравнений и приближённые методы их решения, теория квазилинейных систем, связанных с газовой динамикой. В. А. Тупчиевым и Н. Н. Кузнецовым доказана теорема существования для квазилинейных гиперболических систем без условия выпуклости системы. Их обоюдный интерес к системе газовой динамики в немалой степени определялся огромным влиянием на них А. Н. Тихонова и его ученика Б. Л. Рождественского. К началу 60-х годов восходит научная дружба «физфаковца» Вилия Асадулаевича с «мехматянином» Станиславом Николаевичем Кружковым, учеником академика Ольги Арсеньевны Олейник, которая, в свою очередь, являлась ученицей академика И. Г. Петровского. Эта дружба заложила основу научного семинара по квазилинейным законам сохранения, которым они руководили около 20 лет совместно с Б. Л. Рождественским на ВМК МГУ вплоть до трагической кончины С. Н. Кружкова 12 июня 1998 г.

В 1964 году Виль Асадулаевич приехал в Обнинск на работу в филиал МИФИ по приглашению первого директора и организатора филиала В. Н. Глазанова. В. А. Тупчиев стал читать курс математической физики и дифференциальных уравнений для будущих физиков-теоретиков и экспериментаторов, переноса физфаковские идеи преподавания математики на обнинскую благодатную почву.

После кончины директора В. Н. Глазанова Виль Асадулаевич перешёл 66-м году на научную работу в Институт экспериментальной метеорологии, расположенный в Обнинске. Там, в отделе активных воздействий на атмосферу и физики облаков, он занялся по предложению А. Н. Тихонова, избранного тогда академиком, подготовкой докторской диссертации, которая сочетала методы малого параметра и построение классов корректности автомодельных решений для систем типа газовой динамики в случае знаменитой задачи Римана о «распаде начального разрыва». Здесь получилось мощное объединение теории сингулярно возмущённых систем для обыкновенных дифференциальных уравнений и газовой динамики. Сама по себе эта задача некорректная. Но к этому времени Вилем Асадулаевичем был разработан конструктивный способ отбора во множестве разрывных решений так называемых устойчивых решений, связанный с подсчётом размерностей устойчивых и неустойчивых многообразий на разрыве.

Работа спорилась, к тому же Виль Асадулаевич познакомился в 6-м отделе ИЭМ, который возглавлял его друг д.ф.-м.н. Александр Сергеевич Степанов, с новым для себя классом задач, связанных с явлением коагуляции облачных капель, — кинетическим уравнением М. Смолуховского (являющимся разновидностью кинетического уравнения Л. Больцмана для неупругих столкновений частиц). В этом отделе тогда царила творческая атмосфера, занимались приближёнными решениями уравнения Смолуховского, его строгим обоснованием — задача, напрямую связанная с 6-й проблемой Гильберта! Возвратившись в Обнинский филиал МИФИ на кафедру высшей математики, Виль Асадулаевич

привлёк в 1972 г. к задачам обоснования приближённых методов для уравнения коагуляции Смолуховского своего первого ученика — Валерия Галкина, который в 1978 г. защитил на физфаке МГУ кандидатскую диссертацию «Математическая теория уравнения коагуляции».



Проф. А. Б. Васильева в гостях на кафедре прикладной математики ИАТЭ, Обнинск, 2004 г.

Важнейшей чертой учебной и научной деятельности Вилия Асадулаевича всегда была поддержка работы исследовательских семинаров на кафедре для преподавателей и обязательно — для студентов. Через эти семинары в течение сорока лет прошли сотни талантливых молодых людей, уносивших в себе искру научного пламени, зажжённого А.Н. Тихоновым.

В 1978 г. после защиты докторской диссертации на ВМК МГУ Виль Асадулаевич возглавил кафедру прикладной математики Обнинского филиала МИФИ. В течение двадцати лет руководства кафедрой профессор В.А. Тупчиев сформировал её научный и образовательный облик, органично связанный с нуждами атомной отрасли — главной в Обнинске, обеспечил высочайшие стандарты математической культуры преподавателей и студентов.

В июле 1999 года В.А. Тупчиев передал кафедру прикладной математики своему заместителю по кафедре и первому ученику — профессору В. А. Галкину.

До конца своих дней Виль Асадулаевич всегда оставался любимейшим преподавателем для выпускников ИАТЭ, развивая новые научные направления и сохранял высочайший уровень научных исследований, связанных с газовой динамикой, физической кинетикой, задачами атомно-энергетического комплекса.



Кафедра прикладной математики ИАТЭ. В центре — зав. кафедрой профессор В.А. Тупчиев. Обнинск, 1990 г.



Кафедра ПМ ИАТЭ в начале 2000-х



Профессор В.А. Тупчиев и академик А.А. Самарский. Обнинск, 2000 г.

Пленарные доклады

25 октября 2024 года в Обнинском институте атомной энергетики — филиале Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ» начала свою работу международная математическая конференция «Современные математические модели в энергетике», посвящённая памяти д.ф.-м.н., профессора, В. А. Тупчиева».

Конференцию открыл ректор Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ», д.ф.-м.н., профессор Шевченко Владимир Игоревич.

С приветственным словом к участникам конференции обратилась Заместитель губернатора Калужской области Леонова Татьяна Николаевна.

С 40-минутными докладами на пленарном заседании выступили:

- Галкин Валерий Алексеевич, директор Сургутского филиала ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН — «К 90-летию профессора В. А. Тупчиева: энергетика и современные задачи математической физики»;
- Бетелин Владимир Борисович, научный руководитель ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, академик РАН — «Будущее страны завтра — это её модель экономики и отражение сегодня»;
- Шагалиев Рашит Мирзагалиевич, первый заместитель директора ИТФМ РФЯЦ-ВНИИЭФ, начальник математического отделения, член-корреспондент РАН и Деулин Андрей Александрович, начальник НИО ИТФМ РФЯЦ-ВНИИЭФ — «Актуальные задачи развития технологии высокопроизводительных вычислений, включая суперкомпьютерного моделирования, в интересах создания высокотехнологичных изделий»;
- Петров Игорь Борисович, заведующий кафедрой «МФТИ», член-корреспондент РАН — «Расчёты динамического деформирования и разрушения сложных конструкций»;
- Гимранов Ринат Дамирович, начальник управления ИТ ПАО «Сургутнефтегаз» — «Актуальные вопросы импортозамещения ИТ и суверенного развития в промышленности — от общего к частному»;
- Кабанихин Сергей Игоревич, Член-корреспондент РАН — «Математическое моделирование взаимосвязанных эпидемиологических, экономических и социальных процессов в регионе»;
- Нагорнов Олег Викторович, первый проректор НИЯУ МИФИ — «Моделирование волн COVID-19 на основе решения обратных задач»;
- Лаврентьев Михаил Михайлович, декан факультета информационных технологий «Новосибирского национального исследовательского государственного университета» — «Моделирование цунами на персональном компьютере».

К 90-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА В. А. ТУПЧИЕВА: ЭНЕРГЕТИКА И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Галкин В. А.^{1,2,a}

¹ Сургутский филиал Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут,
Российская Федерация

² БУ ВО «Сургутский государственный университет», г. Сургут,
Российская Федерация

^a val-gal@yandex.ru

Ключевые слова: профессор В. А. Тупчиев, математическое моделирование, системы законов сохранения, энергетика.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Профессор, д.ф.-м.н. В. А. Тупчиев — создатель научной школы в ИАТЭ НИЯУ МИФИ, которая внесла значительный вклад в развитие современной математической физики в области корректности задач для систем законов сохранения, газовой динамики, физической кинетики (уравнения Л.Больцмана и коагуляции М. Смолуховского), в разработке и обосновании приближённых методов в задачах атомной энергетики. Научные достижения, полученные в школе В. А. Тупчиева, имеют мировую известность.

Развитие научной школы В. А. Тупчиева неразрывно связано с именем выдающегося математика академика А. Н. Тихонова. В. А. Тупчиев возглавил кафедру прикладной математики Обнинского филиала МИФИ в 1978 г. и в течение двадцати лет руководства кафедрой он сформировал её научный и образовательный облик, органично связанный с нуждами атомной отрасли — главной в Обнинске, обеспечил высочайшие стандарты математической культуры преподавателей и студентов.

Под руководством В. А. Тупчиева в области атомной энергетики были выполнены работы по оптимальному профилированию загрузки ядерных реакторов, построение обоснованных вычислительных методов для теплоэлектрических преобразователей [1]. Развита теория корректности для задач газовой динамики, разрешимости в среднем систем законов сохранения [2], что в дальнейшем привело его ученика к разработке теории функциональных решений систем законов сохранения [3]. Выполнены глубокие исследования по корректности задач физической кинетики [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Тупчиев В. А., Галкин В.А., Ермаков В.И. *Асимптотико-итерационный метод решения системы теплоэлектрических уравнений*. Тезисы Всесоюзной конференции по методам малого параметра, Алма-Ата, 1979.
2. Галкин В. А., Тупчиев В. А. *О разрешимости в среднем систем квазилинейных законов сохранения* // ДАН СССР, 1988, Т. 300, № 6, С. 1300—1304.
3. Галкин В. А. *Анализ математических моделей: Законы сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского*. М. БИНОМ, 2009, 408 С.

TO THE 90TH ANNIVERSARY OF PROFESSOR V. A. TUPCHIEV: ENERGETICS AND MODERN PROBLEMS OF MATHEMATICAL PHYSICS

Galkin V. A.^{1,a}

¹ *Surgut branch of the Federal Scientific Center “Scientific Research Institute of Systems Research of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation*

² *Surgut State University, Surgut, Russian Federation*

^a *val-gal@yandex.ru*

Keywords: Professor V. A. Tupchiev, mathematical modeling, systems of conservation laws, energetics.

The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal State Institution of the Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences on the topic FNEF-2024-0001 “Creation and implementation of trusted artificial intelligence systems based on new mathematical and algorithmic methods, models of fast computing implemented on domestic computing systems” (1023032100070-3-1.2.1).

Professor, Dr. Math V. A. Tupchiev is the founder of the scientific school at the IATE (branch of the National Research University – MEPhI), which has made a significant contribution to the development of modern mathematical physics in the field of correctness of problems for systems of conservation laws, gas dynamics, physical kinetics (L. Boltzmann Equations of gas dynamics and M. Smolukhovsky for coagulation theory), in the development and substantiation of approximate methods in nuclear power engineering problems.

The scientific achievements obtained at the school of V. A. Tupchiev are world famous. The development of the scientific school of V. A. Tupchiev is inextricably linked with the name of the outstanding mathematician academician A. N. Tikhonov. V. A. Tupchiev headed the Department of Applied Mathematics of the Obninsk branch of MEPhI in 1978, and during twenty years he was Head of the Department, he formed its scientific and educational image, organically linked to the needs of the nuclear industry – the main one in Obninsk, provided the highest standards the mathematical culture of professors and students.

Under the leadership of V. A. Tupchiev, work was carried out in the field of nuclear energetics on optimal profiling of the loading of nuclear reactors, the construction of justified computational methods for thermoelectric converters [1]. The theory of correctness for problems of gas dynamics, solvability in average to the systems of conservation laws was developed [2], which later led his the former student to develop a theory of functional solutions to systems of conservation laws [3]. In-depth research has been carried out on the correctness of physical kinetics problems [3].

REFERENCES

1. Tupchiev V. A., Galkin V. A., Ermakov V. I. An asymptotic-iterative method for solving a system of thermoelectric equations. Abstracts of the All-Union Conference on Small Parameter Methods, Alma-Ata, 1979
2. Galkin V. A., Tupchiev V. A. On the average solvability of systems of quasi-linear conservation laws // DAN USSR, 1988, vol. 300, No. 6, pp. 1300-1304.
3. Galkin V. A. Analysis of mathematical models: Conservation laws, Boltzmann equations and Smolukhovsky. M.: BINOM, 2009, 408 P.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ, ЭКОНОМИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕГИОНЕ

Кабанихин С. И.¹

¹ *Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

Ключевые слова: математическое моделирование, эпидемиология.

Вспышки новых эпидемий (COVID-19, туберкулез, ВИЧ и др.) требуют учета социально-экономических взаимодействий для своевременного реагирования, контроля и управления эпидемиологическим процессом. Взаимосвязанные эпидемиологические и социально-экономические процессы описываются системами интегро-дифференциальных уравнений, агентно-ориентированными моделями с применением алгоритмов машинного обучения и оптимального управления [1]. Для уточнения параметров совмещенных моделей (контагиозности вируса, вероятность развития тяжелых форм заболевания, длительность латентного периода и т.д.) решаются обратные задачи, дополнительной информацией для которых служат регулярные сводки Минздрава и Росстата, социальные сети, экономические и экологические показатели регионов [2–3].

В докладе будет представлено описание IT-платформы моделирования взаимосвязанных эпидемиологических и социально-экономических процессов, в которой:

- собираются и обрабатываются в автоматическом режиме данные эпидемиологических и социально-экономических процессов,
- для выбранного региона загружается математическая модель прогнозирования и управления указанными процессами.

На выходе пользователь получает картину распространения инфекционного заболевания в регионе на указанном промежутке времени, а также сценарии развития эпидемии в зависимости от социально-экономических процессов, чувствительные эпидемиологические параметры и их доверительные интервалы [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Криворотько О.И., Кабанихин С.И. О математическом моделировании COVID-19. Сибирские электронные математические известия. 2023. Т. 20, № 2. С. 1211–1268. DOI: 10.33048/semi.2023.20.075
2. Krivorotko O.I., Zyatkov N.Y. Data-driven regularization of inverse problem for SEIR-HCD model of COVID-19 propagation in Novosibirsk region. Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, 2022, V. 10, iss. 1, pp. 51–68. DOI: 10.32523/2306-6172-2022-10-1-51-68
3. Криворотько О.И., Кабанихин С.И., Бектемесов М.А., Сосновская М.И., Неверов А.В. Моделирование сценариев распространения COVID-19 в Республике Казахстан на основе регуляризации агентной модели. Дискретный анализ и исследование операций, 2023, Т. 30, №1, 40–66. DOI: 10.33048/daio.2023.30.746
4. Криворотько О.И., Кабанихин С.И., Петракова В.С. Идентифицируемость математических моделей эпидемиологии: туберкулез, ВИЧ, COVID-19. Математическая биология и биоинформатика. 2023. Т. 18, № 1. С. 177–214. DOI: 10.17537/2022.18.177

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН COVID-19 НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

Нагорнов О. В., Леонов А. С., Тюфлин С. А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Ключевые слова: математическое моделирование, эпидемиология, обратные задачи.

Пандемия COVID-19 стимулировала исследования в биофизике и математическом моделировании распространения инфекций. Основные усилия были связаны с определением факторов, которые помогают прогнозировать развитие пандемии и устанавливать социальные ограничения. Эти исследования осуществлялись в разных странах, включая Россию [1–4]. Значительная часть исследований основывалась на хорошо известных моделях SIR и SEIR и их модификаций.

Усложнение математических моделей распространения эпидемии и сложность и неоднозначность процедуры нахождения коэффициентов уравнений, описывающих распространение эпидемий приводят к решению так называемых обратных задач. Решения обратных задач определения параметров математических моделей распространения инфекции во время эпидемии по данным медицинской статистики, и полученные результаты используются для прогнозирования динамики эпидемии.

Мы используем приближение SIR моделей. Для адекватного воспроизведения данных решается обратная коэффициентная задача для модели в классе кусочно-постоянных функций с некоторыми дополнительными ограничениями. В частности, вводятся неизвестные внешние источники, которые меняются во времени. Это могут быть агрегированные латентные носители инфекций, которые активируются на разных временных интервалах из-за погодных условий, а также носителей, прибывающих из других стран. Математически эти источники моделируются включением дополнительного члена, представляющего неизвестную функцию времени в одном из уравнений модели типа SIR. Для нахождения этой функции и коэффициентов, задача минимизации невязки между данными и их аналогами, вычисленными из модели, решается при ограничениях на кусочно-постоянные коэффициенты и на источник. Решения хорошо воспроизводят волны инфекций для ряда стран. Использовались входные данные ресурсного центра по коронавирусу Johns Hopkins.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыкованов, Г. Н. Агентный подход к моделированию эпидемии COVID-19 в России [Текст] / Г. Н. Рыкованов, С. Н. Лебедев О. В. Зацепин и др. // Вестник РАН. 2022. Т. 92, № 8. С. 747–755. doi: 10.31857/S0869587322080138.
2. Kabanikhin, S. I. Inverse problems of immunology and epidemiology [Text] / S. I. Kabanikhin, O. I. Krivorotko, D. V. Ermolenko et al. // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2017. Vol. 5, № 2. P. 14–35.
3. Leonov, A. S. Inverse problem for coefficients of equations describing propagation of COVID-19 epidemic [Text] / A. S. Leonov, O. V. Nagornov, S. A. Tyufin // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2036. P. 012028. doi: 10.1088/1742-6596/2036/1/012028.
4. Leonov, A. S. Modeling of Mechanisms of Wave Formation for COVID-19 Epidemic [Text] / A. S. Leonov, O. V. Nagornov, S. A. Tyufin // Mathematics. 2023. Vol. 11, № 1. P. 167. doi: 10.3390/math11010167.

MODELLING COVID-19 WAVES BASED ON THE INVERSE PROBLEM SOLUTIONS

Nagornov O. V., Leonov A. S., Tyufin S. A.
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Keywords: mathematical modeling, epidemiology, inverse problems.

The COVID-19 pandemic has stimulated research in biophysics and mathematical modelling of the spread of infections. The main efforts were related to identifying factors that help predict the development of the pandemic and set social restrictions. These studies were carried out in different countries, including Russia [1–4]. A significant part of the research was based on well-known SIR and SEIR models and their modifications.

The increasing complexity of mathematical models of epidemic spread and the complexity and ambiguity of the procedure for finding the coefficients of equations describing the spread of epidemics lead to the solution of so-called inverse problems. Solutions to inverse problems of determining the parameters of mathematical models of the spread of infection during an epidemic according to medical statistics, and the results obtained are used to predict the dynamics of the epidemic.

We use an approximation of SIR models. To adequately reproduce the data, an inverse coefficient problem is solved for the model in the class of piecewise constant functions with some additional restrictions. In particular, unknown external sources are introduced, which change over time. These may be aggregated latent carriers of infections that are activated at different time intervals due to weather conditions, as well as carriers arriving from other countries. Mathematically, these sources are modelled by including an additional term representing an unknown function of time in one of the equations of the SIR type model. To find this function and coefficients, the problem of minimizing the discrepancy between the data and their analogues calculated from the model is solved under restrictions on piecewise constant coefficients and on the source. The solutions reproduce the waves of infections well for a number of countries. Input data from the Johns Hopkins Coronavirus Resource Center were used.

REFERENCES

1. Rykovanov, G. N. Agent approach to modelling of the COVID-19 in Russia [Text] / G. N. Rykovanov, S. N. Lebedev, O. V. Zatsepin et al. // Vestnik RAS. 2022. Vol. 92, № 8. P. 747–755. doi: 10.31857/S0869587322080138.
2. Kabanikhin, S. I. Inverse problems of immunology and epidemiology [Text] / S. I. Kabanikhin, O. I. Krivorotko, D. V. Ermolenko et al. // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2017. Vol. 5, № 2. P. 14–35.
3. Leonov, A. S. Inverse problem for coefficients of equations describing propagation of COVID-19 epidemic [Text] / A. S. Leonov, O. V. Nagornov, S. A. Tyufin // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2036. P. 012028. doi: 10.1088/1742-6596/2036/1/012028.
4. Leonov, A. S. Modeling of Mechanisms of Wave Formation for COVID-19 Epidemic [Text] / A. S. Leonov, O. V. Nagornov, S. A. Tyufin // Mathematics. 2023. Vol. 11, № 1. P. 167. doi: 10.3390/math11010167.

Математическое моделирование сложных систем

Руководитель секции:

Олег Викторович Нагорнов

Доктор физико-математических наук,
профессор, первый проректор Националь-
ного Исследовательского Ядерного Универ-
ситета «МИФИ»

Section moderator:

Prof. Oleg Viktorovich Nagornov

Doctor of Physical and Mathematical Sci-
ences, Professor, First Vice-Rector of the Na-
tional Research Nuclear University MEPhI

АСИМПТОТИКА РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЖЕСТКО СВЯЗАННЫХ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Нестеров А. В.^{1,a}

¹ *Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, г. Москва,
Российская Федерация*

^a *andrenesterov@yandex.ru*

Ключевые слова: асимптотические разложения, малый параметр, задача Коши, систе-
мы гиперболических уравнений, уравнение Кортевега-де-Вриса.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ № FSS-2023-0004.

Строятся первые члены формального асимптотического разложения (АР) решения за-
дачи Коши для сингулярно возмущенной системы гиперболических уравнений [1] в кри-
тическом случае [2]

$$\begin{aligned}\varepsilon^6(u_{tt} - k_1 u_{xx}) &= -au + bv + \varepsilon^2 f(u, v), \\ \varepsilon^6(v_{0,tt} - k_2 v_{xx}) &= au - bv - \varepsilon^2 f(u, v), |x| < \infty, t > 0, \\ u(x, 0) &= u^0(x/\varepsilon), u_t(x, 0) = 0, v(x, 0) = a/bu^0(x/\varepsilon), v_t(x, 0) = 0, |u^0(z)| < Ce^{-\kappa z^2}, \kappa > 0.\end{aligned}\tag{1}$$

Построенное АР решения задачи имеет вид

$$\begin{pmatrix} u(x, t, \varepsilon) \\ v(x, t, \varepsilon) \end{pmatrix} = \sum_{i=0}^3 \varepsilon^i \begin{pmatrix} S_i^I u(\zeta_1, \tau) \\ S_i^I v(\zeta_1, \tau) \end{pmatrix} + \sum_{i=0}^3 \varepsilon^i \begin{pmatrix} S_i^{II} u(\zeta_2, \tau) \\ S_i^{II} v(\zeta_2, \tau) \end{pmatrix} + R_3.\tag{2}$$

Здесь $\zeta_{1,2} = \frac{x \pm \kappa t}{\varepsilon}$, κ выражается через данные задачи (1). Главные слагаемые в АР
(2) $S_0^J u(\zeta_J, \tau), S_0^J v(\zeta_J, \tau), J = I, II$, имеют вид $S_0^J v(\zeta_J, \tau) = a/b S_0^J u(\zeta_J, \tau)$, где $S_0^J u(\zeta_J, \tau), J = I, II$ есть решения обобщенного уравнения Кортевега-де-Вриса [3]

$$-S_0^J u_t + K S_0^J u_{\zeta\zeta\zeta} - h(S_0^J u)_\zeta = 0, J = I, II.$$

Здесь $K, h(z)$ определяются через данные задачи.

Для остаточного члена R_3 получена формальная оценка по невязке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева А. Б., Бутузов В. Ф. *Сингулярно возмущенные уравнения в критических случаях*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. С. 106.
2. Nesterov A. Asymptotics of the solution of the Cauchy problem for a singularly perturbed system of hyperbolic equations. arXiv preprint arXiv:2211.17242, 2022; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.17242>
3. Наумкин П.И., Шишмарев И.А. Асимптотика решения уравнения Уизема при больших временах // *Математическое моделирование*. 1990. Т. 2. № 3. С. 72

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЕРАРХИЧЕСКИХ И НАЛОЖЕННЫХ СЕТОК

Хохлов Н. И.^{1,2,a}

¹ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация

² Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

^a khokhlov.ni@mipt.ru

Ключевые слова: сеточно-характеристический метод, наложенные сетки, иерархические сетки.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения» (1023032900401-5-1.2.1).

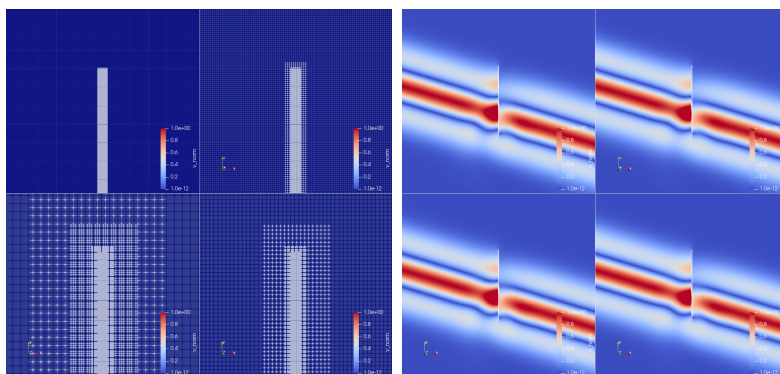


Рис. 1. Пример распространения фронта плоской волны через флюидонасыщенную трещину. Слева показаны несколько вариантов уровней иерархии сеток, справа — соответствующие волновые картины.

Задачи, связанные с исследованием распространения динамических возмущений, возникают в широком круге областей математической физики. Одной из проблем в такого рода задачах является учет разномасштабных эффектов. В случае распространения волн

в гетерогенной разномасштабной среде, размеры области интегрирования и размеры исследуемых эффектов могут отличаться на порядки. В случае покрытия равномерной расчетной сеткой всей области интегрирования ее размеры могут достигать таких размеров, что моделирование, даже с привлечением современных суперкомпьютеров, будет нецелесообразно из-за временных затрат, либо вовсе невозможно. В данной работе предложен новый подход, основанный на наложенных [1] и иерархических сетках для решения такого рода задач. На примере численного моделирования распространения волнового возмущения от тонкой флюидонасыщенной трещины (рис. 1) показана работа и преимущество предложенного алгоритма. Приводится серия тестовых расчетов, демонстрирующих существенное сокращение времени расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khokhlov N. и др. *Grid-characteristic method using Chimera meshes for simulation of elastic waves scattering on geological fractured zones*. J. Comput. Phys. 2021. Т. 446. С. 110637.

APPLICATION OF THE GRID-CHARACTERISTIC METHOD TO THE MODELLING OF MULTI-SCALE DYNAMIC PROCESSES USING HIERARCHICAL AND OVERSET MESHES

Khokhlov N. I.^{1,2,a}

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation* ² *Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation*

^a *khokhlov.ni@mipt.ru*

Keywords: grid-characteristic method, hierarchical meshes, overset meshes.

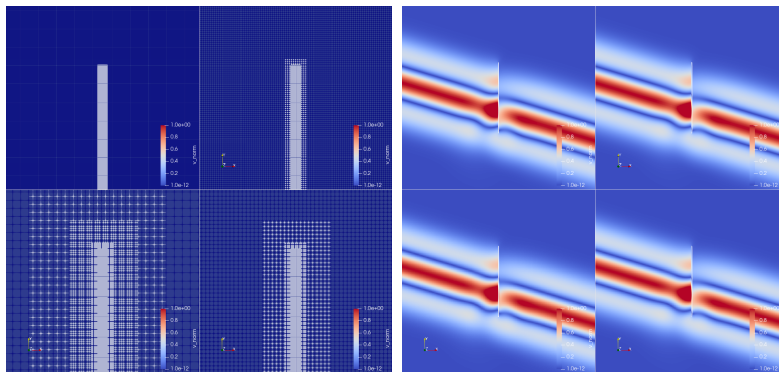


Figure 1. *An example of the propagation of a plane wave front through a fluid-saturated fracture. Several variants of the grid hierarchy levels are shown on the left, and the corresponding wave patterns are shown on the right.*

Problems related to the study of the propagation of dynamical perturbations arise in many areas of mathematical physics. One of the problems in such problems is the consideration of multiscale effects. In the case of wave propagation in a heterogeneous multiscale medium, the size of the integration domain and the size of the effects under study may differ by orders. In the case of a uniform computational mesh covering the entire integration region, its size can reach such dimensions that modelling, even with the use of modern supercomputers, becomes impractical or even impossible due to time cost. In this paper we propose a novel approach based on overset [1] and hierarchical meshes to solve such problems. Using the example of

numerical modelling of wave perturbation propagation from a thin fluid-saturated crack (Fig. 1), the operation and advantages of the proposed algorithm are demonstrated. A series of test computations is given, demonstrating a significant reduction in computational time.

REFERENCES

1. Khokhlov N. etc. *Grid-characteristic method using Chimera meshes for simulation of elastic waves scattering on geological fractured zones*. J. Comput. Phys. 2021. V. 446. P. 110637.

НЕЯВНЫЕ СООБЩЕСТВА В СЕТЯХ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Чеповский А. А.^{1,а}, Чеповский А. М.^{2,б}

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Российская Федерация*

² *Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация*

^а *aachepovsky@hse.ru*, ^б *achepovskiy@hse.ru*

Ключевые слова: неявные сообщества, взаимная информация, ранговый анализ, психолингвистические характеристики.

В рамках проблемы оценки информационного воздействия на пользователей социальных сетей и мессенджеров решается задача оценки качества выделения неявных сообществ на графе взаимодействия акторов, которая ставится в работах [1, 2, 3].

Исследуется на примерах способ сравнения результатов выделения сообществ, основанный на методах из теории информации и заключающийся в подсчете нормализованной взаимной информации (NMI) и асимметрично-нормализованной преобразованной взаимной информации (ANRMI). Показано, что для графов с большим числом сообществ такие методики дают неоднозначные результаты.

Два метода оценок качества выделения неявных сообществ графов социальных сетей и мессенджеров построены на анализе текстовых массивов, составленных из сообщений всех членов этих сообществ [3, 4, 5].

Для одного из методов сравнение текстовых массивов неявных сообществ проводится попарным сравнением частотных словарей различных лингвистических характеристик (лексических единиц отдельных частей речи, словосочетаний, псевдооснов слов), составленных для каждого из анализируемых наборов текстов [3, 4]. Определяются и сравниваются коэффициенты попарной ранговой корреляции для словарей разных текстовых массивов. На основе исследования реальных данных показана возможность оценки корректности выделения неявных сообществ на графе, импортированном из социальных сетей и мессенджеров.

Во втором методе анализ текстовых массивов неявных сообществ проводится путем подсчета психолингвистических характеристик [3, 5]. Исследуется 24 различных фактора, из которых выбираются порядка 5 маркеров, которые различают неявные сообщества по психологической направленности текстов. На примерах реальных данных показана применимость вычисления психолингвистических характеристик для анализа сообществ, выделенных на графе взаимодействующих объектов социальных сетей и мессенджеров. Это позволяет выделять группы, ведущие активное информационное воздействие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fortunato, S., Newman, M. E. J. 20 years of network community detection // Nat. Phys. 2022. 18. P. 848–850.
2. Чеповский А. А. О неявных сообществах на графе взаимодействующих объектов // Успехи кибернетики. 2023. Т.4. № 1. С. 56–64. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-08.
3. Чеповский А.А. Анализ графов взаимодействующих объектов. М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2022. 270 с.
4. Аванесян Н.Л., Зенькова В.В., Чеповский А.А., Чеповский А.М. Анализ текстов сообществ социальных сетей // Успехи кибернетики. 2023. Т.4. № 2. С. 33–39. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-2-05.
5. Чеповский А. А. Об особенностях построения и анализа графов взаимодействующих объектов в сети Telegram-каналов // Вопросы кибербезопасности. 2023. № 1 (53). С. 75–81.

ИНТУИТИВНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И БОЛЬШИЕ ЯЗЫКОВЫЕ МОДЕЛИ

Гавриленко Т. В.^{1,2,a}

¹ Сургутский филиал Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация

² БУ ВО «Сургутский государственный университет» г. Сургут, Российская Федерация

^a taras.gavrilenko@gmail.com

Ключевые слова: интуитивные логические системы, искусственные нейронные сети, искусственный интеллект, алгоритм, теории, большие языковые модели.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 "Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах"(1023032100070-3-1.2.1).

Рассмотрены задачи построения интуитивных языковых образов, связанных с идеями построения искусственных нейронных сетей (ИНС), широко и без надлежащего строгого математического обоснования применяемых в технологиях искусственного интеллекта (ИИ) [1]. Принципиальным моментом указанных технологий является понятийный аналитический аппарат, создаваемый интеллектом Человека-пользователя в рамках его информационной среды, в которой ИНС и ИИ выступают как вспомогательные быстродействующие средства, способствующие решению задач, сформулированных в рамках общечеловеческой интуитивной языковой среды. Представлено понятие теории и семантической значимости, определяемой Человеком. Показаны возможные ограничения в технологиях ИИ, основанные на особенностях человеческого мышления и языковых систем.

Представлены рассуждения и доказательства, что если ИНС строится на базе знаний (текстов, утверждений и т.д.) одного конкретного человека и/или некоторого сообщества (одной теории), тогда в ИНС могут быть исключены неопределённость и противоречивость. Если же ИНС строится на основе множества теорий, как это сейчас и происходит при создании больших языковых моделей, тогда такая система с высокой вероятностью будет содержать противоречия, которые в итоге и порождают условную «ложь» и так называемые «галлюцинации» искусственного интеллекта. В настоящий момент увеличение

масштаба ИНС приводит к увеличению недостоверных ответов, по последним оценкам до 60 % [2]. Создатели больших языковых моделей непрерывно борются с различными негативными эффектами и пытаются повысить точность ответов. Например, в самые современные большие языковые модели внедряются системы рассуждений, которые должны отсекают на каждом этапе возможные противоречия и ошибки, но это не гарантирует отсутствия так называемой «лжи» и «галлюцинаций» ИНС, просто рассуждения становятся более компактными, а «ложь» и «галлюцинации» менее заметны и в ряде случаев более правдоподобными. Эти эффекты являются неотделимым свойством таких систем и в текущей парадигме создания подобных систем непреодолимы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриленко Т.В., Галкин В.А. Интуитивные логические системы и их приложения в технологиях искусственного интеллекта // Успехи кибернетики. 2024. Т. 5, № 1. С. 8-16. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-01.
2. Zhou, L., Schellaert, W., Martínez-Plumed, F. et al. Larger and more instructable language models become less reliable. Nature (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07930-y>.

СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПО РАСПОЗНАВАНИЮ ОБРАЗОВ

Акобян Т. С.^{1,а}

¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^а askobyantigran2018@yandex.ru

Ключевые слова: нейронные сети, распознавание образов, сравнение технологий, искусственные нейронные сети, каскады Хаара.

Работа выполнена в рамках подготовки к кандидатской диссертации под руководством профессора, д.ф.-м.н. В. А. Галкина.

В представленной работе выполнен обзор методов и технологий, применяемых при построении искусственных нейронных сетей (ИНС).

1. Каскады Хаара — это метод машинного зрения для быстрого обнаружения объектов на изображениях, основанный на последовательном применении простых классификаторов, где каждый этап отбрасывает нерелевантные области и передает потенциальные объекты на следующий уровень анализа.
2. Dlib — это многоцелевой программный пакет с открытым исходным кодом, предназначенный для машинного обучения и компьютерного зрения.
3. DBFace — это одностадийная нейросетевая модель для быстрого и точного обнаружения лиц и ключевых точек на изображениях.
4. FaceNet — это нейросетевая модель, преобразующая изображения лиц в эмбединги, позволяющие эффективно выполнять задачи распознавания, верификации и кластеризации лиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Частикова В.А., Титова А.А., Войлова Д.О. Аналитический обзор методов идентификации личности на основе биометрических характеристик // Вестник адыгейского государственного университета. Серия: естественно-математические и технические науки. 2022. № 296. С. 92–112.

2. Лицевая биометрия в системах контроля и управления доступом и не только // СТА URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/tekhnologii/124283/> (дата обращения: 10.02.2024).
3. Амеличев Г.Э., Панина В.С., Белов Ю.С. Распознавание лиц с использованием каскадов Хаара // E-Scio. 2020. № 47. С. 221–228.
4. Андриянов Н.А., Андриянов Д.А. Разработка программы распознавания лиц // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1–2. С. 118–119.
5. Бычков И.В., Ружников Г.М., Федоров Р.К., Попова А.К., Авраменко Ю.В. О классификации космических снимков Sentinel-2 нейронной сетью ResNet-50 // Компьютерная оптика. 2023. № 3. С. 474–481.
6. Introduction to FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering <https://medium.com/analytics-vidhya/introduction-to-facenet-a-unified-embedding-for-face-recognition-and-clustering-dbdac8e6f02>.

COMPARISON OF MODERN IMAGE RECOGNITION TECHNOLOGIES

Akobyany T. S.^{1,a}

¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ackobyany.tigran2018@yandex.ru

Keywords: neural networks, pattern recognition, technology comparison, artificial neural networks, Haar cascades.

The work was carried out in preparation for a PhD thesis under the supervision of Professor, Ph.D. V. A. Galkin.

In the present paper, an overview of the methods and technologies used in the construction of artificial neural networks (ANN) is carried out.

1. Haar cascades is a machine vision method for quickly detecting objects in images based on the sequential application of simple classifiers, where each stage discards irrelevant areas and transfers potential objects to the next level of analysis.
2. Dlib is a multi-purpose open source software package designed for machine learning and computer vision.
3. DBFace is a single-stage neural network model for fast and accurate detection of faces and key points in images.
4. FaceNet is a neural network model that converts facial images into embeddings, allowing you to effectively perform the tasks of face recognition, verification and clustering.

REFERENCES

1. Chastikova V.A., Titova A.A., Voylova D.O. Analytical review of methods of identification of personality based on biometric characteristics // Bulletin of the Adygea State University. Series: natural, mathematical and technical sciences. 2022. No.296. pp. 92–112.
2. Facial biometrics in access control and management systems and not only // HUNDRED URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/tekhnologii/124283/> (date of reference: 02/10/2024).
3. Amelichev G.E., Panina V.S., Belov Yu.S. Face recognition using Haar cascades // E-Scio. 2020. No.47. pp. 221–228.
4. Andriyanov N.A., Andriyanov D.A. Development of a facial recognition program // Microwave technology and telecommunication technologies. 2020. No.1–2. pp. 118–119.

5. Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K., Avramenko Yu.V. On the classification of Sentinel-2 satellite images by the ResNet-50 neural network // Computer optics. 2023. No.3. pp. 474–481.
6. Introduction to FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering <https://medium.com/analytics-vidhya/introduction-to-facenet-a-unified-embedding-for-face-recognition-and-clustering-dbdac8e6f02>.

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЛАДШЕГО КОЭФФИЦИЕНТА В МНОГОМЕРНОМ ПАРАБОЛИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ

Камынин В. Л.^{1,a}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва, Российская Федерация*

^a *vlkamyinin2008@yandex.ru*

Ключевые слова: обратные задачи, обобщённые решения.

В данном докладе изучаются обратные задачи определения коэффициента поглощения $\gamma(x)$ в параболическом уравнении

$$\rho(t,x)u_t - \Delta u + \langle \vec{b}(x), u_x \rangle + c(t,x)u + \gamma(x)u = f(t,x), \quad (t,x) \in Q \equiv 0,T \times \Omega, \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$u(t,x)|_{\Gamma} = \Psi(t,x)|_{\Gamma}. \quad (2)$$

Здесь $Q = [0,T] \times \Omega$, Ω — ограниченная область в $\mathbb{R}^n$ с гладкой границей $\partial\Omega$, $\Gamma = \{0\} \times \bar{\Omega} \cup [0,T] \times \partial\Omega$ — параболическая граница цилиндра Q .

В качестве дополнительного условия используется либо условие финального наблюдения

$$u(T,x) = \varphi(x), \quad x \in \bar{\Omega}, \quad (3)$$

либо условие интегрального наблюдения

$$\int_0^T u(t,x)\chi(t) dt = \varphi(x), \quad x \in \Omega. \quad (4)$$

В условиях (3) и (4) $\chi(t)$ $\varphi(x)$ известные функции.

В случае задачи с интегральным наблюдением (4) допускается вырождение старшего коэффициента $\rho(t,x)$ вида $0 \leq \rho(t,x) \leq \rho_1$, $1/\rho(t,x) \in L_q(Q)$, $q > 1$.

Установлены достаточные условия, при которых обобщенные решения обратных задач (1), (2), (3) и (1), (2), (4) существуют и единственны.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНОЙ ЭНЕРГИИ ДВУХАТОМНОЙ МОЛЕКУЛЫ КРЕМНИЯ В ПЕРВОМ ПОРЯДКЕ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ

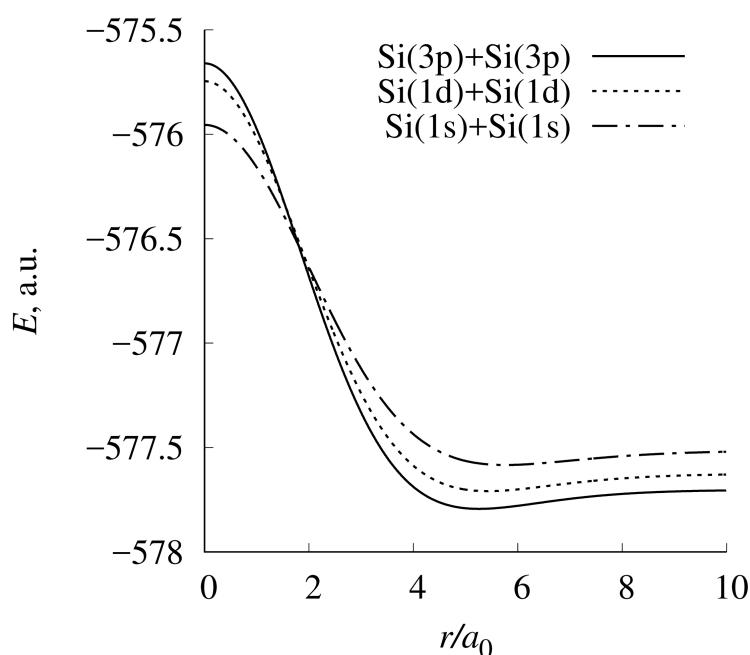
Штанов Ю. Н.^{1,a}, Кощев В. П.^{2,b}

¹ *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», филиал «Сургутский институт нефти и газа», г. Сургут, Российская Федерация*

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», филиал «Стрела», г. Жуковский, Российская Федерация
^a yuran1987@mail.ru, ^b koshcheev1@yandex.ru

Ключевые слова: двухатомная молекула, теория возмущений, полная энергия.

Полная энергия двухатомной молекулы (димера) вычислялась в первом порядке теории возмущений [1]: $E = E^0 + E^1 + \dots$, где $E^0 = E_1^0 + E_2^0$ — сумма полных энергий изолированных атомов в основном или возбужденном состоянии [2], а $E^1 = U(r)$ — потенциальная энергия взаимодействия между атомами. В докладе рассматривается программный комплекс TotalEnergy [3], с помощью которого построены кривые полной энергии молекулы кремния на рисунке.



ЛИТЕРАТУРА

1. Koshcheev V. P., Shtanov Y. N. Computer Simulation of the Total Energy and Shielding Function of a Carbon Molecule Using the First-Order Perturbation Theory // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2024. V. 88. №. 4. P. 441–446. <https://doi.org/10.1134/S1062873823706049>.
2. Clementi E., Roetti C. // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1974. V. 14. № 3. P.177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0092-640X\(74\)80016-1](https://doi.org/10.1016/S0092-640X(74)80016-1).
3. Библиотека программ «JINRLIB». URL: <http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinrlib/tropics/index.html> [Электронный ресурс].

ГЛАДКИЕ МНОЖЕСТВА ЖЮЛИА ОДНОГО СЕМЕЙСТВА РАЦИОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

Секованов В. С.^{1,a}, Секованов В. С.^{2,b}

¹ «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация

² «Сургутский государственный университет» БУ ВО Ханты-Мансийского автономного округа — Югры, г. Сургут, Российская Федерация

^a sekovanovvs@yandex.ru, ^b i-v-sh@mail.ru

Ключевые слова: голоморфная динамика, множества Жюлиа, фрактальные множества, гладкие множества.

В настоящее время интенсивно развивается новая ветвь нелинейной динамики — голоморфная динамика. Данной теме посвящены исследования, среди которых укажем работы [1–4], связанные с дискретными динамическими системами. Важнейшими составляющими голоморфной динамики являются множества Жюлиа, являющиеся, как правило, фрактальными множествами (Рис. 1, 2).

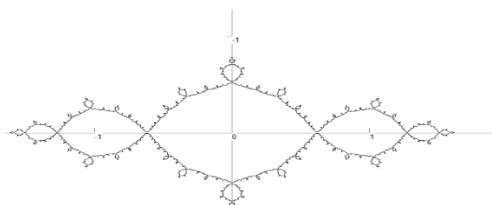


Рис. 1. Множество Жюлиа функции $f(z) = z^2 - 1$

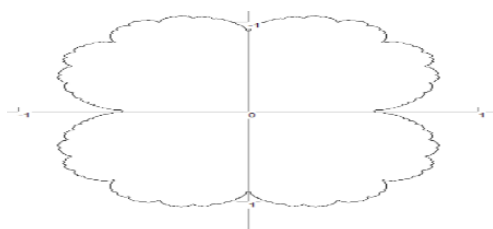


Рис. 2. Множество Жюлиа функции $f(z) = z^2 + 0,25$

Однако для некоторых функций множества Жюлиа являются гладкими множествами. В настоящей статье мы продолжим исследования Милнора [2], связанные с выявлением гладких множеств Жюлиа рациональных функций. Пусть $\mathbb{D}$ — открытый единичный круг радиуса единица с центром в начале координат. Определим две рациональные функции: $\phi_a(z) = \frac{z-a}{1-\bar{a}z}$, $a \in \mathbb{D}$ и $f(z) = e^{i\theta} \phi_{a_1}(z) \phi_{a_2}(z) \dots \phi_{a_k}(z) \dots \phi_{a_n}(z)$, $a_k \in \mathbb{D}$, $k = 1, \dots, n$. В работе [2] Милнор отмечает, что если $n \geq 2$ и один из множителей имеет вид, например, $\phi_{a_k}(z) = z$, то множество Жюлиа $j(f)$ совпадает с единичной окружностью с центром в начале координат.

Покажем, что данное утверждение справедливо, когда, например, $\phi_{a_k}(z) = z^m$, $m \in \mathbb{N}$, $m \geq 1$. Не нарушая общности рассуждений определим рациональную функцию $f(z) = e^{i\theta} z^m \frac{z-a}{1-\bar{a}z}$, $m \in \mathbb{N}$, $m \geq 1$, $a \in \mathbb{D}$ и $\theta \in \mathbb{R}$.

Нетрудно заметить, что точки $z_1 = 0$, $\hat{z} = \infty$ будут сверх-притягивающими неподвижными точками для функции $f(z)$.

Непосредственная проверка показывает, что если $z \in \widehat{\mathbb{C}} \setminus \mathbb{D}$, то $\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(n)}(z) = \infty$. Пусть $z \in \mathbb{D}$, тогда $\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(n)}(z) = 0$. Если же $z \in \partial\mathbb{D}$, то и $f^{(n)}(z) \in \partial\mathbb{D}$, где $\partial\mathbb{D}$ — единичная окружность с центром в начале координат.

Согласно [1, 3] множество Жюлиа $j(f)$ функции $f(z)$ совпадает с окружностью $\partial\mathbb{D}$. Таким образом, $j(f)$ является гладким множеством.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кроновер Р. М. *Фракталы и хаос в динамических системах*. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
2. Милнор Дж. *Голоморфная динамика*. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 320 с.
3. Секованов В. С. Гладкие множества Жюлиа. *Фундаментальная и прикладная математика*. 2016. Т. 21, выпуск 4, с. 133–150. Режим доступа: <http://mech.math.msu.su/~fpm/rus/k16/k164/k16407g.htm>.
4. Секованов В. С. *Элементы теории дискретных динамических систем*. Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань». 2017. 180 с.

SMOOTH JULIA SETS OF A FAMILY OF RATIONAL FUNCTIONS

Sekovanov V. S.^{1,a}, Shaposhnikova I. V.^{2,b}

¹ "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation

² "Surgut State University" of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, Surgut, Russian Federation

^a sekovanovs@yandex.ru, ^b i-v-sh@mail.ru

Keywords: holomorphic dynamics, Julia sets, fractal sets, smooth sets.

At present a new branch of nonlinear dynamics – holomorphic dynamics – is being intensively developed. This topic is the subject of research among which we will mention the works [1–4] related to discrete dynamical systems. The most important components of holomorphic dynamics are Julia sets, which are usually fractal sets (Fig. 1–2).

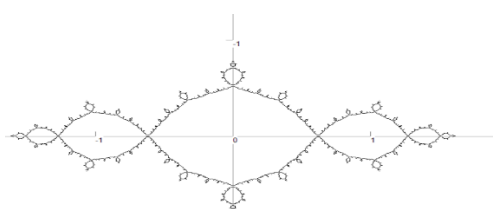


Figure 1. Julia set of the function $f(z) = z^2 - 1$

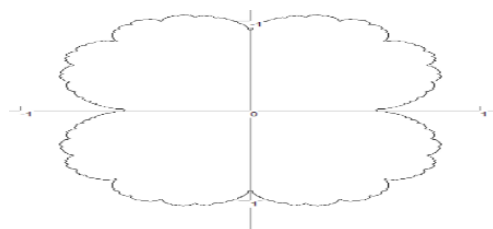


Figure 2. Julia set of the function $f(z) = z^2 + 0.25$

However, for some functions, Julia sets are smooth sets. In the present paper, we will continue the research of Milnor [2] related to the identification of smooth Julia sets of rational functions. Let $\mathbb{D}$ be an open unit circle of radius 1 centered on the origin. We define two rational functions: $\phi_a(z) = \frac{z-a}{1-\bar{a}z}$, $a \in \mathbb{D}$ and $f(z) = e^{i\theta} \phi_{a_1}(z) \phi_{a_2}(z) \dots \phi_{a_k}(z) \dots \phi_{a_n}(z)$, $a_k \in \mathbb{D}$, $k = 1, \dots, n$. In [2], Milnor notes that if $n \geq 2$ and one of the multipliers is of the form, e.g., $\phi_{a_k}(z) = z$, then the Julia set $j(f)$ coincides with the unit circle centered at the origin.

We will show that this statement is true if, for example, $\phi_{a_k}(z) = z^m$, $m \in \mathbb{N}$, $m \geq 1$. Without breaking the generality of the argument, let us define a rational function $f(z) = e^{i\theta} z^m \frac{z-a}{1-\bar{a}z}$, $m \in \mathbb{N}$, $m \geq 1$, $a \in \mathbb{D}$ and $\theta \in \mathbb{R}$.

It is easy to see that the points $z_1 = 0$, $\hat{z} = \infty$ are super-attractive fixed points for the function $f(z)$.

A direct check shows that $z \in \widehat{\mathbb{C}} \setminus \overline{\mathbb{D}}$, then $\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(n)}(z) = \infty$. Let $z \in \mathbb{D}$, then $\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(n)}(z) = 0$. If $z \in \partial\mathbb{D}$, then $f^{(n)}(z) \in \partial\mathbb{D}$, where $\partial\mathbb{D}$ is the unit circle centered at the origin.

According to [1, 3], the Julia set $j(f)$ of the function $f(z)$ coincides with the circle $\partial\mathbb{D}$. Thus, $j(f)$ is a smooth set.

REFERENCES

1. R. M. Kronover, *Fractals and Chaos in Dynamic Systems. Basic Theory* [in Russian], Postmarket, Moscow (2000).
2. J. Milnor, *Holomorphic Dynamics* [Russian translation], Regular and Chaotic Dynamics, Izhevsk (2000).
3. Sekovanov, V.S. Smooth Julia Sets. *Journal of Mathematical Sciences (New York)*, 2020, Volume 245, Issue 2, Pages 202–216 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-020-04687-3>.

4. Sekovanov, V.S. *Elements of the Theory of Discrete Dynamical Systems* [in Russian], Lan', St. Petersburg (2017).

ФРАКТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ПОТОКОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Мышев А. В.^{1,а}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ — Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск, Российская Федерация*

^а *mishev@iate.obninsk.ru*

Ключевые слова: вариабельность, информационная размерность, геометрическая размерность, фрактальная размерность, фрактальная структура.

В работе излагается математический и логический аппарат теории фракталов для построения моделей алгоритмов и процедур интеллектуальных технологий обработки больших потоков экспериментальных и наблюдаемых данных в различных сферах физической реальности. Основной посыл создания математических, логических и алгоритмических основ теории фракталов для разработки методологии построения таких моделей и схем состоит в том, чтобы, во-первых, показать новый подход разработки интеллектуальных технологий обработки и анализа больших потоков экспериментальных и наблюдаемых данных, который основан на принципах и методах исследования фрактальной и сингулярной природы больших информационных потоков. Во-вторых, изложить конкретные математические методы и логические схемы реализации цифровых технологий обработки и анализа больших потоков данных, выделяя в них монофрактальные и/или мультифрактальные информационные структуры с целью их идентификации по признаку принадлежности к классам перколирующего фрактала или фрактального агрегата. В этом случае фрактальная парадигма в методологии создания цифровых технологий обработки, анализа и классификации больших потоков экспериментальных и наблюдаемых данных, в отличие от традиционных методов и способов, позволяет учитывать как свойства регулярности и нерегулярности структуры пространства состояний информационной шкалы данных потока, так и факторы их сингулярной вариабельности. Логический аппарат построения моделей алгоритмов и процедур цифровых технологий строится на основе теории фрактальных размерностей и перколяционной функции. В качестве критерия идентификации фрактальной структуры на потоке данных используются интегральные оценки информационной и геометрической фрактальной размерностей. Для исследования и определения масштабов процессов информационной перколяции на фрактальной структуре потока данных разработаны логические схемы алгоритмов процедур интеллектуальных технологий обработки потока данных и методы анализа обозначенных процессов. Эти методы и логические схемы позволяют отразить и определить особенности получаемых оценок разных фрактальных мер и размерностей в технологиях обработки и анализа потока данных, а также область применения выводов. В этом случае используются два типа фрактальных размерностей — информационная и геометрическая. Информационная фрактальная размерность отражает вариабельность элементов и сингулярные процессы на вероятностном пространстве потока данных. Геометрическая фрактальная размерность отражает вариабельность элементов потока данных относительно цены деления информационной шкалы измерения. Результаты обработки реальных потоков данных с использованием информационных технологий и программных компонентов позволили показать, как и в чем проявляется синергия пространственной геометрии и информационной насыщенности потока данных, а также описать и объяснить синергетические свойства потока данных в рамках

фрактальной парадигмы. Можно ли провести такие аналогии в рамках традиционных моделей, алгоритмов, схем интеллектуальных технологий обработки и анализа больших потоков данных? Если да, то покажите результаты обозначенных аналогий и сформулируйте тренды их теоретического развития и практического продолжения.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ РЕШЕНИЙ «РАЗМЫТЫХ» ЗАДАЧ НА ВИРТУАЛЬНЫХ РЕШЕТКАХ

Мышев А. В.^{1,а}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ — Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск, Российская Федерация*

^а *mishev@iate.obninsk.ru*

Ключевые слова: метод виртуальной перспективы, виртуальные решетки, размытые задачи, среда вычислений, вычислительный интеллект, нейросетевые технологии, компьютеринг.

В работе рассматривается новый подход построения решений размытых задач в условиях замкнутости, ограничений, обмена и неопределенности на виртуальных решетках. Математическая и логическая суть обозначенного подхода является продолжением и развитием теории метода виртуальной перспективы в методологии моделирования размытых задач [1]. Теоретическую основу и базис разрабатываемого подхода образуют: теория метода виртуальной перспективы, нейросетевые технологии вычислительного интеллекта, теория отображений в среде вычислений с переменными доменами-диапазонами и процессы с локальным информационным взаимодействием в виртуальной среде моделирования. Решения моделируемых задач строятся в виде комплексов на конечных топологиях узлов виртуальных решеток активной памяти среды вычислений. Содержательно-смысловой посыл предлагаемого подхода состоит в том, что новые парадигмы вычислительной и компьютерной математики в реалиях тенденций ее современной конъюнктуры связаны, с одной стороны, с построением новых теорий разработки и реализации моделей алгоритмов и процедур вычислительных технологий математического моделирования размытых задач в условиях модельной и алгоритмической замкнутости, ограничений среды вычислений, обмена (энергией и информацией) и информационной неопределенности. А с другой — с созданием (осуществлением) новых форм компьютеринга, когда взаимодействие объектов среды вычислений определяется механизмом виртуальной «аппликации» в информационной среде систем виртуальной реальности. В этом случае формализм среды вычислений предполагает нетрадиционный подход построения логических схем алгоритмов и процедур вычислительных технологий моделирования размытых задач. Технологии математического и компьютерного моделирования дискретизированных задач в среде вычислений любой вычислительной системы, которые реализуются в обозначенных выше условиях, определяют эти задачи, как размытые задачи. В чем же тогда заключается и состоит содержательно-смысловое значение понятия размытая задача, как базового атрибута среды вычислений? Основным посылом этого значения в этом случае заключается в том, что: 1) формализм алгоритмики среды вычислений оперирует терминами и понятиями информационной динамики объектов среды вычислений, а в традиционных схемах построения вычислительных экспериментов такие атрибуты отсутствуют; 2) среда информационного взаимодействия объектов компьютерных процессов в вычислительных технологиях математического моделирования включает такие атрибуты-посредники, как: виртуальная алгоритмическая переменная, операторы взаимодействия на виртуальных решетках, информационная система координат привязки и проверки результатов вычислений (промежуточных и конечных), логическая виртуальная структура в адресном пространстве огра-

нической памяти вычислительной системы и другие, которые являются компонентами и атрибутами среды вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мышев А.В. Метод виртуальной перспективы в моделировании «размытых» задач. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2011;3: 66–78.

МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО УРОВНЕМЕРА ДЛЯ РЕЗЕРВУАРОВ

Замятин Н. В.^{1,а}, Смирнов Г. В.^{1,б}, Маковкин В. И.^{1,в}

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Российская федерация

^а zamnv47@gmail.com, ^б smirnov@main.tusur.ru, ^в assorti2030@yandex.ru

Ключевые слова: резервуар, уровнемер, лазер, Монте-Карло.

При определении объемов веществ в резервуарах лучше всего измерять уровень бесконтактными уровнемерами. Перспективно применение лазерных уровнемеров для измерения уровня нефтепродуктов. Поэтому необходимо изучение влияния пылевых облаков и паров, образуемых внутри резервуара, на возвращаемый сигнал.

Метод Монте-Карло применяется для моделирования транспорта фотонов через мутные среды и получаемая модель должна учитывать характеристики среды, ее оптические свойства, геометрию, и описание распространения излучения.

Модель представляет следующие события:

- 1) инициализация фотона: задаются начальные координаты фотона, исходный вес и направление;
- 2) перемещение фотона в среде: перемещение фотона в определенном направлении на некоторое расстояние;
- 3) рассеяние фотона: определение нового направления движения фотона и длины следующего пробега;
- 4) попытка перемещения фотона в другой слой (отражение или пересечение их границы);
- 5) уменьшение веса фотона;
- 6) смерть фотона.

Представленный подход целесообразно использовать для анализа влияния пыли, пара и прочих мутных сред, возникающих при взаимодействии с хранящимися в резервуарах веществ, на измеряемые значения уровня лазерным уровнемером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маковкин В.И. Замятин Н.В. Система мониторинга и обработки информации о состоянии резервуарного парка // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (2016), 19, № 4. С. 95–99.
2. Якимович Е.А., Замятин Н.В. Моделирование бесконтактного видеоразмера с использованием анализа нейронных сетей. // Научное издание информационные технологии в территориальном управлении, промышленности, образовании: Сб. статей. Томск, (2002) С. 165–170.

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТА НАГРУЗКИ ОТ ПРОХОДЯЩЕГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СОСТАВА

Кожемяченко А. А.^{1,2,a}, Фаворская А. В.^{1,2,b}

¹ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация

² Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

^a kozhemyachenko.aa@mipt.ru, ^b aleanera@yandex.ru

Ключевые слова: компьютерное моделирование, верхнее строение железнодорожного пути, система колесо-рельс.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения» (1023032900401-5-1.2.1).

Расширение и совершенствование железнодорожной инфраструктуры направлено на увеличение её провозных и пропускных способностей в условиях роста объемом грузовых и пассажирских перевозок. Важной задачей является определение нагрузки конструкции верхнего строения пути в различных условиях его устройства при скоростном или грузовом движении железнодорожного состава. Проведение физического эксперимента зачастую оказывается возможным только на специальных железнодорожных полигонах, не имея возможности гибко менять параметры и дизайн эксперимента, для этого требуется проведение компьютерного моделирования.

В докладе рассматривается применение сеточно-характеристического метода для расчета динамической нагрузки железнодорожного состава и получения волновых картин распределения упругих параметров в верхнем строении пути и наземной его части (при наличии) [1]. Железнодорожный путь рассматривается со всеми его характерными компонентами в линейно-упругом приближении с использованием прямоугольных структурированных расчетных сеток (Рис. 1 слева): 1 — рельс, 2 — демпферы, 3 — шпалы, 4 — насыпь, 5 — земляное полотно. Изменяя в математической модели упругие параметры сред, можно рассматривать движение железнодорожного состава при различных параметрах жесткости подрельсового основания, рассматривать движение по балластному или безбалластному пути, рассматривать движение по мосту при замене земляного полотна на несущую конструкцию и доопределения граничных условий. Результаты тестовых при использовании специального граничного условия для моделирования системы колесо-рельс приведены на Рис. 1 справа.

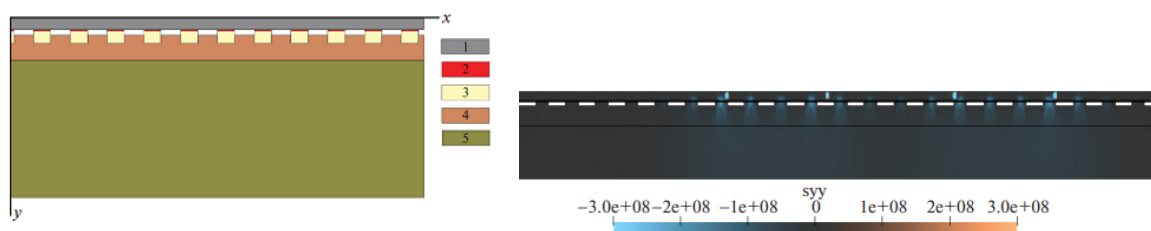


Рис. 1. Расчетные сетки (слева). Прохождение железнодорожного состава (справа)

ЛИТЕРАТУРА

1. Kozhemyachenko A. A., Pesnya E. Computer Simulation of Train Movement by Grid-Characteristic Method. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2024; 45(1): 262–271.

APPLICATION OF THE GRID-CHARACTERISTIC METHOD FOR CALCULATING THE LOAD FROM THE PASSING TRAIN

Kozhemyachenko A. A.^{1,2,a}, Favorskaya A. V.^{1,2,b}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation

² Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation

^a kozhemyachenko.aa@mipt.ru, ^b aleanera@yandex.ru

Keywords: numerical simulation, the upper structure of the railway track, the wheel-rail system.

The work was carried out within the framework of the state task of the Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences” on the topic No. FNEF-2024-0002 “Mathematical modeling of multi-scale dynamic processes and virtual environment systems” (1023032900401- 5-1.2.1).

The expansion and improvement of the railway infrastructure is aimed at increasing its carrying capacity in the context of the increase in the volume of freight and passenger traffic. The important task is to determine the load of the upper structure of the track in various conditions of its arrangement during high-speed or freight movement of the train. Conducting the physical experiment is often possible only at special railway ranges, without being able to flexibly change the parameters and design of the experiment, this requires computer modeling.

The report examines the application of the grid-characteristic method for calculating the dynamic load of train and obtaining wave patterns of the distribution of elastic parameters in the upper structure of the track and its ground part (if available) [1]. The railway track is considered with all its characteristic components in a linear elastic approximation using rectangular structured computational meshes (Fig. 1 on the left): 1 – rail, 2 – dampers, 3 – sleepers, 4 – embankment, 5 – roadbed. By changing the elastic parameters of the media in the mathematical model, it is possible to consider the movement of the train at various parameters of the stiffness of the sub-rail base, consider movement along the ballast or non-ballast track, consider movement along the bridge when replacing the roadbed with the supporting structure and determining boundary conditions. The test results using the special boundary condition for modeling the wheel-rail system are shown in Fig. 1 on the right.

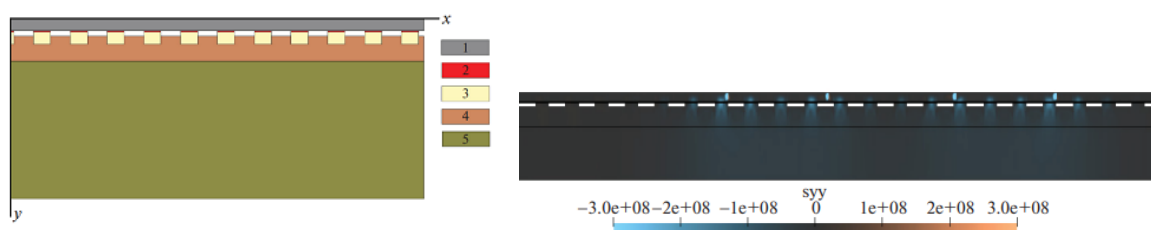


Figure 1. Computational grids (left). Passage of the train (right)

REFERENCES

1. Kozhemyachenko A. A., Pesnya E. Computer Simulation of Train Movement by Grid-Characteristic Method. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2024; 45(1): 262–271.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ BLENDER ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ И ИЛЛЮЗИЙ

Моргун Д. А.^{1,а}

¹ Сургутский филиал Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация

^а morgun_da@office.niisi.tech

Ключевые слова: Blender, 3D-модели, opensource, оптические эффекты.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Компьютерная визуализация широко применяется в настоящее время практически во всех сферах человеческой деятельности. Объектами визуализации могут служить и абстрактные математические объекты; и виртуальные модели конструкций, сооружений, приборов, построенные с учётом их прочностных, теплофизических, электрофизических и прочих характеристик; и сказочные персонажи или предметы, которые могут существовать только в фантазии автора.

Blender [1] — бесплатный набор для создания 3D-изображений с открытым исходным кодом. Blender предназначен для создания реалистичных 3D-изображений и анимации. Специализированные научные или конструкторские средства визуализации обычно гораздо более удобны для быстрой визуализации, позволяют пользователю-специалисту оперировать привычными терминами и обозначениями и вполне достаточны для формирования представления о пространственных особенностях визуализируемого объекта. Но создание действительно реалистичной визуализации требует возможности задания множества дополнительных параметров визуализируемой сцены — источников освещения, оптических параметров поверхности визуализируемых объектов, параметров камеры и др. Особую значимость реалистичность изображения приобретает в системах дополненной реальности.

В программе Blender для учёного-исследователя могут быть интересны и возможности интерактивного моделирования посредством графического интерфейса, и возможность программирования любого элемента сцены с помощью скриптов на языке Python, и промежуточный вариант — визуальное программирование с помощью «узлов» (Blender nodes), и само внутреннее устройство программы Blender, которая использует для своей работы около сотни сторонних библиотек, обеспечивающих возможности моделирования, эффективных вычислений и хранения данных в различных форматах.

В настоящей работе представлена технология моделирования голографической иллюзии, создаваемой двумя параболическими зеркалами [2] с помощью программы Blender и результаты компьютерной визуализации этой иллюзии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Blender*. Режим доступа: <https://www.blender.org/>.
2. *DIY – Holographic Parabolic Mirrors – the Mirascope*. Режим доступа: <https://www.instructables.com/member/Edson1974/>.

USING BLENDER SOFTWARE TO MODEL OPTICAL EFFECTS AND ILLUSIONS

Morgun D. A.^{1,a}¹ *Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation*^a *morgun_da@office.niisi.tech*

Keywords: Blender, 3D models, opensource, optical effects.

This study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, project No.1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Computer visualization is widely used nowadays in almost all spheres of human activity. Objects of visualization can be abstract mathematical objects; virtual models of structures, buildings, devices, built taking into account their strength, thermal, electrical and other characteristics; and fairy-tale characters or objects that can exist only in the author’s imagination.

Blender [1] – a free open-source 3D image creation kit. Blender is designed to create realistic 3D images and animation. Specialized scientific or design visualization tools are usually much more convenient for quick visualization, allow a specialist user to operate with familiar terms and notations and are quite sufficient for forming an idea of the spatial features of the visualized object. But creating a truly realistic visualization requires the ability to specify many additional parameters of the visualized scene – light sources, optical parameters of the surface of the visualized objects, camera parameters, etc. The realism of the image is especially important in augmented reality systems.

In the Blender program, a research scientist may be interested in the capabilities of interactive modeling through a graphical interface, and the ability to program any element of the scene using Python scripts, and an intermediate option – visual programming using “Blender nodes”, and the internal structure of the Blender program itself, which uses about a hundred third-party libraries for its work, providing modeling capabilities, efficient calculations and data storage in various formats.

This paper presents a technology for modeling a holographic illusion created by two parabolic mirrors [2] using the Blender program and the results of computer visualization of this illusion.

REFERENCES

1. *Blender*. Available at: <https://www.blender.org/>.
2. *DIY – Holographic Parabolic Mirrors – the Mirascope*. Available at: <https://www.instructables.com/member/Edson1974/>.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ НА В-КОМПЬЮТЕРАХ

Деев Г. Е.^{1,а}, Ермаков С. В.^{1,б}

¹ Обнинский институт атомной энергетики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация

^а georgdeo@mail.ru, ^б ermakov@iate.obninsk.ru

Ключевые слова: В-компьютеры, искусственный интеллект.

Всякий объект находится на той или иной стадии развития. Под *стадией развития* объекта понимается его **конструктивное состояние**, а также набор **функциональных возможностей**, вытекающих из конструктивного состояния, и проявляемых объектом при его взаимодействии с окружающей средой. Набор функциональных возможностей объекта является его важнейшей эволюционной характеристикой. Мы будем называть его *набором функций объекта*.

Под **развитием** понимается переход объекта от одной стадии развития к другой. Это подразумевает как возможное конструктивное изменение самого объекта, так и изменение набора связанных с ним функций. Каждая стадия развития характеризуется двумя компонентами: конструктивными особенностями объекта и его функциональным набором. Вполне естественно предполагать, что функциональный набор объекта зависит от его конструкции, так что набор функций, характеризующих стадию развития, есть своего рода функция его конструктивного совершенства, что отражается записью $\{f_1, f_2, \dots\} = \Psi(k)$, где k — коэффициент, характеризующий конструктивное развитие. Будем считать его меняющимся в пределах $0 \leq k < \infty$. Реальные потребности, определяемые взаимодействием объекта с окружающей средой, могут не требовать использования некоторых функций, потенциально входящих во множество $\{f_1, f_2, \dots\}$.

Стадия развития объекта — это пара $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$, состоящая из коэффициента конструктивного развития k и набора функций $\{f_1, f_2, \dots\}$.

Оба фактора, входящих в пару $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$, могут определяться внешним воздействием; тогда мы говорим об **индуцированном развитии**.

Поведение пары $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$ определяется внутренними причинами, присущими объекту. При этом, внешнее воздействие может быть слабым или вообще отсутствующим. Тогда мы говорим о **саморазвитии**. С понятием саморазвития тесно связано понятие **искусственного интеллекта**. Существует два подхода к понятию искусственного интеллекта.

Согласно **первому подходу** под *искусственным интеллектом* понимается *искусственно созданный объект, обладающий способностью к самостоятельной интеллектуальной деятельности*. Будем называть это понятие *искусственным интеллектом в полном смысле*. Таким образом, первой отличительной чертой искусственного интеллекта является его искусственное происхождение, т.е. он должен быть создан кем-то или чем-то другим, способным к достаточно высокой творческой деятельности, например, человеком творящим, или каким-либо ещё, способным к творению, **мыслящим существом** (Спиноза, [1], стр.165. Второй отличительной чертой искусственного интеллекта является его способность в полной мере самостоятельно проявлять свой интеллект при взаимодействии с окружающей средой, решая, в идеале, любые, самые разнообразные задачи, возникающие при этом взаимодействии.

Согласно **второму подходу** под *искусственным интеллектом* понимается *искусственно созданный объект, обладающий способностью к моделированию разумной поведенческой деятельности в пределах запрограммированной компетенции*. Будем называть это понятие, просто, *искусственным интеллектом*. Все известные роботы реализуют

искусственный интеллект в этом смысле, так как *поведение робота определяется человеком*. Это программируемые роботы, моделирующие разумное поведение. До тех пор, пока они управляются программируемыми компьютерами, искусственным интеллектом в полном смысле они названы быть не могут.

Нейронные сети являются примерами искусственного интеллекта второго типа, так как в них «защита» программа итеративного совершенствования.

Подлинный искусственный интеллект есть ИИ в полном смысле. Мыслители прошлого вели свои рассуждения именно в отношении ИИ в полном смысле, в соответствии с первым подходом ([1–7]). Только на этом пути достижимо окончательное решение проблемы ИИ. В полной мере создание такого искусственного интеллекта может быть осуществлено на базе В-компьютеров [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиноза Б. *Избранные произведения*. Ростов-на-Дону: Феникс; 1998. 604 с.
2. Лейбниц Г. В. *Сочинения*. В 4 томах. Т. 2. М.: Мысль; 1983. 686 с.
3. Russel B. *The Analysis of Mind*. Routledge, London; 2005. 285 с.
4. Рассел Б. *Введение в математическую философию. Избранные работы* / Пер. с англ. В. В. Целищева, В. А. Суровцева. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во; 2007. 264 с.
5. Локк Дж. *Опыт о человеческом разумении. Сочинения*: В 3 т. Т. 1 / Под ред. И. С. Нарского. М.: Мысль; 1985. 623 с.
6. Локк Дж. *Опыт о человеческом разумении. Сочинения*: В 3 т. Т. 2 / Под ред. И. С. Нарского. М.: Мысль; 1985. 560 с.
7. Локк Дж. *Избранные философские произведения*. М.: Государственное социально-экономическое издательство; 1960. 1268 с.
8. Г.Е.Деев, С.В.Ермаков В- компьютеры: генезис, развитие, приложения - Успехи кибернетики. 2022;3(2):74–85. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-2-9

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND PERSPECTIVES FOR ITS REALIZATION ON B-COMPUTERS

Deev G. E.^{1,a}, Ermakov S. V.^{1,b}

¹ Obninsk Institute of Atomic Energy, National Research Nuclear University “MEPhI”,
Obninsk, Russian Federation

^a georgdeo@mail.ru, ^b ermakov@iate.obninsk.ru

Keywords: B-computers, artificial intelligence.

Every object is at one stage or another of development. The stage of development of an object is understood as its constructive state, as well as a set of functional capabilities arising from the constructive state and manifested by the object in its interaction with the environment. The set of functional capabilities of an object is its most important evolutionary characteristic. We will call it the feature set of an object.

Development refers to the transition of an object from one stage of development to another. This implies both a possible constructive change of the object itself and a change in the set of functions associated with it. Each stage of development is characterized by two components: the design features of the object and its functional set. It is quite natural to assume that the functional set of an object depends on its design, so that the set of functions characterizing the stage of development is a kind of function of its constructive perfection, which is reflected by the entry $\{f_1, f_2, \dots\} = \Psi(k)$, where k is the coefficient characterizing constructive development.

We will consider it changing within the limits $0 \leq k < \infty$. Real needs, determined by the interaction of an object with the environment, may not require the use of some functions that are potentially included in the set $\{f_1, f_2, \dots\}$.

The stage of development of an object is a pair $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$, consisting of the coefficient of constructive development k and a set of functions $\{f_1, f_2, \dots\}$.

Both factors included in the pair $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$, can be determined by external influences; then we are talking about induced development.

The behavior of the pair $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$ is determined by internal reasons inherent in the object. At the same time, the external impact may be weak or absent altogether. Then we are talking about self-development. The concept of artificial intelligence is closely related to the concept of self-development. There are two approaches to the concept of artificial intelligence.

According to the first approach, artificial intelligence is understood as an artificially created object with the ability to independent intellectual activity. Let's call this concept artificial intelligence in the full sense. Thus, the first distinguishing feature of artificial intelligence is its artificial origin, i.e. it must be created by someone or something else capable of sufficiently high creative activity, for example, a creative person, or some other creative, thinking being (Spinoza, [1], p.165. The second distinctive feature of artificial intelligence is its ability to fully independently demonstrate its intelligence when interacting with the environment, ideally solving any, most diverse tasks arising from this interaction.

According to the second approach, artificial intelligence is understood as an artificially created object with the ability to model intelligent behavioral activity within a programmed competence. Let's call this concept, simply, artificial intelligence. All known robots implement artificial intelligence in this sense, since the robot's behavior is determined by a human. These are programmable robots that simulate intelligent behavior. As long as they are controlled by programmable computers, they cannot be called artificial intelligence in the full sense.

Neural networks are examples of artificial intelligence of the second type, since they have an iterative improvement program "sewn in".

There is genuine artificial intelligence in the full sense. Thinkers of the past conducted their reasoning precisely in relation to AI in the full sense, in accordance with the first approach ([1–7]). Only in this way is a final solution to the AI problem achievable. To the full extent, the creation of such artificial intelligence can be carried out on the basis of B-computers [8].

REFERENCES

1. Spinoza B. Selected works. Rostov-on-Don: Phoenix; 1998. 604 p.
2. Leibniz G. V. Works. In 4 volumes. Vol. 2. M.: Thought; 1983. 686 p.
3. Russell B. The Analysis of Mind. Routledge, London; 2005. 285 p.
4. Russell B. Introduction to Mathematical Philosophy. Selected works / Translated from the English by V. V. Tselishchev, V. A. Surovtseva. Novosibirsk: Sib. univ. publishing house; 2007. 264 p.
5. Locke J. The experience of human understanding. Works: In 3 vols. Vol. 1 / Edited by I. S. Narsky. M.: Thought; 1985. 623 p.
6. Locke J. The experience of human understanding. Works: In 3 vols. Vol. 2 / Edited by I. S. Narsky. M.: Thought; 1985. 560 p.
7. Locke J. Selected philosophical works. M.: State Socio-economic Publishing House; 1960. 1268 S.
8. G.E.Deev, S.V.Ermakov B-computers: genesis, development, applications // Russian Journal of Cybernetics. 2022;3(2):74–85. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-2-9.

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОДЭК И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Кречетников В. В.^{1,a}, Титов И. Е.¹, Спиридонов С. И.¹, Карпенко Е. И.¹,
Соломатин В. М.²

¹ НИЦ «Курчатовский институт» — ВНИИРАЭ, Обнинск

² Акционерное общество «Прорыв», Москва

^a viktor.krechetnikov@mail.ru

Ключевые слова: опытно-демонстрационный энергокомплекс, радиоактивные выбросы, нормальная эксплуатация, сценарии аварий, цифровой двойник, доза облучения, ГИС-проект, электронная карта.

В ходе работ был создан цифровой двойник для оценки и прогнозирования радиационного воздействия на человека и биоту в районе расположения ОДЭК. Систематизирована и описана актуализированная информация, характеризующая радиоактивные выбросы реакторной установки БРЕСТ-ОД-300.

На основе собранных данных и с использованием модуля ГИС «Прогноз (авария)» и «Прогноз (хроника)» выполнен прогноз доз облучения населения. Результаты прогнозирования позволили оценить уровни радиационного воздействия на население при штатной работе реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 и для различных аварийных сценариев. Полученные в ходе расчётов данные были добавлены в виде слоёв электронных карт в цифровой двойник. В результате, созданный цифровой двойник содержит 220 слоёв, включающих базовые слои, точечные слои, содержащие атрибутивную информацию о дозах облучения населения в расчётных точках, линейные слои изолиний распределения доз облучения и растровые слои пространственного распределения дозовой нагрузки.

Результаты, полученные в ходе работ, будут в дальнейшем дополнены оценками доз облучения населения в результате эксплуатации «модуля фабрикация-рефабрикация ядерного топлива» (МФР), что позволит сформировать полную картину воздействия радиационного фактора на население при функционировании ОДЭК. С практической точки зрения, результаты расчётных оценок и создания электронных карт цифрового двойника внесут вклад в обоснование экологической безопасности предприятий ОДЭК с учётом современных подходов к оценке радиационного воздействия на население в районах расположения ядерно-энергетических предприятий.

ЧИСТОТА ДАННЫХ В АНАЛИТИКЕ И МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ДАННЫХ

Поспелов Д.
ООО «КНОДЛЬ»

Ключевые слова: машинное обучение, анализ данных, очистка данных.

Введение

Качество данных — критически важный фактор в аналитике и машинном обучении. Некорректные или грязные данные приводят к ошибочным выводам и решениям, что может вызвать финансовые потери и снизить доверие к аналитическим системам.

Основные проблемы с данными

Распространенные проблемы включают пропущенные значения, дублирующиеся записи, некорректные форматы, аномалии и ошибки ввода. Эти недостатки затрудняют анализ и негативно влияют на точность моделей и прогнозов.

Влияние грязных данных

Грязные данные снижают эффективность моделей машинного обучения, приводят к неверным бизнес-решениям и увеличивают затраты на хранение и обработку. Это подрывает доверие к аналитике и может негативно сказаться на репутации организации.

Современные подходы к очистке данных

Автоматизация процессов очистки с использованием специализированных инструментов ускоряет выявление и исправление ошибок. Описание технологии **KnoDL**.

Вызовы и перспективы

Обработка неструктурированных данных, таких как текст и мультимедиа, требует новых методов и технологий.

Заключение

Чистота данных является основой успешной аналитики и машинного обучения. Организации, уделяющие внимание качеству данных, способны принимать более обоснованные решения и эффективно использовать ресурсы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Olson, J. E. (2003). *Data Quality: The Accuracy Dimension*. Morgan Kaufmann.
2. Rahm, E., & Do, H.-H. (2000). Data Cleaning: Problems and Current Approaches. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 23(4), 3–13.
3. McCallum, Q. E. (2012). *Bad Data Handbook: Mapping the World of Data Problems*. O'Reilly Media.
4. Chu, X., Ilyas, I. F., Krishnan, S., & Wang, J. (2016). Data Cleaning: Overview and Emerging Challenges. *Proceedings of the 2016 International Conference on Management of Data*, 2201–2206.
5. Статья о технологии KnoDL (доступна по запросу или на официальном сайте разработчика).

DATA CLEANLINESS IN ANALYTICS AND MACHINE LEARNING: MODERN APPROACHES AND DATA CLEANSING TECHNOLOGIES

Pospelov D.
KNODL LLC

Keywords: machine learning, data analysis, data cleanup.

Introduction

Data quality is a critically important factor in analytics and machine learning. Incorrect or dirty data leads to erroneous conclusions and decisions, which can cause financial losses and reduce trust in analytical systems.

Main Data Issues

Common problems include missing values, duplicate records, incorrect formats, anomalies, and input errors. These deficiencies complicate analysis and negatively affect the accuracy of models and forecasts.

Impact of Dirty Data

Dirty data reduces the effectiveness of machine learning models, leads to incorrect business decisions, and increases the costs of storage and processing. This undermines trust in analytics and can negatively affect the organization's reputation.

Modern Approaches to Data Cleansing

Automating cleansing processes using specialized tools accelerates the detection and correction of errors. Description of the KnoDL technology.

Challenges and Prospects

Processing unstructured data, such as text and multimedia, requires new methods and technologies.

Conclusion

Data cleanliness is the foundation of successful analytics and machine learning. Organizations that pay attention to data quality are able to make more informed decisions and use resources more effectively.

REFERENCES

1. Olson, J. E. (2003). *Data Quality: The Accuracy Dimension*. Morgan Kaufmann.
2. Rahm, E., & Do, H.-H. (2000). Data Cleaning: Problems and Current Approaches. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 23(4), 3–13.
3. McCallum, Q. E. (2012). *Bad Data Handbook: Mapping the World of Data Problems*. O'Reilly Media.
4. Chu, X., Ilyas, I. F., Krishnan, S., & Wang, J. (2016). Data Cleaning: Overview and Emerging Challenges. *Proceedings of the 2016 International Conference on Management of Data*, 2201–2206.
5. Information about the KnoDL technology (available on the official website of the developer).

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Белоусов П. А.^{1,а}, Диденко В. И.^{2,б}, Марухина О. В.^{3,в}, Аксенов С. В.^{3,г},
Шлапак Н. В.^{1,д}, Моисеева А. К.^{1,е}, Молчанова М. В.^{1,ё}, Замков Д. В.^{1,ж},
Лихоманов А. А.^{1,з}

¹ Обнинский институт атомной энергетики — филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация

² ООО «АйТекФорсайт», г. Москва, Российская Федерация

³ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

^а PABelousov@mephi.ru, ^б hello@itech4sight.ru, ^в Marukhina@mail.tsu.ru,

^г Aksenov@mail.tsu.ru, ^д nikitashlapak04@gmail.com, ^е axnynda@gmail.com,

^ё masha.shrek@mail.ru, ^ж engeftroll@gmail.com, ^з lihomanov0202@gmail.com

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, спутниковые карты, прогнозирование лесного массива, классификация растений, машинное обучение, интеллектуальная обработка изображений.

Работа поддержана грантом компании ООО «АйТекФорсайт».

Создание математических моделей для определения количественных и качественных характеристик лесов с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) имеет высокую актуальность по нескольким причинам. Мониторинг состояния лесов с помощью ДЗЗ позволяет регулярно и оперативно отслеживать состояние лесных экосистем, выявлять изменения в их структуре, здоровье и биоразнообразии. Модели могут помочь в оценке запасов древесины, что важно для управления лесными ресурсами и устойчивого лесопользования, можно также выявлять участки, подверженные рискам, таким как лесные пожары, болезни или вредители, что позволяет заранее принимать меры по их предотвращению.

Леса играют ключевую роль в регуляции углеродного баланса. Моделирование их характеристик помогает оценивать вклад лесов в борьбу с изменением климата. Математические модели могут использоваться для оптимизации управления лесными территориями, включая планирование вырубок, восстановление лесов и охрану природных ресурсов. Современные модели могут интегрировать данные из различных источников (спутниковые снимки, наземные исследования и т.д.), что повышает точность и надежность получаемых результатов. Разработка таких моделей способствует углублению знаний о динамике экосистем и взаимодействии различных факторов, влияющих на состояние лесов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамович Т. А., Кантор Г. Я., Ашихмина Т. Я. и др. *Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш»*. Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 1. С. 18–24.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINING FOREST CHARACTERISTICS USING REMOTE EARTH SENSING DATA

Belousov P. A.^{1,a}, Didenko V. I.^{2,b}, Marukhina O. V.^{3,c}, Aksenov S. V.^{3,d},
Shlapak N. V.^{1,e}, Moiseeva A. K.^{1,f}, Molchanova M. V.^{1,g}, Zamkov D. V.^{1,h},
Likhomanov A. A.^{1,i}

¹ *Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering – branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “National Research Nuclear University “MEPhI”, Obninsk, Russian Federation*

² *ООО “AiTekForsight”, Moscow, Russian Federation*

³ *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “National Research Tomsk State University”*

^a *PABelousov@mephi.ru*, ^b *hello@itech4sight.ru*, ^c *Marukhina@mail.tsu.ru*,

^d *Aksenov@mail.tsu.ru*, ^e *nikitashlapak04@gmail.com*, ^f *axnynda@gmail.com*,

^g *masha.shrek@mail.ru*, ^h *engeftroll@gmail.com*, ⁱ *lihomanov0202@gmail.com*

Keywords: remote sensing, satellite maps, forest forecasting, plant classification, machine learning, intelligent image processing.

The work was supported by a grant from the company ООО “AiTekForesight”.

The creation of mathematical models for determining the quantitative and qualitative characteristics of forests using Earth remote sensing (ERS) data is highly relevant for several reasons. Monitoring the condition of forests using ERS allows for regular and prompt tracking of the condition of forest ecosystems, identifying changes in their structure, health and biodiversity.

Models can help in assessing timber reserves, which is important for forest resource management and sustainable forest use, and can also identify areas exposed to risks such as forest fires, diseases or pests, which allows for early action to prevent them.

Forests play a key role in regulating the carbon balance. Modeling their characteristics helps assess the contribution of forests to combating climate change. Mathematical models can be used to optimize forest management, including logging planning, forest restoration, and natural resource protection. Modern models can integrate data from various sources (satellite images, ground-based studies, etc.), which increases the accuracy and reliability of the results. The development of such models helps to deepen knowledge about ecosystem dynamics and the interaction of various factors affecting the condition of forests.

REFERENCES

1. Adamovich T. A., Kantor G. Ya., Ashikhmina T. Ya., et al. *Analysis of seasonal and long-term dynamics of the NDVI vegetation index on the territory of the Nurgush State Nature Reserve*. Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 1. P. 18–24.

Дифференциальные уравнения (волновые процессы, нелинейная динамика, динамические системы)

Руководитель секции:

Валерий Алексеевич Галкин

Доктор физико-математических наук,
профессор, директор Сургутского филиала
ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

Section moderator:

Prof. Valery Alekseyevich Galkin

Doctor of Physical and Mathematical Sci-
ences, Professor, Director of the Surgut Branch
of SRISA

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКАЛЯРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Голубев В. И.^{1,2,a}

¹ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация

² Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии
наук», г. Москва, Российская Федерация

^a golubev.vi@mipt.ru

Ключевые слова: нейронные сети, сейсмическая разведка, сеточно-характеристический метод, трещиноватые включения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения» (1023032900401-5-1.2.1).

Сейсмические полевые работы направлены на исследование структуры подповерхностного пространства на основе зарегистрированных отражённых от неоднородностей сейсмических волн. Традиционные методы обработки полевых данных, такие как миграция в обратном времени (RTM) и полноволновая инверсия (FWI) эффективны для задач локализации толстых геологических слоёв и построения размытой трёхмерной геологической модели. Однако, трещиноватые зоны, характерны для мест расположения продуктивных нефтенасыщенных слоёв, генерируют отражённый сигнал с очень низким отношением сигнал/шум. Для этих случаев применение ручного анализа сейсмограмм также не позволяет получить надёжные результаты.

В настоящей работе рассматривается проблема локализации небольшого трещиноватого включения. Применение современных нейронных сетей позволило не только решить задачу локализации с высокой точностью, но и достоверно оценить его физические свойства [1]. Сравнение результатов, полученных различными архитектурами сетей, представлено на Рис. 1.

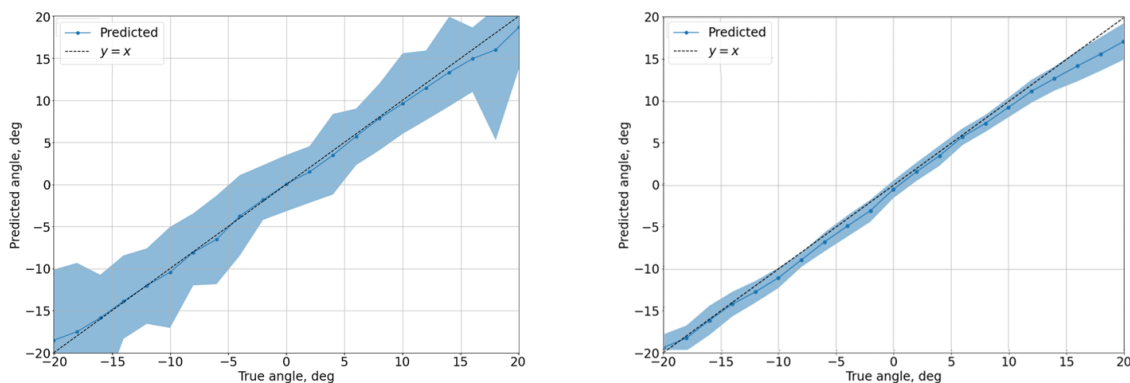


Рис. 1. Истинные и предсказанные углы наклона трещин, усреднённые по всем положениям включения: *single-target model* (слева) and *cross-stitch model* (справа)

ЛИТЕРАТУРА

1. Golubev V., Anisimov M. Application of Convolutional Networks for Localization and Prediction of Scalar Parameters of Fractured Geological Inclusion. *International Journal of Applied Mechanics*. 2024;16(5): 2450064.

SCALAR PARAMETERS PREDICTION OF FRACTURED GEOLOGICAL INCLUSION WITH THE CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Golubev V. I.^{1,2,a}

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation*

² *Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation*

^a *golubev.vi@mipt.ru*

Keywords: neural networks, seismic survey, grid-characteristic method, fractured inclusions.

The work was carried out within the framework of the state task of the Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences" on the topic No. FNEF-2024-0002 "Mathematical modeling of multi-scale dynamic processes and virtual environment systems" (1023032900401-5-1.2.1).

The seismic survey is directed to the investigation of the subsurface structure based on the registered scattered waves from the geological heterogeneities. The traditional methods like Reverse-Time Migration (RTM) and Full-Wave Inversion (FWI) are effective for thick geological layers localization and blurred 3D geological model reconstruction. However, fractured zones, related to the productive oil-filled layers, generate very low signal to noise ratio backscattered signals. In this case, also the manual analysis of seismograms does not provide reliable results.

In this work, the problem of small, fractured inclusion localization problem is considered. The application of modern neural networks gives us the chance not only to localize the inclusion with the high precision, but also reliable estimate its physical parameters [1]. The comparison of two used network architectures is presented at Fig. 1.

REFERENCES

1. Golubev V., Anisimov M. Application of Convolutional Networks for Localization and Prediction of Scalar Parameters of Fractured Geological Inclusion. *International Journal of Applied Mechanics*. 2024;16(5): 2450064.

РАСЧЕТ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ НА СВАЯХ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Фаворская А. В.^{1,2,a}, Голубев В. И.^{1,2,b}

¹ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация

² Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

^a aleanera@yandex.ru, ^b golubev.vi@mipt.ru

Ключевые слова: сейсмостойкость, компьютерное моделирование.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения» (1023032900401-5-1.2.1).

Строительство в условиях Крайнего Севера требует специфического устройства фундамента — использование свай. Грунт между сваями может в зависимости от погодных условий существенно проседать. Динамика поведения конструкции под сейсмическим воздействием в зависимости от формы проседания грунта может быть различной. Подобные эксперименты тяжело проводить с использованием виброплатформ и требуется компьютерное моделирование.

Доклад посвящен численному методу из семейства сеточно-характеристических для определения начальных областей разрушения многоэтажного здания на сваях с учетом произвольной формы проседания грунта [1]. Предложено использовать систему специальным образом строящихся криволинейных структурированных сеток для учета произвольной формы грунта (Рис. 1 слева, 1, 2 — декартовы сетки 3, 4 — криволинейные структурированные сетки), когда между соседними сваями строятся две такие сетки, каждая из которых конформна с декартовыми сетками. Данные две сетки получаются не конформными друг с другом. Предложено строить их таким образом, чтобы на границе использовать не билинейную интерполяцию, а линейную, что с одной стороны снижает количество

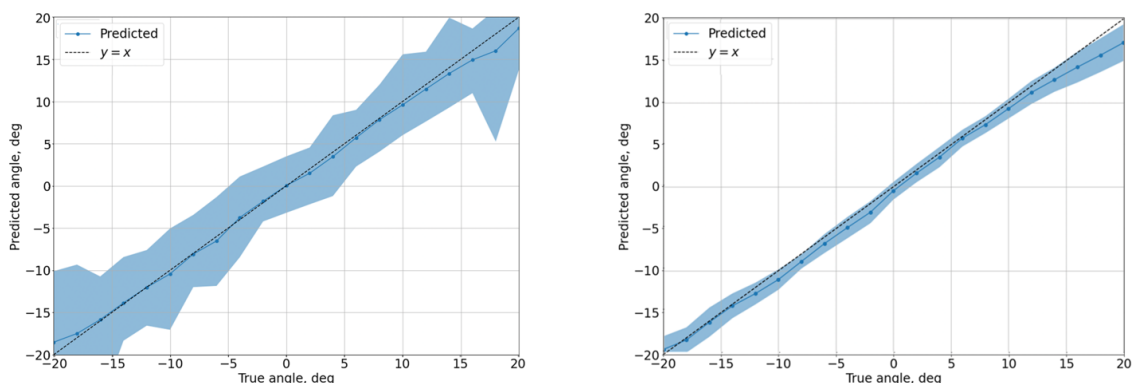


Figure 1. True versus predicted crack orientation angles, averaged through all inclusion positions: single-target model (left) and cross-stitch model (right)

вычислительных операций, а с другой стороны увеличивает точность моделирования. Результаты тестовых расчетов приведены на Рис. 1 справа.

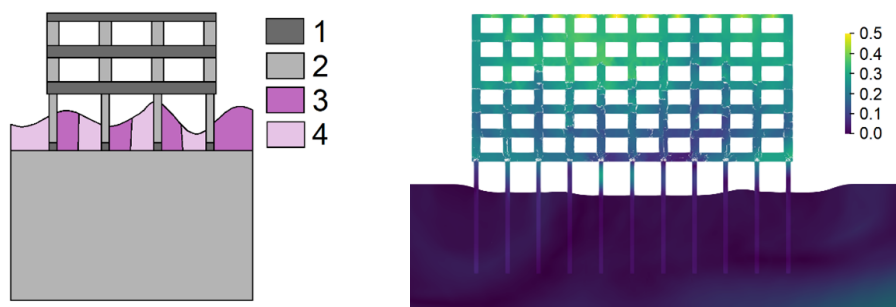


Рис. 1. Расчетные сетки (слева). Прохождение продольной сейсмической волны и формирующиеся разрушения (справа)

ЛИТЕРАТУРА

1. Favorskaya, A. V., Petrov, I. B. Calculation of Seismic Stability of Buildings in the Far North Using the Grid-Characteristic Method. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2024;45(1):213–222.

CALCULATION OF SEISMIC RESISTANCE OF MULTI-STOREY BUILDINGS ON PILES OPERATING IN THE CONDITIONS OF THE FAR NORTH

Favorskaya A. V.^{1,2,a}, Golubev V. I.^{1,2,b}

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation*

² *Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation*

^a *aleanera@yandex.ru*, ^b *golubev.vi@mipt.ru*

Keywords: seismic resistance, numerical simulation.

The work was carried out within the framework of the state task of the Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences” on the topic No. FNEF-2024-0002 “Mathematical modeling of multi-scale dynamic processes and virtual environment systems” (1023032900401- 5-1.2.1).

Construction in the Far North requires a specific foundation device, i.e., the use of piles. The soil between the piles can subside significantly depending on weather conditions. The dynamics of the structure’s behavior under seismic impact can be different depending on the form of soil subsidence. Such experiments are difficult to conduct using vibration platforms and require computer simulation.

The report is devoted to numerical method from the family of grid-characteristic methods for determining the initial areas of destruction of a multi-story building on piles, taking into account an arbitrary form of soil subsidence [1]. We propose to use a system of specially constructed curvilinear structured grids to take into account an arbitrary form of soil (Fig. 1 on the left, 1, 2 Cartesian grids 3, 4 curvilinear structured grids), when two such grids are constructed between neighborhood piles, each of which is conformal with the Cartesian grids. These two grids are not conformal to each other. It is proposed to construct them in such a

way that at the boundary, not bilinear interpolation is used, but linear, which on the one hand reduces the number of computational operations, and on the other hand increases the accuracy of modeling. The results of test calculations are shown in Fig. 1 on the right.

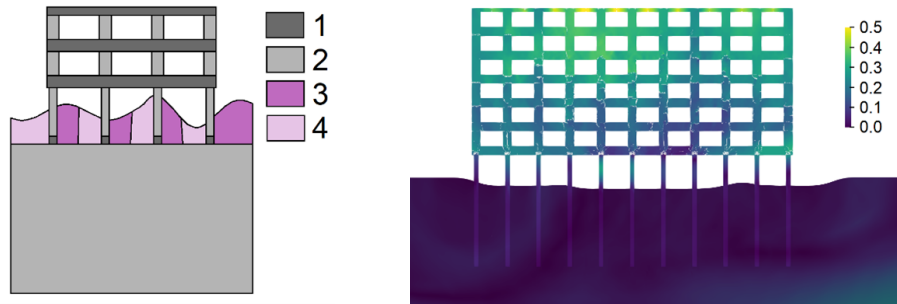


Figure 1. Computational grids (left), transit of longitudinal seismic wave and arising damaged areas (right)

REFERENCES

1. Favorskaya, A. V., Petrov, I. B. Calculation of Seismic Stability of Buildings in the Far North Using the Grid-Characteristic Method. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2024;45(1): 213–222.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ–СТОКСА В ЦИЛИНДРЕ

Галкин В. А.^{1,2,а}, Дубовик А. О.^{1,2,б}

¹ Сургутский филиал Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
^а val-gal@yandex.ru, ^б alldubovik@gmail.com

Ключевые слова: уравнения Навье–Стокса, точные решения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНИЦ НИИСИ РАН (Выполнение фундаментальных научных исследований ГП 47) по теме № 0580-2021-0007 «Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления».

Исследуются уравнения Навье–Стокса $D \subset \mathbb{R}^3 = \{\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)\}$ с условием скольжения на границе

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \Delta \mathbf{u}, \quad \operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$(\mathbf{u}, \mathbf{n})|_{\partial D} = 0, \quad (2)$$

Областью течения D является цилиндр C_k

$$C_k = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 : 0 < r(\mathbf{x}) < \rho_k, 0 < x_3 < 2\pi\sqrt{2}\},$$

где $r(\mathbf{x}) = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$, $J'_0\left(\frac{\rho_k}{\sqrt{2}}\right) = 0$, $k \in \mathbb{N}$, J_0 — функция Бесселя,

В [1] доказано, что системе (1), (2) удовлетворяет решение

$$\mathbf{V}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{U}(\mathbf{x})e^{-\mu t}, \quad P(\mathbf{x}, t) = \frac{\rho}{2} \mathbf{V}^2(\mathbf{x}, t) + \alpha(t),$$

$$\mathbf{U}(x) = \frac{J'_0\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right)}{r\sqrt{2}} \begin{bmatrix} x_2 \sin\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) + \frac{x_1}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) \\ -x_1 \sin\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) + \frac{x_2}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} J_0\left(\frac{r}{2}\right) \begin{bmatrix} 0 \\ \sin\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

где $\alpha(t)$ — произвольная функция. Линии тока представлены на рис. 1 ниже

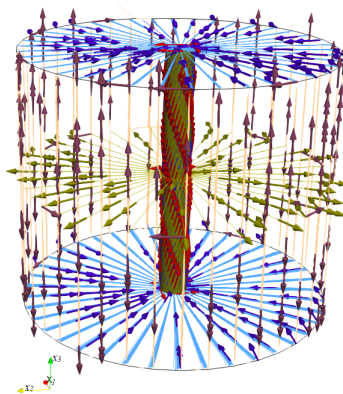


Рис. 1. Линии тока в цилиндре C_k

ЛИТЕРАТУРА

1. Галкин В.А. Об одном классе точных решений системы уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости / В. А. Галкин, А.О. Дубовик // Жур. Матем. модел. 2023. Т. 35. № 8. с. 3-13. DOI: 10.20948/mm-2023-08-01.

EXACT SOLUTIONS OF THE NAVIER-STOKES EQUATIONS IN THE CYLINDER

Galkin V. A.^{1,2,a}, **Dubovik A. O.**^{1,2,b}

¹ Surgut Branch of SRISA, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a val-gal@yandex.ru, ^b alldubovik@gmail.com

Keywords: Navier–Stokes equations, exact solutions.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis” of the Russian Academy of Sciences (Performing fundamental scientific research GP 47) on topic No. 0580-2021-0007 “Development of methods for mathematical modeling of distributed systems and corresponding calculation methods”.

The Navier–Stokes equations with a slip condition on the boundary are investigated in $D \subset \mathbb{R}^3 = \{\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)\}$.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \Delta \mathbf{u}, \quad \operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$(\mathbf{u}, \mathbf{n})|_{\partial D} = 0, \quad (2)$$

The flow region D is the cylinder C_k

$$C_k = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 : 0 < r(\mathbf{x}) < \rho_k, 0 < x_3 < 2\pi\sqrt{2}\},$$

where $r(\mathbf{x}) = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$, $J'_0\left(\frac{\rho_k}{\sqrt{2}}\right) = 0$, $k \in \mathbb{N}$, J_0 – Bessel function.

In [1] it has been proven that the system (1), (2) satisfies the solution

$$\mathbf{V}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{U}(\mathbf{x})e^{-\mu t}, \quad P(\mathbf{x}, t) = \frac{\rho}{2}\mathbf{V}^2(\mathbf{x}, t) + \alpha(t),$$

$$\mathbf{U}(x) = \frac{J'_0\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right)}{r\sqrt{2}} \begin{bmatrix} x_2 \sin\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) + \frac{x_1}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) \\ -x_1 \sin\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) + \frac{x_2}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{2}J_0\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right) \begin{bmatrix} 0 \\ \sin\left(\frac{x_3}{\sqrt{2}}\right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

where $\alpha(t)$ – arbitrary function. The streamlines are shown in Fig. 1 below.

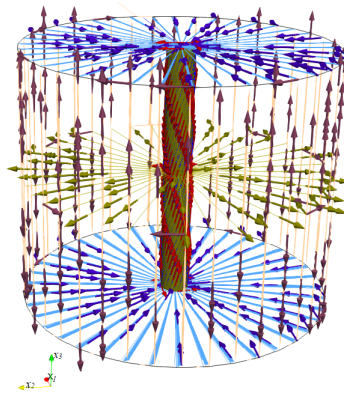


Figure 1. The streamlines in the cylinder C_k

REFERENCES

1. Galkin V.A. On One Class of Exact Solutions of the Navier–Stokes System of Equations for an Incompressible Fluid / V.A. Galkin, A.O. Dubovik // Mathematical Models and Computer Simulations. 2023. V. 15, Suppl. 1. pp. S78-S85. DOI: 10.1134/S2070048223070037.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОЛЯРИТОНА В СТРУКТУРАХ С ГРАФЕНОВЫМ СЛОЕМ

Бухенский К. В.¹, Дюбуа А. Б.^{1,a}, Конюхов А. Н.¹, Кучерявый С. И.²,
Сафошкин А. С.¹

¹ Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина,
г. Рязань, Российская Федерация

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва,
Российская Федерация

^a abd-69@mail.ru

Ключевые слова: модовый метод, дифракция электромагнитной волны, поверхностный поляритон.

Процессы возбуждения поверхностной волны (поляритона) в результате дифракции электромагнитного излучения в средах представляют собой одну из важнейших задач

интегральной оптики [1]. Особый интерес представляют процессы возбуждения и распространения электромагнитных волн вдоль планарных наноструктур, прежде всего на графене [2]. Однако даже в самом простом приближении решение уравнений Максвелла при заданных граничных и краевых условиях приводит к громоздким интегродифференциальным уравнениям, которые имеют строго аналитическое решение только для определенных геометрий структур.

В данной работе решена задача для поверхностной волны на планарной гетероструктуре, привлекательность которой объясняется следующими факторами:

1) относительная простота используемых теоретических моделей распространения электромагнитного излучения вдоль таких структур;

2) фундаментальность получаемых результатов, позволяющая обобщить их на более сложные геометрии структур;

3) планарная геометрия в достаточной степени близка к действительности.

В данной работе для исследования планарной структуры, в которой границы раздела — параллельные и перпендикулярные плоскости, используется модовый метод. Основная особенность метода — сведение достаточно сложных интегродифференциальных уравнений к алгебраическим. Суть метода — представление падающего, отраженного и прошедшего излучения как интеграла перекрытия мод. Исследование процесса возбуждения поверхностного поляритона на планарной структуре представляет собой обычную краевую задачу с заданными граничными условиями [3].

Рассмотрен процесс дифракции электромагнитной волны с гауссовым распределением на структуре из 4 сред с диэлектрическими проницаемостями: ε_1 — вакуум, $\varepsilon_2(\omega)$ — металл, $\varepsilon_3(\omega)$ — нелинейная тонкая пленка, ε_4 — полупроводник. При этом на границах раздела (2)-(3) и (3)-(4) возможно возбуждение поверхностного поляритона [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркузе Д. Оптические волноводы: пер. с англ. / под ред. В.В. Шевченко. Мир. М, 1974.
2. Chakraborty S., Marshall O.P., Folland T.G., Kim Y.-J., Grigorenko A.N., Novoselov K.S. // *Science*. 2016. Vol. 351. No. 6270. P. 246–248.
3. Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Конюхов А.Н., Кучерявый С.И., Машнина С.Н., Сафoshкин А.С. // *Журнал Средневолжского математического общества*. 2017. Т. 19. № 3. С. 73–81.
4. Дюбуа А.Б., Лысов Р.В. // *Математическое моделирование*. 2006. Т. 18. №3. С. 3–12.

SURFACE POLARITON PROPAGATION IN STRUCTURES WITH A GRAPHENE LAYER

Bukhensky K. V.¹, Dubois A. B.^{1,a}, Konukhov A. N.¹, Kucheryavyu S. I.²,
Safoshkin A. S.¹

¹ V.F. Utkin Ryazan State Radioengineering University, Ryazan, Russian Federation

² National Research Nuclear University (NRNU) MEPhI, Moscow, Russian Federation

^a abd-69@mail.ru

Keywords: mode method, diffraction of electromagnetic wave, surface polariton.

The processes of surface wave (polariton) excitation as a result of electromagnetic radiation diffraction in media represent one of the most important problems of integrated optics [1]. The excitation and propagation of electromagnetic waves along planar nanostructures, primarily

on graphene, are of particular interest [2]. However, even in the simplest approximation, the solution of the Maxwell equations under the given boundary and boundary conditions leads to the cumbersome integrodifferential equations, which have a strictly analytical solution only for certain geometries of the structures.

In this paper the problem for the surface wave on a planar heterostructure is solved, the attractiveness of which can be explained by the following factors:

- 1) relative simplicity of the used theoretical models of electromagnetic radiation propagation along such structures;
- 2) fundamentality of obtained results, allowing to generalize them to more complex geometries of structures;
- 3) planar geometry is sufficiently close to reality.

In this paper the mode method is applied to investigate the planar structure, in which the interfaces are parallel and perpendicular planes, is easily investigated within the framework of existing theories of plane and surface wave diffraction. The main feature of the method is the reduction of rather complex integrodifferential equations to algebraic ones. The essence of the method is to represent the incident, reflected, and transmitted radiation as an integral of mode overlap. Investigation of surface polariton excitation on a planar structure is an ordinary boundary value problem with given boundary conditions [3].

Consider the process of diffraction of an electromagnetic wave with a Gaussian distribution on the structure of 4 media with dielectric permittivities: ε_1 – vacuum, $\varepsilon_2(\omega)$ – metal, $\varepsilon_3(\omega)$ – nonlinear thin film, ε_4 – semiconductor. In this case, at the interfaces (2)-(3) and (3)-(4), excitation of a surface polariton is possible [4].

REFERENCES

1. Маркузе Д. Оптические волноводы: пер. с англ. / под ред. В.В. Шевченко. Мир. М, 1974.
2. Chakraborty S., Marshall O.P., Folland T.G., Kim Y.-J., Grigorenko A.N., Novoselov K.S. // Science. 2016. Vol. 351. No. 6270. P. 246-248.
3. Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Конюхов А.Н., Кучерявый С.И., Машнина С.Н., Сафопкин А.С. // Журнал Средневолжского математического общества. 2017. Т. 19. № 3. С. 73–81.
4. Дюбуа А.Б., Лысов Р.В. // Математическое моделирование. 2006. Т. 18. №3. С. 3-12.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ОБ ОБТЕКАНИИ ПРОФИЛЯ КРЫЛА

Рассадин А. А.^{1,2,а}, Ряховский А. В.^{1,2,б}

¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский филиал Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация

^а a.a.rassadin@yandex.ru, ^б ryakhovskij_av@surgu.ru

Ключевые слова: моделирование турбулентности, несжимаемая жидкость, OpenFOAM.

Как известно, в природе и технических устройствах преобладают турбулентные течения. Например, движение воздушных масс в атмосфере Земли, следы при обтекании судов, автомобилей и летательных аппаратов. Турбулентность обеспечивает интенсивное перемешивание вещества, этим часто пользуются в химической промышленности.

Непосредственное численное моделирование турбулентности приводит к значительным вычислительным затратам, поэтому существуют различные способы моделирования турбулентности. В рамках каждого из них существует несколько моделей, разработанных под конкретные частные случаи течений.

Платформа OpenFOAM является свободно распространяемой программной платформой для численного решения задач сплошной среды и, в частности, предоставляет возможность использования для решения задач гидродинамики реализованные модели турбулентных течений. Поэтому представляется целесообразным провести сравнение численных моделей, присутствующих в OpenFOAM, с моделями, реализованными в других программных комплексах, а также с результатами экспериментов.

В данной работе с использованием модели Спаларта–Аллмараса проведено численное решение задачи об обтекании крыла NACA0012 турбулентным потоком вязкой несжимаемой жидкости при различных углах атаки. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса OpenFOAM. На основе численного решения рассчитаны аэродинамические коэффициенты поверхностного трения, поверхностного давления, силы сопротивления и подъемной силы. Для полученных значений проведено сравнение с данными численных [1] и натурных [2, 3] экспериментов других авторов, которое показало качественную и количественную близость значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. 2D NACA 0012 Airfoil Validation Case. Текст: электронный // Turbulence Modeling Resource [сайт]. URL: https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012_val.html (дата обращения 03.10.2024).
2. Ladson C.L., Hill A.S., Johnson W.G. Pressure Distributions from High Reynolds Number Transonic Tests of an NACA 0012 Airfoil in the Langley 0.3-Meter Transonic Cryogenic Tunnel / C. L. Ladson, A. S. Hill, W.G. Johnson. Hampton, Virginia: NASA Research Center. 1987. 398 p.
3. Ladson C.L. Effects of independent variation of Mach and Reynolds numbers on the low-speed aerodynamic characteristics of the NACA 0012 airfoil section / C. L. Ladson. Hampton, Virginia: NASA Research Center. 1988. 97 p.

TURBULENCE MODELING USING THE EXAMPLE PROBLEM OF FLOW AROUND AN AIRFOIL

Rassadin A. A.^{1,2,a}, Ryakhovskiy A. V.^{1,2,b}

¹ *Surgut State University, Surgut, Russian Federation*

² *Surgut Office, Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Surgut, Russian Federation*

^a *a.a.rassadin@yandex.ru*, ^b *ryakhovskij_av@surgu.ru*

Keywords: turbulence modeling, incompressible fluid, OpenFOAM.

Turbulent flows prevail in nature and technical devices. For example, the movement of air masses in the Earth's atmosphere, wakes behinds moving ships, vehicles and aircraft. Turbulence provides intensive mixing of the matter, and this property is often used in the chemical industry.

Direct numerical simulation of turbulence leads to significant computational costs, so there are various methods of modeling turbulence. Within each of them, there are several models developed for specific cases of fluid flows.

The OpenFOAM platform is a freely distributed software platform for the numerical solution of the continuum mechanics problems and, in particular, provides the ability to use implemented turbulent flow models to solve hydrodynamic problems. Therefore, it seems appropriate to compare the numerical models present in OpenFOAM with models implemented in other software packages, as well as with the results of experiments.

In this paper, using the Spalart–Allmaras model, the problem of turbulent flow of viscous incompressible fluid around a NACA0012 wing at various angles of attack is numerically solved. The calculations are performed using the OpenFOAM software package. For the numerical solution, the aerodynamic coefficients of surface friction, surface pressure, drag force, and lift force are calculated. The obtained values are compared with the data of numerical [1] and natural experiments [2, 3] by other authors, which shows the qualitative and quantitative proximity of the results.

REFERENCES

1. 2D NACA 0012 Airfoil Validation Case // Turbulence Modeling Resource [site]. URL: http://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012_val.html.
2. Ladson C.L., Hill A.S., Johnson W.G. Pressure Distributions from High Reynolds Number Transonic Tests of an NACA 0012 Airfoil in the Langley 0.3-Meter Transonic Cryogenic Tunnel / C. L. Ladson, A. S. Hill, W.G. Johnson. Hampton, Virginia: NASA Research Center. 1987. 398 p.
3. Ladson C.L. Effects of independent variation of Mach and Reynolds numbers on the low-speed aerodynamic characteristics of the NACA 0012 airfoil section / C. L. Ladson. Hampton, Virginia: NASA Research Center. 1988. 97 p.

АКУСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛОПЕРЕНОС В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВИБРИРУЮЩЕМ КАНАЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТЕНОК

Губайдуллин А. А.^{1,а}, Пяткова А. В.^{1,б}

¹ Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация

^а a.a.gubaidullin@yandex.ru, ^б annyakovenko@yandex.ru

Ключевые слова: теплоперенос, акустическое течение, вибрация, нелинейные эффекты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00394, <https://rscf.ru/project/24-29-00394/>.

Рассматривается двумерный прямоугольный канал (полость) с непроницаемыми стенками, внутри которого находится воздух. Полость выводится из равновесия вибрационным воздействием $A \cos(\omega t)$ с постоянными частотой ω и амплитудой A . На стенках полости задано условие прилипания, при этом вертикальные стенки полости теплоизолированные, а горизонтальные стенки поддерживаются при постоянной температуре. Температура верхней стенки может быть как равна температуре нижней стенки, так и превышать ее. Колебательное движение газа внутри полости приводит к образованию акустического течения, которое представляет собой устойчивые вихри с определенным направлением вращения [1]. Присутствие перепада температур верхней и нижней стенок полости может привести к искажению вихревой картины акустического течения, что, в свою очередь, окажет влияние на характер распределения средней за период температуры и на тепловой поток через изотермические стенки полости. Численно решена полная система уравнений

Навье–Стокса для двумерного случая в декартовой системе координат. Использовалась методика расчета, описанная в работах [2,3]. За основу взят метод контрольного объёма, используется неявная численная схема по времени и шахматная равномерная расчётная сетка. В ходе исследования выявлено, что влияние изменения температуры одной из горизонтальных стенок на акустическое течение и теплообмен может проявляться по-разному, в зависимости от амплитуды и частоты вибрации полости. При увеличении перепада температур горизонтальных стенок может наблюдаться как уменьшение количества вихрей акустического течения, так и их увеличение в случае выраженной нелинейности процесса. Усиление нелинейности процесса может также привести к тому, что тепло будет покидать полость даже через более нагретую стенку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарембо Л. К. Акустические течения. Мощные ультразвуковые поля. Под ред. Л. Д. Розенберга. М. : Наука, 1968. Т. 2. С. 87–128.
2. Gubaidullin A. A., Pyatkova A.V. The effects of heat transfer through the ends of a cylindrical cavity on acoustic streaming and gas temperature. *Mathematics*. 2023. V. 11. P. 1840.
3. Зубков П.Т., Яковенко А.В. Влияние вибрации на область с газом при адиабатических и изотермических граничных условиях // *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20. № 3. С. 283–294.
4. Gubaidullin A. A., Pyatkova A.V. Acoustic streaming and heat transfer in a rectangular channel with differently heated horizontal walls. *Lobachevskii J. Mathematics*. 2024. V. 45. №5. P. 1980–1987.

ACOUSTIC STREAMING AND HEAT TRANSFER IN A RECTANGULAR VIBRATING CHANNEL WITH A TEMPERATURE DIFFERENCE BETWEEN HORIZONTAL WALLS

Gubaidullin A. A.^{1,a}, Pyatkova A. V.^{1,b}

¹ *Tyumen Branch of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation*

^a *a.a.gubaidullin@yandex.ru*, ^b *annyakovenko@yandex.ru*

Keywords: heat transfer, acoustic streaming, vibration, nonlinear effects.

The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 24-29-00394), <https://rscf.ru/project/24-29-00394/>.

A two-dimensional air-filled rectangular channel (cavity) with impermeable walls is considered. The cavity is disturbed by vibration action $A \cos(\omega t)$ with constant frequency ω and amplitude A . No-slip boundary conditions are specified on the walls of the cavity. In this case, the vertical walls of the cavity are thermally insulated, and the horizontal walls are maintained at a constant temperature. The temperature of the upper wall can be either equal to the temperature of the lower wall or higher. The oscillatory motion of the gas inside the cavity leads to the formation of acoustic streaming, which consists of stable vortices with a certain direction of rotation [1]. The presence of a temperature difference between the upper and lower walls of the cavity can lead to a distortion of the vortex pattern of acoustic streaming, which, in turn, will affect the nature of the distribution of the period average temperature and the heat flow through the isothermal walls of the cavity. The full compressible form of the Navier–Stokes equations for the two-dimensional case in a Cartesian coordinate system is solved numerically.

The calculation method described in [2,3] was used. The method is based on the finite volume method with an implicit staggered grid scheme. The study revealed that the effect of changing the temperature of one of the horizontal walls on acoustic streaming and heat transfer can manifest itself in different ways, depending on the amplitude and frequency of vibration. With an increase in the temperature difference of horizontal walls, both a decrease in the number of acoustic streaming vortices and their increase in the case of pronounced nonlinearity of the process can be observed. Increasing the nonlinearity of the process can also lead to heat leaving the cavity even through a hotter wall.

REFERENCES

1. Zarembo L. K. Acoustic streaming. High-intensity ultrasonic fields, edited by L. D. Rozenberg. New York: Plenum Press, 1971. Part III. P. 137–199.
2. Gubaidullin A. A., Pyatkova A.V. The effects of heat transfer through the ends of a cylindrical cavity on acoustic streaming and gas temperature. *Mathematics*. 2023. V. 11. P. 1840.
3. Zubkov P.T., Yakovenko A.V. // Vibration influence on a region with gas under the adiabatic and isothermal boundary conditions // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2013. V. 20. No. 3. P. 277–288.
4. Gubaidullin A. A., Pyatkova A.V. Acoustic streaming and heat transfer in a rectangular channel with differently heated horizontal walls. *Lobachevskii J. Mathematics*. 2024. V. 45. No. 5. P. 1980–1987.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УСИЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МОДЕЛИ ГЕОДИНАМО

Бычин И. В.^{1,2,а}, Гореликов А. В.^{1,2,б}

¹ Сургутский филиал Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
^а bychin_iv@surgu.ru, ^б gorelikov_av@surgu.ru

Ключевые слова: вычислительная магнитная гидродинамика, геодинамо.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

В гидромагнитном динамо магнитное поле генерируется механизмом самовозбуждения, который заключается в том, что определенные конфигурации течений проводящей жидкости могут усиливать слабое начальное магнитное поле, а затем поддерживать его в стационарном или квазистационарном состоянии, препятствуя затуханию. Представляется важным продемонстрировать эффект усиления магнитного поля методами вычислительной магнитной гидродинамики. В данной работе, рассматривается модель геодинамо с вакуумными граничными условиями для магнитного поля на внешней границе сферического слоя [1, 2]. Определяющими задачу безразмерными параметрами являются: Pr — число Прандтля, Pm — магнитное число Прандтля, E — число Экмана и Ra^* — модифицированное число Релея [1, 2]. Начальный уровень магнитного поля определяется параметром Λ ,

числом Эльзассера. Вычислительные эксперименты проводились с помощью разработанного авторами МГД-кода, адаптированного для работы на гибридных вычислительных системах с графическими процессорами. В коде реализован конечно-объемный метод решения задач резистивной магнитной гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости [3, 4]. В качестве начального магнитного поля рассматривалось слабое ($\Lambda = 10^{-2}$) однородное магнитное поле, направленное вдоль оси вращения сферического слоя. При проведении вычислительных экспериментов, для значений определяющих задачу параметров $Pr = 1$, $Pm = 5$, $E = 5 \cdot 10^{-4}$, $Ra^* = 200$ получено квазистационарное решение, в котором начальный уровень энергии магнитного поля в процессе генерации возрастает на три порядка. В полученном решении, поля температуры и скорости симметричны относительно экваториальной плоскости, а во внешнем магнитном поле преобладает дипольная составляющая.

ЛИТЕРАТУРА

1. U.R. Christensen, J. Aubert, Philippe Cardin, E. Dormy, S. Gibbons, et al. *A numerical dynamo benchmark*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol.128, issue.1–4, pp.25–34, 2001. DOI : 10.1016/S0031-9201(01)00275-8.
2. Hiroaki Matsui, Eric M. Heien, Julien Aubert, Jonathan Aurnou, Margaret Avery, et al. *Performance benchmarks for a next generation numerical dynamo model*. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016, 17 (5), pp.1586–1607. DOI:10.1002/2015GC006159
3. Бычин И.В., Гореликов А.В., Ряховский А.В. *Схема дискретизации уравнения индукции на смещенных сетках в ортогональных криволинейных координатах* // Успехи кибернетики. 2022. Т. 3, № 2. С. 60–73. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-2-8.
4. Бычин И.В. *Тестирование магнитогидродинамического кода на задачах естественной конвекции и геодинамо* // Успехи кибернетики. 2021. Т. 2, № 1. С. 6–13.

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF AMPLIFICATION OF THE INITIAL MAGNETIC FIELD IN THE GEODYNAMO MODEL

Bychin I. V.^{1,2,a}, Gorelikov A. V.^{1,2,b}

¹ Surgut Office, Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a bychin_iv@surgu.ru, ^b gorelikov_av@surgu.ru

Keywords: computational magnetohydrodynamics, geodynamo.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the FSI FSC SRISA RAS on topic No. FNEF-2024-0001 “Creation and implementation of trusted artificial intelligence systems based on new mathematical and algorithmic methods, fast computing models implemented on domestic computing systems” (1023032100070-3-1.2.1).

In a hydromagnetic dynamo, the magnetic field is generated by a self-excitation mechanism, which consists in the fact that certain configurations of conductive fluid flows can amplify a weak initial magnetic field and then maintain it in a stationary or quasi-stationary state, preventing attenuation. It is important to demonstrate the effect of magnetic field amplification using computational magnetohydrodynamics methods. In this paper, a geodynamo model with vacuum boundary conditions for the magnetic field at the outer boundary of a spherical layer is considered [1, 2]. The dimensionless parameters that determine the problem are: Pr is the Prandtl number, Pm is the magnetic Prandtl number, E is the Ekman number and Ra^* is the

modified Rayleigh number [1, 2]. The initial level of the magnetic field is determined by the parameter Λ , the Elsasser number. Computational experiments were carried out using the MHD code developed by the authors, adapted for operation on hybrid computing systems with graphics processors. The code implements a finite-volume method for solving problems of resistive magnetohydrodynamics of a viscous incompressible fluid [3, 4]. A weak ($\Lambda = 10^{-2}$) homogeneous magnetic field directed along the axis of rotation of the spherical layer was considered as the initial magnetic field. When conducting computational experiments, for the values of the parameters defining the problem $Pr = 1$, $Pm = 5$, $E = 5 \cdot 10^{-4}$, $Ra^* = 200$, a quasi-stationary solution was obtained in which the initial level of the magnetic field energy increases by three orders of magnitude during the generation process. In the obtained solution, the temperature and velocity fields are symmetrical relative to the equatorial plane, and the dipole component predominates in the external magnetic field.

REFERENCES

1. U.R. Christensen, J. Aubert, Philippe Cardin, E. Dormy, S. Gibbons, et al. *A numerical dynamo benchmark*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol.128, issue 1–4, pp.25–34, 2001. DOI:10.1016/S0031-9201(01)00275-8.
2. Hiroaki Matsui, Eric M. Heien, Julien Aubert, Jonathan Aurnou, Margaret Avery, et al.. *Performance benchmarks for a next generation numerical dynamo model*. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016, 17 (5), pp.1586–1607. DOI:10.1002/2015GC006159.
3. Bychin I.V., Gorelikov A.V., Ryakhovsky A.V. *Discretization Scheme of the Induction Equation on a Staggered Grid in Orthogonal Curvilinear Coordinates* // Russian Journal of Cybernetics. 2022. Vol. 3, № 2. P. 60–73. (In Russ.) DOI:10.51790/2712-9942-2022-3-2-8.
4. Bychin I.V. *Testing the Magnetohydrodynamic Analysis Software with Natural Convection and Geodynamo Problems* // Russian Journal of Cybernetics. 2021. Vol. 2, № 1. P. 6–13. (In Russ.) DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-1.

ЭФФЕКТ САСАКИ-ШИБУЙЯ В ДВУМЕРНОЙ ГРАФЕНОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

Глазов С. Ю.^{1,а}, Подгорная И. А.^{1,2,б}

¹ Волгоградский государственный социально-педагогический университет, г. Волгоград, Российская Федерация

² Волгоградский государственный медицинский университет, г. Волгоград, Российская Федерация

^а ser-glazov@yandex.ru, ^б pspia_78@mail.ru

Ключевые слова: двумерная графеновая сверхрешетка, плотность тока, кинетического уравнения Больцмана, эффект Сасаки-Шибуйя.

Численно исследовано выражение для плотности тока в двумерной графеновой сверхрешетке (2D ГСР) [1] в присутствии постоянного электрического поля [2]. 2D ГСР образованна графеном, осажденным на подложку из периодически чередующихся областей бесщелевого и щелевого графена. Для расчета тока использовано решение кинетического уравнения Больцмана с модельным интегралом столкновений в приближении постоянного времени релаксации. Энергетический спектр носителей заряда в такой системе непаробалличен, анизотропен, неаддитивен (анизотропная нелинейная среда), что приводит в общем случае к не сонаправленности вектора напряженности электрического поля и вектора плотности электрического тока (эффект Сасаки-Шибуйя). Исключением обычно является

случай линейного режима, когда выполняется закон Ома, или случай, когда поле приложено вдоль высокосимметричных направлений (для квадратной решетки [10], [01], [11]).

В случае квадратной симметричной 2D ГСР изучена зависимость угла Сасаки (угол между вектором напряженности постоянного электрического поля и вектором плотности тока) от угла поворота вектора напряженности постоянного электрического поля. Показано, что угол Сасаки нелинейно зависит от величины модуля напряженности постоянного электрического поля E . С увеличением E растёт максимальное значение угла Сасаки и достигается при меньших значениях углов между вектором напряженности постоянного электрического поля и осями СР. В сильных полях ($E > 100$ В/см) угол Сасаки равен нулю не только в случаях, когда вектор напряженности постоянного электрического поля направлен вдоль осей симметрии рассматриваемой структуры, но и еще для двух направлений, симметричных относительно биссекторной оси.

Выявленные эффекты объясняются особенностями энергетического спектра 2D ГСР, которые проявляются в специфической зависимости плотности тока от величины и направления приложенного сильного постоянного электрического поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kryuchkov S. V., Popov C. A. Two-dimensional graphene superlattice: energy spectrum and current-Voltage characteristics. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2017. V. 9, No. 2. P. 02013.
2. Бадикова П. В., Глазов С. Ю., Сыродоев Г. А. Высшие гармоники плотности тока в двумерной сверхрешетке на основе графена в условиях воздействия внешних электрических полей с учетом ионизации примеси. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2020. Т. 84. №. 1. С. 38–42.

THE SASAKI-SHIBUYA EFFECT IN A TWO-DIMENSIONAL GRAPHENE SUPERLATTICE

Glazov S. Yu.^{1,a}, Podgornaya I. A.^{1,2,b}

¹ *Volgograd State Socio-Pedagogical University, Volgograd, Russian Federation*

² *Volgograd State Medical University, Volgograd, Russian Federation*

^a *ser-glazov@yandex.ru*, ^b *pspia_78@mail.ru*

Keywords: two-dimensional graphene superlattice, current density, Boltzmann kinetic equation, Sasaki-Shibuya effect.

The expression for the current density in a two-dimensional graphene superlattice (2D GSL) is numerically investigated [1] in the presence of a constant electric field [2]. 2D GSL is formed by graphene deposited on a substrate from periodically alternating regions of slit-free and slit-free graphene. The solution of the kinetic Boltzmann equation with a model collision integral in the approximation of a constant relaxation time is used to calculate the current. The energy spectrum of charge carriers in such a system is non-parabolic, anisotropic, and non-additive (anisotropic nonlinear medium), which generally leads to a misdirection of the electric field strength vector and the electric current density vector (Sasaki-Shibuya effect). The exception is usually the case of linear mode, when Ohm's law holds, or the case when the field is applied along highly symmetric directions (for a square lattice [10], [01], [11]).

In the case of a square symmetric 2D GSL, the dependence of the Sasaki angle (the angle between the vector of constant electric field strength and the vector of current density) on the angle of rotation of the vector of constant electric field strength is studied. It is shown that

the Sasaki angle depends non-linearly on the magnitude of the modulus of the constant electric field E . With increasing E , the maximum value of the Sasaki angle increases and is achieved at lower values of the angles between the vector of the constant electric field and the axes of SL. In strong fields ($E > 100$ V/cm), the Sasaki angle is zero not only in cases where the vector of the constant electric field strength is directed along the axes of symmetry of the structure under consideration, but also for two more directions symmetrical with respect to the bisector axis.

The revealed effects are explained by the peculiarities of the 2D GSL energy spectrum, which manifest themselves in a specific dependence of the current density on the magnitude and direction of the applied strong constant electric field.

REFERENCES

1. Kryuchkov S. V., Popov C. A. Two-dimensional graphene superlattice: energy spectrum and current-Voltage characteristics. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2017. V. 9, No. 2. P. 02013.
2. Badikova P.V., Glazov S. Yu., Syrodov G.A Higher harmonics of current density in a two-dimensional graphene-based superlattice under the effect of external electric fields, allowing for the ionization of impurities. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020. V. 84, № 1. P. 30–34.

КЛАССИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА ТОМСОНА И ЕЕ ОБОБЩЕНИЕ

Ермаков С. В.^{1,а}, Ляпаев А. Ю.^{2,б}

¹ Обнинский институт атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

^а *ermakov@iate.obninsk.ru*, ^б *Tony-Jag@yandex.ru*

Ключевые слова: проблема Томсона, сфера, распределение, потенциал.

Проблема Томсона [1], известная как одна из нерешенных задач физики и математики, заключающаяся в поиске расположения заряженных частиц на поверхности сферы, которое отвечало бы глобальному минимуму потенциальной энергии их взаимодействия, на текущий момент имеет широкое практическое применение в самых разных областях наук [2,3]. Наибольший интерес для нас здесь составляет закономерность, обнаруженная в исследованиях Tim P. LaFave Jr.[4], где показано соответствие классической проблемы Томсона и атомной электронной структуры.

По настоящее время аналитически точные решения найдены лишь для небольшого количества частных случаев. Поэтому был разработан и представляется в рамках доклада метод, позволяющий описать распределение произвольного количества заряженных частиц и на его основе составить функциональную зависимость с потенциальной энергии данной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomson J. J. XXIV. On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the

- circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1904. T. 7. №. 39. C. 237–265.
2. Li S. et al. Why large icosahedral viruses need scaffolding proteins // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. T. 115. №. 43. C. 10971–10976.
 3. Gerasimov V. I., Trofimov A., Proskurina O. Isomers of fullerene C60 // Materials Physics and Mechanics. 2014. T. 20. №. 1. C. 25–32.
 4. LaFave Jr T. Correspondences between the classical electrostatic Thomson problem and atomic electronic structure // Journal of Electrostatics. 2013. T. 71. №. 6. C. 1029–1035.

THE CLASSICAL THOMSON PROBLEM AND ITS GENERALIZATION

Yermakov S. V.^{1,a}, Lyapaev A. Y.^{2,b}

¹ *Obninsk Institute for nuclear power engineering, Obninsk, Russian Federation*

² *National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation*

^a *ermakov@iate.obninsk.ru*, ^b *Tony-Jag@yandex.ru*

Keywords: Thomson's problem, sphere, distribution, potential.

The Thomson problem [1], known as one of the unsolved problems of physics and mathematics, which is in finding the location of charged particles on the surface of a sphere that would meet the global minimum of the potential energy of their interaction, currently has wide practical application in various fields of science [2,3]. The most interesting thing for us here is the pattern found in the research of Tim P. LaFave Jr.[4], where the correspondence of the classical Thomson problem and the atomic electronic structure is shown.

To date, analytically accurate solutions have been found only for a small number of special cases. Therefore, a method was developed and presented in the report that allows us to describe the distribution of an arbitrary number of charged particles and, based on it, to construct a functional dependence on the potential energy of a given system.

REFERENCES

1. Thomson J. J. XXIV. On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1904. T. 7. №. 39. C. 237–265.
2. Li S. et al. Why large icosahedral viruses need scaffolding proteins // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. T. 115. №. 43. P. 10971–10976.
3. Gerasimov V. I., Trofimov A., Proskurina O. Isomers of fullerene C60 // Materials Physics and Mechanics. 2014. T. 20. №. 1. P. 25–32.
4. LaFave Jr T. Correspondences between the classical electrostatic Thomson problem and atomic electronic structure // Journal of Electrostatics. 2013. T. 71. №. 6. P. 1029–1035.

РЕШЕНИЯ ВИДА ФРОНТА В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЯВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА

Никулин Е. И.^{1,а}, Орлов А. О.^{1,б}, Левашова Н. Т.^{1,в}, Волков В. Т.^{1,г}

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва,
Российская Федерация

^а nikulin@physics.msu.ru, ^б orlov.andrey@physics.msu.ru, ^в levashovant@physics.msu.ru,
^г volkovvt@mail.ru

Ключевые слова: реакция-диффузия-адвекция, малый параметр, внутренний переходный слой, движущийся фронт.

Работа поддержана грантом РНФ № 23-11-00069.

Рассматриваются начально-краевые задачи реакция-диффузия-адвекция следующего вида

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} - D\Delta u = f(u, \mathbf{x}, t), \mathbf{x} \in \Omega, t \in (0; T] \\ \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}}|_{\partial\Omega} = 0, \quad u(\mathbf{x}, 0) = u^0(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \bar{\Omega}, \end{cases}$$

Для существования у таких задач решений вида движущегося фронта необходимо наличие у них двух устойчивых положений равновесия. Подобное свойство обеспечивается специальным видом нелинейной функции $f(u, \mathbf{x}, t)$ в правой части уравнения. Наиболее часто для этого используются функции с кубической нелинейностью по переменной u или разрывные функции, имеющие скачок вдоль пространственной границы раздела сред или при достижении искомым функцией u некоторого порогового значения.

Если коэффициент диффузии D мал ($D \ll 1$), то уравнение является сингулярно возмущенным. Во многих системах, имеющих два устойчивых положения равновесия и описываемых сингулярно возмущенными уравнениями типа реакция-адвекция-диффузия, неоднородности коэффициентов уравнения определяют положение внутренних резких переходных слоев. Причиной существования таких слоев в малой окрестности некоторой точки может быть выполнение в этой точке условия баланса реакции, адвекции, реакции и адвекции, разрыв коэффициентов по пространственной координате (как конечный, так и слабый) или другие условия, налагаемые на неоднородные коэффициенты. Асимптотический анализ этих уравнений является необходимым этапом их исследования, поскольку позволяет выявить условия на исходные данные, при которых существуют решения с внутренними переходными слоями для создания адекватных математических моделей и проверки достоверности результатов численного моделирования

ЛИТЕРАТУРА

1. Божевольнов Ю.В., Нефедов Н.Н. *Движение фронта в параболической задаче реакция — диффузия*. Журн. вычисл. матем. и матем. физ., 2010, Т. 50, № 2, с. 276–285.
2. Нефедов Н.Н., Никулин Е.И., Орлов А.О. *Движение фронта в задаче со слабой адвекцией в случае непрерывного источника и источника модульного типа*. Дифференц. уравнения, 2022, Т. 58, № 6, с. 763–776, DOI 10.1134/S1061920822020042.
3. A.I. Volpert, V.A. Volpert. *Traveling-wave solutions of parabolic systems with discontinuous nonlinear terms*. Nonlinear Analysis, 2002, V. 49, p. 113–139, DOI:10.1016/S0362-546X(01)00103-1.

ПРОБЛЕМА ДЕСТРУКЦИИ ПОРОДЫ В ХРАНИЛИЩАХ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА: МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Левашова Н. Т.^{1,а}, Левашов П. А.^{2,б}, Сидорова А. Э.^{1,в}, Ерофеев Д. Н.^{3,г}

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Российская Федерация

² МГУ им. М.В. Ломоносова, химический факультет, г. Москва, Российская Федерация

³ НОВАТЭК, Российская Федерация

^а levashovant@physics.msu.ru, ^б levashovpa@my.msu.ru, ^в sky314bone@mail.ru,

^г erofeev@arcticspg1.ru

Ключевые слова: хранение CO_2 , пористая среда, поверхностные реакции, растворение породы.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-11-00069.

В условиях современной тенденции, ориентированной на низкоуглеродную энергетику, встает вопрос утилизации CO_2 . Одним из наиболее интересных природных объектов захоронения CO_2 являются пласты, расположенные в границах терригенных осадочных пород нефтегазоносных бассейнов и угольных бассейнов. Предполагается, что в таком виде CO_2 будет храниться неограниченно долгое время. Однако, в результате растворения углекислоты в содержащейся под землёй воде, понижается уровень pH и может произойти растворение части породы, что изменит структуру земной коры в области закачки. Этот процесс достаточно длительный (предположительно может занимать сотни лет), и для осознания его возможных последствий стоит использовать математическое моделирование. Порода представляет собой частично растворимую пористую среду и скорость её растворения определяется скоростью поверхностных реакций на стенках пор. В настоящей работе мы представляем микроскопическую модель поверхностных реакций. Для моделирования выбран куб с ребром в 1 мкм. Куб заполнен породой с пористостью 0.33. Поры содержат жидкую фазу CO_2 и воду с известными начальными значениями насыщенности. Математическое моделирование включает систему уравнений диффузии для компонентов реакций растворения CO_2 в воде и растворения части породы, а также модель изменения поверхности твёрдой фракции, использующую метод клеточных автоматов. Модель позволяет рассчитывать скорости поверхностных реакций внутри пористой среды и время, за которое возможно существенное изменение структуры породы при различных соотношениях насыщенностей воды и жидкой фазы CO_2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. RuinaXu, RongLi, JinMa, Di He and Peixue Jiang. *Effect of Mineral Dissolution/Precipitation and CO_2 Exsolution on CO_2 transport in Geological Carbon Storage*. Acc. Chem. Res.; 2017, 50, 9, 2056–2066, DOI: 10.1021/acs.accounts.6b00651 2017.
2. Stefan Bachu et.al. *CO_2 storage capacity estimation: Methodology and gaps*. International Journal of Greenhouse Gas Control; V.1, Issue 4, 2007, 430–443, doi:10.1016/S1750-5836(07)00086-2.

ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ВОЗМУЩЕННЫХ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Даник Ю. Э.^{1,а}, Дмитриев М. Г.^{1,б}, Макаров Д. А.^{1,в}

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук, г. Москва, Российская Федерация

^а yuliadanik@gmail.com, ^б mdmitriev@mail.ru, ^в makarov@isa.ru

Ключевые слова: задачи управления, асимптотические разложения, регулярно и сингулярно возмущенные краевые задачи, Паде аппроксимации, программные и синтезирующие конструкции.

При нахождении программных и синтезирующих конструкций могут возникать сингулярно возмущенные краевые задачи для программных управлений и такие же возмущенные начальные задачи для матричных дифференциальных уравнений типа Риккати. Первые результаты по асимптотике погранслойных решений в сингулярно возмущенных краевых задачах были получены в работах А. Б. Васильевой и В. А. Тупчиева. Эти результаты можно использовать для построения соответствующих погранслойных решений на границах временной области. Для приложений могут быть также полезны алгоритмы построения и использования так называемой численной асимптотики для интерполяционных и экстраполяционных процедур по параметрам семейств решений. Здесь возможно на основе асимптотик строить Паде аппроксимации для повышения точности приближений и получения законов управления в режиме реального времени. Приближенные законы обратной связи могут быть построены с помощью матричных решений соответствующих уравнений Риккати, формирующих матрицы коэффициентов усиления управлений. Здесь также могут быть использованы так называемые композитные управления, которые как показывают численные расчеты на основе объединения информации о нулевом и первом приближении могут значительно увеличить эффективность получающихся приближенных законов синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева А.Б., Дмитриев М.Г. Сингулярные возмущения в нелинейной задаче управления // В кн. «Актуальные проблемы мат. физики и вычисл. Матем.» М., Наука. 1984; 40–49.
2. Dmitriev M. G., Makarov D. A. The stabilizing composite control in a weakly nonlinear singularly perturbed control system // *Proceedings of 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia. 2017; 589–594.
3. Dmitriev M., Makarov D. An Iterative Method for Regulator Construction in a Weakly Nonlinear Singularly Perturbed Control Problem // *2022 16th International Conference on Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference)*. IEEE, 2022; 1–4. DOI: 10.1109/STAB54858.2022.9807591.
4. Дмитриев М.Г., Макаров Д.А. Алгоритм построения численной асимптотики к решениям одного класса нелинейных сингулярно возмущенных задач управления // *Сборник научных трудов XIV Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024)*, 17–20 июня 2024 г., Москва / Под общ. ред. Д.А. Новикова; Ин-т Проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. М.: ИПУ РАН, 2024.
5. Danik Yu., Dmitriev M. The construction of stabilizing regulators sets for nonlinear control systems with the help of Padé approximations // *Nonlinear Dynamics of Discrete and Continuous Systems*. Springer International. 2021; 45–62. DOI: 10.1007/978-3-030-53006-8 5.
6. Danik Yu.E., Dmitriev M.G. Construction of Parametric Regulators for Nonlinear Control Systems Based on the Pade Approximations of the Matrix Riccati Equation Solution // *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(32): 815–820. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.445.

APPROXIMATE SOLUTION OF PERTURBED OPTIMAL CONTROL PROBLEMS

Danik Yu. E.^{1,a}, Dmitriev M. G.^{1,b}, Makarov D. A.^{1,c}

¹ Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^a yuliadanik@gmail.com, ^b mdmitriev@mail.ru, ^c makarov@isa.ru

Keywords: control problems, asymptotic expansions, regularly and singularly perturbed boundary value problems, Padé approximations, program and synthesizing constructions.

When finding program and synthesizing constructions, singularly perturbed boundary value problems for program controls and singularly perturbed initial value problems for matrix differential equations of the Riccati type may arise. The first results on the asymptotics of boundary layer solutions in singularly perturbed boundary value problems were obtained in the works of A. B. Vasilyeva and V. A. Tupchiev. These results can be used to construct the corresponding boundary layer solutions on the boundaries of the time domain. Algorithms for constructing and using the so-called numerical asymptotics for interpolation and extrapolation procedures for the parametric set of solutions can also be useful for applications. Here, it is possible to construct Pade approximations based on asymptotics to improve the accuracy of approximations and obtain closed-loop control in real time. Approximate feedback laws can be constructed using matrix solutions of the corresponding Riccati equations, which form the matrices of control gains. So-called composite controls can also be used here, which, as shown by numerical calculations based on combining information on the zero and first approximations, can significantly increase the efficiency of the resulting approximate synthesis laws.

REFERENCES

1. Vasilyeva A. B., Dmitriev M. G. Singular Perturbations in a Nonlinear Control Problem // *In the book “Actual Problems of Mathematical Physics and Computational Mathematics”*. Moscow, Nauka. 1984; 40–49. (In Russian)
2. Dmitriev M. G., Makarov D. A. The stabilizing composite control in a weakly nonlinear singularly perturbed control system // *Proceedings of the 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia. 2017; 589–594.
3. Dmitriev M., Makarov D. An Iterative Method for Regulator Construction in a Weakly Nonlinear Singularly Perturbed Control Problem // *2022 16th International Conference on Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy’s Conference)*. IEEE, 2022; 1–4. DOI: 10.1109/STAB54858.2022.9807591.
4. Dmitriev M.G., Makarov D.A. Algorithm for constructing numerical asymptotics for solutions of one class of nonlinear singularly perturbed control problems // *Collection of scientific papers of the XIV All-Russian Conference on Control Problems (VSPU-2024)*, June 17–20, 2024, Moscow / Under the general editorship of D.A. Novikov; Trapeznikov Institute of Control Problems of the Russian Academy of Sciences. Moscow: IPU RAS, 2024. (In Russian)
5. Danik Yu., Dmitriev M. The construction of stabilizing regulator sets for nonlinear control systems with the help of Padé approximations // *Nonlinear Dynamics of Discrete and Continuous Systems*. Springer International. 2021; 45–62. DOI: 10.1007/978-3-030-53006-8 5.
6. Danik Yu.E., Dmitriev M.G. Construction of Parametric Regulators for Nonlinear Control Systems Based on the Pade Approximations of the Matrix Riccati Equation Solution // *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(32): 815–820. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.445.

Математическое моделирование в задачах атомной энергетики

Руководитель секции:

Владимир Леонидович Шаблов

Доктор физико-математических наук,
профессор, ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Section moderator:

Prof. Vladimir Leonidovich Shablov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Obninsk Institute of Atomic Energy

МОДЕЛЬ УЧЕТА ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАСЧЁТАХ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА И РАССЕЯНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ

Гуляев Д. Ю.^{1,a}

¹ ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Российская Федерация

^a *valeriy.148@yandex.ru*

Ключевые слова: модель переноса и рассеяния выбросов, термическая неоднородность подстилающей поверхности, бризовая циркуляция.

При возникновении аварий на технологических объектах появляются задачи, связанные с определением мер, необходимых для ликвидации последствий аварии и защиты населения. Особенности процедуры принятия решений в таких ситуациях вызывают необходимость разработки и применения компьютерных систем поддержки принятия решений (СППР). В составе таких СППР должен присутствовать расчетный модуль для оперативного моделирования процессов переноса и рассеяния выбросов в атмосфере. В число особенностей, которые должны учитываться при расчётах, входят атмосферные процессы, вызванные термической неоднородностью подстилающей поверхности (например, бризовые ветры). В данной работе приводится модель атмосферной циркуляции, которая учитывает эти особенности и предназначена для интеграции в СППР RECASS, разработанную и поддерживаемую в НПО «Тайфун» [1].

Приведенная в настоящей работе модель термической циркуляции основана на впервые предложенном в [2] подходе. Моделирование циркуляции осуществляется на основе решения модифицированных уравнений динамики атмосферы с соответствующими начальными и граничными условиями. Искомые величинами являются пространственно-временные распределения компонент вектора скорости ветра, в дальнейшем использующиеся при расчётах переноса и рассеяния.

Особое внимание в работе уделяется процедуре формирования набора начальных условий для интегрирования уравнений динамики атмосферы. В предлагаемой модели для построения начальных полей используется стационарное, горизонтально-однородное решение исходной системы, а также параметризации, определенные в [3].

В работе приводятся результаты верификации модели. Верификация проведена с использованием решений упрощенных аналитически разрешимых задач, а также некоторых совокупностей эмпирических данных. Процедура верификации продемонстрировала удовлетворительные результаты работы модели. Показано, что модель хорошо воспроизводит общие закономерности процессов переноса и рассеяния в условиях термической неоднородности подстилающей поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косых В.С., Бородин Р.В., Корнейчук Н.А. RECASS: система информационной поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций на радиационно и химически опасных объектах. // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Сборник статей. Том III. ГУ «НПО «Тайфун». Обнинск, 2010. С.24–35.
2. Pielke R.A. A three-dimensional numerical model of the sea breezes over south Florida // Monthly Weather Review. 1974. V. 102. pp. 115–139.
3. РД 52.18.717. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. Обнинск, 2009. 113 с.

THE MODEL OF ACCOUNTING FOR THERMAL SURFACE HETEROGENEITY FOR CALCULATIONS OF ATMOSPHERIC TRANSPORT AND DISPERSION OF RADIOACTIVE EMISSIONS

Gulyaev D. Y.^{1,a}

¹ *Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russian Federation*

^a *valeriy.148@yandex.ru*

Keywords: emission transport and dispersion model, thermal surface heterogeneity, sea breeze circulation.

When accidents occur at technological facilities, problems arise related to determining the measures necessary to eliminate the consequences of the accident and protect the population. The specific feature of the decision-making procedure in such situations requires the development and application of decision support computer systems (DSS). Such DSS should include calculation module for the operational modeling of the processes of emission transport and dispersion in the atmosphere. The features that should be taken into account in the calculations include atmospheric processes caused by thermal surface heterogeneity (e.g., sea breezes). This paper presents the model of atmospheric circulation that takes these features into account and is intended for integration into the RECASS DSS developed and maintained by RPA Typhoon [1].

The thermal circulation model presented in this paper is based on the approach first proposed in [2]. Circulation is modeled by solving modified equations of atmospheric dynamics with the suitable initial and boundary conditions. The required quantities are the spatial and temporal distributions of the wind velocity vector components, which are further used in transport and dispersion calculations.

Particular attention is paid to the procedure for forming the set of initial conditions for integrating the atmospheric dynamics equations. In the proposed model stationary, horizontally

homogeneous solution of the original system is used to construct the initial fields, as well as the parameterizations defined in [3].

The work presents the results of the model verification. Verification was carried out using solutions of simplified analytically solvable problems, as well as some sets of empirical data. The verification procedure demonstrated satisfactory results of the model. It is shown that the model reproduces well the general patterns of transport and dispersion processes under conditions of thermal inhomogeneity of the underlying surface.

REFERENCES

1. Kosykh V.S., Borodin R.V., Korneichuk N.A. RECASS: information support system for decision-making in emergency situations at radiation and chemically hazardous objects // Problems of Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Collection of articles. Volume III. RPA "Typhoon". Obninsk, 2010. pp. 24–35.
2. Pielke R.A. A three-dimensional numerical model of the sea breezes over south Florida // Monthly Weather Review. 1974. V. 102. pp. 115–139.
3. RD 52.18.717. Methodology for Calculating the Dispersion of Pollutants in the Atmosphere during Emergency Emissions. Obninsk, 2009. 113 p.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РОСТА ДЕФЕКТА В КОРПУСЕ РЕАКТОРА

Никитченко И. А.^{1,а}, Воробьев Ю. Б.^{1,б}, Аванов А. В.^{1,в}

¹ *Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Российская Федерация*

^а *NikitchenkoIA@mpei.ru*, ^б *VorobyevYB@mpei.ru*, ^в *AvanovAV@mpei.ru*

Ключевые слова: ядерный реактор, корпус реактора, рекуррентная нейронная сеть, прогнозирование, дефект металла.

В связи с увеличением срока эксплуатации реакторных установок водо-водяных реакторов до 60 лет, возможна некорректная оценка для вязкости разрушения при больших сроках эксплуатации корпуса. С другой стороны, в металле неизбежно могут присутствовать различные дефекты, возникающие как при производстве, так и при эксплуатации корпуса реактора. При этом дефект может быть не всегда выявлен, а размер дефекта не всегда может быть измерен достаточно точно[1].

Таким образом, возможны существенные трудности при прогнозировании и оценки сопротивления хрупкому разрушению, необходим новый адаптивный подход, позволяющий прогнозировать значения подраста дефекта, на основе имеющейся информации.

В данной работе рассматривался расчет на прочность корпуса реактора ВВЭР как при отсутствии, так и при наличии различных дефектов металла. Расчеты проводились с использованием расчетного кода ANSYS Mechanical. Рассматривались различные участки корпуса реактора и отслеживалось изменение напряженно-деформированного состояния при росте дефекта. Затем была проведена разработка методики для моделирования роста дефекта с помощью нейросетевой модели

Методика прогнозирования значений временных рядов с помощью нейросетей используется в различных областях науки. Кроме того, нейронные сети находят всё более широкое применение в ядерной энергетике, в том числе в задачах прочности и прогнозирования. Подрост дефекта рассматривался как значения временных рядов, при этом подрастание дефекта рассмотрено как марковский и немарковский процесс. При расчете подраста и

генерации временных рядов были рассмотрены различные режимы работы реакторной установки.

Для разработки нейросетевой модели выбрана архитектура NARX [2]. Была разработана программная реализация на языке Python, с использованием библиотеки PyTorch[3]. Проведено исследование влияния структуры и метода обучения на результат прогноза.

Разработанная методика позволяет более точно прогнозировать подрастание различных дефектов металла, особенно на больших сроках эксплуатации корпуса реактора, поскольку способна учесть данные от других схожих корпусов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Григорьев, С.П. Юременко, В.А. Пиминов, И.Ф. Акбашев, М.А. Быков, В.П. Шейн, А.А. Трибелев, В.Н. Левин, Н.А. Стребнев, В.М. Лапатин, М.М. Курносков, В.В. Королев, С.И. Сероштан, А.А. Стобецкий, А.Л. Гаврилов «Развитие подхода к анализу вероятности разрушения корпуса реактора ВВЭР-1000 ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС»», г. Подольск, Московская область, Россия
2. Хайкин С., Нейронные сети: полный курс / 2-е изд., испр. М.: 2006.
3. Python 3.12.5 Documentation, URL: <https://docs.python.org/>, 2024.

NEURAL NETWORK MODEL FOR PREDICTING DEFECT GROWTH IN A REACTOR VESSEL

Nikitchenko I. A.^{1,a}, Vorobyov Yu. B.^{1,b}, Avanov A. V.^{1,c}

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

^a NikitchenkoIA@mpei.ru, ^b VorobyevYB@mpei.ru, ^c AvanovAV@mpei.ru

Keywords: nuclear reactor, reactor vessel, recurrent neural network, forecasting, metal defect.

Due to the increase in the service life of water-cooled reactor units to 60 years, an incorrect assessment of the fracture toughness is possible with long service lives of the vessel. On the other hand, various defects may inevitably be present in the metal, arising both during production and during operation of the reactor vessel. In this case, the defect may not always be detected, and the size of the defect may not always be measured accurately enough[1].

Thus, significant difficulties may arise in predicting and assessing brittle fracture resistance, and a new adaptive approach is needed to predict defect growth values based on available information.

In this paper, we considered the calculation of the strength of the VVER reactor vessel both in the absence and in the presence of various metal defects. The calculations were carried out using the ANSYS Mechanical calculation code. We considered various sections of the reactor vessel and tracked the change in the stress-strain state with the growth of the defect. Then, we developed a technique for modeling the growth of the defect using a neural network model.

The method of forecasting time series values using neural networks is used in various fields of science. In addition, neural networks are increasingly used in nuclear power engineering, including in strength and forecasting problems. The growth of a defect was considered as a time series value, while the growth of a defect was considered as a Markov and non-Markov process. When calculating the growth and generating time series, various operating modes of the reactor facility were considered.

The NARX architecture [2] was chosen for the development of the neural network model. A software implementation was developed in Python using the PyTorch library [3]. A study was conducted on the influence of the structure and training method on the forecast result.

The developed method allows for more accurate prediction of the growth of various metal defects, especially over long periods of reactor vessel operation, since it is capable of taking into account data from other similar vessels.

REFERENCES

1. V.A. Grigoriev, S.P. Yuremenko, V.A. Piminov, I.F. Akbashev, M.A. Bykov, V.P. Shein, A.A. Tribelev, V.N. Levin, N.A. Strebnev, V.M. Lapatin, M.M. Kurnosov, V.V. Korolev, S.I. Seroshtan, A.A. Stobetsky, A.L. Gavrillov "Development of an approach to analyzing the probability of destruction of the VVER-1000 reactor vessel FSUE OKB "GIDROPRESS"", Podolsk, Moscow region, Russia
2. Khaikin S., Neural networks: a complete course / 2nd ed., corrected. M.: 2006.
3. Python 3.12.5 Documentation, URL: <https://docs.python.org/>, 2024.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗДАТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ С ДИСКРЕТНЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РАСЧЕТНЫХ КОМПЛЕКСАХ ANSYS FLUENT И OPENFOAM

Дудкин К. О.^{1,а}, Марков П. В.^{1,б}

¹ *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет) г. Москва, Российская Федерация*

^а *Dudkin_KO@nrcki.ru*, ^б *marrkov@list.ru*

Ключевые слова: гидродинамика, CFD-код, раздаточно-коллекторная система, модель крупных вихрей.

Характерной особенностью гидродинамики раздаточно-коллекторной системы (РКС) ядерных реакторов является наличие струйно-вихревых течений в напорной камере, оказывающих влияние на распределение массового расхода теплоносителя по активной зоне и, соответственно, на теплогидравлические процессы в ядерных энергетических установках. К настоящему времени на базе ФЭИ было проведено множество экспериментов, направленных на определение закономерностей распределения расхода в отводящих участках РКС [1]. В результате обработки данных этих экспериментов, сформулированы эмпирические зависимости, позволяющие оценивать гидродинамические характеристики осесимметричных РКС. Однако область применимости указанных соотношений достаточно ограничена.

Более общим подходом для описания гидродинамики РКС может служить математическое моделирование течений CFD-кодах. Наличие крупных вихрей, постоянно мигрирующих по объему напорной камеры РКС, делает предпочтительным использование моделей крупных вихрей (LES-Large Eddy Simulation) в качестве способа замыкания турбулентных напряжений. В связи со значительными вычислительными ресурсами, необходимыми для реализации LES-моделей, широкой практикой является использование RANS-расчета для инициализации начальных условий LES-расчета.

Бесспорным преимуществом программного средства OpenFOAM является его свободное распространение и открытый исходный код, что позволят предельно тонко настаивать имеющиеся модели для конкретной задачи или при необходимости составлять новые. К

настоящему времени выполнен ряд работ, сравнивающих результаты моделирования в OpenFOAM (OF) и Ansys FLUENT (AF) с применением RANS и LES методов [2,3].

Целью настоящей работы является сравнение кодов OF и AF применительно к решению задач моделирования гидродинамики РКС с помощью модели крупных вихрей. Для решения этой задачи был выполнен верификационный расчет течения жидкости в плоском канале со ступенькой. По результатам этого расчета выполнено сравнение средней энергии диссипации и кинетической энергии турбулентности в расчетной области, а также эволюции профиля скорости по длине моделируемого канала. После проведения верификации с помощью кодов AF и OF выполнен расчет цилиндрической РКС с дискретным подводом теплоносителя. По результатам моделирования произведено сравнение параметров турбулентного течения в напорной камере РКС, а также проведена оценка коллекторной неравномерности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Габрианович, Б. Н. Гидродинамические неравномерности теплоносителя на входе в активную зону ядерного реактора / Б. Н. Габрианович, В. Н. Дельнов // Атомная энергия. 2011. Т. 111, № 3. С. 177–180. EDN MXEDUS.
2. Ariza, C., Casado, C., Wang, R., et al. Comparative Evaluation of OpenFOAM® and ANSYS® Fluent for the Modeling of Annular Reactors. Chem. Eng. Technol., 41, 2018: pp.1473–1483
3. Wels, Prasa & Vaagsaether, K. (2018). Comparison of OpenFOAM and ANSYS Fluent.

COMPARING ANSYS FLUENT AND OPENFOAM SIMULATIONS OF DISCRETE DISTRIBUTING HEADER SYSTEMS

Dudkin K. O.^{1,a}, Markov P. V.^{1,b}

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

^a Dudkin_KO@nrcki.ru, ^b marrkov@list.ru

Keywords: hydrodynamics, CFD code, distribution-header system, LES.

A typical characteristic feature of the hydrodynamics of the distribution-header system (DHS) of nuclear reactors is the existence of jet currents in the header volume, which affect the distribution of the coolant mass flow rate in the core and, consequently, the thermal-hydraulic processes in nuclear power plants. To date, many experiments aimed at determining the patterns of flow rate distribution in the diverting sections of RCCs have been carried out at IPPE [1]. As a result of data processing of these experiments, empirical relations have been formulated that allow estimating hydrodynamic characteristics of axisymmetric DCSs. However, the area of applicability of these relations is rather limited.

A more general approach for description of DHS hydrodynamics can be mathematical modeling using CFD-codes. The existence of large eddies constantly migrating through the volume of the header of the DHS makes the use of LES (LES-Large Eddy Simulation) as a method of turbulent stress closure preferable. Due to the significant computational resources required to implement LES models, it is common practice to use RANS calculation to set the initial conditions for LES calculation.

The obvious advantage of the OpenFOAM software tool is its free distribution and open source code, which will allow to fine-tune the existing models for a particular problem or, if necessary, to create new ones. To date, a number of works comparing the results of modeling

in OpenFOAM (OF) and Ansys FLUENT (AF) using RANS and LES methods have been performed [2,3].

The purpose of the present work is to compare OF and AF codes with respect to solving the problems of modeling of DHS hydrodynamics using the LES-model. To solve this problem, a verification calculation of fluid flow in a flat channel with a step was performed. Based on the results of this calculation, the average dissipation energy and kinetic energy of turbulence in the computational domain, as well as the evolution of the velocity profile along the length of the modeled channel were compared. After verification using AF and OF codes, the calculation of a cylindrical DHS with discrete coolant supply was performed. Based on the modeling results, the parameters of turbulent flow in the pressure chamber of the DHS were compared, and the collector non-uniformity was evaluated.

REFERENCES

1. Gabrianovich, B. N. Hydrodynamic nonuniformities of the coolant at the inlet to the nuclear reactor core / B. N. Gabrianovich, V. N. Delnov // Atomic Energy. 2011. T. 111, № 3. p. 177–180. EDN MXEDUS.
2. Ariza, C., Casado, C., Wang, R., et al. Comparative Evaluation of OpenFOAM® and ANSYS® Fluent for the Modeling of Annular Reactors. Chem. Eng. Technol., 41, 2018: pp. 1473–1483
3. Wels, Prasa & Vaagsaether, K. (2018). Comparison of OpenFOAM and ANSYS Fluent.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ ПРЕДИКАТИВНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИКИ РЕАКТОРОВ ВВЭР

Увакин М. А.^а, Николаев А. Л., Антипов М. В., Дарьин Н. А., Рябов Г. А.

Акционерное Общество Опытное Конструкторское Бюро «ГИДРОПРЕСС»,

г. Подольск, Российская Федерация

^а *Uvakin_MA@grpress.podolsk.ru*

Ключевые слова: реактор ВВЭР большой мощности, расчетная модель, искусственная нейронная сеть, предикативный метод, машинное обучение.

Материалы доклада охватывают комплекс работ, выполняемых в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» в области расчетного моделирования динамических режимов на проектах реакторов ВВЭР большой мощности с трехмерной моделью нейтронной кинетики. Основной целью работ является обоснование безопасности, а в качестве основных инструментов используются программный комплекс КОРСАР/ГП, а также средства и методы математического моделирования, отвечающие современному уровню развития науки и техники. Для снижения трудоемкости и повышения производительности расчетных процедур предложен ряд разработок, основанных на использовании технологии искусственного интеллекта. Корректная постановка задач для использования искусственного интеллекта в атомной отрасли выполняется при строгом определении возможностей и ограничений использования данных технологий [1].

В докладе рассматриваются актуальные задачи моделирования процессов на реакторе ВВЭР: обоснование маневренных режимов, валидация программных средств, модернизация расчетных моделей. Представлены разработки по следующим основным направлениям:

- создание нейросетевых моделей для задач прогнозирования нелинейных динамических процессов (в зависимости от типа процессов рассматриваются нейронные сети прямого распространения и комплексные архитектуры на основе нейронных сетей сверточного и рекуррентного типа);

- использование машинного обучения в части учета экспериментальных данных в задачах валидации расчетной модели, описывающей нестационарные ксеноновые процессы;

- применение нейронных сетей и генетических алгоритмов для модернизации технологических средств подготовки параметрических библиотек малогрупповых констант.

Приведены основные положения постановки задач, описание алгоритмов решения и их программной реализации. На конкретных примерах демонстрируются возможности разработанных технологий и делаются оценки количественных показателей эффективности вычислений, анализируются критерии чувствительности, стабильности, релевантности и достижимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаева А.В., Увакин М.А., Пантюшин С.И., Сотсков Е.В., Николаев А.Л., Литышев А.В. Антипов М.В., Безруков Ю.А., Кавун О.Ю., Быков М.А. *Искусственный интеллект в области использования атомной энергии – существующие возможности и стратегические перспективы* // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2023 г., № 3, с. 4–16.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS APPLICATION IN THE TASKS OF VVER REACTOR DYNAMICS PREDICATIVE ANALYSIS

Uvakin M. A.^a, Nikolaev A. L., Antipov M. V., Daryin N. A., Ryabov G. A.
JSC OKB “GIDROPRESS”, Podolsk, Russian Federation

^a *Uvakin_MA@grpress.podolsk.ru*

Keywords: high-power VVER reactor, computational model, artificial neural network, predictive method, machine learning.

The materials of the report cover a set of works carried out in OKB “GIDROPRESS” in the field of computational modeling of dynamic modes on projects of high-power WVER reactors with a three-dimensional model of neutron kinetics. The main objective of the work is safety assessment, and the main tools used are the KORSAR/GP software package, as well as the means and methods of mathematical modeling that meet the current level of development of science and technology. To reduce labor intensity and increase the productivity of calculation procedures, a number of developments based on the use of artificial intelligence technology are proposed. Correct formulation of tasks for the use of artificial intelligence in the nuclear industry is carried out with a strict definition of the possibilities and limitations of using these technologies [1].

The report examines the current problems of modeling processes at the WVER reactor: maneuvering modes calculations, codes validation, modernization of calculation models. Developments in the following main areas are presented:

- creation of neural network models for the problems of forecasting nonlinear dynamic processes (depending on the type of processes, direct propagation neural networks and complex architectures based on convolutional and recurrent neural networks are considered);

- use of machine learning in terms of taking into account experimental data in the problems of validating a calculation model describing non-stationary xenon processes;

- use of neural networks and genetic algorithms to modernize technological tools for preparing parametric libraries of small-group constants.

The main provisions of the problem statement, description of the solution algorithms and their software implementation are given. Specific examples demonstrate the capabilities of the developed technologies and make assessments of quantitative indicators of the efficiency of calculations, analyze the criteria of sensitivity, stability, relevance and attainability.

REFERENCES

1. A.V. Nikolaeva, M.A. Uvakin, S.I. Pantyushin, E.V. Sotskov, M.V. Antipov, A.L. Nikolaev, A.V. Lityshev, Yu.A. Bezrukov, O.Yu. Kavun, M.A. Bykov *Artificial Intelligence in the Field of Atomic Energy Usage — Existing Possibilities and Strategic Perspectives* // VANT, Nuclear Reactor Physics, 2023. № 3. p. 4–16.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ СБОРА ИНЖЕНЕРНЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ДАННЫХ И ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ DIGITAL DECOMMISSIONING ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Любимов А. Ю.^{1,а}, Тихоновский В. Л.^{2,б}

¹ ООО «Лаборатория новых продуктов», г. Москва, Российская Федерация

² АО Группа компаний «НЕОЛАНТ», г. Москва, Российская Федерация

^а la@newproductslab.ru, ^б tikhonovsky@neolant.group

Ключевые слова: вывод из эксплуатации, объект использования атомной энергии, цифровая платформа Digital Decommissioning, заключительная стадия жизненного цикла, снижение стоимости, цифровая исполнительная инженерно-радиационная модель, роботизация, роботизированный комплекс сбора инженерных и радиационных данных.

Соглашение от 20.05.2024 № 574 о проведение пилотного тестирования инновационного решения с ГБУ «Агентство инноваций Москвы» для автономной навигации мобильных роботов с интеграцией внешнего оборудования и стороннего программного обеспечения. Протокол архитектурного совета Госкорпорации «Росатом» от 07.07.2021 о выборе цифровой платформы Digital Decommissioning в качестве базового ПО для реализации проекта «Корпоративная информационная система «Цифровая подготовка к выводу из эксплуатации».

Стадия вывода из эксплуатации (ВЭ) объектов использования атомной энергии (ОИ-АЭ) — самая трудоемкая, продолжительная по времени, методологически разнородная и наименее автоматизированная стадия из всех этапов жизненного цикла ядерного объекта. Помимо прочего, деятельность по ВЭ всегда несет большие риски: это и повышенные дозовые нагрузки на персонал, осуществляющий демонтаж, и обращение с массово образующимися радиоактивными отходами (переработка, захоронение) и, конечно, угроза безопасности населения и окружающей среды. А несовершенство методов оценки стоимости работ по ВЭ, с помощью которых невозможно достоверно наложить радиационную обстановку на объекте на его инженерно-топологическую конфигурацию, приводит к значительным погрешностям в расчетах — как в сторону экономии, так и, по большей части, в сторону превышения сметной стоимости. Применение цифровой платформы Digital Decommissioning совместно с роботизированными комплексами сбора инженерных и радиационных данных для снижения влияния человеческого фактора и защиты людей от

воздействия радиационного излучения обеспечит решение проблематики получения точных оценок затрат на ВЭ ОИАЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/12/19/141662>.
2. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271622002325?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=847579991e353380.

THE USE OF DIGITAL MODELS OF NUCLEAR ENERGY FACILITIES, ROBOTIC SYSTEMS FOR COLLECTING ENGINEERING AND RADIATION DATA AND A DIGITAL DECOMMISSIONING PLATFORM TO REDUCE DECOMMISSIONING COSTS

Lyubimov A. Y.^{1,a}, Tihonovsky V. L.^{2,b}

¹ *New Products LAB LLC, Moscow, Russian Federation*

² *NEOLANT Group of Companies, Moscow, Russian Federation*

^a *la@newproductslab.ru*, ^b *tikhonovsky@neolant.group*

Keywords: decommissioning, nuclear energy facility, digital Decommissioning platform, final stage of the life cycle, cost reduction, digital executive engineering and radiation model, robotization, robotic complex for collecting engineering and radiation data.

Agreement No. 574 dated 05/20/2024 on conducting pilot testing of an innovative solution with GBU “Moscow Innovation Agency” for autonomous navigation of mobile robots with integration of external equipment and third-party software. Protocol of the Architectural Council of the Rosatom State Corporation dated 07.07.2021 on the choice of the Digital Decommissioning digital platform as the base software for the implementation of the Corporate Information System Digital Decommissioning project.

The decommissioning stage (RE) of nuclear energy facilities (OIE) is the most time-consuming, time-consuming, methodologically heterogeneous and the least automated stage of all stages of the life cycle of a nuclear facility. Among other things, RE activities always carry great risks: these are increased dose loads on personnel carrying out dismantling, and handling of massively generated radioactive waste (recycling, burial) and, of course, a threat to the safety of the population and the environment. And the imperfection of methods for estimating the cost of work on RE, with the help of which it is impossible to reliably impose the radiation situation on the object on its engineering and topological configuration, leads to significant errors in calculations – both in the direction of economy and, for the most part, in the direction of exceeding the estimated cost.

The use of the Digital Decommissioning platform in conjunction with robotic complexes for collecting engineering and radiation data to reduce the influence of the human factor and protect people from exposure to radiation radiation will provide a solution to the problem of obtaining accurate estimates of the costs of nuclear power plants.

REFERENCES

1. <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/12/19/141662>.
2. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271622002325?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=847579991e353380.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ НА ДЕФЕКТАХ ПОВЕРХНОСТИ В СРЕДЕ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Авдеенков А. В.^{1,а}, Ачаковский О. И.^{1,б}

¹ Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский Институт по эксплуатации атомных электростанций», г. Москва, Российская Федерация

^а avavdeenkov@vniiaes.ru, ^б oiachakovskiy@vniiaes.ru

Ключевые слова: оксидная пленка, теплоноситель, коррозия, свинец.

Рассмотрена модель локальной коррозии конструкционных материалов в среде тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Наличие значительного количества локальных «неровностей» в виде шероховатой поверхности, то есть различного типа дефектов, может играть заметную роль в скорости и качестве образования защитной пленки. Эволюция оксидной пленки (рост или уменьшение ее толщины) является по определению неким переходным процессом или рядом переходных процессов от системы с одним набором параметров к системе с другим набором. Так как в общем случае рассмотреть дефект произвольной формы технически представляется трудоемкой работой, а более того и не обоснованной, рассмотрены три «явные» локальные неровности, которые наиболее часто встречаются, это круглая ступенька, обратная круглая ступенька и ямка. Рассмотрение таких геометрий вполне достаточно для общего понимания эволюции оксидной пленки в дефектах.

Сопряженная задача эволюции пленки и распределения концентраций кислорода и железа в свинцовом теплоносителе решалась [1] с использованием кода STAR CCM+.

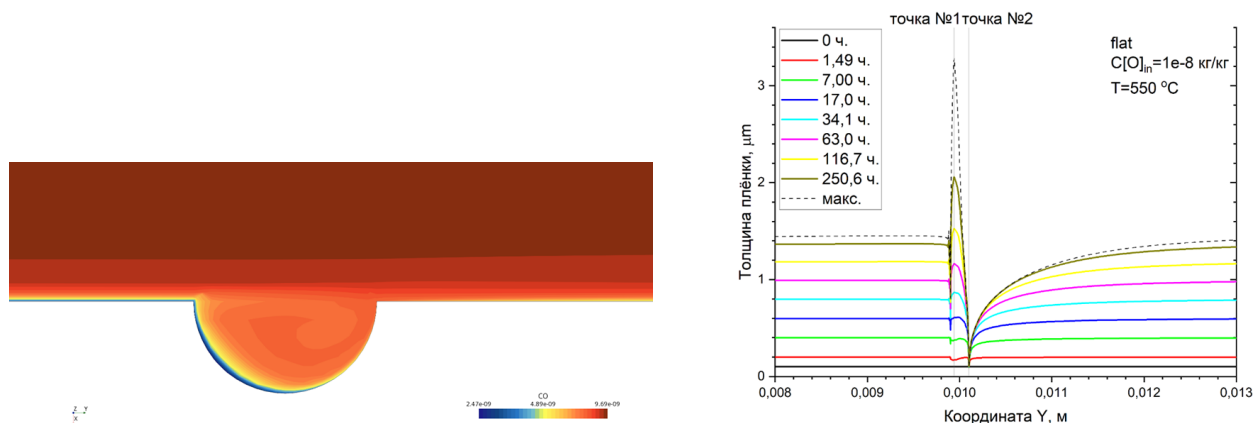


Рис. 1. Распределение кислорода в области дефекта в начальный момент времени и изменение толщины оксидной пленки вдоль поверхности дефекта при скорости теплоносителя 2 м/с

Таким образом в результате проведенных расчетов (пример на Рисунке 1) было продемонстрировано, что эволюция пленки в дефектах и на плоскости идет существенно по-разному; в дефектах существуют области, где пленка растет медленнее, чем на плоскости, но до заметно больших значений толщин; дефекты одновременно в одних точках обеспечивают заметный рост пленки, а в других точках наоборот происходит утонение пленки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Avdeenkov AV, Achakovsky OI, Ketlerov VV, Kumaev VYa, Orlov AI (2020) Basic models and approximation for the engineering description of the kinetics of the oxide layer of steel

in a flow of heavy liquid metal coolant under various oxygen conditions. *Nuclear Energy and Technology*. 6(3):215–234. <https://doi.org/10.3897/nucet.6.59068>

MODELING OF LIQUID METAL CORROSION ON SURFACE DEFECTS IN A LEAD COOLANT ENVIRONMENT

Avdeenkov A. V.^{1,a}, Achakovskiy O. I.^{1,b}

¹ “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” JSC, Moscow, Russian Federation

^a avavdeenkov@vniiaes.ru, ^b oiachakovskiy@vniiaes.ru

Keywords: oxide film, coolant, corrosion, lead.

A model of local corrosion of structural materials in a heavy liquid metal coolant environment is considered. The presence of a significant number of local “irregularities” in the form of a rough surface, that is, various types of defects, can play a significant role in the speed and quality of formation of the protective film. The evolution of an oxide film (growth or decrease in its thickness) is, by definition, a kind of transition process or a series of transition processes from a system with one set of parameters to a system with another set. Since in the general case, considering a defect of an arbitrary shape technically seems like labor-intensive work, and moreover, not justified, three “obvious” local irregularities that are most often encountered are considered: a round step, a reverse round step and a hole. Consideration of such geometries is quite sufficient for a general understanding of the evolution of the oxide film in defects.

The related problem of film evolution and the distribution of oxygen and iron concentrations in a lead coolant was solved [1] using the STAR CCM+ code.

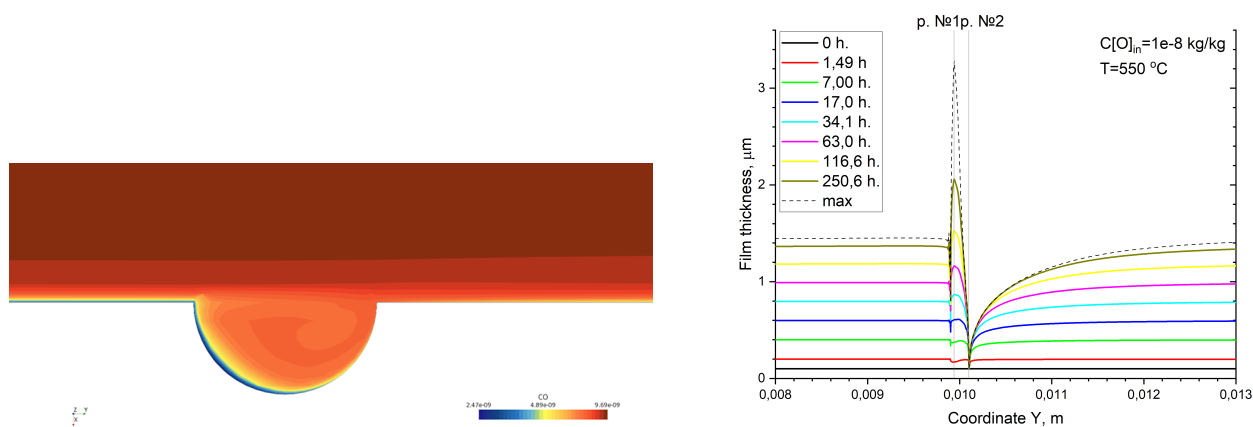


Figure 1. Oxygen distribution in the defect area at the initial time and change in the thickness of the oxide film along the surface of the defect at a coolant speed of 2 m/s

Thus, as a result of the calculations (example in Figure 1), it was demonstrated that the evolution of the film in defects and on the plane surface proceeds significantly differently; in defects there are areas where the film grows more slowly than on the plane, but to noticeably greater thicknesses; defects simultaneously at some points provide noticeable growth of the film, while at other points, on the contrary, thinning of the film occurs.

REFERENCES

1. Avdeenkov AV, Achakovskiy OI, Ketlerov VV, Kumaev VYa, Orlov AI (2020) Basic models and approximation for the engineering description of the kinetics of the oxide layer of steel

in a flow of heavy liquid metal coolant under various oxygen conditions. *Nuclear Energy and Technology* 6(3): 215–234. <https://doi.org/10.3897/nucet.6.59068>

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА КОРРЕЛЯЦИЙ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ

Горяев Р. А.^{1,а}, Пожидаев А. Р.^{1,б}

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет) г. Москва, Российская Федерация

^а rostik.goryaev@mail.ru, ^б Pozhidaev_AR@nrcki.ru

Ключевые слова: электротепловая аналогия, коэффициент теплоотдачи, корреляция, термосифон.

При проектировании теплотехнических устройств бывает важно провести предварительную оценку тепловых потоков и распределения температуры в элементах конструкции. Одним из методов расчёта, позволяющим оперативно оценивать теплофизические параметры системы в стационарном состоянии, является электротепловая аналогия. С её помощью процесс теплообмена может быть представлен в виде тепловой схемы, элементами которой являются источники и приёмники тепловой энергии и термические сопротивления (проводимости). Каждому узлу тепловой схемы ставится в соответствие определенная температура. Переменные величины в тепловой схеме (тепловые потоки и подогревы) подчиняются законам Ома и Кирхгофа. На основании этих законов тепловые схемы могут быть преобразованы и упрощены [1].

Обычно полное термическое сопротивление тепловой системы включает в себя составляющие, связанные с явлениями теплопроводности и конвекции. Интенсивность конвективного теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи, для определения которого в подавляющем большинстве случаев используются эмпирические зависимости. При этом для описания одного и того же процесса передачи тепла может существовать несколько вариантов корреляций, которые могли быть получены при различных методах и условиях эксперимента, из-за чего значения могут иметь существенные расхождения, а область их применения становится ограниченной [2, 3]. Кроме того, использование набора корреляций для описания одного и того же процесса тепловой системы может привести к значительным расхождениям других рассчитанных параметров.

Целью настоящей работы был расчёт теплофизических параметров двухфазного закрытого термосифона с водяным теплоносителем при помощи электротепловой аналогии. В ходе выполнения работы был проведён поиск различных корреляций для описания процессов фазовых превращений применительно к термосифонным системам. Было оценено влияние выбора корреляций на предельный уровень мощности термосифона. Выполнено сравнение результатов расчёта с имеющимися в открытых источниках экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко, В.П. *Теплопередача* / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергия, 1975. 488 с.
2. V. Guichet, H. Jouhara. *Condensation, evaporation and boiling of falling films in wickless heat pipes (two-phase closed thermosyphons): A critical review of correlations* // International Journal of Thermofluids. Vol. 1–2, pp. 1–37. 2020.

3. V. Guichet, S. Almahmoud, H. Jouhara. *Nucleate pool boiling heat transfer in wickless heat pipes (two-phase closed thermosyphons): A critical review of correlations* // Thermal Science and Engineering Progress. Vol. 13, pp. 1–32. 2019.

INFLUENCE OF THE CHOICE OF CORRELATIONS FOR HEAT TRANSFER COEFFICIENTS ON THE RESULTS OF CALCULATIONS USING ELECTROTHERMAL ANALOGY

Goryaev R. A.^{1,a}, Pozhidaev A. R.^{1,b}

¹ *Bauman Moscow State Technical University (National Research University) Moscow, Russian Federation*

^a *rostik.goryaev@mail.ru*, ^b *Pozhidaev_AR@nrcki.ru*

Keywords: electrothermal analogy, heat transfer coefficient, correlation, thermosiphon.

When designing thermotechnical devices, it is important to make a preliminary assessment of heat flows and temperature distribution in the elements of the structure. One of the calculation methods, which allows us to quickly assess the thermophysical parameters of the system in a stationary state, is electrothermal analogy. With its help, the heat exchange process can be represented in the form of a thermal scheme, the elements of which are sources and receivers of thermal energy and thermal resistances (conductances). Each node of the thermal scheme corresponds to a certain temperature. Variables in the thermal scheme (heat flows and heatings) are subject to Ohm's and Kirchhoff's laws. Based on these laws, thermal circuits can be transformed and simplified [1].

Usually, the total thermal resistance of a thermal system includes components related to the phenomena of heat conduction and convection. The intensity of convective heat exchange is characterized by the heat transfer coefficient, for the determination of which, in the vast majority of cases, empirical dependencies are used. At the same time, to describe the same heat transfer process, there may exist several variants of correlations that could be obtained under different methods and experimental conditions, due to which the values may have significant discrepancies, and their application area becomes limited [2, 3]. In addition, the use of a set of correlations to describe the same process of a thermal system can lead to significant discrepancies in other calculated parameters.

The aim of the present work was to calculate the thermophysical parameters of a two-phase closed thermosiphon with a water coolant using electrothermal analogy. In the course of this work, a search for different correlations to describe the phase transformation processes was carried out for thermosiphon systems. The influence of the choice of correlations on the thermosiphon power limit was evaluated. The calculation results were compared with the experimental data available in open sources.

REFERENCES

1. Isachenko, V.P. *Heat transfer* / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. Moscow: Energy, 1975. 488 p.(in Russ.)
2. V. Guichet, H. Jouhara. *Condensation, evaporation and boiling of falling films in wickless heat pipes (two-phase closed thermosyphons): A critical review of correlations* // International Journal of Thermofluids. Vol. 1–2, pp. 1–37. 2020.
3. V. Guichet, S. Almahmoud, H. Jouhara. *Nucleate pool boiling heat transfer in wickless heat pipes (two-phase closed thermosyphons): A critical review of correlations* // Thermal Science and Engineering Progress. Vol. 13, pp. 1–32. 2019.

ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СТРАТЕГИЙ ОБУЧЕНИЯ РАБОЧЕГО ПЕРСОНАЛА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Фонталины Е.^{1,а}, Заволженский В.¹, Пивень Н.¹, Щепалов С.², Сергиенко Н.²

¹ ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск, Россия

² НИУ МЭИ, Москва, Россия

^а *deav@inbox.ru*

Ключевые слова: искусственный интеллект, дополнительное профессиональное образование.

В современном мире образование играет ключевую роль в развитии личности, общества и экономики. В условиях постоянно меняющихся требований к профессиональной квалификации, специалисты любых областей вынуждены постоянно совершенствовать свои навыки и умения, чтобы оставаться востребованными и эффективными специалистами [1,2]. Проблема данного исследования заключается в необходимости разработки и внедрения технологий искусственного интеллекта в систему дополнительного профессионального обучения рабочего персонала тепловых электростанций (ТЭЦ), а именно операторов котельных и операторов главного щита управления, для своевременного реагирования на различные чрезвычайные ситуации. Это позволит адаптировать образовательный процесс к индивидуальным потребностям каждого обучаемого, оптимизировать работу преподавателей и улучшить результаты обучения в целом. Разработка и использования интеллектуальной обучающей системы для реализации дополнительного профессионального образования специалистов ТЭЦ, характеризуется автоматизацией всех процессов, возникающих в ходе обучения и контроля знаний/умений обучаемых, но главной особенностью подхода является возможность формирования персонализированной стратегии обучения, основанной на совокупной модели персоналии обучаемого. Вся информация об обучаемых, информация о преподаваемом курсе, представленном в виде онтологии, результатах прохождения обучения, результатах контроля обучаемых, индивидуальных рекомендациях на основании полученных результатов обучения и т.д. находится в единой среде и в любое время доступна обучаемому и/или контролирующему процесс обучения [3]. Персонализация образования на сегодняшний день стала необходимостью, позволяющей обучаемым развиваться в соответствии со своими интересами, способностями и особенностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузь Ю. А. Основы персонализации обучения в современном образовании // Образование и общество. 2023. № 6 (143). С. 20–27.
2. Шамсутдинова Т.М. Формирование индивидуальной образовательной траектории в адаптивных системах управления обучением. Открытое образование. 2021;25(6): 36–44.
3. Рыбина Г.В., Никифоров А.Ю., Фонталына Е.С., Григорьев А.А. Автоматизированное формирование персонифицированных стратегий обучения на основе интегрированных экспертных систем. Приборы и системы, Управление, Контроль, Диагностика. 6, 2023. С.14–23

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ МАЛОРАДИОАКТИВНОГО D-³He ТОПЛИВА

Годес А. И.^{1,а}, Шаблов В. Л.^{1,б}

¹ Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск,

Российская Федерация

^а godes.ai@yandex.ru, ^б shablov.vl@yandex.ru

Ключевые слова: управляемый термоядерный синтез, D-³He топливный цикл, критерий Лоусона, тройной критерий Лоусона.

Доклад посвящен результатам комплексных расчетных исследований в рамках альтернативной концепции топливного цикла ТЯР с магнитным удержанием плазмы, использующих D-³He топливо. Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена тем, что переход от традиционного для D-T топлива к D-³He топливу позволит решить ключевые проблемы D-T-цикла: необходимость обращения с радиоактивным тритием и так называемую проблему первой стенки, возникающую из-за интенсивного потока высокоэнергетических нейтронов из ТЯР [1]. Выполненные исследования позволили повысить точности предсказания характеристик D-³He топливного цикла термоядерных реакторов с магнитным удержанием плазмы на основе комплекса усовершенствованных методов и алгоритмов моделирования процессов в плазме. Для скоростей термоядерных реакций были использованы удобные в практическом применении аналитические параметризации, разработанные на основе приближения эффективного радиуса для описания сечений этих реакций [2], хорошо согласующиеся с данными базы NACRE II [3], которые приводятся в менее удобном табличном виде. С помощью решения уравнений кинетики процессов в плазме для двух основных сценариев использования D-³He топлива — полностью катализированного D-D цикла с эквимоллярным D-³He топливом и полностью катализированного D-D цикла с самообеспечением ³He были определены параметры критерия Лоусона и тройного критерия Лоусона в зависимости от параметра усиления ТЯР. Ранее в большинстве работ [4-5] эти параметры определялись для заниженных значений скоростей основной реакции D-³He → p + ⁴He, а исследование тройного критерия Лоусона в используемой постановке было выполнено в единичных работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжков С. В., Чирков А. Ю. *Системы альтернативной термоядерной энергетики*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. 200 с.
2. Godes A. I., Shablov V. L. Lawson criterion for different scenarios of using D-³He fuel in fusion reactors. *Nuclear energy and technology*. 2023;9(4);207–214; DOI:10.3897/nucet.9.114267.
3. Xua Y., Takahashia K., Gorielya S., et al Utsumiyad H. NACRE II: an update of the NACRE compilation of charged-particle-induced thermonuclear reaction rates for nuclei with mass number A < 16. *Nuclear Physics*. 2013; A918:61-181. DOI:10.1016 / j.nuclphysa.2013.
4. Khvesyuk V. I., Chirkov A. Yu. Low radioactivity D-3He fusion fuel cycles with 3He production. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2002;44: 263260. DOI: <https://doi.org/10.1088/07413335/44/2/308>.
5. Khvesyuk V. L. , Chirkov A. Yu. Parameters of D-T , catalyzed D-D , and D-3He tandem mirror reactors in burning operating. *J. Plasma Fusion Res. SERIES*. 2000; 3: 537–540.

COMPUTATIONAL STUDIES IN THE FOUNDATION OF THE CHARACTERISTICS OF THERMONUCLEAR INSTALLATIONS BASED ON LOW-RADIOACTIVE D-³He FUEL

Godes A. I.^{1,a}, Shablov V. L.^{1,b}

¹ Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russian Federation

^a godes.ai@yandex.ru, ^b shablov.vl@yandex.ru

Keywords: controlled thermonuclear fusion, D-³He fuel cycle, Lawson criterion, triple Lawson criterion.

The report is devoted to the results of complex calculation studies within the framework of an alternative concept of the fuel cycle of a nuclear magnetic confinement reactor using D-³He fuel. The relevance of the problem under consideration is due to the fact that the transition from traditional D-T fuel to D-³He fuel will allow solving the key problems of the D-T cycle: the need to handle radioactive tritium and the so-called first wall problem arising due to the intense flux of high-energy neutrons from a nuclear magnetic confinement reactor [1]. The studies performed allowed increasing the accuracy of predicting the characteristics of the D-³He fuel cycle of nuclear magnetic confinement reactors based on a set of advanced methods and algorithms for modeling processes in plasma. For the rates of thermonuclear reactions, convenient in practical application analytical parameterizations were used, developed on the basis of the effective radius approximation for describing the cross-sections of these reactions [2], which are in good agreement with the data of the NACRE II database [3], which are given in a less convenient tabular form. By solving the equations of plasma kinetics for two main scenarios of using D-³He fuel – a fully catalyzed D-D cycle with equimolar D-³He fuel and a fully catalyzed D-D cycle with self-sufficiency of ³He – the parameters of the Lawson criterion and the triple Lawson criterion were determined depending on the parameter of the nuclear fusion enhancement. Previously, in most studies [4-5], these parameters were determined for underestimated values of the rates of the main reaction $D + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^4\text{He}$, and the study of the triple Lawson criterion in the used formulation was performed in very few studies.

REFERENCES

1. Ryzhkov S. V., Chirkov A. Yu. *Systems of Alternative Thermonuclear Power Engineering*. Moscow. Fizmatlit Publ., 2017, 200 p. (in Russian).
2. Godes A. I., Shablov V. L. Lawson criterion for different scenarios of using D-³He fuel in fusion reactors. *Nuclear energy and technology*.2023;9(4);207–214; DOI:10.3897/nucet.9.114267.
3. Xua Y., Takahashia K., Gorielya S., et al Utsunomiyad H. NACRE II: an update of the NACRE compilation of charged-particle-induced thermonuclear reaction rates for nuclei with mass number $A < 16$. *Nuclear Physics*.2013; A918:61-181.DOI:10.1016 / j.nuclphysa.2013.
4. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Low radioactivity D-³He fusion fuel cycles with ³He production. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2002;44: 263260. DOI: <https://doi.org/10.1088/07413335/44/2/308>.
5. Khvesyuk V. L., Chirkov A. Yu. Parameters of D-T, catalyzed D-D, and D-³He tandem mirror reactors in burning operating // *J. Plasma Fusion Res. SERIES*. 2000. V. 3. P. 537–540.

РЕШЕНИЕ ЧАСТНОГО СЛУЧАЯ УРАВНЕНИЯ КИНЕТИКИ И ЕГО АНАЛИЗ

Данилюк Ю. С.^{1,а}, Зюзикова А. А.^{1,б}, Терехова А. М.^{1,в}

¹ ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск, Россия

Ключевые слова: уравнения кинетики, приближённый анализ.

В работе рассмотрено решение кинетических уравнений для важного частного случая и проведен анализ поведения реактора при изменении определенных параметров.

Не всегда имеется возможность аналитического решения уравнений кинетики, поэтому вводятся необходимые приближения и упрощения. Аналитические соотношения дают хорошее представление о поведении мощности реактора во времени при различных начальных условиях и вводимых возмущениях.

Для нахождения изменения количества нейтронов в реакторе от времени необходимо решить систему семи дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \lambda c + q \\ \frac{dc_i(t)}{dt} &= \frac{\beta}{\Lambda} n(t) - \lambda_i c_i(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где $i = 1, \dots, 6$.

Эта система содержит семь неизвестных функций: $n(t)$ и $c_i(t)$. К ним следует добавить зависимости, описывающие поведение во времени $\rho(t)$ реактивности и зависимость интенсивности внешнего источника нейтронов $q(t)$ от времени.

Для решения данной задачи надо знать начальные условия — количество нейтронов $n(0) = n_0$. При этом начальные количества эмиттеров запаздывающих нейтронов определяются из условия стационарного состояния реактора при $t = 0$. Получаем:

$$c_i(0) = \frac{\beta_i}{\lambda_i \Lambda} n(0).$$

Для качественного анализа временного поведения реактора рассмотрим уравнение кинетики в приближении одной группы запаздывающих нейтронов, т.е. будем считать, что все нейтроны имеют одну постоянную распада λ . Такой приближенный анализ дает качественно те же результаты, что и решение с шестью группами запаздывающих нейтронов, а в определенных случаях — даже близкие и количественные результаты.

Уравнения кинетики с одной группой запаздывающих нейтронов:

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \lambda c + q \\ \frac{dc}{dt} &= \frac{\beta}{\Lambda} n - \lambda c.\end{aligned}\tag{2}$$

Решение выполнялось для подкритического реактора с источником нейтронов при введении в него реактивности. Начальные условия принимались такими:

$$\rho = \rho_0, \quad q = q_0\tag{3}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Казанский Ю. А., Слекеничс Я. В. Кинетика ядерных реакторов. Коэффициенты реактивности. Введение в динамику: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 300 с.
2. Аристов А. И. Нелинейные дифференциальные уравнения: лекции и задачи: учебное пособие. М.: Издательство Московского университета, 2023. 233 с.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ ДЛЯ КОЛЬЦЕВОГО РЕАКТОРА

Терехова А. М.^{1,а}, Трухачев А. А.^{1,б}

¹ Обнинский институт атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», г. Обнинск, Российская Федерация
^а amterekhova@mephi.ru, ^б 2004truhachevalexei@mail.ru

Ключевые слова: кольцевой реактор, плотность потока нейтронов, диффузия нейтронов.

Большинство ядерных энергетических установок имеет цилиндрическую форму. Сферические и прямоугольные реакторы распространены в меньшей степени.

Есть ряд работ рассматривающие решение уравнение диффузии для концевых реакторах [3–4]. В данной работе рассмотрены модели реактора в форме кольца в форме кольца с несколькими активными зонами, отражателем и различными видами топлива. Для упрощения, в первом приближении рассматривается бесконечный по высоте реактор.

Для расчета плотности потока нейтронов использовалось однострунное уравнение диффузии нейтронов [1–2]:

$$[(\Delta - \Lambda_1) (\Delta - \Lambda_2)] \Phi_T(r) = 0 \quad (1)$$

где $\Lambda_{1/2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{L^2} + \frac{1}{\tau} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{L^2} + \frac{1}{\tau} \right)^2 + \frac{1}{L^2 \tau} \left(\frac{K_\infty}{K_{\text{эф}}} - 1 \right)}$.

В результате расчетов были получены значения плотности потока нейтронов и коэффициентов неравномерности кольцевого реактора по радиусу с различными геометрическими параметрами, для разного количества активных зон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диффузия нейтронов: Учеб. пособие по курсу «Физ. теория ядер. реакторов» / М. Н. Николаев; Обнин. ин-т атом. энергетики, Физ.-энерг. ин-т. Обнинск : ОИАЭ, 1989.
2. Ганев И. Х. Физика и расчет реактора : Учеб. пособие для энергомашиностроит. спец. вузов / Под общ. ред. Н. А. Доллежалея. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1992.
3. Волков Ю. В., Румянцев Г. Я. Элементарная теория кольцевого ядерного реактора (Об устойчивости кольцевых реакторов) // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2004. №. 2. С. 38–38.
4. Старостин, М. И. Ядерный реактор кольцевой (дуговой) формы и математический анализ процессов, протекающих в нём / М. И. Старостин, А. А. Силян // Современные проблемы физики и технологий : Сборник тезисов докладов X Международной молодежной научной школы-конференции, Москва, 25–27 апреля 2023 года. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2023.

ВЕРИФИКАЦИЯ CFD-МОДЕЛИ РЕКОМБИНАТОРА ВОДОРОДА РВК500 НА СТЕНДЕ БМ-П

Зыонг Куанг Хыонг¹, Авдеенков А. В.^{1,2}

¹ ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Россия

² АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Россия

Ключевые слова: химическая кинетика, рекомбинация водорода.

Существенной частью подхода является использование детального механизма химической кинетики водорода и кислорода, что позволяет избежать частно используемой подгоночной процедуры при определении параметров одношаговой реакции для описания производительности рекомбинатора [1]. Данный подход позволяет согласованно рассчитывать производительность рекомбинатора при любых режимах и определять порог беспламенной рекомбинации, что однозначно является необходимым при численном обосновании тяжелых аварий с входом водорода. Для тестирования разработанной методики численного обоснования работы рекомбинатора в среде с изменяющимися параметрами и обоснования протекающих переходных (нестационарных) процессов использованы данные, полученные в испытании рекомбинатора водорода РВК-500 (производства ЗАО «ИНПК РЭТ»), на стенде БМ-П. В данной работе использовались данные только одного теста, а именно БМ-П Р13п (естественная циркуляция) и БМ-П Р19п (принудительная циркуляция) (2). На рисунке 1 показано сравнение рассчитанной и экспериментальной скоростей рекомбинации водорода с учетом экспериментальных погрешностей. Получено достаточно хорошее согласие. Также приведена рассчитанная производительность рекомбинатора РВК-500 по формуле РЭТ. Как видно, результат расчета по предлагаемой модели (1) существенно лучше описывает данным эксперимента.

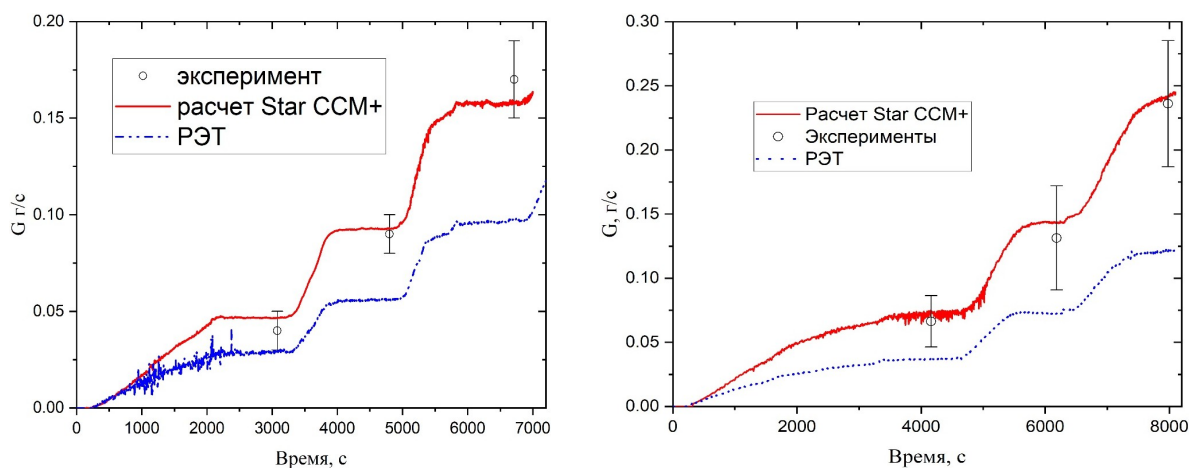


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные производительности рекомбинатора РВК500 в испытании Р13п (слева), Р19п (справа)

ЛИТЕРАТУРА

1. Зыонг Кунг Хыонг., Авдеенков А. В., В.В Кетлеров., Верификация CFD-модели рекомбинатора водорода РВК - 500 с использованием детального механизма реакции рекомбинации // XVI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2023. С. 74–76.
2. Валидация численной модели рекомбинатора водорода РВК-500 / С. Г. Калякин, А. В. Кошечев, М. К. Седов [и др.] // Теплоэнергетика : ежемесячный теоретический и научно-практический журнал / учредители: Рос. акад. наук, Рос. науч.-техн. о-во энергетиков и электротехников. Москва. 2024. N 3. С. 5–17.

Авторский указатель | Author index

А

Аванов А. В., 71
Авдеенков А. В., 79, 87
Акобян Т. С., 26
Аксенов С. В., 44
Антипов М. В., 75
Ачаковский О. И., 79

Б

Белоусов П. А., 44
Бухенский К. В., 53
Бычин И. В., 59

В

Волков В. Т., 65
Воробьев Ю. Б., 71

Г

Гавриленко Т. В., 25
Галкин В. А., 16, 51
Глазов С. Ю., 61
Годес А. И., 84
Голубев В. И., 47, 49
Гореликов А. В., 59
Горяев Р. А., 81
Губайдуллин А. А., 57
Гуляев Д. Ю., 69

Д

Даник Ю. Э., 66
Данилюк Ю. С., 86
Дарьин Н. А., 75
Деев Г. Е., 39
Диденко В. И., 44
Дмитриев М. Г., 66
Дубовик А. О., 51
Дудкин К. О., 73
Дюбуа А. Б., 53

Е

Ермаков С. В., 39, 63
Ерофеев Д. Н., 66

З

Заволженский В., 83
Замков Д. В., 44
Замятин Н. В., 34
Зыонг Куанг Хыонг, 87
Зюзикова А. А., 86

К

Кабанихин С. И., 18
Камынин В. Л., 28
Карпенко Е. И., 42
Кожемяченко А. А., 35
Конюхов А. Н., 53
Кощеев В. П., 28
Кречетников В. В., 42
Кучерявый С. И., 53

Л

Левашов П. А., 66
Левашова Н. Т., 65, 66
Леонов А. С., 19
Лихоманов А. А., 44
Любимов А. Ю., 77
Ляпаев А. Ю., 63

М

Макаров Д. А., 66
Маковкин В. И., 34
Марков П. В., 73
Марухина О. В., 44
Моисеева А. К., 44
Молчанова М. В., 44
Моргун Д. А., 37
Мышев А. В., 32, 33

Н

Нагорнов О. В., 19
Нестеров А. В., 21
Никитченко И. А., 71
Николаев А. Л., 75
Никулин Е. И., 65

О

Орлов А. О., 65

П

Пивень Н., 83
Подгорная И. А., 61
Пожидаев А. Р., 81
Поспелов Д., 42
Пяткова А. В., 57

Р

Рассадин А. А., 55
Рябов Г. А., 75
Ряховский А. В., 55

С

Сафошкин А. С., 53
Секованов В. С., 29
Сергиенко Н., 83
Сидорова А. Э., 66
Смирнов Г. В., 34
Соломатин В. М., 42
Спиридонов С. И., 42

Т

Терехова А. М., 86, 87
Титов И. Е., 42
Тихоновский В. Л., 77
Трухачев А. А., 87
Тюфлин С. А., 19

У

Увакин М. А., 75

Ф

Фаворская А. В., 35, 49
Фонталиня Е., 83

Х

Хохлов Н. И., 22

Ч

Чеповский А. А., 24
Чеповский А. М., 24

Ш

Шаблов В. Л., 84
Шапошникова И. В., 29
Шлапак Н. В., 44
Штанов Ю. Н., 28

Щ

Щепалов С., 83

А

Achakovskiy O. I., 80
Akobyan T. S., 27
Aksenov S. V., 45
Antipov M. V., 76
Avanov A. V., 72
Avdeenkov A. V., 80

В

Belousov P. A., 45
Bukhensky K. V., 54
Bychin I. V., 60

Д

Danik Yu. E., 68
Daryin N. A., 76
Deev G. E., 40
Didenko V. I., 45
Dmitriev M. G., 68
Dubois A. B., 54
Dubovik A. O., 52
Dudkin K. O., 74

Е

Ermakov S. V., 40

Ф

Favorskaya A. V., 36, 50

Г

Galkin V. A., 17, 52
Glazov S. Yu., 62
Godes A. I., 85
Golubev V. I., 48, 50
Gorelikov A. V., 60
Goryaev R. A., 82
Gubaidullin A. A., 58
Gulyaev D. Y., 70

К

Khokhlov N. I., 23
Konukhov A. N., 54
Kozhemyachenko A. A., 36
Kucheryavyu S. I., 54

Л

Leonov A. S., 20
Likhomanov A. A., 45
Lyapaev A. Y., 64
Lyubimov A. Y., 78

М

Makarov D. A., 68

Markov P. V., 74
Marukhina O. V., 45
Moiseeva A. K., 45
Molchanova M. V., 45
Morgun D. A., 38

N

Nagornov O. V., 20
Nikitchenko I. A., 72
Nikolaev A. L., 76

P

Podgornaya I. A., 62
Pospelov D., 43
Pozhidaev A. R., 82
Pyatkova A. V., 58

R

Rassadin A. A., 56
Ryabov G. A., 76
Ryakhovskiy A. V., 56

S

Safoshkin A. S., 54
Sekovanov V. S., 31
Shablov V. L., 85
Shaposhnikova I. V., 31
Shlapak N. V., 45

T

Tihonovsky V. L., 78
Tyufilin S. A., 20

U

Uvakin M. A., 76

V

Vorobyov Yu. B., 72

Y

Yermakov S. V., 64

Z

Zamkov D. V., 45

Международная математическая конференция «Современные
математические модели в энергетике», посвящённая памяти профессора,
д.ф.-м.н. В. А. Тупчиева
Сборник тезисов научной конференции

Тексты статей печатаются в авторской редакции

Оригинал-макет подготовил Д. А. Моргун

Подписано в печать 02.12.2024.

Формат $60 \times 84 \frac{1}{8}$. Печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 10,5.
Тираж 100 экз. Изд. № 027-2. Заказ № 113.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
Типография НИЯУ МИФИ. 115409, Москва, Каширское ш., д. 31.