

Математический институт имени В.А.Стеклова РАН
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова
Институт системного программирования им. В.П. Иванникова
Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

Steklov Mathematical Institute of RAS
Ammosov North-Eastern Federal University
Ivannikov Institute for System Programming of RAS
Bauman Moscow State Technical University

**СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

IV международная конференция

**SUPERCOMPUTER TECHNOLOGIES OF
MATHEMATICAL MODELLING**

IV international conference

**Тезисы докладов
Abstracts**

June, 19 – 21, 2019 / 19 – 21 июня 2019 г.
Moscow, Russia / Москва, Россия

Якутск
2019

УДК 519.8:004.9(063)

ББК 22.18я431

С11

Суперкомпьютерные технологии математического моделирования : тезисы докладов IV международной конференции / Под редакцией В.И. Васильева. – Якутск : Издательский дом СВФУ, 2019. – 99 с.

ISBN 978-5-7513-2721-7

В сборник включены тезисы докладов, представленных на IV международной конференции «*Суперкомпьютерные технологии математического моделирования*».

Для научных и инженерно–технических работников, занимающихся вычислительной математикой и математическим моделированием.

Конференция организована при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-01-20037

УДК 519.8:004.9(063)

ББК 22.18я431

© Математический институт имени В.А.Стеклова РАН, 2019

ISBN 978-5-7513-2721-7

© Северо-Восточный федеральный университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

1 Математические проблемы механики сплошных сред	14
<u>Агишева У.О.</u> Особенности отражения звука на границе раздела однофазной им двухфазной систем	14
<u>Бахолдин И.Б.</u> Уравнения, описывающие волны в трубах с упругими стенками, методы их расчета	15
<u>Богомолов Н.В.</u> Моделирование процесса отделения малых космических аппаратов от контейнера, установленного на грузовом корабле	15
<u>Булатов В.В.</u> Дальние поля внутренних и поверхностных гравитационных волн при нестационарных режимах генерации	16
<u>Бояринцева Т.Е.</u> Траекторные портреты для двух возмущённых центрально симметричных систем точечных вихрей	16
<u>Вигдорovich И.И.</u> Законы стенки для скорости и температуры в сверхзвуковом турбулентном пограничном слое	17
<u>Владимиров И.Ю.</u> Оценка циркуляционного обтекания трубопровода придонным морским течением	18
<u>Боронина М.А., Вишивков В.А., Вишивкова Л.В., Генрих Е.А., Дудникова Г.И., Черных И.Г.</u> Гибридные модели открытых плазменных ловушек	19
<u>Гаврильева А.А.</u> К линейной устойчивости сдвиговых течений идеальной стратифицированной жидкости: методы исследования и новые результаты	20
<u>Gavrilyuk S.</u> Structure of the hydraulic jump in convergent radial flows	20
<u>Голубятников А.Н., Украинский Д.В.</u> О периодических решениях в нелинейных задачах механики сплошной среды и их численной реализации	21
<u>Гордеева Н.М.</u> Математическое моделирование поведения плазмы в слое	22
<u>Губайдуллин Д.А.</u> Математические модели, особенности и эффекты волновой динамики многофазных сред	22

<u>Доброхотов С.Ю.</u> Аналитико-численные алгоритмы расчета локализованных решений в задачах о распространении и набеге на берег длинных волн на воде	23
<u>Дружков К.П., Аксенов А.В.</u> Контактные симметрии и законы сохранения первого порядка уравнения одномерной мелкой воды над неровным дном в лагранжевых переменных	24
<u>Калугин А.Г., Павлов Д.В.</u> Об ориентационной неустойчивости в пленках нематических жидких кристаллов	24
<u>Конопельчев М.А., Бакулин В.Н., Недбай А.Я.</u> Моделирование аэроупругой устойчивости композитных оболочек, подкрепленных цилиндром с переменным каналом	25
<u>Корчагин Н.Н., Владимиров И.Ю.</u> Модельные оценки циркуляционного обтекания объектов в морской среде и атмосфере	26
<u>Kuzmin A.G.</u> Non-uniqueness of transonic flow in an intake-type channel	26
<u>Леонтьев Н.Е.</u> Задача о закачке суспензии в пористую среду в рамках двухскоростной модели объемной фильтрации	27
<u>Li Shuguang</u> Mathematical model of local process of filtration for non-Newtonian fluid in porous fabrics . .	27
<u>Литвинов В.Л.</u> Нелинейные математические модели продольно-поперечных колебаний одномерных механических объектов с движущимися границами	28
<u>Максимова А.Г.</u> Расчет смещений вокруг трещины, образовавшейся при импульсной тепловой нагрузке . .	28
<u>Мастихин А.В.</u> Вычисление финальных вероятностей общей эпидемии	29
<u>Никитин Н.В.</u> О степени предсказуемости пристенной турбулентности	30
<u>Острик А.В.</u> Построение широкодиапазонных уравнений состояния, предназначенных для решения задач механики сплошных сред	30

<u>Панченко Г.Л.</u> Математическое моделирование процессов ползучести и вязкопластического течения материала цилиндрического слоя	31
<u>Privalov L. Yu.</u> The effect of an additional air inlet in the hot outlet area on the performance of a vortex tube . .	31
<u>Радченко П.А.</u> Моделирование поведения гетерогенных материалов и конструкций при импульсных нагрузках	32
<u>Ревенко В.П., Бакулин В.Н.</u> Аналитико–численный метод конечных тел для математического моделирования напряженно–деформированного состояния многосвязных оболочек с прямоугольными отверстиями	33
<u>Савин А.С.</u> Обратная задача генерации поверхностных волн	34
<u>Сидняев Н.И.</u> О теореме импульсов и энергии при определении параметров электроракетного двигателя КА	34
<u>Стручкова Г.П., Тимофеева В.В., Капитонова Т.А., Ноговицын Д.Д., Кусатов К.И.</u> Оценка максимальных уровней воды в период весеннего половодья на участках реки Лена	35
<u>Цыпкин Г.Г.</u> Математическая модель конверсии гидрата метана в гидрат углекислого газа при инъекции CO ₂ в истощенное газовое месторождение	36
<u>Гусев Е.Л., Бакулин В.Н., Черных В.Д.</u> Разработка комбинированных методов поиска экстремума показателей эффективности в вариационных постановках задач прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов	36
<u>Чесноков А.А.</u> Гиперболическая модель теории мелкой воды с учетом дисперсионных и вихревых эффектов	37
<u>Юнаковский А.Д., Богомолов Я.Л.</u> Гиперболизация неограниченного оператора Шредингеровского типа	38
2 Вычислительные алгоритмы инженерных и научных исследований	39
<u>Ладонкина М.Е., Тишкин В.Ф.</u> Исследование сходимости схем DG для вязких членов в уравнениях Навье–Стокса	39

<u>Головизнин В.М., Четверушкин Б.Н.</u> Балансно – характеристические разностные схемы для законов сохранения гиперболического типа	40
<u>Vabishchevich Petr</u> Incomplete iterative implicit schemes	40
<u>А.И. Анучина, Артёмова Н.А., Гордейчук В.А., Ушакова О.В.</u> Алгоритм построения структурированных сеток в деформированных объемах вращения	41
<u>Асфандияров Д.Г.</u> Математическое моделирование пристенной турбулентности на основе схемы КАБАРЕ без использования настроечных параметров	42
<u>Асфандияров Д.Г., Дзама Д.В., Сороковикова О.С.</u> Вероятностные модели загрязнений приповерхностных вод крупных морских акваторий	42
<u>Дзама Д.В., Устинов Г.А., Асфандияров Д.Г., Сороковикова О.С., Черепанов А.А.</u> Модели динамики распространения загрязнения в поверхностных водоемах с использованием моделирования гидродинамических процессов разного уровня детализации	43
<u>Афанасьев Н.А.</u> Принцип временной обратимости при анализе звуковых точек в балансно – характеристических разностных схемах	44
<u>Глотов В.Ю., Канаев А.А., Киселев А.Е.</u> Математическое моделирование в задачах водородной безопасности	44
<u>Горбачев Д.Ю.</u> Балансно-характеристическая схема на треугольных расчетных сетках	45
<u>Горчаков А.Ю., Соловьев А.В.</u> CUDA UNIFIED MEMORY – ускорение процесса разработки multi-GPU приложений	46
<u>Гришин Ю.</u> Применение нестационарных газодинамических функций для математического моделирования газодинамических процессов	47
<u>Гуцин В.А., Кондаков В.Г.</u> Математическое моделирование течений со свободной поверхностью с использованием многопроцессорных вычислительных систем	48
<u>Егорова А.А.</u> Интеллектуальный анализ данных с использованием теории коалиционных игр в условиях неопределенности для кластеризации данных	49

<u>Ермолаева Н.Н., Курбатова Г.И.</u> Об одном эффективном алгоритме численного решения задачи Стефана	49
<u>Зайцев М.А.</u> Сравнение решений задач упругопластического деформирования методом Кабаре и методами с использованием искусственной вязкости	50
<u>Соловьёв А.В.</u> Верификация схемы Кабаре для уравнений мелкой воды, основанных на законе сохранения момента импульса, на неоднородной вращающейся сфере	51
<u>Каширин А.А.</u> Алгоритмы численного решения интегральных уравнений трехмерной скалярной задачи дифракции	51
<u>Kravchenko O.V.</u> Interpolation type schemes application to analysis of electromagnetic field propagation in dispersive media	52
<u>Лазарева Г.Г.</u> Модель испарения вольфрама при импульсной тепловой нагрузке с высокой плотностью мощности	53
<u>Matveenko A.M., Ostrik A.V., Bakulin V.N.</u> Thermal action of pulse radiation on the carbon conic shells loaded with internal pressure	53
<u>Майоров П.А.</u> Гиперболическая декомпозиция в задачах со свободной границей в приближении гидростатики	54
<u>Соловьёв П.С., Коростелева Д.М., Соловьёв С.И.</u> Сеточные аппроксимации самосопряженных дифференциальных задач на собственные значения с нелинейным вхождением спектрального параметра .	55
<u>Тимофеева Т.С., Ким Е.Л.</u> Численная реализация пространственно-временной модели распространения эпидемии	56
<u>Храпов С.С.</u> Лагранжево-эйлеров метод численного интегрирования уравнений газодинамики: параллельная реализация на GPUs	57
3 Программное обеспечение высокопроизводительных вычислений	58

<u>Боганюк Юлия</u> Featured algorithm development of a distributed data processing in a high-load computing system with NoSQL storage	58
<u>Брехов А.Т.</u> Трехмерные электронные карты плотности для промежуточных продуктов ферментативной реакции: большие данные и высокая производительность вычислительных услуг в виртуализированной среде	58
<u>Галлимзянов М.Н.</u> Моделирование распространения волн давления в пузырьковой жидкости с использованием открытого пакета OpenFoam	59
<u>Levin M.P.</u> Mathematical Model of Gas Dilution in Two Phases Flows of Fluid and Gas	60
<u>Капуста Д.П.</u> Разработка и применение методов КМ/ММ.	60
<u>Стрижаск С.В.</u> Расчет работы и значений мощности ветроустановок в действующем ветропарке с использованием открытой библиотеки SOWFA на суперкомпьютере	61
<u>Yunfeng Bai</u> An algorithm to identify text marked in rock core pictures with machine learning algorithm	62
4 Суперкомпьютерные технологии решения прикладных проблем	63
<u>Антонов М.Ю.</u> Молекулярное моделирование метана в керогене	63
<u>Ахметбаев Д.С., Джандигулов А.Р.</u> Реализация алгоритма нового топологического метода расчета коэффициентов токораспределения в сложных электрических сетях	63
<u>Виноградов Ю.И.</u> Аналитические матричные методы решения линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с непрерывными коэффициентами	64
<u>Воложитин В.Д.</u> Суперкомпьютерная реализация одного численного интегрирования больших открытых квантовых систем	64

<u>Гергель В.П.</u> Суперкомпьютерные вычисления в вычислительно-сложных задачах глобальной оптимизации	65
<u>Глинский Б.М., Загорюлько Ю.А., Куликов И.М., Сапетина А.Ф.</u> Суперкомпьютерные технологии решения вычислительно сложных задач	66
<u>Ерёменко А.В., Дорошин А.В.</u> Вычисление показателей Ляпунова для связок аттракторов Шильникова в фазовом пространстве углового движения наноспутников переменной конфигурации	66
<u>Iliev O., Mohring J., Shegunov N., Zakharov P.</u> Parallel Renormalization Based Multilevel Monte Carlo Algorithm	67
<u>Казаков А.Л.</u> Вычислительный алгоритм построения двумерной тепловой волны, порожденной нестационарным краевым режимом	67
<u>Мальшиев В.Л.</u> Параллельные вычисления в решении задач молекулярной динамики	68
<u>Мышев А.В.</u> Виртуальные потоковые вычислительные системы с нечеткой средой вычислений	68
<u>Никитин И.С.</u> Математическое моделирование динамики слоистых и блочных сред с нелинейными контактными условиями на суперкомпьютерах	69
<u>Поляков С.В.</u> Суперкомпьютерная технология моделирования процессов в микросистемах газ-металл на основе методов молекулярной динамики	70
<u>Попов В.В.</u> Математическая модель разложения гидратов в пласте при снижении давления	71
<u>Рассадин А.Э., Степанов А.В.</u> Математическая технология для решения уравнения Кардара-Паризи-Цванга с источником	71
<u>Репинский В.В.</u> Конечно-элементное моделирование критических нагрузок потери устойчивости пространственных конструкций с учетом нелинейности докритического состояния	72
<u>Reshetova G.V.</u> Virtual digital core sample: new parallel numerical technique to estimate effective elastic parameters	72

<u>Seredzhinova G.I.</u>	Numerical simulation of bubble dynamics in acoustic field using graphics processing unit	73
<u>Токарева М.А., Зубкова Т.М.</u>	Моделирование нагруженности при автоматизированном расчете на прочность несущих конструкций мобильных машин . . .	74
<u>Cheverda V.A.</u>	Digital twins of multiscale 3D heterogeneous geological objects based on 3D tectonic and seismic simulations: faults, fractures, and caves	74
<u>Шаўдуров В.В.</u>	Численные методы решения задач в играх среднего поля (Mean Field Games)	75
<u>Iushina I.D.</u>	High Throughput Calculations as an Elevator on the Way from Chemical Structure to Drug Design and Novel Materials	75
<u>Ценаев А.В.</u>	Методы декомпозиции для решения задач многофазного неизотермического течения жидкости в трехмерных пластах на гетерогенных вычислительных системах	75
5	Многомасштабный метод конечных элементов	77
<u>Аристов А.О.</u>	Модели потоковых систем на основе квазиклеточных сетей	77
<u>Egorova A.A., Neustroeva N.V., Afanaseva N.M.</u>	Homogenization of the elasticity problem with periodically located cracks	77
<u>Alekseev V.N., Vasilyeva M.V.</u>	Mixed generalized multiscale finite element method for numerical simulation of the transport and flow problems in perforated domains	78
<u>Bakulin V.N.</u>	Block finite-element model of layer-by-layer analysis of the stress-strain state of three-layer generally irregular shells	78
<u>Vasilev A.O.</u>	Numerical simulation of neutron transport in SP ₃ approximation by FEM	79
<u>Viet Ha Hoang</u>	Multilevel Markov Chain Monte Carlo method for Bayesian inverse problems for elliptic equations with log-normal coefficients	79

<u>Yalchin Efendiev</u> Multiscale modeling and learning of heterogeneous differential equations	80
<u>Grigoriev A.V.</u> Neural networks for multicontinuum models	80
<u>Akimov M.P., Grigoriev V.V., Zakharov P.E.</u> Effective calculation of thermophysical properties of composite materials with multiple configurations by asymptotic homogenization technique	81
<u>Gavrilieva U.S., Vasilyeva M.V., Alekseev V.N.</u> Generalized Multiscale Finite Element Method for scattering problem in heterogeneous media	81
<u>Lazarov R</u> An overview of recent advances in numerical treatment of fractional PDEs with non-smooth data	82
<u>Луцица B.B.</u> Моделирование геологических разломов методом дискретных элементов	82
<u>Nikiforov D. , Vasilyeva M.</u> An Unstructured Generalized Multiscale Finite Element Method for flows in fractured media	83
<u>Морозов П.Е.</u> Моделирование нестационарного притока жидкости к горизонтальной скважине в анизотропном трещиновато-пористом пласте	83
<u>Панасенко Г</u> High order homogenized models	84
<u>Поташев К.А., Мазо А.Б</u> Масштабирование в суперэлементной модели нефтяного пласта	84
<u>Vladislav Balashov, Evgeny Savenkov</u> Direct numerical simulation of multiphase flows at porescale	84
<u>Spiridonov D.A., Vasilyeva M.V., Chung E.T., Efendiev Ya.</u> Generalized Multiscale Finite Element method for multicontinua unsaturated flow problem in fractured porous media	85
<u>Stepanov S.P., Vasilyeva M.V., Grigoriev A.V., Spiridonov D.A.</u> Simulation of the process of infiltration into fractured porous soil in permafrost using GMsFEM	85
<u>Petr V. Sivtsev, Aleksandr E. Kolesov, Petr E. Zakharov and Ying Yang</u> Numerical homogenization of elastoplastic deformations of composite material with small proportion of inclusions	86

<i>Alexei Tyrylgin, D. Spiridonov, Petr M.V. Vasilyeva</i>	
Mathematical modeling of the fluid flow and geomechanics for multicontinua problem in the fractured porous media using Generalized Multiscale Finite Element Method	86
<i>Zakharov P.E.</i>	
Multilevel Monte Carlo algorithms based on renormalization for elliptic PDEs with random coefficients	87
<i>Chung E.T.</i>	
Nonlocal multi-continua upscaling and applications	87
6 Численные методы решения обратных задач	88
<i>Васильев В.И., Кардашевский А.М.</i>	
Численная идентификация начального условия параболического уравнения	88
<i>Винокурова Т.А., Пермьяков П.П.</i>	
Идентификация граничных условий теплообмена при различных природных и техногенных факторах	89
<i>Гадьяльшин К.Г.</i>	
Численная реализация метода обращения полного волнового поля для трехмерно-неоднородных сред на суперкомпьютере	89
<i>Иванов Д.Х.</i>	
Численное восстановление кусочно-постоянной правой части эллиптического уравнения по граничным данным	90
<i>Кабанихин С.И., Шишленин М.А., Новиков Н.С.</i>	
Многомерные аналоги уравнений И.М. Гельфанда, Б.М. Левитана, В.А. Марченко и М.Г. Крейна	91
<i>Кадырова Альфия</i>	
Исследование устойчивости дебитов скважин к погрешностям идентификации поля проницаемости в условиях однофазной стационарной фильтрации	92
<i>Карчевский А.Л.</i>	
Решение уравнения теплопроводности с данными на временноподобной границе	92
<i>Колесов А.Е.</i>	
Восстановление кусочно-постоянного младшего коэффициента эллиптического уравнения	94
<i>Кондаков А.С.</i>	
Алгоритм восстановления по температурным данным мощности трения в барабанном тормозном устройстве с накладкой из композиционного материала	94

<u>Полежаев В.Д., Юсупова К.О.</u> Идентификации параметров адаптивных моделей временных рядов . . .	95
<u>Шишленин М.А., Кабанихин С.И.</u> Регуляризация задачи Коши для уравнений математической физики с данными на части поверхности	95
<u>Старостин Н.П., Аммосова О.А., Васильева М.А.</u> Управление тепловым процессом сварки полиэтиленовых труб деталями с закладным нагревателем .	96
<u>Ling-De Su</u> Numerical Method for Solving the Boundary Inverse Problem of One Dimensional Parabolic Equation	97
<u>Тихонов Р.С., Старостин Н.П.</u> Обратная задача теплопроводности для тепловой диагностики трения в системе полимерных подшипников скольжения . . .	97
<u>Хайруллин М.Х.</u> О решении обратной задачи неизометрической фильтрации в многослойном пласте	98
<u>Чубатов А.А.</u> Решение задачи идентификации интенсивности источника загрязнения атмосферы с помощью расширенных систем	98
<u>Ягола А.Г., Лукьяненко Д.В., Ван Я.</u> Трехмерные обратные задачи восстановления магнитного поля по экспериментальным данным	99

Секция 1

Математические проблемы механики сплошных сред

ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ОДНОФАЗНОЙ И ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМ

У.О. Агишева¹

¹*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа
agisheva_u@mail.ru*

В работе численно исследуется задача о распространении колоколообразного импульса в жидкости, содержащей пузырьковый или пенный слой. Решение проводилось с использованием метода быстрого преобразования Фурье. В ходе исследований уточнены результаты, опубликованные ранее в [1, 2]. На основе полученных результатов определены коэффициенты отражения и прохождения при прохождении волны через границу раздела между рассматриваемыми средами. Полученные результаты могут иметь приложения в медицине, промышленности и трубопроводном транспорте.

Работа поддержана средствами государственного бюджета по государственному заданию на 2017-2019 годы (№ 0246-2019-0052).

Литература

1. Агишева У.О. Воздействие ударных волн на пузырьковые и пенные структуры в двумерных осесимметричных объемах // Вестник БашГУ. 2013. Т. 18. № 3. С. 640–645.
2. Агишева У.О., Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Коробчинская В.А. Особенности вихреобразования при воздействии импульса давления на газовую область, ограниченную пенным слоем // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2016. № 6. С. 47-56.

УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ВОЛНЫ В ТРУБАХ С УПРУГИМИ СТЕНКАМИ, МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

И.Б. Бахолдин¹

¹*Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва,
Россия
ibbakh@yandex.ru*

Рассматриваются уравнения с контролируемым давлением, с заполнением жидкостью, с заполнением газом. Для стенок трубы применяется полная нелинейная мембранная модель и нелинейные уравнения гиперупругих материалов. Для учета жесткости стенок трубы на изгиб предложено использовать линейную модель пластины. Численно решается задача о распаде произвольного разрыва. Результаты соответствуют ранее разработанной теории структур обратимых и слабодиссипативных разрывов. Разработаны общие методы решения уравнений со сложной дисперсией и нелинейностью: трехслойная центрированная по пространству и по времени схема и центрированные только по пространству схемы с аппроксимацией временных производных по методу Рунге-Кутты. Схемы на основе метода Рунге-Кутты второго порядка обладают сходимостью, при больших временах расчета при их использовании возникает рост возмущений, в конечном итоге приводящий к аварийной остановке. Это можно исправить добавлением малых диссипативных членов с производными высокого порядка. Анализируется необходимый порядок производных и необходимый порядок коэффициентов при добавленных членах. Схемы на основе метода Рунге-Кутты более высокого порядка коррекции не требуют.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ КОНТЕЙНЕРА, УСТАНОВЛЕННОГО НА ГРУЗОВОМ КОРАБЛЕ

Н.В. Богомолов¹

¹*ПАО РКК "Энергия" им. С.П. Королёва, Королёв, Россия
bogomol@appl.sci-nnov.ru*

Возможным способом запуска малых космических аппаратов формата «CubeSat» является их размещение в транспортно-пусковых контейнерах, устанавливаемых снаружи грузового корабля «Прогресс». Выведение спутников на орбиту при этом потенциально осуществимо как во время автономного полета корабля, так и в период его пребывания в составе Международной космической станции. Для того, чтобы аппараты могли выполнять свои целевые задачи, в процессе отделения необходимо сообщить им нужные линейные скорости, минимизировать получаемые угловые возмущения

и обеспечить дальнейшее движение спутников без соударений. Решение указанных вопросов подразумевает разработку вычислительных алгоритмов построения динамической модели, в основе которой лежит численное интегрирование уравнений движения. После верификации модели, учитывающей, помимо допустимых разбросов массо-центровочных и инерционных характеристик объектов, контактные взаимодействия спутников с направляющими внутри пускового контейнера, проводятся серии статистических расчетов, по итогам которых делается вывод о возможности реализации рассмотренных схем и выдаются рекомендации (с точки зрения динамики) по выбору наиболее подходящей компоновки.

ДАЛЬНИЕ ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ГЕНЕРАЦИИ

В.В. Булатов¹

¹*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишмлинского Российской
академии наук, Москва, Россия
internalwave@mail.ru*

Рассмотрена задача о математическом моделировании полей внутренних и поверхностных гравитационных волн вдали от движущегося нестационарного источника возмущений. В линейном приближении получены интегральные формы решения для отдельной волновой моды, асимптотически и численно показано, что волновая картина возбуждаемых волновых полей при определенных параметрах генерации представляет собой систему гибридных волновых возмущений, одновременно обладающих свойствами волн двух типов: кольцевидных (поперечных) и клиновидных (продольных). Представлены и обсуждены результаты асимптотического анализа и численных расчетов, описывающих основные особенности фазовой структуры и волновых картин возбуждаемых полей внутренних и поверхностных гравитационных волн в зависимости от параметров генерации. Проведено сравнение получаемых аналитических результатов с данными натуральных измерений гидродинамических полей.

ТРАЕКТОРНЫЕ ПОРТРЕТЫ ДЛЯ ДВУХ ВОЗМУЩЁННЫХ ЦЕНТРАЛЬНО СИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМ ТОЧЕЧНЫХ ВИХРЕЙ

Т.Е. Бояринцева¹

¹*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
t.bojare@mail.ru*

Постановка задачи.

Пусть вихри находятся в вершинах правильного шестиугольника либо восьмиугольника с расстоянием между противоположными вершинами $2R$. Допустим, что возникает следующее возмущение: вихри через одного смещаются на величину $(\delta r, \theta)$. Тогда три (либо четыре) вихря оказываются в вершинах равностороннего треугольника (либо квадрата), вписанного в окружность радиуса R , назовём их основными вихрями, а другие три (либо четыре) вихря окажутся в вершинах правильного треугольника (либо квадрата), вписанного в окружность радиуса r , повернутого относительно первого на угол θ .

Система в целом вращается вокруг общего центра, и меняется взаимное расположение вихрей в системе. Для лучшего понимания взаимного движения будем считать, что три (либо четыре) вихря, расположены на окружности радиуса $R = 1$, а положение трёх (либо четырёх) других вихрей будем рассчитывать. Полная картина линий движения одних вихрей относительно других называется траекторным портретом. Требуется построить траекторные портреты для данных двух систем точечных вихрей.

Решение поставленной задачи.

Формула для расчёта траекторных портретов взята из статьи Бояринцевой Т.Е. и Савина А.С. «Возмущённое движение центрально-симметричной системы точечных вихрей» //МЖГ. 2001. №1. С 102-107. Траекторный портрет получен как совокупность большого числа точек для каждого значения. Для практического расчёта точек траекторий была написана программа на языке C++ , реализованная на компьютере DELL Inspiron 7577 - 5990.

Результаты.

Траекторный портрет для системы трёх пар точечных вихрей: у этой системы имеется три типа взаимного движения вихрей, все они описаны. Точки устойчивого равновесия находятся на той же окружности, что и основные вихри.

Траекторный портрет для четырёх пар точечных вихрей: у данной системы имеется четыре вида взаимных движений вихрей, точки устойчивого равновесия смещены, они не находятся на той же окружности, что основные вихри. На тех местах, где находились вихри до начала возмущения системы, находятся точки неустойчивого равновесия. Кроме них есть ещё точки неустойчивого равновесия на отрезках между центром системы и точками расположения основных вихрей.

ЗАКОНЫ СТЕНКИ ДЛЯ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

И.И. Вигдорович¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт механики, Москва
vigdorovich@imec.msu.ru

Построена асимптотическая теория для описания гидродинамики и теплообмена в сверхзвуковом турбулентном пограничном слое на пластине при нулевом продольном градиенте давления. Рассмотрены все возможные случаи теплопередачи на обтекаемой поверхности – охлаждаемая, теплоизолированная и нагреваемая стенка при температурном факторе, имеющем порядок единицы (умеренные числа Маха набегающего потока).

Тот факт, что задача зависит от конечного числа определяющих параметров позволяет сформулировать условия замыкания, связывающие турбулентное касательное напряжение и турбулентный поток тепла с градиентами усредненной скорости и энтальпии. Уравнения Рейнольдса для сжимаемого газа решены методом сращиваемых асимптотических разложений в трех характерных областях течения: вязком подслое, логарифмическом подслое и внешней области пограничного слоя. В результате установлены законы подобия для скорости и температуры, справедливые в пристеночной области пограничного слоя (законы стенки), которые позволяют представить профили скорости и температуры в потоке сжимаемого газа через профили этих величин в несжимаемом пограничном слое. Главный член асимптотики для профиля скорости соответствует известной формуле Ван Дриста. Однако полученное решение содержит еще дополнительные слагаемые порядка единицы, которые исправляют недостатки формулы Ван Дриста и обеспечивают лучшее согласование с экспериментальными данными. Аналогичную структуру имеет закон стенки для температуры, который для сжимаемого течения установлен впервые.

Кроме постоянной Кармана и турбулентного числа Прандтля в логарифмической области, известных для течения несжимаемой жидкости, в теории появляются три новые универсальные постоянные, которые не зависят от молекулярных свойств и отношения теплоемкостей газа. Их значения определены путем сопоставления законов стенки с экспериментальными данными.

ОЦЕНКА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИДОННЫМ МОРСКИМ ТЕЧЕНИЕМ

И.Ю. Владимиров¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Проведены модельные исследования силового воздействия на обтекаемые горизонтальные элементы инженерных сооружений в двухслойном потоке жидкости с генерацией внутренних волн на границе раздела слоев. Получены интегральные представления волнового сопротивления и подъемной

силы. Выполнены численные расчеты при реальных значениях характеристик морской среды. Выявлены условия, при которых происходят значительные изменения гидродинамических реакций на обтекаемые элементы технических конструкций (например, трубопроводов).

ГИБРИДНЫЕ МОДЕЛИ ОТКРЫТЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ЛОВУШЕК

М.А. Боронина¹, В.А. Вшивков¹, Л.В. Вшивкова¹, Е.А. Генрих¹,
Г.И. Дудникова¹ и И.Г. Черных¹

¹*Институт вычислительной математики и математической геофизики
СО РАН, Новосибирск, Россия
vssh@ssd.ssc.ru*

Для моделирования физических процессов в разреженной плазме лучше всего подходит математическая модель, состоящая из уравнений Власова для каждой компоненты плазмы (электроны и ионы разных сортов) и уравнений Максвелла для электромагнитных полей. Для численного решения задач с использованием этой модели наиболее эффективен метод частиц в ячейках в связи с его универсальностью для широкого диапазона физических параметров. Однако применение метода частиц требует больших вычислительных ресурсов – памяти и быстродействия ЭВМ. Это связано с тем, что в методе частиц в ячейках в области решения вводится сетка (шаг сетки определяет точность решения), в каждой ячейке которой размещается достаточно большое количество модельных частиц (до 1000 частиц). Но ещё большее ограничение на эффективность численной модели накладывает разномасштабность физических явлений, связанная с большой разницей масс электронной и ионной компонент плазмы. Временной шаг в численной модели подбирается из условий точности и устойчивости движения самых лёгких частиц, моделирующих электронную компоненту плазмы. Если в задаче изучаемые эффекты связаны с движением ионных компонент, то это накладывает существенное ограничение при использовании модели, связанное с большим временем счёта.

Для частичного преодоления этого недостатка применяются гибридные модели, в которых электронная компонента плазмы описывается с помощью гидродинамического приближения и соответствующие уравнения решаются конечно-разностными методами, а ионы – кинетическими уравнениями, и для их решения используется метод частиц в ячейках. При решении каждой конкретной задачи с использованием гибридных моделей необходимы обоснования возможности их применения, к которым относятся, например, условие замагничности электронов. В докладе рассмотрен ряд гибридных моделей и проведено их сравнение на примере численного моделирования нестационарных процессов в осесимметричной открытой ловушке с диамагнитным удержанием плазмы.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант 19-71-20026)

К ЛИНЕЙНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ: МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А.А. Гаврильева¹

¹*Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО
РАН, Якутск, Россия
gav-ann@yandex.ru*

Изучение гидродинамической устойчивости, с математической точки зрения, зачастую сводится к исследованию устойчивости решений тех или иных задач для уравнений с частными производными, описывающих те либо другие течения жидкостей. Огромное значение в теории гидродинамической устойчивости придается изучению устойчивости течений по линейному приближению. При этом в качестве одного из основных способов исследования линейной устойчивости применяется спектральный метод. Однако когда задача на собственные значения и собственные функции ставится для дифференциального уравнения с переменными коэффициентами, на первый план выступает иной способ ее изучения — метод интегральных соотношений.

В данной работе результаты, которые получены методом интегральных соотношений для задачи линейной устойчивости стационарных сдвиговых плоско-параллельных течений невязкой стратифицированной жидкости в поле силы тяжести относительно плоских возмущений и в приближении Буссинеска, и без него, уточняются, дополняются и развиваются наиболее мощным аналитическим подходом современной математической теории гидродинамической устойчивости – вторым (или прямым) методом Ляпунова, что позволило добиться существенных продвижений по целому ряду направлений.

STRUCTURE OF THE HYDRAULIC JUMP IN CONVERGENT RADIAL FLOWS

Sergey Gavriluk¹

¹*Aix-Marseille University, Marseille
sergey.gavrilyuk@univ-amu.fr*

We are interested in the modelling of multi-dimensional turbulent hydraulic jumps in convergent radial flow. To describe the formation of intensive eddies (rollers) at the front of the hydraulic jump, a new model of shear shallow water flows is used. The governing equations form a non-conservative hyperbolic system with dissipative source terms. The structure of equations is reminiscent of generic Reynolds-averaged Euler equations for barotropic compressible turbulent

flows. Two types of dissipative term are studied. The first one corresponds to a Chézy-like dissipation rate, and the second one to a standard energy dissipation rate commonly used in compressible turbulence. Both of them guarantee the positive definiteness of the Reynolds stress tensor. The equations are numerically solved by using an original splitting procedure. Numerical results for both types of dissipation are presented and qualitatively compared with the experimental works. The results show both experimentally observed phenomena (cusp formation at the front of the hydraulic jump) as well as new flow patterns (the shape of the hydraulic jump becomes a rotating square).

О ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ И ИХ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

А.Н. Голубятников^{1,*} и Д.В. Украинский^{1,**}

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Москва

*golubiat@mail.ru, **d.v.ukrainskiy@gmail.com

Развивается метод аналитического построения решений уравнений МСС, в частности адиабатического движения идеального совершенного газа, периодических по времени. Используется разложение по степеням периодической функции времени, удовлетворяющей системе с дробно-рациональным гамильтонианом. Возможен учет электромагнитного и гравитационного полей. Такого рода задачи встречаются в динамике атмосферы и астрофизике. В качестве уравнений применяется проекция уравнений Эйлера на лагранжеву систему координат, а также дифференциальное сохранение энтропии, наиболее удобные для перемножения рядов. Начальные условия задаются в виде функций от лагранжевых переменных: удельных энтропии, энтальпии и скорости движения. Полное решение строится только путем дифференцирования и целых алгебраических операций [1]. Доказывается сходимость метода в определенном классе начальных данных. Метод апробирован на одномерной задаче о колебаниях гравитирующего слоя, допускающей частное точное решение, путем построения ее общего периодического решения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 17-01-00037).

Литература

1. D V Ukrainskii, A N Golubiatnikov. On the periodical solutions for single-dimensional gas dynamics. J. Phys.: Conf. Ser. 2018. 1129 012035

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПЛАЗМЫ В СЛОЕ

Н.М. Гордеева¹

¹*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

nmgordееva@bmstu.ru

Моделируется отклик слоя электронного газа на воздействие внешнего электрического поля. При сделанных предположениях о характере изменения поля, выбранной геометрии задачи (напряженность внешнего поля перпендикулярна границе слоя) и при зеркальных граничных условиях можно решить задачу аналитически, получив в явном виде функцию напряженности индуцированного внутри слоя электрического поля и функцию распределения электронов.

Для постановки задачи используется интеграл столкновений в форме Бхатнагара – Гросса – Крука (БГК) и уравнение Максвелла для электрического поля в плазме. Рассматривается столкновительная плазма с произвольной степенью вырождения. Искомые функции представлены в виде суммы слагаемых, соответствующих собственным решениям.

Для случая невырожденной плазмы найдена величина поглощения электрического поля для каждой моды. Проанализирован характер изменения величины поглощения в зависимости от параметров задачи. Показано, что при частотах выше плазменной наблюдаются осцилляции в зависимости поглощения от частоты. Эти осцилляции связаны с возбуждением плазменных колебаний в слое.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ОСОБЕННОСТИ И ЭФФЕКТЫ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД

Д.А. Губайдуллин¹

¹*Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр*

РАН, Казань, Россия

gubaidullin@imm.knc.ru

Представлены математические модели и дан анализ некоторых особенностей и эффектов волновой динамики и акустики газок капельных и пузырьковых сред.

Рассмотрены особенности распространения линейных волн в полидисперсных парогазокапельных (с произвольной функцией распределения включений по размерам) и многофракционных пузырьковых (в том числе с оболочкой вокруг пузырька) средах с фазовыми превращениями. Разработаны математические модели, получены дисперсионные соотношения, изучены

высоко- и низкочастотные асимптотики коэффициента затухания, обсуждаются области применимости развитых теорий.

Теоретически исследована динамика импульсного возмущения давления в жидкости, содержащей многослойную преграду с пузырьковым слоем. Численно изучено распространение ударных волн в газовзвесах и ударно-волновой разлет газовзвеси в двухкомпонентный газ. Изучено влияние сорта газа на динамику процесса.

Показано хорошее согласие представленных результатов с опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-11-10016).

АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ЛОКАЛИЗОВАННЫХ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ О РАСПРОСТРАНЕНИИ И НАБЕГЕ НА БЕРЕГ ДЛИННЫХ ВОЛН НА ВОДЕ

С.Ю. Доброхотов¹

¹*Институт проблем механики им А.Ю.Ишлунского РАН, Москва, Россия
dobr@ipmet.ru*

Рассматривается задача Коши с локализованными исходными данными для двумерного волнового уравнения с переменной скоростью $C(x, y) = \sqrt{gD(x)}$ ($D(x)$ - глубина) в области Ω , описывающей длинные линейные волны в приближении мелкой воды, а также дисперсионные обобщения этой задачи. Предполагается, что скорость $C(x, y) = 0$ и $|\text{grad}C(x, y)| > 0$ на границе (берегу) области Ω . Построены асимптотические решения этой задачи с использованием модифицированного квазиклассического приближения и канонического оператора Маслова. Они определяются фронтами, которые задаются траекториями системы Гамильтона с гамильтонианом $H(p, x) = C(x, y)|p|$ и являются движущимися нестандартными каустиками. Когда траектории достигают границы области D , импульс p траекторий становится равным бесконечности; в некотором смысле можно рассматривать границу области Ω как каустику специального типа. Строится каноническое преобразование, которое приводит к компактификации траекторий и позволяет продолжить их через такую особенность. В окрестности границы Ω стандартное квазиклассическое приближение не работает и мы применяем квантование Фока канонических преобразований, которое приводит к представлению решений в окрестности такого типа каустик с помощью преобразование Ханкеля. В результате получаются явные асимптотические формулы решения исходной задачи во всей области Ω . Далее мы обсуждаем применение полученных решений в комбинации с преобразованием Карриера-Гринспана в задачах о набеге на берег нелинейных длинных волн (например,

волн цунами). На основе полученных асимптотических формул мы конструируем быстрый аналитико-численный алгоритм расчета распространения и набега на берег длинных волн, порожденных локализованными источниками.

Эта работа выполнена совместно с А.Ю. Аникиным, Д.С. Миненковым, В.Е. Назайкинским и А.А. Толченниковым и поддержана Российским научным фондом (проект № 16-11-10282).

КОНТАКТНЫЕ СИММЕТРИИ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ ПЕРВОГО ПОРЯДКА УРАВНЕНИЯ ОДНОМЕРНОЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ НАД НЕРОВНЫМ ДНОМ В ЛАГРАНЖЕВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

К.П. Дружков^{1,*} и А.В. Аксенов^{1,**}

¹ *Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Москва*

* *konstantin.Druzhkov@gmail.com*, ** *aksenov@mech.math.msu.su*

Рассмотрено уравнение одномерной мелкой воды над неровным дном в лагранжевых переменных. Получена система определяющих уравнений для нахождения операторов контактных симметрий. Система определяющих уравнений была исследована на совместность. Показано, что ядро операторов контактных симметрий состоит из двух операторов переноса по времени и по массовой лагранжевой переменной. Найдены все профили дна, при которых происходит расширение ядра операторов контактных симметрий. Результаты групповой классификации были использованы для нахождения законов сохранения первого порядка. Уравнение одномерной мелкой воды в лагранжевых переменных является уравнением Эйлера-Лагранжа. Для всех классифицирующих случаев найдены вариационные симметрии. С использованием теоремы Нетер были найдены все законы сохранения первого порядка уравнения мелкой воды в лагранжевых переменных. Законы сохранения первого порядка были также найдены другим способом без использования теоремы Нетер. Было показано совпадение базисов законов сохранения, найденных двумя способами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-11-00238).

ОБ ОРИЕНТАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ПЛЕНКАХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

А.Г. Калугин¹ и Д.В. Павлов¹

¹ *МГУ имени М.В. Ломоносова, механико-математический факультет,
Москва, Россия*

kalugin@mech.math.msu.su

В пленках и тонких слоях нематических жидких кристаллов существует эффект спонтанной ориентационной неустойчивости, когда при однородных внешних воздействиях и граничных условиях поле вектора ориентации становится неоднородным, образуя одномерные или двумерные периодические структуры, которые наблюдаются оптически.

В представленной работе предложено теоретическое объяснение такого эффекта, связанное с неположительной определенностью энергии упругости ориентации Франка. Получены точные решения для задачи о периодических возмущениях однородного поля вектора ориентации в пленке нематика, выведено соотношение, связывающее толщину слоя, период возмущений и константы Франка. Показано, что наличие таких решений возможно только при достаточно больших значениях коэффициента при дивергентном слагаемом в энергии Франка. Найдено три диапазона значений этого коэффициента: когда периодические решения отсутствуют, существуют только для очень тонких слоев и существуют независимо от толщины слоя. Показано, как полученные решения и известные из литературы экспериментальные данные можно применить для определения величины дивергентной константы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОУПРУГОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК, ПОДКРЕПЛЕННЫХ ЦИЛИНДРОМ С ПЕРЕМЕННЫМ КАНАЛОМ

М.А. Конопельчев¹, В.Н. Бакулин², А.А. Недбай

¹АО «Корпорация «Московский институт теплотехники», Москва,

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва,

³Институт прикладной механики Российской Академии наук, Москва,
konopelchev@gmail.com

С внедрением композитных материалов (КМ) и разработкой новых конструкций возник класс актуальных задач по моделированию флаттера оболочек из КМ.

На основе моментной теории впервые получены уравнения аэроупругой устойчивости оболочки из КМ, подкрепленной упругим цилиндром переменной толщины, при обтекании сверхзвуковым потоком газа и нагружении осевыми силами. Цилиндр представляется упругим основанием Винклера, коэффициент постели определяется решением уравнений трехмерной теории упругости, инерционные свойства учитываются с помощью метода Рэлея.

Решение уравнений ищется в виде тригонометрического ряда по осевой координате с применением метода Бубнова-Галеркина. Полученное характеристическое уравнение с помощью полинома Лагранжа представляется в явном виде относительно комплексной частоты. Устойчивость характеристического уравнения анализируется с использованием критерия Рауса-Гурвица.

Впервые установлены зависимости критической скорости обтекания от длины конической части канала для различных значений осевой силы, модулей упругости цилиндра и длины оболочки.

Предложенная методология значительно расширяет круг решаемых задач по моделированию аэроупругой устойчивости конструкций из КМ.

Работа поддержана РФФИ, грант №18-08-00840А.

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ ОБЪЕКТОВ В МОРСКОЙ СРЕДЕ И АТМОСФЕРЕ

Н.Н. Корчагин^{1,2} и И.Ю. Владимиров^{1,2}

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва,*

²*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана
e-niknik@mail.ru*

Получены выражения для гидродинамической нагрузки на диполь при его циркуляционном обтекании потоком стратифицированной (двухслойной) жидкости конечной глубины. Исследованы зависимости волнового сопротивления и подъемной силы от скорости потока и циркуляции. Показано, что учет циркуляции скорости может существенно изменить величину гидродинамического воздействия на диполь. Обнаружен эффект резкого (реверсивного) изменения направления действия подъемной силы в относительно узком диапазоне скорости обтекания моделируемого диполем фрагмента трубопровода. Подобный эффект может проявляться как при движении самоходных подводных объектов, так и летательных аппаратов в атмосфере.

NON-UNIQUENESS OF TRANSONIC FLOW IN AN INTAKE-TYPE CHANNEL

A.G. Kuzmin¹

¹*St Petersburg University, Moscow
a.kuzmin@spbu.ru*

The two-dimensional turbulent airflow in a 9-degrees-bent channel is studied numerically. Inner surfaces of the top and bottom walls are parallel to each other upstream and downstream of the bends. The incoming flow is supersonic, whereas flow velocity at the channel exit is either supersonic or subsonic depending on the given backpressure. Solutions of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations are obtained with a finite-volume solver of second order accuracy using the Spalart-Allmaras and Shear Stress Transport $k - \omega$ turbulence models.

The solutions reveal a flow hysteresis and non-uniqueness in considerable bands of the free-stream Mach number, angle of attack, and backpressure. At the

endpoints of the bands, there are jumps of shock waves in the channel and abrupt changes of the flow structure. The hysteresis admits up to three different flow regimes at given steady boundary conditions. This must be taken into account in supersonic intakes' design, as different flow fields in the same flight conditions may essentially influence the combustion of fuel and thrust of the engine. The thickness of the leading edges of walls is shown to significantly affect the shock positions and hysteresis bands. Inviscid flow computations confirm the instability of flow structure and agree with well-known analytical relations for shock wave reflections.

ЗАДАЧА О ЗАКАЧКЕ СУСПЕНЗИИ В ПОРИСТУЮ СРЕДУ В РАМКАХ ДВУХСКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕМНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Н.Е. Леонтьев¹

¹*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Москва, Россия
leontiev_n@mail.ru*

В докладе обсуждаются вопросы, связанные с фильтрацией суспензий в пористой среде в рамках двухскоростной модели (при учете отставания взвешенных частиц от несущей жидкости). Рассматривается встречающаяся в практических приложениях задача о закачке суспензии в первоначально незагрязненный пористый образец.

Принимается правдоподобное предположение о том, что рассогласование скоростей взвешенных частиц и несущей жидкости известным образом зависит от концентрации, в частности эти скорости могут отличаться на постоянный множитель.

Приводятся примеры как точных аналитических, так и численных решений для одномерных течений с плоскими волнами.

Одной из целей доклада является обращение внимания на то, что при определенных условиях возможны решения задачи о закачке с непрерывным изменением пористости — без образования скачков концентрации (для в некотором смысле аналогичных задач двухфазной фильтрации в рамках модели Маскета — Мереса такие непрерывные решения хорошо известны). Это обстоятельство может быть полезным при интерпретации результатов лабораторных экспериментов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-01-00037).

MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL PROCESS OF FILTRATION FOR NON-NEWTONIAN FLUID IN POROUS FABRICS

Li Shuguang¹

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow
shuguangli2008@gmail.com*

Many processes in the polymer composite, textile, food, and pharmaceutical industries are associated with the flow of non-Newtonian fluids in porous media. This paper considers the mathematical model of a multi-scale process for the filtration of non-Newtonian fluid in periodic porous fabrics. The model should be based on a three-dimensional Navier-Stokes equation with non-Newtonian Carreau-Yasuda viscosity using the asymptotic averaging method. A numerical algorithm was developed for solving local problems of non-Newtonian fluids in periodic cells, and the distribution of velocity, pressure and non-Newtonian viscosity in a single pore was obtained. The algorithm for calculating the permeability tensor is developed, and the effects of fluid rheology are also highlighted.

**НЕЛИНЕЙНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОДНОМЕРНЫХ
МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ДВИЖУЩИМИСЯ
ГРАНИЦАМИ**

В.Л. ЛИТВИНОВ¹

¹*Самарский Государственный Технический Университет филиал в г.
Сызрани, Сызрань и Московский Государственный Университет имени
М.В. Ломоносова, Москва
vladlitvinov@rambler.ru*

Произведена нелинейная постановка задач, описывающих продольно-поперечные колебания объектов с движущимися границами. Полученная математическая модель состоит из системы двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с наибольшей производной по времени второго порядка и по пространственной переменной четвёртого порядка. Нелинейные условия на движущейся границе имеют максимальную производную по времени второго порядка и по пространственной переменной третьего порядка. Учтены геометрическая нелинейность, вязкоупругость, изгибная жёсткость колеблющегося объекта, а также упругость подложки, на которой расположен объект. Получены граничные условия в случае наличия энергетического обмена между частями объекта слева и справа от движущейся границы. Движущаяся граница имеет присоединённую массу. Учтён упругий характер присоединения границы. Масса границы и жёсткость присоединения различны в продольном и поперечном направлениях. С помощью полученной дифференциальной модели можно описывать продольно-поперечные колебания объектов с движущимися границами большой интенсивности. При постановке использован вариационный принцип Гамильтона.

РАСЧЕТ СМЕЩЕНИЙ ВОКРУГ ТРЕЩИНЫ, ОБРАЗОВАВШЕЙСЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕПЛОЙ НАГРУЗКЕ

А.Г. Максимова¹

¹*Институт вычислительной математики и математической геофизики
СО РАН, Новосибирск, Россия
maksimova@oapng.ssc.ru2*

В настоящее время представляет интерес моделирование поверхности стенок токамака-реактора, подверженных тепловым нагрузкам. Наиболее сильное влияние оказывают импульсные нагрузки. При локальном поверхностном нагревании материал может необратимо расширяться. В таком случае последующее остывание приводит к натяжению, из-за чего образуются трещины. Доклад посвящен построению двумерной модели, с помощью которой производится расчет смещений вокруг таких трещин. Трещина задается на границе прямоугольной области через граничные условия. Численная реализация основана на использовании схемы стабилизирующей поправки, производящей расчет в два этапа. За основу расчетов смещений вокруг трещин взято уравнение Ламе в терминах коэффициента Пуассона. Стационарное решение системы уравнений эллиптического типа ищется с помощью нахождения установившегося решения эволюционной системы уравнений параболического типа.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №17-79-20203).

ОБ АЛГОРИТМЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФИНАЛЬНЫХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

А.В. Мاستихин¹

¹*Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия
mastikhin@bmstu.ru*

Рассматривается марковский процесс с непрерывным временем и счетным числом состояний, известный как процесс (общей) эпидемии Барлетта–Мак-Кендрика. Уравнение Колмогорова на экспоненциальную (двойную) производящую функцию финальных вероятностей является гиперболическим уравнением с частными производными. Его решение требует вычисления финальных вероятностей для траекторий, задающих одно из граничных условий. В работе показано, что искомые траектории описываются как пути Дика, перечисляемые числами Каталана. Для произвольных траекторий финальных вероятностей процесса общей эпидемии предложен алгоритм

вычисления, основанный на составлении контекстно-свободной грамматики. Решается перечислительная задача.

О СТЕПЕНИ ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Н.В. Никитин¹

¹*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт механики, Москва, Россия*
nnikitin@mail.ru

Степень предсказуемости пространственно-временной системы ассоциируется с характеристиками ее устойчивости – насколько быстро меняется пространственная структура под действием малых случайных возмущений. В работе путем прямого численного моделирования нескольких турбулентных течений в трубах и каналах определены характеристики их устойчивости (показатели и векторы Ляпунова). Обнаружена универсальность старшего показателя Ляпунова (независимость от числа Рейнольдса и вида течения при подходящем выборе масштабов). Определены свойства старшего Ляпуновского вектора (СЛВ). Показано, что процесс развития возмущений существенным образом диктуется неоднородностью основного течения, а также присутствием в нем трансверсального движения. Пренебрежение этими факторами ведет к значительной недооценке скорости роста возмущений. Наличие пристенных полос в основном течении наоборот не играет заметной роли в развитии возмущений СЛВ. Пространственная и временная локализованность возмущений СЛВ указывает на их связь с обнаруженными недавно локализованными структурами (турбулентно-турбулентные пятна) в развитом турбулентном пограничном слое.

ПОСТРОЕНИЕ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

А.В. Острик¹

¹*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия*
ostrik@icp.ac.ru

Уравнения состояния поликристаллических тел строятся в виде соотношений типа Ми-Грюнайзена. Для построения в области сжатия функций удельной холодной энергии и Грюнайзена в зависимости от плотности используются соотношение Гюгонио на ударной волне, данные ударно-волновых экспериментов по ударной сжимаемости и обобщенное соотношение, связывающее коэффициент Грюнайзена с холодной энергией. В итоге

задача сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению третьего порядка для функции удельной холодной энергии. Полученное дифференциальное уравнение с соответствующими начальными условиями интегрируется численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности с переменным шагом по плотности.

В области растяжений и формирования двухфазных состояний изотермы преобразуются по правилу Максвелла для устранения неустойчивых состояний, приводящих к соответствующим неустойчивостям численных алгоритмов решения уравнений механики сплошной среды. Однако в области низких температур и малых тепловых флуктуаций правило Максвелла не применяется и допускается возможность метастабильных состояний, которые наблюдаются в экспериментах.

Приводятся результаты расчетов и сравнения с экспериментальными данными для ряда металлов и оконного материала сапфира.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-08-00964-а.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛЗУЧЕСТИ И ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ

Г.Л. Панченко¹

¹*Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного
отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*
panchenko.21@yandex.ru

В рамках математической теории больших упругопластических деформаций, учитывающей вязкие свойства материалов, рассматривается краевая задача о ползучести и вязкопластическом течении материала в зазоре между двумя жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями при прямолинейном движении внутренней поверхности. Необратимые деформации накапливаются с начала процесса деформирования и первоначально связаны с процессом ползучести материала, для описания которого используется степенной закон ползучести Нортон. С последующим увеличением скорости движения внутреннего цилиндра в некоторый момент времени напряженное состояние достигнет поверхности текучести и в материале начнется вязкопластическое течение. В качестве пластического потенциала используем условие текучести Треска, обобщенное на случай учета вязких свойств материала. Рассматриваются вязкоупругое деформирование, возникновение и развитие вязкопластического течения при равноускоренном движении внутренней поверхности, течение при постоянной скорости и торможение течения при равнозамедленном движении поверхности до полной остановки, а также релаксация напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (18-01-00038).

THE EFFECT OF AN ADDITIONAL AIR INLET IN THE HOT OUTLET AREA ON THE PERFORMANCE OF A VORTEX TUBE

L.Yu. Privalov¹

¹*Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia*
HungryDoodles@yandex.ru

In this paper the modification of a vortex tube is shown. The feature of this vortex tube is that it has an additional air inlet in the hot outlet area along the tube axis designed to redistribute air consumption between cold and hot outlets. Computational experiments are done in openFOAM toolbox using sonicFoam solver. In order to increase computational speed the mesh is being decomposed into equal parts, which allows for the parallel run using MPI on a single computer. The results of the experiment show temperature values and air consumption on the corresponding outlets in relation to the change of the vortex tube length. A conclusion about the effective vortex tube length is made.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ

П.А. Радченко¹

¹*Томский государственный архитектурно-строительный университет,*
Томск
radchenko@live.ru

Актуальной проблемой численного моделирования высокоскоростного взаимодействия твердых тел является интенсивное разрушение материала в области контактных границ. Разрушенные элементы материала не способны сопротивляться внешним воздействиям и вследствие этого возникают сильные искажения расчетной сетки. Поэтому для устойчивого счета необходимо удалять разрушенные конечные элементы из расчетной сетки. Реализация алгоритма эрозии начинается при выполнении критерия разрушения в конечном элементе, находящемся на контактной поверхности. В алгоритме эрозии происходит удаление элемента из расчетной сетки и образование новых поверхностных треугольников из граней элементов, которые были смежными разрушенному. В случае, если один или несколько узлов разрушенного элемента больше не принадлежат другим элементам, полагаем, что узел тоже разрушенный и его массу необходимо перераспределить.

В докладе представлены результаты применения различных подходов к моделированию разрушения контактных поверхностей при высокоскоростном взаимодействии твердых тел. Выделено три основных метода эрозии, которые различаются алгоритмами распределения массы после разрушения

элементов на контактных границах. Проведено сравнение всех трех алгоритмов с экспериментальными данными, полученными «КБМ машиностроения», г. Коломна. Для расчетов использовался авторский вычислительный комплекс EFES. Моделирование проводилось в полной трехмерной постановке. Произведено сравнение полученных результатов между алгоритмами и с экспериментом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-48-700035, грант № 18-41-703003).

АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД КОНЕЧНЫХ ТЕЛ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБОЛОЧЕК С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

В.П. Ревенко¹ и В.Н. Бакулин²

¹*Институт прикладных проблем механики и математики НАНУ, Львов,
Украина*

²*Институт прикладной механики Российской академии наук, Москва,
Россия*

victor.rev.12@gmail.com

Предложен метод конечных тел [1] для математического моделирования напряженно – деформированного состояния (НДС) многосвязных оболочек с прямоугольными отверстиями, которые условно разрезаем на односвязные части. НДС отдельных частей разделяем на две составляющие: основное напряженное состояние, отвечающее главным векторам сил и моментов, и возмущенное самоуравновешенное состояние. На линиях разрезов удовлетворяем всем условиям идеального контакта. Разработан универсальный алгоритм аналитико-численного решения полученных краевых задач, основанный на аппроксимации напряженного состояния конечной суммой разрешающих функций и предложенном универсальном способе сведения удовлетворения условий контакта и граничных условий с коэффициентами, зависящими от пространственных переменных, к минимизации обобщенных квадратичных форм [1,2]. Разработаны методики точного решения исходных систем уравнений. Установлены критерии, при которых построенное приближенное решение совпадает с точным.

Литература

1. Бакулин В.Н.,Ревенко В.П.//Изв. вузов. Математика.2016,№6
2. Bakulin V.N.,Revenko V.P.//Materials physics and mechanics.2017,31, №1/2

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ГЕНЕРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

А.С. Савин¹

¹*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия*
assavin@list.ru

Обратная задача генерации поверхностных волн состоит в определении параметров источников возмущений по данным о порождаемых ими волнах на поверхности жидкости. Эта задача о продолжении полей в сторону их источников относится к классу некорректно поставленных задач. Её аналитические решения неустойчивы по отношению к малым изменениям исходных данных, что существенно затрудняет получение информации об источниках возмущений по данным эксперимента. В настоящей работе предложен принципиально новый подход к решению этой задачи, основанный на методах машинного обучения, а именно, теории нейронных сетей.

О ТЕОРЕМЕ ИМПУЛЬСОВ И ЭНЕРГИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ КА

Н.И. Сидняев¹

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*
Sidn_ni@mail.ru

В докладе представлены современные физические принципы об ускорении заряженных частиц и плазмы в электрическом и магнитных полях, положенные в основу классификации электрических ракетных двигателей. Для реактивных средств коррекции параметров орбиты срок существования, в большей степени, зависит от запасов рабочего тела и соответствующей тяги и энергии для двигательной установки. Особенная ценность определения импульсов и энергии для электроракетных двигателей (ЭРД) состоит в том, что их применение дает возможность получать представление об этих явлениях на пограничной поверхности определенной области, без знания в отдельности явлений, происходящих внутри ЭРД. Именно, часто в тех случаях, когда дифференциальные уравнения истечения плазмы не могут быть составлены или по крайней мере не могут быть интегрированы, теория импульсов или энергии дает возможность узнать характер движения в его общих чертах, не вдаваясь в детали происходящего явления. С другой стороны, теоремы импульсов и энергии являются удобным средством для проверки правильности результатов, в том числе и экспериментальных. Теорема импульсов

имеет практическое значение – только для установившихся явлений движения или для «в среднем» установившихся движений, т.е. таких вихревых и кажущихся нерегулярными движений, которые позволяют заметить в себе установившееся главное движение потока.

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА УЧАСТКАХ РЕКИ ЛЕНА

Г.П. Стручкова¹, В.В. Тимофеева¹, Т.А. Капитонова¹, Д.Д. Ноговицын¹ и К.И. Кусатов¹

¹*Институт Физико-Технических Проблем Севера имени В.П. Ларионова
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия
g.p.struchkova@iptpn.usn.ru*

Республика Саха (Якутия), обладая обширной территорией, расположенной в различных климатических зонах и развитой сетью водных объектов подвержена широкому спектру природных чрезвычайных ситуаций (ЧС). Наиболее характерными из них являются весенне-летние половодья, вызывающие затопления обширных территорий, объектов, инфраструктуры и наносящие огромные ущербы народному хозяйству, что обуславливает актуальность разработки и совершенствования методов прогнозирования наводнений для снижения уровней опасности и ущерба.

На основе статистических данных, полученных за 44 года, и регрессионного моделирования представлено применение многопараметрических моделей и нейронных сетей для разработки прогностической модели, позволяющей прогнозировать опасности наводнения от весенних половодий.

Предложенные методы позволяют оценивать уровни воды при весенних половодьях на основе зависимостей от различных факторов (толщины льда, температуры и т.д.) с достаточной точностью, что показано результатами прогнозирования максимальных уровней воды на примере двух участков реки Лена. Выбор участков определялся исходя из расположений потенциально опасных объектов, затопление которых может нанести значительный материальный ущерб, определены природные факторы, влияющие на уровень весенних половодий.

На основе анализа данных установлено, что на возможность развития экстремальных весенних половодий влияют следующие природные факторы:

- максимальный уровень воды (во время весеннего половодья);
- расход воды на дату вскрытия;
- сумма положительных температур воздуха от даты перехода через 0 до даты вскрытия;
- максимальная толщина льда; уровень воды в начале ледостава;

- запасы воды в снеге по апрельским снегосъемкам (средние за апрель);
- средняя температура воздуха в апреле – мае (в апреле и первой декаде мая).

Относительные ошибки прогнозов полученных с помощью метода искусственных нейронных сетей и методом линейной регрессии различаются незначительно (1 – 8%), что свидетельствует о возможности использования обоих способов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕРСИИ ГИДРАТА МЕТАНА В ГИДРАТ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПРИ ИНЖЕКЦИИ CO_2 В ИСТОЩЕННОЕ ГАЗОВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

Г.Г. Цыпкин¹

*¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлмского РАН, Москва,
Россия
tsyarkin@ipmnet.ru*

Представлена математическая модель замещения метана углекислым газом в гидрате при инъекции CO_2 в пласт, изначально содержащий гидрат метана. Предполагается формирование фронтов диссоциации гидрата метана и образования гидрата углекислого газа. Показано, что в режиме интенсивной инъекции в высокопроницаемый пласт поток тепла от скважины не влияет на процесс замещения, который поддерживается только теплом, выделяемым при образовании гидрата углекислоты. Получено автомодельное решение одномерной задачи. Проведено исследование термодинамических условий существования режимов преобразования гидрата метана в гидрат углекислого газа и построены критические диаграммы.

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ВАРИАЦИОННЫХ ПОСТАНОВКАХ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.Л. Гусев^{1,2}, В.Н. Бакулин^{3,4}, В.Д. Черных⁵

¹Институт проблем нефти и газа Сибирского Отделения РАН,

²Институт математики и информатики СВФУ, Якутск, Россия,

³Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия,

⁴Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия,

⁵Физико-технический Институт Северо-Восточного федерального университета, Якутск, Россия

elgusev@mail.ru

В настоящее время проблемы математического моделирования задач прогнозирования ресурса, надежности, долговечности конструкций из полимерных композитов в условиях Крайнего Севера, Арктической и Субарктической зоны, при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды, решаются в значительно упрощенных постановках, не учитывающих значительное число факторов, оказывающих существенное влияние на точность решения. При этом составной частью проблемы разработки эффективных методов прогнозирования остаточного ресурса является решение проблемы эффективного построения глобально-оптимальных решений, доставляющих абсолютный минимум многопараметрическим критериям эффективности, связанным с решением задач прогнозирования остаточного ресурса полимерных композитов при воздействии экстремальных факторов внешней среды и эксплуатационных нагрузок. Исследованы модификации методов поиска глобального экстремума многопараметрических функций с учетом структурных особенностей критериев эффективности, применяемых в задачах прогнозирования остаточного ресурса, долговечности конструкций из композиционных полимерных материалов. Проведены сравнительные качественные исследования и разработаны методы выбора наиболее перспективных направлений поиска абсолютного минимума исследуемых показателей эффективности в уточненных вариационных постановках обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов.

ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕОРИИ МЕЛКОЙ ВОДЫ С УЧЕТОМ ДИСПЕРСИОННЫХ И ВИХРЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

А.А. Чесноков¹

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск,
Россия*

chesnokov@hydro.nsc.ru

Получена гиперболическая система уравнений, аппроксимирующая двухслойную дисперсионную модель теории мелкой воды для сдвиговых течений, недавно предложенная в работе С.Л. Гаврилюка, В.Ю. Ляпидевского и А.А. Чеснокова (J. Fluid Mech., 2016, V. 808, P. 441–468). Использование этой системы для моделирования эволюции поверхностных волн позволяет избежать основных численных проблем при решении дисперсионных уравнений теории мелкой воды, связанных с обращением эллиптического оператора на каждом шаге по времени и реализацией неотражающих условий на границе расчетной области. Кроме того, использование гиперболической модели, как правило, приводит к сокращению времени вычислений. Показано, что численные решения полученной гиперболической системы практически

совпадают с решениями дисперсионной модели для больших временных интервалов и асимптотически стремятся к ним при увеличении параметра «гиперболизации». Предложенная гиперболическая модель применяется для исследования негидростатических сдвиговых течений над локальным препятствием и волновых боров, возникающих при отражении потока от неподвижной стенки.

ГИПЕРБОЛИЗАЦИЯ НЕОГРАНИЧЕННОГО ОПЕРАТОРА ШРЕДИНГЕРОВСКОГО ТИПА

А.Д. Юнаковский¹ и Я.Л. Богомолов

¹*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*
yun@appl.sci-nnov.ru

Динамика скачка плотности плазмы в заданном поле описывается нелинейным уравнением Шредингера (НУШ), но с линейным по пространственной координате потенциалом. Линейный по пространству оператор является неограниченным с непрерывным спектром, заполняющим всю действительную ось. Его собственные функции выражаются через функции Эйри, образ Фурье которых при счете задает кубическое соотношение шагов по пространству и времени. Проведена регуляризация задачи, чтобы избавиться от неограниченного оператора и воспользоваться идеей гиперболизации, т.е. добавлении второй производной по времени с малым множителем. Преобразование уравнения к гиперболической системе позволяет использовать явно вычисляемое фундаментальное решение для проведения нескольких последовательных операторных замен неизвестных функции системы. Построенное на выбранном интервале приближенное решение в начальной и конечной точках этого интервала удовлетворяет уравнению. В совокупности с квадратичной зависимостью малого параметра от шага по пространству, получаем возможность считать с шагом по времени, пропорциональным шагу по пространству. Отметим, что операторные замены обладают автоматическим параллелизмом.

Секция 2

Вычислительные алгоритмы инженерных и научных исследований

Пленарные доклады

ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ СХЕМ DG ДЛЯ ВЯЗКИХ ЧЛЕНОВ В УРАВНЕНИЯХ НАВЬЕ-СТОКСА

М.Е. Ладонкина¹, В.Ф.Тишкин¹

¹*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия*

v.f.tishkin@mail.ru

При решении широкого класса прикладных задач газовой динамики наиболее востребованным в последнее время является метод Галеркина с разрывными базисными функциями (DG). Данный метод обеспечивает заданный порядок точности, может использоваться для сеток произвольной структуры, имеет компактный шаблон и достаточно легко реализуется на различных параллельных архитектурах[1].

Одним из важных вопросов при реализации DG является вопрос о выборе дискретной аппроксимации потоков для вязких членов уравнения Навье-Стокса. В настоящее время существует несколько видов таких аппроксимаций, наиболее часто используемые в реальных расчетах были исследованы в работах [2]. Однако вопрос оптимального выбора таких аппроксимаций остается открытым. В настоящей работе предлагается потоковое значение для вязких членов на границе элемента вычислять аналогично тому, как это сделано для уравнения теплопроводности [3], используя стабилизирующие добавки.

Литература

1. Krasnov M M, Kuchugov P A, Ladonkina M E, Lutsky A E, Tishkin V F Numerical solution of the Navier-Stokes equations by discontinuous Galerkin method // Journal of Physics: Conference Series, V. 815, №1, 2017.
2. Власенко В.В, Волков А.В., Трошин А.И. Выбор метода аппроксимации вязких членов в методе Галеркина с разрывными базисными функциями // Ученые записки ЦАГИ, т. XLIV, № 3, 2013.

3. Arnold D.N., Brezzi F., Cockburn B., Marini D. Discontinuous Galerkin methods for elliptic problems // Discontinuous Galerkin Methods, vol. 11 of Lecture Notes in Computational Science and Engineering, pp. 89–101, Springer, Berlin, Germany, 2000.

БАЛАНШО – ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЛЯ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ТИПА

Головизнин В.М.¹, Четверушкин Б.Н.

¹*Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia*
gol@ibrae.ac.ru

Уравнения Эйлера для газовых потоков представляют собой систему законов сохранения гиперболического типа. Законы сохранения определяют дивергентный вид этих уравнений, гиперболичность означает, что вдоль любого заданного направления они могут быть записаны в т.н. «характеристической» форме, т.е. в виде системы неоднородных уравнений переноса вдоль характеристик – кривых в плоскости, образованной этим пространственным направлением и осью времени. Такими же свойствами обладают и многие другие системы уравнений: уравнения динамической теории упругости, магнитной гидродинамики, уравнения Максвелла и т.д., включая уравнения Навье – Стокса.

При численном решении дивергентных уравнений стараются сохранить это свойство и на сеточном уровне, поскольку консервативность обеспечивает адекватную скорость распространения сильных и слабых разрывов. Для сохранения свойства консервативности на сеточном уровне используют метод конечного объема, который, однако, не дает ответа на вопрос, как аппроксимировать потоки на гранях этого объема. Наиболее распространенный способ задания потоков базируется на задаче о распаде произвольного разрыва (метод С.К. Годунова). Для уравнений Эйлера эта задача оказывается относительно простой и, кроме того, допускает дальнейшие упрощения для ускорения расчетов.

Однако не для всех гиперболических законов сохранения задача о распаде разрыва относится к разряду «элементарных». Примером может служить система гиперболизированных уравнений, описывающая многофазные течения. В этих случаях приходится искать альтернативные подходы.

В качестве альтернативы для вычисления потоков можно использовать метод характеристик. Этому новому направлению в конструировании численных методов для уравнений гиперболического типа и посвящен настоящий доклад.

INCOMPLETE ITERATIVE IMPLICIT SCHEMES

Petr Vabishchevich¹

¹*Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia*
vabishchevich@gmail.com

In numerical solving boundary value problems for parabolic equations, two- or three-level implicit schemes are in common use. Their computational implementation is based on solving a discrete elliptic problem at a new time level. For this purpose, various iterative methods are applied to multidimensional problems evaluating an approximate solution with some error. It is necessary to ensure that these errors do not violate the stability of the approximate solution, i.e., the approximate solution must converge to the exact one. These questions are investigated in numerical solving a Cauchy problem for a linear evolutionary equation of first order, which is considered in a finite-dimensional Hilbert space. The study is based of the general theory of stability (well-posedness) of operator-difference schemes developed by A.A. Samarskii. The iterative methods used in the study are considered from the same general positions.

Секционные доклады

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК В ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОБЪЕМАХ ВРАЩЕНИЯ

А.И. Анучина¹, Н.А. Артёмова², В.А. Гордейчук¹ и О.В. Ушакова²

¹*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия*

²*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия*

ana@imm.uran.ru

Описывается алгоритм для построения структурированных сеток в объемах вращения, деформированных другими объемами вращения. Алгоритм разработан для численного моделирования процессов многокомпонентной гидродинамики. Под объемом вращения понимается объем, получаемый вращением на 180^0 вокруг оси плоской кривой, состоящей из отрезков прямых, дуг окружностей и эллипсов. Алгоритм относится к алгоритмам построения подвижных сеток и представляет из себя нестационарный процесс, в котором сетка подстраивается под меняющуюся геометрию, при этом объем вращения деформируется до нужной степени другим объемом вращения. По

своему функциональному назначению алгоритм включает в себя средства для задания геометрий и конфигураций областей, построения начальных сеток; коррекции сеток к границам областей; деформации сеток и областей; оптимизации сеток, а также тестирования сеток. Алгоритм создан в рамках вариационного подхода к построению оптимальных сеток, удовлетворяющих заданным критериям качества: невырожденности, близости сеток к равномерным и ортогональным и представляет из себя итерационную процедуру, выполняющую на каждом шаге деформацию и оптимизацию сеток. Приводятся примеры сеток и результаты их тестирования.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ КАВАРЕ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Д.Г. Асфандияров¹

¹ *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук, Москва, Россия*

В работе представлены результаты моделирования классической задачи течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале по схеме КАВАРЕ в широком диапазоне чисел Рейнольдса (от 5600 до 40000). Расчет проводится как при полном (прямое численное моделирование), так и неполном разрешении спектра турбулентных пульсаций. Во втором случае, для расчета используются сетки, характерные для LES моделирования пристенных течений. Для более точного моделирования потока импульса на стенки при неполном разрешении спектра турбулентных пульсаций, в области вблизи стенки вводятся специальные искусственные граничные условия, позволяющие учитывать сдвиговые эффекты в пристеночном слое. Показано, что введение искусственных граничных условий позволяет повысить точность определения средних характеристик течения, в особенности вторых моментов. В работе приводится сравнение полученных результатов с результатами прямого численного моделирования по псевдоспектральному методу, который является наиболее точным в классе решаемых задач, а также с результатами LES моделирования других расчетных групп.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД КРУПНЫХ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

Д.Г. Асфандияров¹, Д.В. Дзама¹, О.С. Сорокикова¹

¹ *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук, Москва, Россия*

dmitry.dzama@yandex.ru

В докладе представлена специализированная версия модели Монте-Карло для расчёта распространения загрязнения в крупных водных акваториях с учётом береговой линии, построенной с произвольным разрешением. Модель основана на использовании многолетней базы данных горизонтальных компонент скорости течения в верхнем слое перемешивания, его глубины, поля возвышения рельефа и глубины акватории. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ в части оценки радиационной обстановки, практическая методология обоснования безопасности и тактика мониторинга состояния радиационно-опасного объекта должна опираться как на данные измерений, так и на результаты моделирования. Для выработки стратегии мониторинга требуется вероятностная картина загрязнения, построенная на основе многолетней базы данных входных параметров. Представляемая модель вероятностная - позволяет проводить многовариантные расчёты с различными моментами начала выхода загрязнения. В основе вычислительного алгоритма предлагаемой методики лежит метод Монте-Карло с применением лагранжевых частиц конечных размеров. Смещение частицы является решением стохастического дифференциального уравнения Ито. Каждая частица характеризуется суммарной активностью и горизонтальным размером.

**МОДЕЛИ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОЕМАХ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗНОГО УРОВНЯ
ДЕТАЛИЗАЦИИ**

Д.В. Дзама¹, Г.А. Устинов¹, Д.Г. Асфандияров¹, О.С. Сороковикова¹ и
А.А. Черепанов¹

¹ *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук, Москва, Россия*
lasados@mail.ru

В данной работе используется идеология решения гиперболических уравнений с использованием эйлерова балансно-характеристического подхода, позволяющего экономично и корректно разрешать динамику процессов распространения загрязнений с большими градиентами концентраций, характерных при аварии.

Целью проведения исследования является разработка трехмерной модели адвекции – диффузии в неоднородном поле скоростей и неизотропном поле турбулентной диффузии с учетом некоторых физических процессов: гравитационного осаждения, накопления наносов и их динамики. А также осуществление взаимодействия модели с гидродинамическим модулем, основанным на решении уравнений теории мелкой воды в приближении Сен-Венана.

Методология опробована на ряде модельных задач, допускающих аналитическое решение: задача адвекции без диффузии, задача диффузии без адвекции, задача адвекции-диффузии, задача осаждения взвеси, задача динамики донных отложений. Показаны хорошие результаты решений при наличии больших градиентов концентраций.

ПРИНЦИП ВРЕМЕННОЙ ОБРАТИМОСТИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЗВУКОВЫХ ТОЧЕК В БАЛАНСНО – ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМАХ

Н.А. Афанасьев¹

¹*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва*
gandiken@yandex.ru

Высокоточное численное решение систем уравнений в частных производных гиперболического типа всегда являлось актуальной задачей математического моделирования. Особый интерес представляет решение таких уравнений при моделировании трансзвуковых течений. В широкий класс таких задач входят, например, моделирование процесса разрушения плотины с помощью уравнений мелкой воды или моделирование процесса течения газа в сопле Лавалья с помощью уравнений газодинамики. В случае трансзвуковых течений классическую схему Кабаре в консервативно-потокковой форме надо дополнять аппроксимационным алгоритмом вычисления новых потоковых значений в звуковых точках. В данной работе предложен новый локально-неявный алгоритм обработки звуковых точек для схемы Кабаре, основанный на переносе точных инвариантов Римана в звуковую точку по неявно проведенным характеристикам. Данный метод обладает вторым порядком аппроксимации по времени и пространству, а также свойством временной обратимости. Также приведены результаты тестов для задач о распаде разрыва в случае уравнений мелкой воды и газодинамики.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 18-11-00163).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Глотов В.Ю.¹, Канаев А.А., Киселев А.Е.

¹*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,*
Russia

Во время тяжелой аварии на АЭС с реакторами с водяным теплоносителем в помещении защитной оболочки может быть выброшено значительное количество водорода, что может привести к образованию взрывоопасных водородсодержащих смесей с воздухом.

Распространение водорода в помещениях защитной оболочки АЭС определяется сложными тепловыми и гидравлическими процессами, протекающими на разных этапах тяжелой аварии: распространением струйных течений пароводородных смесей, взаимодействием струй с препятствиями, конденсацией пара в объеме и на поверхностях, связанными с этими процессами конвективным теплообменом и переносом энергии излучением.

В последние 15 лет за рубежом было выполнено несколько научно-исследовательских проектов, посвященных вопросам формирования стратификации легкого газа и возможностях её разрушения. Проводимые исследования охватывали широкий круг сложных взаимосвязанных физических процессов и явлений, влияющих на стратификацию газа. Сложный характер исследуемых явлений и высокая чувствительность процесса стратификации к внешним условиям приводили к существенным трудностям в интерпретации полученных результатов. Полное понимание физической картины, наблюдаемой в экспериментах, становится возможным лишь с привлечением численного моделирования.

Современные подходы для численного моделирования турбулентных потоков основываются на методике осреднения исходных уравнений по времени и пространству и используют набор замыкающих соотношений, полученных на основе эмпирических корреляций (RANS). Такой способ позволяет достаточно быстро рассчитывать длительные по времени процессы, однако зачастую не может обеспечить достаточной точности моделирования и обладает ограниченной предсказательной силой. В связи с этим, приобретает интерес разработка новых подходов предсказательного математического моделирования, способных достаточно точно воспроизводить весь комплекс существенных явлений, с одной стороны, и обладающих достаточной вычислительной эффективностью, чтобы численный расчет занимал приемлемое время.

В ИБРАЭ РАН для моделирования турбулентных течений в многокомпонентных средах разрабатывается беспараметрический подход, основанный на методике КАБАРЕ. КАБАРЕ относится к классу вихререшающих схем с неявным моделированием подсеточных масштабов турбулентности. Она позволяет проводить расчеты на сетках с неполным разрешением масштабов турбулентности без использования настроечных параметров. Единственным источником неопределенностей является сеточная модель, критерий выбора которой, основан на анализе сходимости решения.

В докладе приведены результаты численного анализа задачи о разрушении стратификации легкого газа диффузным потоком, полученным в результате взаимодействия паровой струи с горизонтальным препятствием в виде круглого диска, с помощью методики КАБАРЕ.

БАЛАНСНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ СХЕМА НА ТРЕУГОЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ СЕТКАХ

Д.Ю. Горбачев¹

¹*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия
gorbachev-daniil@inbox.ru*

В промышленных задачах, связанных с решением систем уравнений гиперболического типа, используются сетки различной степени сложности. Схема КАБАРЕ зарекомендовала себя при решении таких задач на четырехугольных сетках. Однако, возникают задачи, для которых использование четырехугольных сеток не является оправданным в виду того, что на шаг по времени накладывается слишком сильные ограничения из-за малости ячеек. В таком случае хочется перейти на треугольные сетки.

К тому же, расчетные сетки с треугольными ячейками широко используются в прикладных расчетах. Этому способствует наличие в открытом доступе простых и эффективных алгоритмов триангуляции сложных геометрических областей. Попытки обобщить алгоритм схемы КАБАРЕ на треугольные расчетные ячейки, предпринимаемые ранее [2] были не совсем успешными, поскольку приводили к потере важных качеств схемы - второго порядка аппроксимации и временной обратимости. Проблема перехода на треугольники оставалась актуальной.

Данный доклад посвящен описанию новой балансно-характеристической схемы для решений гиперболических систем на треугольной сетке с качествами, присущими схеме КАБАРЕ.

Приводятся примеры тестовых расчетов.

Литература

1. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных систем. 2013. Издательство Московского университета Москва, 467 с.
2. Яковлев П.Г. Метод Кабаре для решения двумерных задач аэроакустики и гидродинамики. Кандидатская диссертация.
3. Магомедов К.М., Холодов А.С. О построении разностных схем для уравнений гиперболического типа на основе характеристических соотношений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1969, том 9, номер 2, 373–386.

CUDA UNIFIED MEMORY – УСКОРЕНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ MULTI-GPU ПРИЛОЖЕНИЙ

Горчаков А.Ю.^{1,2}, Соловьев А.В.³

¹ *Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Федерального
исследовательского центра «Информатика и управление» Российской
Академии наук, г. Москва*

² *Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет), г. Долгопрудный*

³ *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской Академии наук, г. Москва
andrgor12@gmail.com*

CUDA UNIFIED MEMORY – технология позволяющая работать с единым адресным пространством, в которой память как вся системная память (host memory), так и память всех установленных GPU (device memory). При этом не требуется явно копировать данные между CPU и GPU и преобразовывать указатели при копировании. Применение данной технологии позволяет существенно упростить разработку высокопроизводительных приложений.

В докладе рассматривается процесс переноса вычислений на MULTI-GPU модельной двумерной задачи, описываемой уравнениями однослойной мелкой воды с переменной плотностью над неровным дном [1]. Для решения задачи применялась балансно – характеристическая схема «КАБАРЕ», обладающая определенными преимуществами над другими схемами [2].

В докладе приведены минимальные действия необходимые для перехода от вычислений на GPU к вычислениям на MULTI-GPU. Исследована вычислительная эффективность в зависимости от размеров разностной сетки. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №18-11-00163.

Литература

1. Evtushenko Y. G., Gorchakov A. Y., Goloviznin V. M. Fast automatic differentiation in problems variations four-dimensional data assimilation (4Dvar) // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1128. – №. 1. – С. 012001.
2. В. М. Головизнин, А. А. Самарский. Некоторые свойства разностной схемы “кабаре” // Матем. моделирование, 1998, 10:1, с. 101-116.

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Юрий Гришин¹

¹*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва
grishin.bmstu@mail.ru*

Моделирование нестационарных газодинамических процессов в протяженных каналах с использованием схемы С.К.Годунова, а также граничные условия (ГУ) на концах расчетных областей опираются на представление о распаде произвольного разрыва (РПР). В массовых расчетах обычно применяются упрощенные, линеаризованные записи соотношений на РПР. При моделировании волновых процессов значительной интенсивности такой подход часто не обеспечивает требуемую точность и скорость вычислений. С использованием представления о сохранении инвариантов Римана при переходе через фронты простых волн, получающихся в результате РПР, получена система нестационарных газодинамических функций (НГДФ) от числа Маха M , с помощью которых можно проводить расчеты с повышенными значениями сеточного числа Куранта.

Преимущества использования НГДФ проявляются при записи соотношений на границах каналов, где находятся местные сопротивления. Здесь удобно применять НГДФ в комбинации с известными газодинамическими функциями стационарного течения от числа M , т.к. в РПР на каждом расчетном шаге используется представление о квазистационарном течении между прошедшей и отраженной от ГУ волнами. С помощью ППП на базе НГДФ решен ряд важных задач.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ СО
СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

В.А. Гуцин¹, В.Г. Кондаков¹

¹*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук, Москва, Россия
kondakov@ibrae.ac.ru*

Рассматривается модель несжимаемой среды со свободной поверхностью. Предложена конечно-разностная схема на основе методики КАБАРЕ. На серии тестов проведено количественное сравнение с результатами решения задач по схеме второго порядка точности МЕРАНЖ. На основе итерационных

методов решения СЛАУ предложена параллельная версия расчетного кода с декартовой декомпозицией на подобласти. Данная работа является продолжением совместной работы авторов по моделированию течений со свободной поверхностью.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ КОАЛИЦИОННЫХ ИГР В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДЛЯ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ

А.А. Егорова¹

*¹ Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО "Северо-Восточный
федеральный университет имени М.К. Аммосова" в г. Мирном, Мирный,
Россия*

nastyagorova@mail.ru

При анализе данных объекты можно кластеризовать различными способами и методами. Появляется дерево возможных вариантов. При принятии решений воспользуемся методами теории игр. При выборе можно рассматривать теоретико-игровую модель как коалиционную игру. Характеристическая функция рассматривается как функция, которая зависит от степени схожести объектов. Таким образом, сформируем кластеры. Если рассмотрим игру как дифференциальную игру управления, можно сформировать сильно динамически устойчивое решение в S -ядре, что позволяет принять решение.

ОБ ОДНОМ ЭФФЕКТИВНОМ АЛГОРИТМЕ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

Н.Н. Ермолаева^{1,*} и Г.И. Курбатова^{1,**}

*¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
Россия*

** n.ermolaeva@spbu.ru, ** g.kurbatova@spbu.ru*

Для одномерных однофазных и двухфазных задач Стефана предложен алгоритм численного решения, позволяющий с высокой точностью рассчитать положение фронта фазового перехода в любой момент времени.

На примере модельных расчетов плоской двухфазной задачи Стефана, имеющей точное аналитическое решение, продемонстрировано преимущество предложенного алгоритма по сравнению с рядом известных вариантов метода сквозного счета и по сравнению с фронтальным методом решения задачи Стефана.

Представлены примеры решения предложенным методом однофазных и двухфазных задач оледенения плоской и цилиндрических поверхностей при различных значениях числа Стефана для разных краевых условий.

Литература

1. Васильев Ф. П. О методе конечных разностей для решения однофазной задачи Стефана // ЖВМ и МФ 1963. Т. 3, № 5. С. 861-873.
2. Васильев Ф. П., Успенский А.Б. Разностный метод решения двухфазной задачи Стефана // ЖВМ и МФ 1963. Т. 3, № 5. С. 874-886.
3. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // ЖВМ и МФ 1965. Т. 5, № 5. С. 816 - 827.
4. Будаков Б.М., Соловьева Е.Н., Успенский А.Б. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задачи Стефана // ЖВМ и МФ 1965. Т. 5, № 5. С. 828 - 840.
5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М. Наука. Физматлит, 1972. 736 с.
6. Васильев В.И., Максимов А.М., Петров Е.Е., Цыпкин Г.Г. Тепло-массоперенос в промерзающих и протаивающих грунтах. М. Наука. Физматлит, 1996. 224 с.
7. Курбатова Г. И. О расчете оледенения поверхностей в морской воде // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. Т. 14. Вып. 3. 2018 г. С. 186-199.

СРАВНЕНИЕ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КАБАРЕ И МЕТОДАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ ВЯЗКОСТИ

М.А. Зайцев¹

¹*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук, Москва, Россия
ztsu@ibrae.ac.ru*

Проводится сравнение методов решения на примере задач вдавливания сферы в упругопластическое пространство и деформирования сосуда под действием заданного давления.

При решении по методу Кабаре использовано обобщение схемы Кабаре для линейных уравнений упругости с учетом нелинейного эффекта пластичности в лагранжевой постановке. В соответствии с балансно-характеристическим подходом Кабаре, используются консервативные переменные, относящиеся к центрам контрольных объемов и "активные" граничные (потокосные) переменные. Линейные уравнения упругости, отвечающие

гиперболической части задачи, решаются в консервативной форме относительно центральных переменных на этапах предиктор-корректор. Граничные переменные пересчитываются на новый слой по времени с учетом экстраполяции по характеристическим направлениям. Для учета пластичности используется классическая модель Прандтля-Рейсса. Лагранжевый шаг включает пересчет медленно меняющихся координат узлов контрольных объемов. Решения с использованием искусственной вязкости взяты из [1-2].

Литература

1. Бакиров М.Б., Зайцев М.А., Фролов И.В. Математическое моделирование процессов идентификации сферы в упругопластическое полупространство // Заводская лаборатория, 2001, 67(1), с.37-47.
2. Зайцев М.А., Гольдберг С.М. Математическое моделирование взаимодействия детонирующих сред с упругими оболочками // Математическое моделирование РАН, т. 5, N 6, 1993 г., с.56-68.

ВЕРИФИКАЦИЯ СХЕМЫ КАБАРЕ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ, ОСНОВАННЫХ НА ЗАКОНЕ СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА, НА НЕОДНОРОДНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СФЕРЕ

А.В. Соловьев¹

¹*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
Москва, Россия
soloujev@ibrae.ac.ru*

На основе системы интегральных уравнений, включающих закон сохранения момента импульса вместо традиционно используемого закона сохранения импульса, построена универсальная конечно-объемная дифференциально-разностная схема на произвольных геодезических сетках для неоднородной вращающейся сферы. Полученная дифференциально-разностная схема является хорошо сбалансированной, имеет второй порядок аппроксимации по пространству и свободна от проблемы полюсов. Для нахождения потоковых переменных и аппроксимации по времени применен метод Кабаре. Приведены примеры расчетов серии тестов, включая тесты Вильямсона, подтверждающие высокое качество полученных решений.

АЛГОРИТМЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ТРЕХМЕРНОЙ СКАЛЯРНОЙ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ

А.А. Каширин¹

¹*Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск,
Россия
elomer@mail.ru*

Рассматривается трехмерная задача дифракции стационарных акустических волн на однородном включении. Она сводится к граничным слабо сингулярным интегральным уравнениям Фредгольма первого рода с одной неизвестной функцией, каждое из которых условно-эквивалентно исходной задаче. При помощи специального метода осреднения ядер интегральных операторов эти уравнения аппроксимируются системами линейных алгебраических уравнений. Полученные системы решаются численно обобщенным методом минимальной невязки (GMRES).

Для нахождения решения на спектре интегральных операторов, где нарушаются условия эквивалентности интегральных уравнений исходной задаче, предложен метод интерполяции решения. Он не требует знания спектра и позволяет находить искомые решения с высокой точностью. Предложенные алгоритмы реализованы на вычислительном кластере ВЦ ДВО РАН. Приведены результаты расчетов, позволяющие судить о возможностях данного подхода [1, 2].

Литература

1. Каширин А.А., Смагин С.И. Численное решение интегральных уравнений трехмерных скалярных задач дифракции // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23. № 2. С. 20-36.
2. Каширин А.А., Смагин С.И. Численное решение интегральных уравнений на спектре для задачи дифракции акустических волн // Информатика и системы управления, 2018, № 4 (58). С. 141-149.

INTERPOLATION TYPE SCHEMES APPLICATION TO ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC FIELD PROPAGATION IN DISPERSIVE MEDIA

O.V. Kravchenko¹

¹*Federal Research Center «Computer Science and Control» of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia
olekravchenko@gmail.com*

A class of difference schemes of interpolation type is widely used to simulate electromagnetic waves propagation. It is known as constrained interpolation profile (CIP) method as well. The basis of CIP method is a Hermite interpolation in space. This allows to develop a compact difference schemes of a high order by increasing the order of derivatives are considered. The advantage of CIP schemes is that they have greater stability than commonly used finite-difference time domain techniques (FDTD). For the other hand, CIP method allows to achieve fine resolution with a discontinuous initial data as well. This situation makes sense in case of dispersive media or in case of composite media with different properties are considered. In present paper a case mentioned above is investigated. A comparison between CIP and FDTD approach is provided during the simulation.

МОДЕЛЬ ИСПАРЕНИЯ ВОЛЬФРАМА ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ МОЩНОСТИ

Г.Г. Лазарева¹

¹*Институт вычислительной математики и математической геофизики
СО РАН , Новосибирск, Россия
lazareva@ssd.ssc.ru*

На экспериментальном стенде Beam of Electrons for materials Test Applications (ВЕТА), созданного в ИЯФ СО РАН, получены новые результаты испарения вольфрама с поверхности пластины под действием на нее электронного пучка. Натурный эксперимент постоянно сопровождается численным. Модель испарения вольфрама основана на решении в области образца двухфазной задачи Стефана для температуры и уравнений электродинамики, на решении в области над образцом уравнений газовой динамики. Большое влияние на решение задачи оказывают разрывные нелинейные по времени и пространству граничные условия, описывающие нагрев и испарение материала. Целью исследования является моделирование эрозии поверхности образца в результате испарения и проникновения теплового потока вглубь материала с учетом неоднородностей (микротрещин).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект 0315-2016-0009).

THERMAL ACTION OF PULSE RADIATION ON THE CARBON CONIC SHELLS LOADED WITH INTERNAL PRESSURE

A.M. Matveenko¹, A.V. Ostriki¹, V.N. Bakulin¹

¹*Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia
vl-bakulin@mail.ru*

The new mechanism for destruction of constructions of aircraft from composite materials at thermal action of fluxes of radiations and particles (FRP) is offered in work. It is assumed that operability of a construction is broken because of development of non-stationary processes of deformation and destruction in it under the action of quasi-stationary flight loadings. These non-stationary processes are formed by means of almost instant change of rigidity of a construction at pulse FRP-heating of materials.

Carbon nozzles of the working rocket engines of upper stages are in hard heat-strength conditions. FRP is prevailing for upper steps in comparison with other factors of powerful explosion (for example action of a shock wave).

It is possible to take an orthotropic conic shell having variable thickness and made of a carbon plastic as nozzle model. The this shell is jammed from fixture and is freely supported by the opposite end. The maximum levels of pulse FRP of a Plank spectrum that safely for a model nozzle of the running engine are received as a result of systematic calculations by means of numerical model.

Work is made with support of the RFBR (project № 18-08-00094-а, 19-08-00606).

ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ В ЗАДАЧАХ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ В ПРИБЛИЖЕНИИ ГИДРОСТАТИКИ

П.А. Майоров¹

¹ *Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия
maiorov.peter@gmail.com*

В задачах динамики атмосферы и океана широко используется приближение однослойной «мелкой воды», представляющее собой гиперболическую систему законов сохранения массы и импульса при наличии свободной границы. Все рассчитываемые величины в таком приближении не зависят от глубины и являются только функциями координат (x,y). Такое допущение во многих случаях является слишком грубым, и в качестве следующего приближения рассматривают т.н. «многослойную мелкую воду». В приближении многослойной мелкой воды водная толща делится на несколько слоев, в каждом из которых рассчитываемые величины по глубине полагаются постоянными и считается, что среда находится в гидростатическом равновесии. Методы численного решения систем гиперболических уравнений достаточно хорошо развиты. В задачах однослойной мелкой воды успешно применяются балансно – характеристические вычислительные алгоритмы, в частности схема КАБАРЕ [1]. Но уже на двух слоях ситуация резко меняется – система уравнений теряет свою безусловную гиперболичность и при некоторых

параметрах становится эллиптической, что приводит к численной неустойчивости [2]. При большем числе слоев картина только усложняется и для достижения вычислительной устойчивости в уравнения приходится вводить искусственную вязкость, приводящую систему к параболическому типу. Это может негативно отразиться на характере решения.

В докладе излагается новый подход к регуляризации численного решения уравнений многослойной мелкой воды, основанный на методе гиперболической декомпозиции. Суть этого метода состоит в том, что исходный оператор задачи представляется в виде суммы двух операторов, один из которых всегда остается гиперболическим, а второй переносится в правую часть системы и является «как бы параметром», зависящем от решения «гиперболизованной» части задачи. Для решения «гиперболизованной» задачи предлагается использовать схему КАБАРЕ.

Опыт расчета задач со свободной границей методом гиперболической декомпозиции показал, что со временем начинает развиваться нелинейная неустойчивость Филиппса, для устранения которой приходится применять фильтрацию высокочастотных компонент решения. В докладе приводятся примеры расчетов модельных и тестовых задач.

Литература

1. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных систем. 2013 место издания Издательство Московского университета Москва, 467 с.
2. Овсянников Л.В. Модели двухслойной мелкой воды // ПМТФ. - 1979 - № 2 - С- 2-14

СЕТОЧНЫЕ АППРОКСИМАЦИИ САМОСОПРЯЖЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ НА СОБСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМ ВХОЖДЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

П.С. Соловьёв¹, Д.М. Коростелева¹ и С.И. Соловьёв¹

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Уфа, Россия*
pavel.solovev.kpfu@mail.ru

Рассматривается положительно определённая обыкновенная дифференциальная задача на собственные значения второго порядка с коэффициентами, нелинейно зависящими от спектрального параметра, и однородными граничными условиями Дирихле. Задача на собственные значения аппроксимируется сеточной схемой метода конечных элементов с численным интегрированием на равномерной сетке. Для построения сеточной схемы применяются лагранжевы конечные элементы произвольного порядка и квадратурные формулы Гаусса. Установлены оценки погрешности приближённых собственных значений и оценки погрешности приближённых собственных функций в пространстве Соболева и в пространстве Лебега. Эти оценки погрешности совпадают по порядку с оценками погрешности сеточной схемы метода конечных элементов для линейных спектральных задач. Кроме того, получены оценки суперсходимости приближённых собственных функций в сеточной норме по узлам квадратурной формулы Гаусса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №18-41-160029. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (коды проектов 17-08-01279, 19-08-01184).

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ

Т. С. Тимофеева¹, I. Farago, E. Л. Ким

¹*Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова,*
Якутск, Россия
timofeevatc@mail.ru

Рассматривается задача прогнозирования эпидемиологической ситуации. Все возрастающие миграционные потоки и глобализация экономики способствуют быстрому распространению инфекционных заболеваний. Система дифференциальных уравнений, которая описывает развитие эпидемического процесса с учетом пространственной зависимости, предложенная в работах

[1, 2] основана на модели Кермака-Маккендрика. В работе проведен сравнительный анализ численных решений этой системы дифференциальных уравнений по явным и неявным разностным схемам.

Литература

1. I. Farago, R. Horvath. On some qualitatively adequate discrete space-time models of epidemic propagation // J. of Computational and applied mathematics. 2016, 293, 45-54.
2. I. Farago, R. Horvath. Qualitative properties of the finite difference solution of a space-time epidemic propagation model // Annales Univ. Sci. Budapest., Sect. Comp. 2016, 45, 157-168.

ЛАГРАНЖЕВО-ЭЙЛЕРОВ МЕТОД ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ГАЗОДИНАМИКИ: ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА GPUS

С.С. Храпов¹

¹ *ФГАОУ ВО Волгоградский государственный университет, Волгоград,
Россия*

khrapov@volsu.ru

Разработана новая численная схема CSPH-TVD для решения уравнений газодинамики, основанная на комбинированном лагранжево-эйлеровом подходе. Численная схема CSPH-TVD была специально разработана для моделирования газодинамических течений в астрофизических системах с сильно неоднородными гравитационными полями и нестационарными границами раздела газ-вакуум. Проведено тестирование численного алгоритма на классических задачах газодинамики и детальное сравнение схемы CSPH-TVD со схемой MUSCL. Показано, что схема CSPH-TVD имеет второй порядок точности для гладких решений, является хорошо сбалансированной и обеспечивает надежный расчет при наличии сильных ударных волн, потенциальных ям и открытых границ раздела газ-вакуум. Проведено распараллеливание численного алгоритма CSPH-TVD с использованием технологии CUDA и исследована эффективность параллельной реализации для различных GPU NVIDIA Tesla K20/40/80, P100.

Секция 3

Программное обеспечение высокопроизводительных вычислений

FEATURED ALGORITHM DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED DATA PROCESSING IN A HIGH-LOAD COMPUTING SYSTEM WITH NOSQL STORAGE

Юлия Боганюк¹

¹*Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия*
j.boganyuk@gmail.com

Разработана архитектура системы high-load вычислений и NoSQL хранилища для распределенных вычислений в задачах анализа данных. Описаны особенности и проведен сравнительный анализ алгоритмов для последовательной и распределенной обработки больших объемов данных табличного формата.

ТРЕХМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КАРТЫ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ РЕАКЦИИ: БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ И ВЫСОКАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСЛУГ В ВИРТУАЛИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ

А.Т Брехов¹

¹*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова*
tony.brekhov@ya.ru

Ферментативные реакции играют ключевую роль в метаболизме всех живых организмов. Последние достижения в вычислительных методах позволили очень детально изучить ферментативно-катализируемые процессы, в том числе моделирование электронной структуры промежуточных состояний на пути реакции. Кроме того, экспериментальные данные о структуре промежуточных продуктов реакции становятся более широко распространенными благодаря достижениям лазерной короткоимпульсной спектроскопии. Необработанные экспериментальные данные обычно описывает электронную плотность промежуточных продуктов, в некоторых случаях во временных рядах. Итак, служба базы данных, где могут храниться как экспериментальные, так и смоделированные данные, и совместный анализ может

стать ценным научным инструментом для приведения теории и эксперимента все вместе. В настоящее время известный банк данных о протеинах (PDB) может вести учет в необработанном виде.

Кристаллографические данные об электронной плотности, обычно описывают только ферменты или ферменты ингибиторные комплексы. Известны сотни ферментов, и следует ожидать больших объемов данных об размерное свойство, такое как электронная плотность. В то же время квантовая химия, моделирование больших молекул, таких как белки, требует большого вычислительного ресурса. Таким образом, мы решили превратиться в сервисную модель и использовать как модель сервис Nautilus среды Cognitive Hardware и Software Ecosystem Community Infrastructure (CHASE-CI). В этой среде каждая участвующая организация может пожертвовать свое оборудование и ресурсы, такие как хранилище данных, вычислительные элементы и предоставление доступа к запущенным сервисам и наборы данных с большой гибкостью. Мы установили и протестировали небольшие прототип среды с использованием ресурсов лаборатории ЛСС на химическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Объединенного института ядерных исследований (Дубна) и Компании RSC Group (Москва). Поскольку он был эффективно реализован в проекте Sloan Digital Sky Survey (SDSS), мы определили основные поисковые запросы и структуру баз данных соответственно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТКРЫТОГО ПАКЕТА OPENFOAM

М.Н. Галимзянов¹

¹*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа
monk@anrb.ru*

Численно исследуется задача о взаимодействии волны давления слабой интенсивности в жидкости с пузырьковой областью конечных размеров. В работе проведено моделирование описанной задачи с использованием открытого пакета OpenFoam, что позволило исследовать динамику волны на подробных расчетных сетках и для больших временных интервалов. В ходе исследований уточнены результаты, опубликованные ранее в [1, 2]. На основе полученных результатов определены критерии усиления и ослабления волн посредством пузырьковых областей в зависимости от параметров волны и пузырьковой области. Полученные результаты могут иметь приложения в медицине, промышленности и трубопроводном транспорте.

Работа поддержана средствами государственного бюджета по государственному заданию на 2017-2019 годы (№ 0246-2019-0052).

Литература

1. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К., Галимзянов М.Н. Двумерные волны давления в жидкости, содержащей пузырьковые зоны // Доклады АН, Т. 378, №.6, 2001. С. 763-768.
2. Галимзянов М.Н., Гималтдинов И.К., Шагапов В.Ш. Двумерные волны давления в жидкости, содержащей пузырьки // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. №2. 2002. С. 139-147.

MATHEMATICAL MODEL OF GAS DILUTION IN TWO PHASES FLOWS OF FLUID AND GAS

M.P. Levin¹

¹*Ivannikov Institute for System Programming, Russian Academy of Sciences
mlevin@ispras.ru*

Recently the phenomenons connected with solubility of gases in two-phase flows of gas and liquid play an important role in various technical devices. Special attention to such phenomena arose after the well known crash on Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in Japan. This crash was related with hydrogen explosion previously soluble in liquid. The hydrogen was discharged from the multi-phase mixture and this process was initiated by energy inflow from the earthquake. In the present work various models of solubility of gas in two-phase currents of gas and liquid are considered. The law of mass balance for bubble flows with gas dissolution, the momentum conservation law for bubble flows with gas dissolution, gas phase model, and liquid phase dissolution model were considered and discussed.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КМ/ММ

Д.П. Капустя¹

¹*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова
litaka@mail.ru*

Смешанные методы КМ/ММ являются компромиссом между уровнем теории и затратами компьютерного времени в молекулярном моделировании, что делает их незаменимым средством при изучении ферментативных систем. Недавно в рамках молекулярно-динамического пакета NAMD 2.12 был разработан интерфейс для проведения расчетов методом КМ/ММ. Он позволяет рассматривать комбинированные системы с несколькими количеством квантовых подсистем, а также рассматривать динамический состав квантовой подсистемы при построении КМ/ММ МД траектории, что делает его необходимым в исследованиях ферментативных систем. Его применение может позволить на более высоком качественном уровне описывать влияния

растворителя на ход реакций ферментативного катализа. В данной работе разрабатывалась оболочка для взаимодействия программного пакета NAMD 2.12 с квантово-механическими пакетами Firefly 8.2.0 и GAMESS. В докладе будут представлены особенности реализации КМ/ММ на базе NAMD/Firefly и NAMD/GAMESS, представлены положительные и отрицательные аспекты пакетов, а также рассмотрены примеры и перспективы применения данного программного обеспечения.

РАСЧЕТ РАБОТЫ И ЗНАЧЕНИЙ МОЩНОСТИ ВЕТРОУСТАНОВОК В ДЕЙСТВУЮЩЕМ ВЕТРОПАРКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТКРЫТОЙ БИБЛИОТЕКИ SOWFA НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ

С.В. Стрижак¹

¹ *Институт системного программирования им. В.П. Иванникова
Российской академии наук, Москва, Россия
strizhak@yandex.ru*

Ветроэнергетика является важной составной частью энергетики в РФ. В настоящее время на территории РФ построен новый современный ветропарк в Ульяновской области РФ с 28 ветроэлектроустановками (ВЭУ) различной мощности, строится новый ветропарк в Республике Адегея, планируется строительство ветропарков в Ленинградской области, в Краснодарском крае, на Белом море. Расчет работы и значений мощности ВЭУ в действующем ветропарке является актуальной задачей в связи с тем, что ветер является крайне нестабильным источником и подвержен ежедневным и сезонным изменениям. Необходимо правильно оценивать мощность каждой отдельной ВЭУ. Большое значение имеет взаимное расположение ВЭУ и рельеф местности.

В работе использовалась открытая библиотека SOWFA на базе OpenFOAM 2.4.0 и решатели ABLSolver и pisoFoamTurbine. Авторами проведен расчет для модельного ветропрака в форме параллелепипеда с 14 имитаторами ветроустановок. Расчетная область имела размеры 9 метров по оси OX, 6 метров по оси OY, 1 метр по оси OZ. Имитаторы ветроустановок располагались в соответствии с планом первой очереди строительства ветропарка в Ульяновской области РФ. Расчет проводился в постановке URANS с k-ε моделью турбулентности, а также в постановке метода крупных вихрей (LES). В методе крупных вихрей использовалась динамическая модель Смагоринского. Для задания граничных условий на входе использовался метод Precursor. Предварительно был проведен расчет для атмосферного нейтрального пограничного слоя с помощью решателя ABLSolver. Для задания профиля скорости и направления ветра на входе расчетной области использовались данные, полученные в ходе ветромониторинга. В расчетах использовалась расчетная неструктурированная сетка

с различным количеством ячеек: 1.5 миллиона, 3 миллиона и 6 миллионов ячеек. В ходе расчета с помощью решателя pisoFoamTurbine были получены поля скорости, давления, температуры, турбулентной вязкости. Решатель pisoFoamTurbine верифицировался на известной тестовой задаче Blind Test с двумя модельными ветроустановками в аэродинамической трубе. Проведено сравнение с результатами эксперимента по значению безразмерной скорости в различных сечениях за ветроустановками. В результате расчета были определены значения величин коэффициентов мощности C_p и осевой силы C_t . Диапазон изменений значений для C_p был 0.2 до 0.6. Меньшее значение C_p имела ВЭУ, которая была расположена в следе за другими ВЭУ. В заключении приведено сравнение достоинств и недостатков двух разных методов на базе URANS и LES. Расчеты проведены на вычислительном кластере web-лаборатории UNICFD ИСП РАН. Каждый расчет запускался на 72-96 вычислительных ядрах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-07-01391).

AN ALGORITHM TO IDENTIFY TEXT MARKED IN ROCK CORE PICTURES WITH MACHINE LEARNING ALGORITHM

Bai Yunfeng¹

¹*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Arkhangelsk, Russia
yumengleme@126.com*

Petroleum engineers are interested in obtaining a series of numerical descriptors or features which statistically describe porous materials. As these features are valuable to predict the physical properties of porous media including porosity, specific permeability and formation factor which are important components in production studies. Traditionally, these numerical descriptors or features are gathered by experts based on analysing rock core samples with microscope or experiment. And it has been noticed that these processes are time consuming. The aim of our project is to extract numerical descriptors or gather feature of rock samples from their images made under microscope with computer vision algorithm, which can efficiently save time.

This paper is about an algorithm to identify the text used to mark microscope magnification information in rock core sample pictures. This is a sub project. As locations of text in these pictures are not fixed, font of text is not fixed, font size of text is not fixed, a method of two steps is designed to identify the text from the background. It works as follows: first, find the location of text; second, recognize the text with machine learning.

Experimental results demonstrate that the proposed approach could efficiently be used to identify the magnification information in rock core sample pictures.

Секция 4

Суперкомпьютерные технологии решения прикладных проблем

МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАНА В КЕРОГЕНЕ

М.Ю. Антонов¹

¹*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Якутск, Россия*
mikhail.antonoff@gmail.com

В работе рассматриваются вычислительные модели, моделирующие состояние газа в условиях высоких давления и температур, соответствующих состоянию газа в керогене, с использованием методов молекулярного моделирования.

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА НОВОГО ТОПОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Д.С. Ахметбаев^{1,*} и А.Р. Джандигулов^{2,**}

¹*Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Астана,
Республика Казахстан*
²*Евразийский национальный университет им. Л. Гумилева, Астана,
Республика Казахстан*
**axmetbaev46@mail.ru, **abeke@mail.ru*

Предлагается реализация нового алгоритма определения коэффициентов распределения задающих токов в сложных электрических сетях при установившемся режиме. Нахождение коэффициентов токораспределения существенно упрощает анализ стационарных режимов таких сетей. Традиционные подходы к анализу установившихся режимов предусматривает решение нелинейных систем уравнений достаточно большой размерности, решение которых проводится итерационными методами, что не всегда приводят к удовлетворительным результатам.

Другой подход связан с использованием топологии анализируемой сети. Одним из авторов данного доклада получены явные формулы вычисления

коэффициентов токораспределения на основе топологии сложных электрических сетей, без составления каких-либо уравнений.

Достоинством предлагаемого подхода, в отличие от ранее известных, является отсутствие необходимости вычисления всех 2-деревьев, что сокращает количество операций в $n2$ раз.

Полученные результаты вычислений предложенным методом на различных тестовых примерах на 99% совпали с результатами вычислений, полученных при помощи промышленной программы RastrWin3. Вместе с тем, следует отметить, что программа работает существенно быстрее, а результаты вычислений более наглядно описывают происходящие в сети процессы.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МАТРИЧНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С НЕПРЕРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Ю.И. Виноградов¹

¹ *Московский государственный технический университет им. Н. Э.*

Баумана, Москва

yuvino@rambler.ru

Прикладной проблемой механики сплошных сред является анализ концентрации напряжений в тонкостенных конструкциях, например, летательных аппаратов.

Математической проблемой при этом является анализ математических моделей механики деформирования оболочек и пластин с контролируемой погрешностью, то есть аналитически.

Решается проблема анализа математических моделей в виде линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) теории оболочек и пластин для класса краевых задач, ограниченного возможностью метода Фурье разделения переменных.

Решение проблемы основано на работах Вольтерры (1887 г.), Пикара (1888 г.) и Крылова (1931 г.). При этом модифицирован подход Вольтерры к определению мультипликативного интеграла – аналога определенного, интегральный ряд Пикара представлен в виде ряда Тейлора для матричной экспоненты, используются идеи Крылова и доказательства Стеклова о множестве фундаментальных систем решений ОДУ. Решения однородных ОДУ и для их правых частей впервые получены в виде сходящихся матричных рядов, удобных для программирования и решения на ЭВМ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №18-08-00840А.

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОДНОГО АЛГОРИТМА ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ БОЛЬШИХ ОТКРЫТЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ

В.Д. Волокитин¹

¹*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
valentin.volokitin@itlab.unn.ru*

Многочастичные квантовые системы подвержены «Проклятию размерности»: размерность гильбертова пространства, в котором «живут» эти системы, растет экспоненциально с числом компонент систем. Однако для некоторых систем этого «проклятия» можно избежать с использованием технологии малоранговых аппроксимаций, известной как «matrix product state/operator (MPS/O) representation» в вычислительной квантовой физике или как «тензорный поезд» в прикладной математике. Мы рассматриваем цепочки из N спинов, связанных взаимодействием с ближайшим соседом. Спины подвергаются воздействию окружающей среды. Совместное действие пространственно неупорядоченных взаимодействий и обусловленной средой декогеренции приводят к релаксации таких квантовых систем в нетривиальные асимптотические состояния. Используя технику MPO и численно интегрируя модельные системы методом «time-evolving block decimation», принципиально возможно достичь асимптотических состояний. В докладе предлагается способ распараллеливания данного метода для кластерных систем, позволивший разрешить асимптотические состояния модельных систем с $N = 128$ спинами (полная размерность гильбертова пространства = $2^{128} \approx 10^{39}$).

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО–СЛОЖНЫХ ЗАДАЧАХ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В.П. Гергель¹

¹*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
gergel@unn.ru*

В докладе рассматриваются параллельные алгоритмы для решения вычислительно–сложных задач глобальной оптимизации. Неходимость оптимизации возникают практически при решении любой прикладной задачи и в большинстве случаев нахождение оптимальных параметров требует большого объема вычислений. Преодоление вычислительной сложности возможно только при использовании высокопроизводительных

вычислительных систем. В докладе приводятся эффективные параллельные алгоритмы глобальной оптимизации и рассматриваются результаты вычислительных экспериментов.

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО СЛОЖНЫХ ЗАДАЧ

Б.М. Глинский¹, Ю.А. Загоруйко², И.М. Куликов¹ и А.Ф. Сапегина¹

*¹Институт вычислительной математики и математической геофизики
СО РАН, Новосибирск, Россия ²Институт систем информатики СО РАН
им. А.П. Ершова СО РАН, Новосибирск, Россия
gbm@sccc.ru*

Обсуждаются вопросы применения суперкомпьютерных технологий, разработанных авторами статьи, к решению вычислительно сложных задач математической физики. Разработанная технология создания алгоритмического и программного обеспечения для суперкомпьютеров, содержит три связанных этапа: со-дизайн, под которым мы понимаем адаптацию постановки задачи, математического метода, вычислительного алгоритма под параллельную архитектуру суперкомпьютера на всех этапах решения задачи; создание упреждающего алгоритмического и программного обеспечения для наиболее перспективных суперкомпьютеров на основе имитационного моделирования; оценка энергоэффективности алгоритмов при различных реализациях на заданной архитектуре суперЭВМ.

Предлагается дальнейшее развитие суперкомпьютерных технологий с применением интеллектуальной поддержки решения вычислительно сложных задач с использованием онтологии вычислительных методов и алгоритмов решения задачи, онтологии вычислительных гетерогенных архитектур и правил принятия решения.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЯПУНОВА ДЛЯ СВЯЗОК АТТРАКТОРОВ ШИЛЬНИКОВА В ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ НАНОСПУТНИКОВ ПЕРЕМЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

А.В. Ерёменко^{1,*} и А.В. Дорошин^{1,}**

*¹Самарский национальный исследовательский университет имени
академика С.П. Королева, Самара, Россия
*yeryomenko.a@bk.ru, **doran@inbox.ru*

Рассматриваются вопросы построения эффективных вычислительных алгоритмов вычисления показателей Ляпунова для определения свойств сложных фазовых траекторий в фазовых пространствах углового движения

наноспутников переменной конфигурации. Среди указанных фазовых траекторий находятся отдельные траектории–аттракторы Шильникова, а также их связки, изучение свойств которых является важной задачей анализа динамики движения наноспутника. В этой связи также важна задача применения для этих целей эффективных вычислительных алгоритмов и их реализации в распараллеленных вариантах. Примером подобной реализации может являться выполненная в настоящей работе многопоточное приложение Java.

PARALLEL RENORMALIZATION BASED MULTILEVEL MONTE CARLO ALGORITHM

Oleg Iliev¹, Jan Mohring, Nikolay Shegunov, and Petr Zakharov

¹*Fraunhofer Institute for Industrial Mathematics, Kaiserslautern, Germany*
iliev@itum.fhg.de

Multilevel Monte Carlo (MLMC) attracts great interest for numerical simulations of SPDEs, due to its superiority over the standard Monte Carlo approach. In previous papers the authors, have presented renormalization based MLMC approach, over a simple SPDE model problem in Computational Fluid Dynamics. Such renormalization leads to very efficient simulations. Here we propose and study a parallel version of the renormalization based MLMC suitable for large scale problems.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ, ПОРОЖДЕННОЙ НЕСТАЦИОНАРНЫМ КРАЕВЫМ РЕЖИМОМ

А.Л. Казаков¹

¹*Институт динамики систем и теории управления Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*

kazakov@icc.ru

Рассматриваются решения двумерного нелинейного уравнения теплопроводности, имеющие вид тепловой волны, распространяющейся по нулевому фону с конечной скоростью. Подобные решения нетипичны для параболических уравнений, их существование связано с вырождением задачи на фронте волны (нулевым фронте). Ранее авторами уже проводились исследования в данном направлении, в частности, был разработан алгоритм пошагового решения уравнения методом граничных элементов при известном законе движения нулевого фронта. В докладе представлен алгоритм решения при ненулевом краевом условии, заданным на подвижной границе. Отличие новой задачи – неизвестная в каждый момент область решения. Решение проводится в два этапа:

1. Меняются ролями искомая функция и радиальная полярная координата. Для новой искомой функции в каждый момент времени решается краевая задача для уравнения Пуассона в известной области. Пошаговое решение этой задачи на заданном промежутке времени позволяет определить закон движения нулевого фронта.
2. Решается исходное уравнение при определенном законе движения фронта. Распараллеленный алгоритм реализован на суперкомпьютере Уран ИММ УрО РАН.

Тестовые расчеты показали хорошие результаты.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В.Л. Мальшев¹

¹ *Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,
Россия*

victor.L.malyshev@gmail.com

В представленной работе рассматривается применение высокопроизводительных алгоритмов для моделирования динамики дисперсных систем с помощью метода молекулярной динамики. Крупномасштабное моделирование, позволяющее определять различные термодинамические параметры и контролировать процессы фазовых превращений, требует рассмотрения большого количества частиц, что накладывает существенные ограничения на вычислительные возможности системы. В работе рассмотрены различные задачи динамики дисперсных систем. Для решения поставленных задач авторами разработана специализированная структура данных, позволяющая уменьшить вычислительную сложность алгоритма с квадратичной до линейной. Специфика метода молекулярной динамики позволяет достичь значительного ускорения при использовании вычислений на гетерогенных станциях, оснащенных центральным процессором (CPU) и графическими процессорами (GPU). Авторами показано, что представленная методика может быть результативно использована для решения задач, связанных с моделированием процессов, происходящих в областях с характерными размерами в десятки нанометров на персональных компьютерах, оборудованных одним или несколькими GPU.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ПОТОКОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С НЕЧЕТКОЙ СРЕДОЙ ВЫЧИСЛЕНИЙ

А.В. Мышев¹

¹ *Обнинский институт атомной энергетики — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия
mishhev@iate.obninsk.ru*

В работе раскрывается архитектура (структура) виртуальных потоковых вычислительных систем с нечеткой средой вычислений (условия замкнутости, ограничений, обмена, малых масштабов и информационной неопределенности), которая предполагает, что аппаратно-программные, вычислительные и информационно-интеллектуальные функции таких систем реально могут быть реализованы и воплощены в виде продуктов hardware, software, brainware (как отдельных платформ, так и синтеза платформ различных уровней в виде схемотехнических и системотехнических решений) для суперкомпьютерных технологий математического моделирования. Такие продукты позволяют получать более адекватные, надежные, значимые и ценные результаты в вычислительных технологиях математического моделирования. Это обусловлено тем, что логические схемы алгоритмов и процедур вычислительных технологий включают информационную систему координат привязки и проверки результатов вычислений в нечеткой (размытой) среде вычислений, на основе принципов локальности (физической, информационной, временной и модельной) и задания модели информационной среды формирования результата.

Принципы локальности определяют следующие важные свойства механизма получения результатов математического моделирования в различных аспектах, а именно:

1. физическая локальность обусловлена ограничениями аппаратно-алгоритмического характера;
2. временная локальность обусловлена квантованием по физическому времени и алгоритмическими ограничениями по информационному времени;
3. информационная локальность или шаг информационной системы координат определяется количеством значащих цифр получаемых результатов в локальной области значений;
4. модельная локальность определяется сферой действия дискретной линейаризованной модели получения результатов вычислений в окрестности узлов информационной системы координат.

Модель информационной среды позволяет учитывать факторы неопределенности, ограничений, обмена в логических схемах алгоритмов и процедур получения результатов вычислений.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
СЛОИСТЫХ И БЛОЧНЫХ СРЕД С НЕЛИНЕЙНЫМИ
КОНТАКТНЫМИ УСЛОВИЯМИ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ**

И.С. Никитин¹

¹*Институт автоматизации проектирования РАН (ИАП РАН), Москва,
Россия*

i_nikitin@list.ru

Построены континуальные модели деформируемых твердых сред с дискретным набором плоскостей скольжения (слоистые, блочные среды) и с нелинейными условиями проскальзывания вязкопластического типа на контактных границах структурных элементов. Для устойчивого численного решения системы дифференциальных уравнений предложен явно- неявный метод с явной аппроксимацией уравнений движения и неявной аппроксимацией определяющих соотношений, содержащих малый параметр в знаменателе нелинейных свободных членов. Из неявных нелинейных разностных аппроксимаций аналитически, с использованием метода возмущений получены различные эффективные формулы корректировки компонент напряжений после «упругого» шага по времени. Для расчета «упругого» шага использован сеточно-характеристический метод на гексаэдральных сетках, который позволил существенно увеличить скорость расчётов и провести моделирование нестационарной трёхмерной задачи о формировании отклика от ориентированного кластера флюидонасыщенных трещин, расположенных в однородной среде.

**СУПЕРКОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МИКРОСИСТЕМАХ
ГАЗ-МЕТАЛЛ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ДИНАМИКИ**

С.В. Поляков¹

¹*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской
академии наук, Москва*

polyakov@iamod.ru

Современный этап развития науки, техники и производства характеризуется массовой разработкой и внедрением нанотехнологий во многие отрасли хозяйства. При этом практикуется проведение предварительных детальных научных исследований с помощью современной компьютерной и суперкомпьютерной техники. Одним из перспективных научных направлений является моделирование процессов газодинамического напыления нанопорошков на

поверхности различных материалов. В рамках этой последней проблемы требуется все более точное описание взаимодействия газового потока с поверхностью. Одним из способов исследования этих процессов является прямое молекулярное моделирование, реализующееся на основе суперкомпьютерных технологий. В предлагаемом докладе будет представлена такая технология и результаты ее применения к решению проблемы пограничного слоя в системе газ-металл.

MATHEMATICAL MODEL OF DECOMPOSITION OF HYDRATES IN A RESERVOIR

V.V. Popov¹

¹*677000 Yakutsk, 58, Belinsky str., Ammosov North-Eastern Federal University
677000 Yakutsk, 1 Oktyabrsky St., Institute of Oil and Gas Problems Siberian
Division RAS,
imi.pn.pvv@mail.ru*

A mathematical model of the process of decomposition of hydrates in a reservoir by reducing pressure is implemented numerically. The dependence of results obtained on main parameters of the problem such as initial hydrate saturation, initial water saturation, depression on the formation, permeability coefficient, porosity has been studied. We compare results of the numerical implementation of the original model with results obtained after linearization of the heat equation, equations of gas flow continuity both separately and simultaneously. It is shown that with relatively low permeability, initial water saturation and depression one can use the model with linearized equations. The relative difference of the calculated hydrate saturation is a few percent. For the distribution of temperature and pressure, this difference is even smaller. The developed algorithm can easily be expanded for a multidimensional problem.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ КАРДАРА-ПАРИЗИ-ЦВАНГА С ИСТОЧНИКОМ

А.Э. Рассадин¹ и А.В. Степанов

¹*Лаборатория бесконечномерного анализа и математической физики
механико-математического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова,
Москва, Россия
brat_ras@list.ru*

В докладе представлены результаты численного решения двумерного уравнения Кардара-Паризи-Цванга (КПЦ) с не зависящим от времени случайным приповерхностным источником частиц и фрактальным начальным

условием, описывающего процесс роста поверхности твёрдого тела при эпитаксиальной технологии. С помощью подстановки типа Коула-Хопфа уравнение КПЦ сводится к линейному параболическому уравнению с переменным коэффициентом, расчет которого ведется с помощью суперкомпьютера ЛОМОНОСОВ с применением технологии параллельного программирования MPI с использованием фреймворка ROOT. При этом прямоугольная область решения исходного уравнения КПЦ сегментируется на прямоугольные подобласти. Обратной подстановкой по решению вспомогательного уравнения восстанавливается искомый профиль эволюционирующей поверхности, оценивается его автокорреляционная функция и её спектральная плотность мощности, а также временная динамика фрактальной размерности поверхности и информации по Шеннону. Кроме того, на отдельных линиях вычисляется тройная автокорреляционная функция в качестве характеристики негауссовости процесса роста.

Работа поддержана РФФИ, грант № 18-08-01356-а.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ДОКРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В.В. Репинский¹

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
repinski.vadim@yandex.ru*

Для определения критических нагрузок потери устойчивости предлагается подход, позволяющий учесть геометрическую нелинейность докритического напряженно – деформированного состояния (НДС) моделируемых пространственных конструкций. На первом этапе определяется НДС с учетом геометрической нелинейности при некотором заданном уровне нагружения. Затем в окрестности найденного решения проводится линеаризация нелинейной системы уравнений и находится решение полученной линеаризованной системы. Далее проводится повторная линеаризация исходной нелинейной системы уравнений в окрестности решения линеаризованной системы, полученного на предыдущем этапе. Условие вырожденности системы уравнений, полученной после повторной линеаризации, приводит к обобщенной проблеме собственных значений, решая которую получим искомое значение критических нагрузок потери устойчивости. В частном случае, когда конструкция деформируется линейно вплоть до достижения критического равновесия, подход позволяет получать линеаризованное решение задачи устойчивости минуя этап решения нелинейной задачи. Подход реализуется в конечно-элементных моделях (КЭМ) и блочных КЭМ с размерными КЭ для расчета в т.ч. трёхмерных конструкций

**VIRTUAL DIGITAL CORE SAMPLE: NEW PARALLEL
NUMERICAL TECHNIQUE TO ESTIMATE EFFECTIVE
ELASTIC PARAMETERS**

G.V. Reshetova¹

¹*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
reshetova.gv@mail.ru*

Physical characteristics of the core samples are mainly determined by expensive labor-intensive experiments, which result in a risk of damaging a sample. Fortunately recently there have appeared and are intensively developing alternative approaches, based on 3D Computer Tomography (CT). This approaches give the possibility of providing a three-dimensional high-resolution digital representation of the internal structures of rock samples and make possible to numerically evaluate the desired physical properties.

A new parallel numerical technique to estimate the effective elastic parameters of a rock core sample from 3D CT images is presented. The method is based on the energy equivalence principle and a new approach to solving the 3D static elasticity problem by the iterative relaxation technique. The method in the 3D case requires the obligatory parallel implementation. The most commonly used strategy of parallelization is MPI and OpenMP. The latest Fortran extension offers the new Coarray Fortran (CAF) features, which can potentially compete with the MPI due to its efficiency and simple implementation. We compare three parallel approaches based on the MPI, MPI+OpenMP and CAF to solve the problem. Comparison of these methods has shown that the CAF brings about a sufficiently compact parallel code with a simple syntax and provides comparable performance to an equivalent MPI version.

**NUMERICAL SIMULATION OF BUBBLE DYNAMICS IN
ACOUSTIC FIELD USING GRAPHICS PROCESSING UNIT**

G.I. Serezhdzhinova¹

¹*Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education «NORTH
CAUCASUS FEDERAL UNIVERSITY», Pyatigorsk, Russia
gilmanova.galia@gmail.com*

In many industries, dissolved gases in the liquid have a negative effect on technological processes. It is known that ultrasonic vibrations provide a faster and deeper decrease in the concentration of dissolved gas, compared with other methods. So, the study of the influence of an acoustic field on the dynamics of bubbles is an actual problem. In the present paper, three-dimensional modeling of the dynamics of bubbles in unbounded liquid in acoustic field. We consider

a cluster of bubbles in a unbounded liquid. As a field is turned two cases of bubble dynamics are observed, depending on the bubble concentration. In the first case, with a small number of bubbles, a one-way interaction field-bubble is observed, so their effect on the field is insignificant. In the second case, with a high concentration of bubbles, a two-way interaction of the bubbles-field-bubbles is appeared, so we observe formation of a wave of void fraction which rapidly propagates through the bubbly medium leaving a region almost free of bubbles behind its front. To accelerate calculations, the matrix-vector product algorithm was parallelized on GPUs using CUDA technology, without storing the matrix in the computer's memory.

MODELING OF BURDEN AT AUTOMATED STRENGTH CALCULATION OF MOBILE VEHICLES SUPPORTING STRUCTURES

M, Tokareva^{1,*} и T, Zubkova^{1,**}

¹*Orenburg State University, Orenburg*

tokareva@mail.osu.ru*, *bars87@mail.ru*

A method, its algorithmic and software implementation, based on the use of the Ritz variational principle, which allows to calculate the values of stresses, displacements, reactions at the points of interest to the researcher, has been developed to simulate static loading when calculating the strength of structures consisting of flat elements This provides an opportunity to reduce the complexity and timeline of final testing of the supporting structures of mobile vehicles.

DIGITAL TWINS OF MULTISCALE 3D HETEROGENEOUS GEOLOGICAL OBJECTS BASED ON 3D TECTONIC AND SEISMIC SIMULATIONS: FAULTS, FRACTURES, AND CAVES

V.A. Cheverda¹

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

vova_chev@mail.ru

Seismic waves' propagation and imaging in a three-dimensional multiscale geological media are one of the main trends in the development of modern geophysics. We develop 3D digital twin of some real geological object. This object is cavernous fractured carbonate reservoir near the Riphean roof. One of the main features of this geology is the presence of the family of geological faults. To simulate the detailed 3D structure of these faults, in particular, their interiors and surrounding damaged areas, we use paleo tectonic data and perform simulation of blocks interaction with the use of 3D discrete element. This simulation we do with GPU parallelization.

Next, we do the finite-difference simulation of the seismic waves' propagation in this digital geological model and get the full 3D data set. To do this simulation we use an original technique based on local grid refinement in time and space. To be able to deal with huge amount of input / output data we use High-Performance Computing (HPC) systems with parallel architecture and hybrid parallelization strategy on the base of MPI and OpenMP.

For multiscale seismic imaging, we develop a special approach that suppresses specular reflection, but accumulates weak scattered / diffracted waves and, hence, opens the way to see subseismic structures, like fracture corridors and clusters of caves. To compute these images we use HPC with parallel architecture and MPI+OpenMP programming.

HIGH THROUGHPUT CALCULATIONS AS AN ELEVATOR ON THE WAY FROM CHEMICAL STRUCTURE TO DRUG DESIGN AND NOVEL MATERIALS

I.D. Iushina¹

¹*South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*
iushinaid@susu.ru

Development of new materials and drugs requires expensive and time consuming experimental methods. We describe the role of virtual design of organic crystal structures and theoretical predictions of their optical and biological properties. We focus on computational techniques for the modelling of organic materials with nonlinear optical and antibacterial properties.

The evolutionary algorithms applied to 2-iodo-3-hydroxypyridin crystal structure leads to increased hyperpolarizability of its polymorphs and reveals great impact of hydrogen bonding on the stabilization of generated structures. Periodic quantum-chemical calculations of amino acid crystals allow analyzing their elastic properties in tasks of design of flexible crystalline materials. The modeling of biopolymers using classical molecular dynamics enables to investigate their conformational mobility: the structure of chloramphenicol complex with the E.coli ribosome stalled in the canonical state explained the results of biochemical studies. We illustrate how the global challenges in material science and drug design can be solved on the basis of high throughput calculations applied as an elevator in modern structural chemistry.

The work was made with the support of Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant 4.1157.2017/4.6, contract No. 02.A03.21.0011).

**МЕТОДЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
МНОГОФАЗНОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ
ЖИДКОСТИ В ТРЕХМЕРНЫХ ПЛАСТАХ НА
ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

А.В. Цепаев¹

¹*Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия*

alex_tsepaev@mail.ru

Работа посвящена решению задач многофазного неизотермического течения жидкости в трехмерных пластах со скважинами. Рассматривалась трехмерная трехфазная "black oil" модель. Предполагалось, что температура флюидов влияет на текущие фильтрационные характеристики и, в следствии этого, на конечную нефтеотдачу. Для определения температуры использовался закон сохранения энергии (первый закон термодинамики) для пластовых систем при этом температура флюидов и скелета считались одинаковыми. Вязкости флюидов брались функциями температуры. Предложены методы для решения задач трехфазного течения в пористых средах, основанные на методах декомпозиции. На основе предложенных методов, построены численные алгоритмы для решения задачи на гетерогенных вычислительных системах. Показана высокая эффективность методов при решении задачи на графических ускорителях.

Секция 5

**Многомасштабный метод конечных
элементов**

**МОДЕЛИ ПОТОКОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
КВАЗИКЛЕТОЧНЫХ СЕТЕЙ**

А.О. Аристов¹

¹*Национальный исследовательский технологический университет
"МИСиС Москва, Россия
datan-87@mail.ru*

Рассматриваются предложенные автором дискретные структуры – квазиклеточные сети, предполагающие дискретизацию пространства – разделение на области-клетки вдоль направления распространения потоков в различных предметных интерпретациях (транспорт, промышленность, социальные системы, живые системы и др.). Каждая клетка представляется в памяти ЭВМ как набор данных о состоянии области пространства, потокообразующих объектов в ней, прохождения потока через указанную область. Распространение потока рассматривается как передача данных между соседними клетками. В целом квазиклеточные сети представляют собой модели, позволяющие реализовать общий потоковый дуализм (микро и макроуровень моделирования) в различных предметных интерпретациях.

**HOMOGENIZATION OF THE ELASTICITY PROBLEM WITH
PERIODICALLY LOCATED CRACKS**

А.А. Egorova¹, N.V. Neustroeva¹, N.M. Afanaseva¹

¹*M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
alena.egorova@gmail.com, nataliauv@mail.ru, afanasieva.nm@gmail.com*

In this work we consider the elasticity problem on a domain with periodically located cracks. It is supposed, that opposite faces of cracks can not penetrate into each other. The period of distribution of cracks, as well as their sizes, depends on the small parameter. The problem is non-linear, it results in a variational inequality in some convex closed set of admissible displacements.

The behavior of the solution of the problem with periodically located cracks is determined by the first two terms u^0 , u^1 of the asymptotic expansion. Then

$u^0(x)$ is the solution of the elasticity problem in a domain without cracks, and the first corrector $u^1(x, y)$ is the solution of the variational inequality for a given function $u^0(x)$ on a periodicity cell. The convergence of the problem solution to the solution u^0 of the homogeneous problem was proved in [1]. We prove the convergence of the solution of the variational inequality to the solution of the homogenised problem by the unfolding method, introduced by [2]. For the first corrector of the classical asymptotic expansion we construct a penalty equation and a linear iterative equation in integral form. We prove that solution of the penalty problem converges to the solution of the local problem, when the small regularization parameter tends to zero. We show that the approximate solution of the iteration equation converges strongly to the solution of the penalty equation.

References

1. Pastukhova S. E., On homogenization of a variational inequality for an elastic body with periodically distributed fissures, *Sb. Math.*, 191, No. 2, 291–306 (2000).
2. Cioranescu D., Damlamian A., Griso G., The Periodic Unfolding Method in Homogenization, *SIAM J. Math. Anal. Society for Industrial and Applied Mathematics*, 40, No. 4, 1585–1620 (2008).

MIXED GENERALIZED MULTISCALE FINITE ELEMENT METHOD FOR NUMERICAL SIMULATION OF THE TRANSPORT AND FLOW PROBLEMS IN PERFORATED DOMAINS

V. Alekseev¹ and M. Vasilyeva^{1,2}

¹*North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

²*Institute for Scientific Computation, Texas A&M University, TX, USA*
alekseev.valen@mail.ru

Many processes in real applications have multiscale nature. These include flow and transport in porous media, deformation in composite materials, filtration processes and so on. In these physical processes, the transport of the material can be described by the concentration transport equation and energy equation. We use mixed formulation for the transport equation. The convection term in the transport equation is governed by a flow velocity field. The flow can be described by Darcy equation. Numerical solutions for flow and transport equations are expensive and require resolving fine-scale details. For this reason, some type of model reduction is necessary. In this work, we consider transport and flow processes in perforated domains. For coarse grid approximation, we use Mixed Generalized Multiscale Finite Element method (GMsFEM) and construct local multiscale basis functions. We present numerical results for model problem in two dimensional perforated domain.

**BLOCK FINITE-ELEMENT MODEL OF LAYER-BY-LAYER
ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THREE-LAYER
GENERALLY IRREGULAR SHELLS**

V.N. Bakulin¹

¹*Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
vbak@yandex.ru*

The block finite–element approach is proposed for constructing a new corrected model for layer–by–layer analysis of the stress–strain state of three–layer generally irregular shells. For the first time, a filler model has been developed for such shells, which is based on more accurate setting than those in similar conventional models; in this case, one succeeds in avoiding the breaking of generalized displacements on the interfaces with the carrier layers and, depending on the conditions of the problem, passes to simpler models. The model constructed makes it possible to take into account the change in the properties and parameters of the stress–strain state along all three coordinates to which the shell is assigned and to obtain for the first time the solution in a corrected formulation for various shell shapes and boundary conditions of the layers, as well as for their discontinuities.

**NUMERICAL SIMULATION OF NEUTRON TRANSPORT IN SP_3
APPROXIMATION BY FEM**

Alexander O. Vasilev¹

¹*North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
haska87@gmail.com*

The SP_3 approximation of the neutron transport equation allows improving the accuracy for both static and transient simulations for reactor core analysis compared with the neutron diffusion theory. Besides, the SP_3 calculation costs are much less than higher order transport methods (S_N or P_N). Another advantage of the SP_3 approximation is a similar structure of equations that is used in the diffusion method. Therefore, there is no difficulty to implement the SP_3 solution option to the multi-group neutron diffusion codes. In this work, the application of the SP_3 methodology based on solution of the λ - and α -spectral problems has been tested for HWR reactor benchmark test. The FEM is chosen to achieve the geometrical generality, using GMSH as a generic mesh generator. The results calculated with the diffusion and SP_3 methods are compared with the reference transport calculation results. It was found for the HWR reactor test that some eigenvalues are complex when calculating using both diffusion and SP_3 options.

**MULTILEVEL MARKOV CHAIN MONTE CARLO METHOD
FOR BAYESIAN INVERSE PROBLEMS FOR ELLIPTIC
EQUATIONS WITH LOG-NORMAL COEFFICIENTS**

Viet Ha Hoang¹

¹*Nanyang Technological University, Republic of Singapore*
vihahoang@gmail.com

The Markov Chain Monte Carlo method for sampling the posterior probability of Bayesian inverse problems for inferring uncertain coefficients of partial differential equations can be prohibitively expensive. This is because the forward equation needs to be solved repeatedly for a large number of samples. using the same small mesh to achieve a reasonable level of accuracy. We develop the multilevel Markov Chain Monte Carlo method that drastically reduces the complexity of the sampling procedure to an essentially optimal level, to achieve a prescribed level of accuracy. We consider Bayesian inverse problems for inferring the coefficients of elliptic partial differential equations with log-normal coefficients, with Gaussian prior. Rigorous mathematical theory is developed for the convergence of the method. Numerical experiments support our theory

MULTISCALE MODELING AND LEARNING OF HETEROGENEOUS DIFFERENTIAL EQUATIONS

Yalchin Efendiev

¹ *Texas A&M University, College Station, TX, USA*
² *Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia.*
yalchinrefendiev@gmail.com

We will discuss novel multiscale methods to approximate heterogeneous equations. The methods are based on rigorous multiscale method development. For heterogeneous flows, the coarse-grid solution using these basis functions provides first-order accuracy with respect to the coarse-mesh size independent of high permeability contrast. The degrees of freedom in multiscale methods represent the coordinates of the solution in the multiscale space. To design an upscaled model, we modify these basis functions such that the degrees of freedom have physical meanings, in particular, the averages of the solution in each continua. We will discuss deep learning strategies to approximate and learn the solutions of multiscale PDEs. Using learning techniques, we can avoid local computations and employ observed data.

NEURAL NETWORKS FOR MULTICONTINUUM MODELS

A.V. Grigoriev¹, S.P. Stepanov¹, Dj. Ya. Nikiforov¹

¹*North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*
re5itsme@gmail.com

Neural networks are developed for multicontinuum models. Multicontinuum models assume that processes divided into several continuums and they are connected by some exchange member. The proposed approach involves the use of a neural network for the approximate generation of a solution on one of the continuums and the further adaptation of the solution of a neural network with a solution obtained by the discrete method.

EFFECTIVE CALCULATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS WITH MULTIPLE CONFIGURATIONS BY ASYMPTOTIC HOMOGENIZATION TECHNIQUE

Mir.P. Akimov¹, V.V. Grigoriev¹ and P.E. Zakharov¹

¹*North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*
d_alighieri@rambler.ru

In this work a three-scale asymptotic homogenization technique is considered for calculating the thermophysical properties of composite materials with multiple periodic configurations. Heterogenities of porous structures were considered by the periodic distribution of single cells at the microscale and mesoscale levels. Two effective thermal conductivity coefficients are calculated to obtain an average solution on the global structure. A three-scale algorithm is also compared with the classical two-scale homogenization, where microscale allows all heterogenities. We provide a numerical experiments which show the efficiency and accuracy for the calculation of heat transfer of composite material with multiple configurations.

GENERALIZED MULTISCALE FINITE ELEMENT METHOD FOR SCATTERING PROBLEM IN HETEROGENEOUS MEDIA

U. Gavriliya¹, M. Vasilyeva¹ and V. Alekseev¹

¹*North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*
lanasemma@mail.ru

In this work we consider scattering problem of a time-harmonic wave in heterogeneous domain. As is well-known scattering problems in open-boundary domains are somewhat different from static or quasi-static ones because, to ensure the uniqueness of the solution, the Sommerfeld radiation condition must be imposed. The mathematical model is described by Helmholtz problem related to wave propagation with absorbing boundary condition. We construct a coarse grid approximation for effective solution using Generalized Multiscale Finite Element Method (GMsFEM). In this method, we construct a multiscale space using solution of the local spectral problems in each coarse elements. The results

of the numerical solution are presented for model problems wave propagation in heterogeneous media.

AN OVERVIEW OF RECENT ADVANCES IN NUMERICAL TREATMENT OF FRACTIONAL PDES WITH NON-SMOOTH DATA

Raytcho Lazarov¹, Bangti Jin, Joseph Pasciak, and Zhi Zhou

¹*Texas A&M University*
raytcho.lazarov@gmail.com

We survey some recent results in numerical treatment of initial and boundary value problems for fractional partial differential equations involving both Riemann-Liouville and Caputo fractional derivatives and fractional powers of elliptic operators. Examples of such problems include fractional time dependent diffusion equation and multi-term diffusion, convection-diffusion problems, and steady-state sub-diffusion described in terms of fractional Laplacian. Due to low regularity of the solution of fractional PDEs the numerical treatment poses various challenges that will be addressed in this talk. We shall discuss error estimates that are optimal with respect to the solution regularity and are expressed in terms of the data regularity. Finally, we present some numerical test that confirm our theoretical findings.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.В. Лисица¹

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

lisitsavv@ipgg.sbras.ru

В работе представлен алгоритм численного моделирования процессов формирования геологических разломов и приразломных зон повышенной деформации. Подход основан на методе дискретных элементов, который позволяет проводить моделирование развития конечных деформаций вплоть до нарушений сплошности среды, развития трещин и разломов. Основой метода дискретных элементов является представление среды в виде скопления частиц, которые взаимодействуют между собой как упругие или упруго-пластичные тела. При этом траектории движения частиц определяются вторым законом Ньютона, который интегрируется по времени с использованием метода конечных разностей, например, схемы Верле или Рунге-Кутты.

Программная реализация алгоритма, представленная в работе, основана на использовании технологии CUDA, которая чрезвычайно эффективна

для решения такого класса задач. В силу нелинейности взаимодействия частиц, расчет сил, действующих на каждую частицу, требует большого числа арифметических операций и применения условных операторов при относительно низкой интенсивности обращений к памяти. В рамках данной работы распараллеливание с применением технологии MPI проводится только по статистическим реализациям модели.

На основе численных экспериментов показано, что распределение деформаций в окрестности разлома имеет ярко выраженную клиновидную форму, что приводит к формированию приразломной зоны разрушения с локальным изменением петроупругих параметров среды.

AN UNSTRUCTURED GENERALIZED MULTISCALE FINITE ELEMENT METHOD FOR FLOWS IN FRACTURED MEDIA

D. Nikiforov¹, M. Vasilyeva¹

¹ North-Eastern Federal University

dju92@mail.ru

In this work, we consider an unstructured generalized multiscale finite element method for solution of the filtration problem in a fractured media. The basic idea is that coarse grid blocks are formed as sets of fine grid triangular cells and, thus, can be of an almost arbitrary polygonal shape. In this approach, when constructing the fine grid, the faces of coarse blocks are not considered. Discrete fractured model is used to describe flows in a fractured media.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ В АНИЗОТРОПНОМ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ

П.Е. Морозов¹

¹ ИММ - обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН

morozov@imm.knc.ru

В работе рассматривается задача нестационарного притока жидкости к горизонтальной скважине в анизотропном трещиновато-пористом пласте. Для описания фильтрации жидкости в трещиновато-пористой среде используется модель «вложенных» друг в друга пористой и трещинной сред, предложенная Г.И. Баренблаттом и Ю.П. Желтовым. При этом предполагается, что движение жидкости происходит по системе трещин, а обмен жидкостью между пористыми блоками и трещинами является квазистационарным. Численное решение задачи нестационарной фильтрации жидкости в анизотропном трещиновато-пористом пласте строится методом конечных элементов с использованием неструктурированных сеток со сгущением в окрестности ствола горизонтальной скважины. Сопоставление численного и аналитического решений показало, что они достаточно хорошо согласуются между

собой. Исследуется влияние анизотропии проницаемости трещин на динамику изменения давления в горизонтальной скважине. На основе алгоритма Левенберга-Марквардта предлагается метод определения фильтрационных параметров трещиновато-пористого пласта по кривым изменения давления в горизонтальной скважине.

МАСШТАБИРОВАНИЕ В СУПЕРЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ НЕФТЯНОГО ПЛАСТА

Поташев К.А., Мазо А.Б

¹ *Казанский федеральный университет*
kpotashev@mail.ru

Особенностью суперэлементной модели двухфазной фильтрации в нефтяном пласте является построение решения на расчетных сетках с пространственным шагом порядка расстояния между скважинами (сотни метров) по горизонтали и порядка общей толщины пласта (десятки метров) по вертикали. Для сохранения приемлемой точности решения выполняются процедуры ремасштабирования (апскейлинга) при переходе от детальной геологической к крупной суперэлементной расчетной сетке и демасштабирования (даунскейлинга) при обратном переходе на этапе локального уточнения решения. Апскейлингу подлежат поле абсолютной проницаемости и функции относительных фазовых проницаемостей. Процедура даунскейлинга применяется для сеточной функции насыщенности на суперэлементной сетке для формулировки начальных условий при локальном уточнении решения на детальной расчетной сетке. В работе описаны способы упрощения и методы реализации данных процедур с учетом характерных особенностей геологической структуры и процесса разработки нефтяных пластов.

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF MULTIPHASE FLOWS AT PORESCALE

Vladislav Balashov, Evgeny Savenkov

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS
e.savenkov@gmail.com

Analysis of the multiphase flows in different natural and artificial porous materials is relevant and important problem. With the development of micro-CT technologies which allows to construct geometrical models of material microstructure, it becomes possible to analyze such flows numerically.

We describe the computational framework for an analyses of multiphase fluid flows in the pore space. The approach is based on quasi-hydrodynamic regularization of Navier–Stokes–Cahn–Hilliard model which uses diffuse interface

description of the inter-phase boundaries. The developed algorithms allows for highly parallel implementation. Description of the simulation domain is based on voxel representation wich allows to use micro-CT data with minimal preprocessing.

A number of simulations demonstrating consistency of the model and algorithms as well as “realistic” flow simulations within realistic micro-CT models are presented. Additional attention is paid to the analysis of numerical algorithms with improved properties which minimize influence of the so called «parasitic currents».

GENERALIZED MULTISCALE FINITE ELEMENT METHOD FOR MULTICONTINUA UNSATURATED FLOW PROBLEM IN FRACTURED POROUS MEDIA

Denis Spiridonov¹, Maria Vasilyeva^{1,2}, Eric T. Chung³ and Yalchin Efendiev²

¹*North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

²*Institute for Scientific Computation, Texas A&M University, TX, USA*

³*The Chinese University of Hong Kong (CUHK), Hong Kong SAR*

d.stalnov@mail.ru

In this work, we present a multiscale method for simulations of the multicontinua unsaturated flow problems in heterogeneous fractured porous media. The mathematical model is described by the system of Richards equations for each continuum that coupled by the specific transfer term.

To illustrate the idea of our approach, we consider a dual continua background model with discrete fractures networks that generalized as a multicontinua model for unsaturated fluid flow in the complex heterogeneous porous media. We present fine grid approximation based on the finite element method and Discrete Fracture Model (DFM) approach to take into account flow in fractures. In this model, we construct an unstructured fine grid that take into account a complex fracture geometries for two and three-dimensional formulations. Due to construction of the unstructured grid, the fine grid approximation leads to the very large system of equations. For reduction of the discrete system size, we develop a multiscale method for coarse grid approximation of the coupled problem using Generalized Multiscale Finite Element Method (GMSFEM). In this method, we construct a coupled multiscale basis functions that used to construct highly accurate coarse grid approximation.

SIMULATION OF THE PROCESS OF INFILTRATION INTO FRACTURED POROUS SOIL IN PERMAFROST USING GMSFEM

S.P. Stepanov¹, A.V. Grigoriev¹, M.V. Vasilyeva¹, D.A. Spiridonov¹

¹*North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*
Cepe2a@inbox.ru

This article provides mathematical modeling of a complex multiphysical problem relevant to the territories of the Arctic. The multiphysical model consists of the Richards equation for describing the infiltration process, the dual porosity model for describing the natural fracture of the soil, the Stefan equation for describing the temperature regime of the frost soil. The computational algorithm is based on Generalized Multiscale Finite Element Method.

NUMERICAL HOMOGENIZATION OF ELASTOPLASTIC DEFORMATIONS OF COMPOSITE MATERIAL WITH SMALL PROPORTION OF INCLUSIONS

Petr V. Sivtsev¹, Aleksandr E. Kolesov¹, Petr E. Zakharov¹
and Ying Yang²

¹ *Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

² *Xiangtan University, Hunan, China.*

sivkapetr@mail.ru

Numerical simulation of the stress-strain state of a composite material may be difficult due to large computational complexity associated with a grid resolution of a large number of inclusions. To overcome the problem one may use the homogenization method. But for material with plastic properties, proper modeling of yield stress and hardening may be overcomplicated. In this work we use some simplification associated with a small proportion of inclusions and restriction of stress values by matrix material strength. As model problem, we use deformation of concrete deep beam reinforced with steel or basalt fiber inclusions. For the numerical solution, the finite element method was applied using the FEniCS computing platform.

MATHEMATICAL MODELING OF THE FLUID FLOW AND GEO-MECHANICS FOR MULTICONTINUA PROBLEM IN THE FRACTURED POROUS MEDIA USING GENERALIZED MULTISCALE FINITE ELEMENT METHOD

A. Tyrylgin, D. Spiridonov, M. Vasilyeva

¹*Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

koc9tk@mail.ru

In the reservoir simulation, mathematical modeling of the fluid flow and geo - mechanics in the fractured porous media plays an important role. Fracture networks have complex geometries, exist in the multiple scales and typically

have very small thickness compared to typical reservoir sizes. We consider a dual continua background model with discrete fractures networks that generalized as a multicontinua model. Due to high permeability, fractures have a significant impact on the flow processes. this work, we consider a discrete fracture model for coupled flow and mechanics problems. We construct coarse grid approximation using Generalized Multiscale Finite Element method (GMsFEM). In this method, we solve local spectral problems for construction to the multiscale basis functions for pressure and displacements. We present numerical results for two and three - dimensional model problem.

**MULTILEVEL MONTE CARLO ALGORITHMS BASED ON
RENORMALIZATION FOR ELLIPTIC PDES WITH RANDOM
COEFFICIENTS**

P.E. Zakharov¹

¹*North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*
zapetch@gmail.com

In groundwater flow simulations it is not possible or requires too many efforts to define the permeability field in the whole simulation domain. Usually, soil permeability measurement is given by values in very sparse space points, and for the rest of domain, permeability is uncertain. To handle with this there are uncertainty quantification methods and one of is Monte Carlo method. In this work we used finite volume method for PDE problem approximation and also used simplified renormalization method for a total flux approximation.

**NONLOCAL MULTI-CONTINUA UPSCALING AND
APPLICATION**

Eric T. Chung

¹*Chinese University of Hong Kong, China*
eric.t.chung@gmail.com

In this talk, we will present a new numerical upscaling framework, called nonlocal multi-continua (NLMC) upscaling, for flows in heterogeneous porous and fracture media. The method uses multiple macroscopic variables for each coarse region to model various flow characteristics. A nonlocal coupling among these variables, which is based rigorous mathematical analysis, are derived to obtain the resulting upscale system. Some numerical results for flows and poroelasticity are shown. This is a joint work with Yalchin Efendiev, Wing Tat Leung, Maria Vasilyeva, Yating Wang and Mary Wheeler. The research of Eric Chung is partially supported by the Hong Kong RGC General Research Fund (Project numbers 14304217 and 14302018) and CUHK Faculty of Science Direct Grant 2018-19.

Секция 6

Численные методы решения обратных задач

ЧИСЛЕННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАЧАЛЬНОГО УСЛОВИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

В.И. Васильев¹, А.М. Кардашевский¹

¹*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Якутск, Россия
vasvasil@mail.ru*

Рассматривается ретроспективная обратная задача теплопроводности для параболического уравнения с условием переопределения в виде заданного распределения температуры в конечный момент времени. В силу того, что данная задача весьма чувствительна к возмущениям дополнительного условия, разработка эффективного метода численного решения данной обратной задачи представляет большой интерес для исследователей [1–3].

В работе предлагается численный метод решения ретроспективной обратной задачи для многомерного параболического уравнения. Специфику рассматриваемых задач, хорошо учитывает метод итерационного уточнения начального условия, приводящий на каждой итерации к решению прямой корректной начально-краевой задачи для параболического уравнения. Для расчетов предлагается использовать быстро сходящийся метод сопряженных градиентов.

Обсуждаются результаты вычислительного эксперимента, проведенного на модельных задачах с точным и квазиреальными решениями, в том числе, со случайными погрешностями задания входных данных. Они показали достаточно высокую точность и эффективность решения поставленной задачи.

Работа поддержана грантом РФФ № 19-11-00230.

Литература

1. Самарский А. А., Вабищевич П. Н., Васильев В. И. Итерационное решение ретроспективной обратной задачи теплопроводности // Матем. моделирование. 1997, том 9, № 5, с. 119–127.
2. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. – М.: Едиториал. УРСС, 2004.
3. V.I. Vasil'ev and A.M. Kardashevsky. Iterative Solution of the Retrospective Inverse problem for a Parabolic Equation Using the Conjugate Gradient Method / Sixth Conference on Numerical Analysis

and Applications, June 15-22, 2016. Lozenetz, Bulgaria. LNCS, 2017, volume 10187. Pp. 698-705.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРАХ

Т.А. Винокурова¹, П.П. Пермяков²

¹*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск,
Россия*

²*Институт физико-технический проблем Севера им. В.П. Ларионова СО
РАН, Якутск, Россия
tatyana_umka91@mail.ru*

Освоение районов многолетней мерзлоты требует достоверных и долгосрочных прогнозных оценок в условиях меняющегося климата и техногенных воздействий. Опасные природные и техногенные факторы, как снегопад, инфильтрация атмосферных осадков, наледи, термокарсты и т.д., взаимодействуют с грунтом и определяют устойчивость территорий криолитозоны. В связи с этим, работа посвящена разработке новых алгоритмов и программных средств для идентификации граничных условий на поверхности мерзлого грунта с учетом реального процесса промерзания–протаивания порового раствора грунта.

Граничные обратные задачи относятся к классу некорректных и решаются специальными методами. Разработан алгоритм и программа численного восстановления теплового потока на поверхности промерзающих-протаивающих мерзлых грунтов с учетом порового раствора. Задачу сформулировали как задачу оптимального управления, т.е. находили искомую функцию из минимума целевого функционала. Минимизация функционала невязки осуществляется методом сопряженных градиентов, который относится к классу итерационных регуляризирующих численных алгоритмов.

Достоверность предложенного алгоритма проверена на модельной задаче с точным решением. В результате численного эксперимента установлено, что предложенный алгоритм обладает хорошим регуляризирующим свойством. С помощью предложенного алгоритма восстановлены тепловые потоки на поверхности мерзлого грунта при различных экзогенных и техногенных условиях (наледи, удаления снега, почвенно-растительного покрова т.д.).

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОБРАЩЕНИЯ ПОЛНОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ ТРЕХМЕРНО–НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ

К.Г. Гадыльшин¹

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия
GadylshinKG@ipgg.sbras.ru*

Метод обращения полного волнового поля (FWI, англ. Full Waveform Inversion) обеспечивает построение глубинной скоростной модели путём решения обратной динамической задачи сейсмологии на основе использования всей информации, доступной в сейсмических данных. Эта задача требует больших вычислительных ресурсов, так как на каждой итерации процесса минимизации происходит численное моделирование волновых полей для всех сейсмических источников, участвующих в обращении. Численная реализация FWI, представленная в работе, включает в себя два уровня параллелизма. На первом уровне, обратная задача распараллеливается по сейсмическим источникам. Второй уровень — параллельная реализация расчёта одного источника: в зависимости от размера задачи, частотного диапазона сигнала и характеристик суперкомпьютера задача либо распараллеливается между вычислительными узлами с разбиением расчётной области, либо используется ОМР распараллеливание в пределах вычислительного узла, либо же задача считается на графическом ускорителе. В работе представлены результаты вычислений на суперкомпьютере как для реалистичных 3D моделей среды (синтетические входные данные), так и для реальных данных морской сейсмозаписи.

ЧИСЛЕННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КУСОЧНО-ПОСТОЯННОЙ ПРАВОЙ ЧАСТИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПО ГРАНИЧНЫМ ДАНЫМ

Д.Х. Иванов¹

¹*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Якутск, Россия
djulius.ivanov@yandex.ru*

В ограниченной области рассматривается краевая задача для эллиптического уравнения второго порядка с граничными условиями первого рода на кусочно-гладкой границе области. Обратная задача состоит в восстановлении кусочно-постоянной правой части, которая понимается в смысле идентификатора некоторой подобласти. В качестве переопределения (дополнительной

информации о решении) берутся граничные условия второго рода. В работе предложен вычислительный алгоритм идентификации правой части, основная идея которого заключается в замене идентификатора подобласти функцией Хевисайда от решения вспомогательной эллиптической задачи. Ставится задача минимизации функционала невязки для данных переопределения по правой части вспомогательной эллиптической задачи. Численная реализация основана на конечно-элементной аппроксимации с использованием вычислительной платформы FEniCS и пакета dolfin-adjoint. Возможности разработанного вычислительного алгоритма иллюстрируются результатами численного решения двумерных тестовых задач.

МНОГОМЕРНЫЕ АНАЛОГИ УРАВНЕНИЙ И.М. ГЕЛЬФАНДА, Б.М. ЛЕВИТАНА, В.А. МАРЧЕНКО И М.Г. КРЕЙНА

С.И. Кабанихин^{1,*}, М.А. Шишленин^{1,**} и Н.С. Новиков

¹*Институт вычислительной математики и математической геофизики
СО РАН, Новосибирск, Россия*

**ksi52@mail.ru, **mshishlenin@ngs.ru*

Будет изложен алгоритм численного решения обратных задач для систем уравнений акустики и теории упругости, возникающих в геофизике, медицине, промышленности. Для определения скорости распространения волн и плотности среды использованы данные площадной системы наблюдений. Построены многомерные аналоги уравнений И.М. Гельфанда, Б.М. Левитана, В.А. Марченко и М.Г. Крейна [1], дискретная аппроксимация которых приводит к необходимости решать системы линейных алгебраических уравнений с матрицами очень большого размера. Для это цели разработан супербыстрый алгоритм обращения блочно-теплицевых матриц [2, 3] больших размерностей в сочетании с методом Монте-Карло [4].

Литература

1. S. Kabanikhin, A. Satybaev, M. Shishlenin. Direct Methods of Solving Multidimensional Inverse Hyperbolic Problems. VSP. 2004.
2. Kabanikhin S.I., Novikov N.S., Oseledets I.V., Shishlenin M.A. Fast Toeplitz linear system inversion for solving two-dimensional acoustic inverse problem // J. of Inverse and Ill-Posed Problems, 2015. Vol. 23, No. 6, pp. 687-700.
3. В.В. Воеводин, Е.Е. Тыртышников. Вычислительные процессы с теплицевыми матрицами. Москва, Наука, 1987

4. Kabanikhin S.I., Sabelfeld K.K., Novikov N.S., Shishlenin M.A. Numerical solution of the multidimensional Gelfand–Levitan equation // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems, 2015. Vol. 23, No. 5, pp. 439-450.

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕБИТОВ СКВАЖИН
К ПОГРЕШНОСТЯМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЯ
ПРОНИЦАЕМОСТИ В УСЛОВИЯХ ОДНОФАЗНОЙ
СТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

Альфия Кадырова¹

¹ *Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия*
kadyrova@rambler.ru

Рассматриваются модельные задачи идентификации поля проницаемости двухмерного пласта по известным значениям забойного давления на скважинах в условиях однофазной стационарной фильтрации жидкости. Поле проницаемости определяется из решения обратной коэффициентной задачи, которая сводится к задаче минимизации функции невязки. Функция невязки имеет вид суммы квадратов разностей между вычисленными и известными значениями забойного давления на скважинах. Минимизация функции невязки проводится методом Левенберга-Марквардта. При решении обратной задачи поле проницаемости ищется в виде сплайн-функции с узлами интерполяции, совпадающими с местоположением скважин. Истинное поле проницаемости, которое в тестовых задачах всегда известно, строится методом «kriging» по заданным значения проницаемости в узлах вспомогательной регулярной сетки. Вычисленное поле проницаемости используется для расчета дебитов добывающих скважин при изменении дебитов нагнетательных скважин и при добавлении новых нагнетательных скважин. Проводится сравнение с результатами, полученными с использованием истинного поля проницаемости, и оценивается устойчивость к погрешностям идентификации поля проницаемости.

РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ И УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ДАНЫМИ НА ВРЕМЕННОПОДОБНОЙ ГРАНИЦЕ

А.Л. Карчевский¹

¹*Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, Россия
karchevs@math.nsc.ru*

В работе представлено усовершенствование метода нагреваемой тонкой фольги, который позволяет изучать стационарные и нестационарные процессы переноса в области контактной линии «твердое тело-воздух-жидкость». Математически задачи сводятся к решению задачи Коши для эллиптического уравнения и решению уравнения теплопроводности с данными на временноподобной границе. Предложенные методы решений апробированы на реальных данных, полученных в ходе лабораторных экспериментов.

Работа поддержана грантом РФФ 18-19-00538, а результаты опубликованы:

1. A.L. Karchevsky, Reformulation of an inverse problem statement that reduces computational costs // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, 2013, V. 1, № 2, p. 4-20.
2. V. Marchuk, A. Karchevsky, A. Surtaev, O. Kabov, Heat flux at the surface of metal foil heater under evaporating sessile droplets // International Journal of Aerospace Engineering, 2015, V. 2015, Article ID 391036, 5 pages.
3. A.L. Karchevsky, I.V. Marchuk, O.A. Kabov, Calculation of the heat flux near the liquid-gas-solid contact line // Applied Mathematical Modelling, 2016, V. 40, n. 2, p. 1029-1037
4. V.V. Cheverda, I.V. Marchuk, A.L. Karchevsky, E.V. Orlik, O.A. Kabov, Experimental investigation of heat transfer in a rivulet on the inclined foil // Thermophysics and Aeromechanics, 2016, V. 23, n. 3, p. 415-420
5. V. Cheverda, A. Karchevsky, The heat flux near the contact line of the droplets on heated foil // MATEC Web of Conference, 2016, V. 84, paper number 00007, 4 p.
6. V.V. Cheverda, A.L. Karchevsky, I.V. Marchuk, O.A. Kabov, Heat flux density in the region of droplet contact line on a horizontal surface of a thin heated foil // Thermophysics and Aeromechanics, 2017, V. 24, n. 5, p. 803-806.
7. A.L. Karchevsky, Development of the heated thin foil technique for investigating nonstationary transfer processes // Interfacial Phenomena and Heat Transfer, 2018, V. 6, n. 3, p. 179-185

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КУСОЧНО-ПОСТОЯННОГО МЛАДШЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

А.Е. Колесов¹

¹*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Якутск, Россия
kolesov.svfu@gmail.com*

В работе предложен новый алгоритм для восстановления кусочно-постоянного младшего коэффициента эллиптического уравнения. Рассматриваемая коэффициентная обратная задача сводится к задаче идентификации неизвестной подобласти. Предложенный алгоритм основан на минимизации функционала невязки под управлением правой части вспомогательного эллиптического уравнения для функции, характеризующей искомую подобласть. Численное решение задачи основано на методе конечных элементов и реализовано на вычислительной платформе FEniCS и библиотеке dolfin-adjoint. Производительность алгоритма демонстрируется на тестовых задачах.

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ДАНЫМ МОЩНОСТИ ТРЕНИЯ В БАРАБАННОМ ТОРМОЗНОМ УСТРОЙСТВЕ С НАКЛАДКОЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

А.С. Кондаков¹

¹*Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии
наук, Якутск
kondak_aleksey@mail.ru*

В данной работе рассматривается задача восстановления суммарного теплового потока, т.е. удельной мощности теплообразования, в зоне трения барабанном тормозном устройстве, широко применяемом в транспортных средствах, например, в тракторе Т-150К и в автомобилях ВАЗ-2101, ГАЗ-3102. Барабанное тормозное устройство состоит из пары неподвижных тормозных колодок, расположенных внутри тормозного цилиндра, закреплённого с ведущим валом колеса и вращающегося вместе с ним. При торможении колодки прижимаются к цилиндру с определённым усилием, обеспечивающим остановки вращения оси колеса. В процессе торможения кинетическая энергия движущегося транспортного средства преобразуется тормозным устройством в теплоту, рассеиваемую посредством его элементов в окружающую среду. Тепловые анализы, проводимые посредством температурных измерений для пары трения, преследуют такие важные задачи как

оценку мощности фрикционного теплообразования (мощности трения), так и определении эффективных теплофизических свойств материалов, из которых изготавливаются элементы тормозного устройства. В связи с этим, оценка или восстановление удельной мощности фрикционного теплообразования значит и мощности трения по температурным замерам является актуальной математической задачей. Эффективным методом решения подобных обратных задач теплообмена является метод итерационной регуляризации на основе градиентных методов минимизации целевого функционала невязки.

ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В.Д. Полежаев¹, К.О. Юсупова²

¹*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва,
Россия*

²*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
vpolej@gmail.com*

Работа посвящена вопросам исследования адаптивных моделей временных рядов и разработке способов их построения. Самым проблемным этапом реализации алгоритмов методов прогнозирования временных рядов является идентификация неизвестных параметров, от которых зависит адекватность построенного прогноза. На основе экономических данных проведено исследование ряда адаптивных моделей: с использованием экспоненциального сглаживания, моделей Брауна, Хольта-Уинтерса и Тейла-Вейджа, учитывающих сезонность. Было установлено, что основные сложности возникают при подборе постоянных сглаживания и выборе коэффициентов, так как никакого универсального алгоритма их задания не существует.

В работе предложен способ интеграции адаптивного метода и метода численной оптимизации. В качестве оптимизационного метода выбран безградиентный метод – метод роя частиц (МРЧ), который в сравнении с градиентными и часто используемым МНК дал меньшую ошибку итогового прогноза и сходимость во всех случаях применения. Представлены алгоритмы поиска параметров, подлежащих идентификации в МРЧ. Показано, что в некоторых случаях предлагаемая модель имеет преимущество перед другими моделями временных рядов.

РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ С ДАННЫМИ НА ЧАСТИ ПОВЕРХНОСТИ

М.А. Шишленин^{1,*}, С.И. Кабанихин^{1,**}

¹ *Институт вычислительной математики и математической геофизики
СО РАН, Новосибирск, Россия*

**mshishlenin@ngs.ru, **ksi52@mail.ru*

Рассматриваются задачи Коши для уравнений математической физики с данными на части поверхности (задачи продолжения), которые возникают в геофизике, томографии, тепломассопереносе. В качестве примеров рассмотрены задачи продолжения теплового поля в недоступную для наблюдений зону, задачи продолжения электромагнитного поля по данным георадара.

Задачи продолжения являются некорректными и формулируются в виде операторного уравнения $Aq = f$, для решения которого применяется метод минимизации целевого функционала и метод сингулярного разложения. Исследуются свойства оператора A и приводится алгоритм минимизации функционала градиентным методом.

Изучение свойств сингулярных чисел оператора продолжения позволило регуляризовать задачу продолжения с учетом погрешности в данных. Предложенные методы позволяют восстановить граничные условия на недоступной части границы, а также получить информацию о неоднородностях (количество, расположение, размеры), расположенных в области недоступности.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ ПРОЦЕССОМ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ДЕТАЛЯМИ С ЗАКЛАДНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ

Н.П. Старостин, О.А. Аммосова, М.А. Васильева¹

¹ *Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской
академии наук, Якутск, Россия*

eowa@mail.ru

Согласно нормативным документам сварные соединения полиэтиленовых труб для газопроводов с соединительными деталями рекомендуется производить при температуре окружающего воздуха не ниже -15 градусов Цельсия. В данной работе предлагается технология оперативной сварки на открытом воздухе при температурах до минус 50 градусов. Для успешного управления тепловым процессом сварки определенное внимание уделяется учету теплоты фазового превращения в интервале температур. Для этого предлагается использовать зависимость степени кристалличности материала трубы от температуры, определяемую на основе данных дифференциального сканирующего калориметра. Управление тепловым процессом сварки сводится

к предварительному подогреву с использованием закладного нагревателя, оплавлению в регламентируемом режиме и охлаждению под слоем теплоизоляции. Технологические параметры сварки (напряжение для подогрева, продолжительности подогрева и выравнивания температуры, толщина слоя теплоизоляции) определяются расчетным путем из условия динамики температурного поля в зоне термического влияния по закономерности, свойственной при сварке в условиях допустимых температур. Приводятся результаты определения параметров сварки при электродуговой сварке и приварке седлового отвода, а также результаты испытаний соединений, полученных по предлагаемой технологии сварки.

NUMERICAL METHOD FOR SOLVING THE BOUNDARY INVERSE PROBLEM OF ONE DIMENSIONAL PARABOLIC EQUATION

Ling-De Su¹

¹*Ammosov North-Eastern Federal University
sulingde@gmail.com*

Numerical method for solving boundary inverse problem is considered, using implicit difference scheme for approximation this boundary inverse problem. Numerical solution of the boundary inverse problem is determined by using a special decomposition which transforms the problem into two standard problems. The results of numerical experiments including with random errors in the input data are presented, confirming the capabilities of the proposed computational algorithms for solving this boundary inverse problem.

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ТРЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Р.С. Тихонов¹, Н.П. Старостин¹

¹*Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской
академии наук, Якутск, Россия
roman_tikhon@mail.ru*

При проведении стендовых и эксплуатационных испытаний узлов трения зачастую невозможно непосредственно измерить момент трения. Это связано с компактностью реальных узлов трения и невозможностью размещения в них громоздких механических устройств. Кроме того, большинство серийных машин трения не позволяет измерять моменты трения, превышающие предельную величину. Задача еще более усложняется для системы узлов трения, например, системы подшипников скольжения на общем валу. Нами

предложен метод тепловой диагностики трения, позволяющий восстанавливать момент трения по температурным данным. Метод основан на факте, что практически вся энергия, затрачиваемая на трение, трансформируется в теплоту. Таким образом, задача определения момента трения сводится к решению обратной задачи идентификации функции фрикционного теплообразования. Рассматривается обратная задача одновременного восстановления в системе подшипников скольжения моментов сил трения, зависящих от времени. Нелинейная обратная задача решается методом итерационной регуляризации на основе градиентных методов минимизации функционала невязки. Приводятся результаты определения четырех функций теплообразования (момента трения) и результаты экспериментальной проверки эффективности предлагаемого метода тепловой диагностики трения.

О РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В МНОГОСЛОЙНОМ ПЛАСТЕ

М.Х. Хайруллин¹

¹*Институт механики и машиностроения — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань*
khairullin@imm.knc.ru

Отличительной чертой обратных задач нефтегазовой гидромеханики, связанных с исследованием математических моделей реальных процессов фильтрации в нефтяных пластах, является то, что характер дополнительной информации определяется возможностями промыслового эксперимента. Проблемы, связанные с интерпретацией геолого-промысловой информации, приводят к некорректным, в смысле Адамара, математическим задачам.

Предлагается метод интерпретации кривых изменения температуры и давления, снятых одновременно несколькими глубинными измерительными автономными приборами, установленными в различных участках ствола горизонтальной скважины с учетом коэффициента влияния ствола скважины. Метод позволяет оценить коллекторские свойства призабойных и удаленных зон пласта, радиусы призабойных зон в окрестностях глубинных приборов.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ РАСШИРЕННЫХ СИСТЕМ

А.А. Чубатов¹

¹*Армавирский государственный педагогический университет, Армавир, Россия*
chaa@inbox.ru

Рассмотрена задача идентификации интенсивности источника загрязнения атмосферы по известным коэффициентам чувствительности, описывающим математическую модель и замерам концентрации.

Задача идентификации с помощью теоремы Дюамеля сводилась к решению приближенной СЛАУ. Задача некорректна по Адамару (решение неустойчиво к погрешностям исходных данных), что приводит к необходимости использовать регуляризирующие методы. Решение понимается в смысле псевдорешения (метод наименьших квадратов, минимизирующий невязку).

Векторы решения и невязки ищутся одновременно для этого СЛАУ дополняется нормальной системой и получившаяся расширенная нормальная система регуляризируется методом А.Н. Тихонова. Использован апостериорный способ выбора регуляризирующего параметра по принципу обобщенной невязки, т.к. априорный выбор гарантирует лишь асимптотическую сходимость к решению.

ТРЕХМЕРНЫЕ ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

А.Г. Ягола¹, Д.В. Лукьяненко¹, Я. Ван²

¹*Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*
²*Институт геологии и геофизики Китайской академии наук*
yagola@physics.msu.ru

В докладе, подготовленном совместно с Д.В.Лукьяненко (физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова) и Я. Ван (Институт геологии и геофизики Китайской академии наук), будут рассмотрены численные методы решения трехмерной обратной задачи восстановления распределения магнитного поля по исследуемому намагниченному телу под земной поверхностью по результатам измерений магнитного поля и его производных на поверхности и над поверхностью Земли.

Работа поддержана грантом РФФИ-ГФЕН 19-51-53005.

Научное издание

**СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

IV международная конференция

Тезисы докладов

Печатается в авторской редакции
Компьютерная верстка *С. П. Степанов*
Оформление обложки *П. Е. Захаров*

Подписано в печать 14.06.2019. Формат 60 × 84/16.

Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.

Печ. л. 6,25. Уч.изд. л. 6,5. Тираж 150 экз. Заказ № 209.

Издательский дом Северо-Восточного федерального университета,
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5.

Отпечатано в типографии ИД СВФУ