



III НАУЧНАЯ ШКОЛА ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МНОГОМАСШТАБНЫХ, МУЛЬТИФИЗИЧНЫХ ПРОБЛЕМ
ОСВОЕНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ**



ПРОГРАММА / СБОРНИК ТЕЗИСОВ

19 – 21 декабря 2024 г.
Якутск, Россия



ОРГАНИЗАТОРЫ

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
Международная научно-исследовательская лаборатория «Многомасштабное математическое моделирование и компьютерные вычисления»
Лаборатория «Вычислительные технологии и искусственный интеллект»

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

Эфендиев Ялчин, профессор., TA&MU, США, СВФУ, Якутск

Члены:

Вабищеви́ч Петр Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, Москва

Головизнин Василий Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, Москва

Лаевский Юрий Миронович, д.ф.-м.н., профессор, Новосибирск

Цыпкин Георгий Геннадиевич, д.ф.-м.н., Москва

Четверушкин Борис Николаевич, академик РАН, Москва

Кабанихин Сергей Игоревич, член-корр. РАН, Новосибирск

Оселедец Иван Валерьевич, д.ф.-м.н., профессор РАН, Москва

Пененко Алексей Владимирович, д.ф.-м.н., ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

Васильев В.И., академик АН РС(Я), профессор, рук. гранта РФФ №23-71-30013

Ответственный секретарь:

Спиридонов Д.А., к.ф.-м.н., отв. исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Члены:

Алексеев В.Н., к.ф.-м.н., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Аммосов А.В., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Афанасьева Н.М., к.ф.-м.н., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Григорьев В.В., к.ф.-м.н., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Гуринов А.И., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Иванов Дь.Х, к.ф.-м.н., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Ильина К.П., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Калачикова У.С., к.ф.-м.н., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Саввин А.В., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Сивцев П.В., к.ф.-м.н., исполнитель гранта РФФ №23-71-30013

Сивцева В.И., к.ф.-м.н., постдокторант гранта РФФ №23-71-30013

Олесова Т.И., зав. кабинетом кафедры ВТ ИМИ СВФУ

Место проведения: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Кулаковского, 42, зал «Синергия», Якутск, Россия.

Сайт конференции: http://multiscalemr.ru/ru/forumforyoung24_1/

Научная школа для молодых ученых проводится при поддержке СВФУ в рамках гранта РФФ № 23-71-30013.

ПРОГРАММА

1-й день: 19 декабря — Четверг

Приветственные слова:

- 14:00 – 14:15 — Четверушкин Б.Н., академик РАН, заместитель академик-секретаря отделения математических наук РАН, рук. секции прикладной математики и информатики ОМН РАН;
— Васильев В.И., д. ф.-м.н., профессор, действующий член Академии наук РС(Я) заведующий кафедрой «Вычислительные технологии» ИМИ СВФУ
-

14:15 – 14:45 ЧЕТВЕРУШКИН Борис Николаевич (Москва)
Кинетические модели и моделирование задач гидро- и газовой динамики

14:45 – 15:15 ВЛАДИМИРОВ Леонид Николаевич (Якутск)
Математическое моделирование для устойчивого развития северо-восточных территорий России

15:15 – 15:45 САВВИНА Надежда Валерьевна (Якутск)
Тенденции медицинской науки для повышения эффективности здравоохранения

15:45 – 16:00 КОФЕ-БРЕЙК

16:00 – 16:30 ЛАЕВСКИЙ Юрий Миронович(Новосибирск)
Двухтемпературные модели фильтрации жидкости и газа

16:30 – 17:00 Слепцова Снежана Спиридоновна (Якутск)
Роль математического моделирования в современной медицине (на примере инфекционных болезней)

17:00 – 17:30 РОЖИН Игорь Иванович (Якутск)
Математическое моделирование гидратообразования при добыче, транспортировке и хранении природного газа в северных регионах

2-й день: 20 декабря — Пятница

09:30 – 10:00	КАБАНИХИН Сергей Игоревич (Новосибирск) <i>Математическое моделирование взаимосвязанных эпидемиологических, экономических и социальных процессов</i>
10:00 – 10:30	ПЕНЕНКО Алексей Владимирович (Новосибирск) <i>Алгоритмы обратного моделирования для систем оценки и прогноза качества воздуха</i>
10:30 – 11:00	ЕГОРОВ Иван Егорович (Якутск) <i>О подготовке молодых ученых в области дифференциальных уравнений с частными производными</i>
11:00 – 11:15	КОФЕ-БРЕЙК
11:15 – 11:35	ЛАЗАРЕВ Нюргун Петрович (Якутск) <i>Задача о равновесии неоднородного двумерного упругого тела с двумя взаимодействующими тонкими жесткими включениями</i>
11:35 – 11:50	СТЕПАНОВ Сергей Павлович (Якутск) <i>Многомасштабный подход с использованием явно-неявной временной схемы для решения нелинейной задачи Стефана</i>
11:50 – 12:05	ТЫРЫЛГИН Алексей Афанасьевич (Якутск) <i>Нейронная сеть для онлайн-многомасштабных моделей пониженного порядка для задачи пороупругости в неоднородных средах</i>
12:05 – 12:20	СПИРИДОНОВ Денис Алексеевич (Якутск) <i>Многомасштабное моделирование модели Дарси-Форхгеймера с онлайн коррекцией в трещиноватых средах</i>
12:20 – 12:30	Заккрытие конференции

3-й день: 21 декабря — Суббота

10:00 – 13:00	ОСЕЛЕДЕЦ Иван Валерьевич (Москва) <i>Методы машинного обучения для приближенного решения прямых и обратных задач математического моделирования</i>
---------------	---

КИНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГИДРО- И ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

Четверушкин Б. Н.¹

¹*ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия; office@keldysh.ru*

Связь между кинетическим и газодинамическим описанием сплошной среды хорошо известна из теоретической механики. В данной работе получена квазигазодинамическая система уравнений, построенная непосредственно на использовании кинетической модели для описания одночастичной функции распределения. Обсуждается наличие в задачах механики сплошной среды минимальных масштабов, меньше которых дальнейшая детализация не имеет смысла. Приводятся примеры использования квазигазодинамической системы для моделирования задач газовой динамики, магнитной газовой динамики, фильтрации нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chetveruskin B.N. Kinetic schemes and Quasi Gas Dynamic system of equations. CIMNE. Barcelona. 2008, P. 1-298.*
2. *Четверушкин Б.Н. Пределы детализации и формулировка моделей уравнений сплошных сред // Математическое моделирование. 2012, Т. 24(11), С. 33–52.*
3. *Четверушкин Б.Н., Асцензо Н.Д., Савельев А.В., Савельев В.И. Моделирование астрофизических явлений на основе высокопроизводительных вычислений // Доклады РАН. Математика. 2017, Т. 472(1), С. 13–17.*
4. *Четверушкин Б.Н., Балашихов В.А., Савенков Е.Б. Технология «цифровой керн» и суперкомпьютерные вычисления // Вестник РАН. 2023, Т. 93(6), С. 503–511.*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

Владимиров Л. Н.¹

¹*Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Россия; vladimirovln@mail.ru*

Арктические макрорегион выступает ресурсной базой развития экономики страны, где за последние годы реализуются масштабные научные, технологические, инновационные проекты, требующие разработки новых подходов и методов реализации. Математическое моделирование является актуальным вопросом для разработки и внедрения организационно-экономических механизмов развития ”точек роста” на региональном уровне.

Следует отметить специфику Арктического региона и риски реализации проектов, ведения хозяйственной деятельности, суровые климатические условия и повышенные издержки требуют повышенного внимания. В данном аспекте главным фактором развития выступает научно-технологическое развитие региона и наращивание научного потенциала.

Вместе с тем проблемы глобального изменения климата и антропогенного воздействия на природные процессы вызывают большой интерес в силу их огромной практической значимостью.

Один из наиболее значимых процессов, влияющих на изменения климата - это процесс круговорота углерода. Представляет интерес исследования круговорота углерода в локальных экосистемах, где значительным элементом экосистемы является болота, а также велико антропогенное воздействие. Проблема состоит в оценке эмиссии парниковых гаов и оценке их влияния на климат Арктического региона.

О ПОДГОТОВКЕ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ В ОБЛАСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ЧАСТНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ

Егоров И. Е.¹.

*¹ Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
Научно-исследовательский институт математики, г. Якутск, Россия;
ivanegorov51@mail.ru*

В докладе подчеркивается, что подготовка молодых учёных в области дифференциальных уравнений с частными производными сыграли большую роль открытые в ЯГУ аспирантуры и докторантуры по специальности 01.01.02 Дифференциальные уравнения. При этом была установлена тесная научно-педагогическая связь с профессорами НГУ и крупными учёными научных институтов СО РАН. Данная связь устойчива, расширяется и продолжает работать.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИЙ С УЧЕТОМ СОЦИАЛЬНЫХ, ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Кабанихин С.И.¹

*¹ Директор Международного математического центра
Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирское отделение РАН, г. Новосибирск,
Россия;
ksi52@mail.ru*

В докладе мы обсудим новые математические модели динамики социально-значимых заболеваний с учетом влияния социально-экономических процессов (ограничительные меры, вакцинация, экономические характеристики региона и др.) в регионах Российской Федерации на основе комбинации моделей машинного обучения с дифференциальными и агентными моделями. Получены чувствительные к измеряемым данным эпидемиологические параметры совмещенных моделей. Построены оптимизационные алгоритмы идентификации характерных эпидемиологических и социально-экономических параметров моделей на основе глобальных методов байесовского типа. Математически обоснованы взаимосвязь эпидемиологических и социально-экономических процессов. Построены сценарии распространения COVID-19 социально-экономических ситуаций в регионах РФ. Базовая

дифференциальная математическая модель в эпидемиологии или SIR-модель была сформулирована в 1927 году А. Кермаком и У. Маккендриком [4]. Замкнутая популяция N разделена на 3 группы: S – чувствительные, I – инфицированные и R – иммунные или умершие, связанные между собой $N = S(t) + I(t) + R(t)$

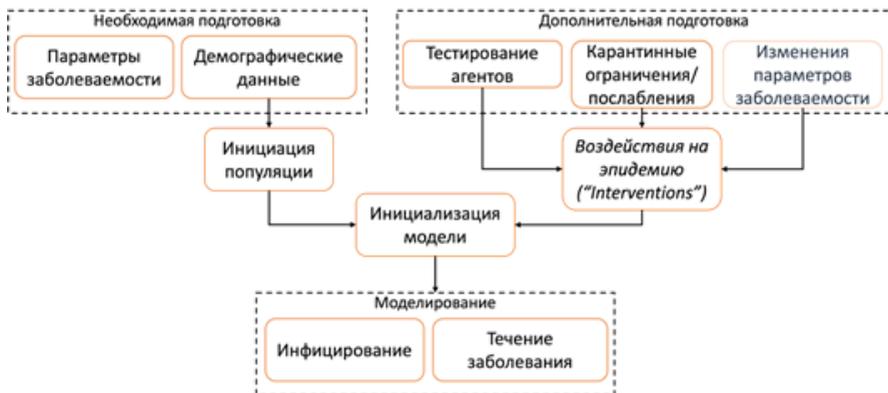
$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= \alpha \frac{S(t)I(t)}{N}, & S(0) &= N - I_0 \\ \frac{dI}{dt} &= \alpha \frac{S(t)I(t)}{N}, & I(0) &= I_0, \\ \frac{dR}{dt} &= \beta I(t), & R(0) &= 0.\end{aligned}\tag{1}$$

В предположении, что в начальный момент времени есть ненулевое количество инфицированных $I_0 > 0$, SIR-модель обладает следующими свойствами:

1. Все функции и коэффициенты модели неотрицательны, то есть $(t), I(t), R(t) \geq 0$ для любого $t \geq 0$.
2. Базовый индекс репродукции вируса $R_0 = \frac{\alpha}{\beta}$ является границей устойчивости состояния равновесия SIR-системы (при $R_0 < 1$ состояние равновесия устойчиво по Ляпунову) и характеризует количество чувствительных индивидуумов, которых может заразить один инфицированный в неиммунизированной популяции.

Благодаря развитию информационных технологий SIR-модель стала применяться при описании близких процессов в экономике (модель Солоу), экологии и других.

Агентно-ориентированная модель. Агентное моделирование основано на исследовании динамики развития заболевания путём изучения взаимодействия между отдельно взятыми индивидуумами, а глобальные изменения в системе возникают как результат деятельности множества агентов (моделирование «снизу вверх»). Для построения такой модели нужно достаточное количество наблюдений и оценок социально-эпидемиологических процессов. На примере пандемии COVID-19 разработана агентная модель для Новосибирской области и Республики Казахстан. Общее описание агентной модели распространения COVID-19 в регионе приведено на рисунке. Оно включает в себя инициацию популяции, правила распространения заболевания и тестирования агентов.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Криворотко О.И., Кабанихин С.И., Петракова В.С.* Идентифицируемость математических моделей эпидемиологии: туберкулез, ВИЧ, COVID-19. Математическая биология и биоинформатика. 2023, Т. 18(1), С. 177-214. DOI: 10.17537/2022.18.177.
2. *Криворотко О.И., Кабанихин С.И.* О математическом моделировании COVID-19. Сибирские электронные математические известия. 2023, Т. 20(2), С. 1211–1268. DOI: 10.33048/semi.2023.20.075
3. *Kermack W.O., McKendrick A.G.* A contribution to the mathematical theory of epidemics. Proc. Roy. Soc. Lond. A. 1927, V. 115, P. 700–721.
4. *Kabanikhin S., Krivorotko O., Bektemessov Z., Bektemessov M., Zhang S.* Differential evolution algorithm of solving an inverse problem for the spatial Solow mathematical model. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2020, V. 28(5), P. 761–774.

ДВУХТЕМПЕРАТУРНЫЕ МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Лаевский Ю. М.¹

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия Страна laev@labchem.sccc.ru

В докладе представлены многомерные модели процессов неизотермической фильтрации двухфазной жидкости и распространения фронта горения горючего газа в химически инертной пористой среде. Особенностью рассматриваемых моделей является их тепловая гетерогенность, когда в каждой точке пространственной области задаются две температуры, определяемые законами сохранения энергии с различными теплофизическими характеристиками и ньютоновским теплообменом между этими двумя континуумами. Математические формулировки моделей основаны на смешанных постановках в виде систем уравнений первого порядка для скалярных субстанций (массы, давления, температуры) и векторных потоков (скоростей, диффузионных и тепловых потоков). Для таких формулировок естественной алгоритмической базой являются смешанный метод конечных элементов в комбинации с центрированным методом конечных объемов с использованием противопотоковой технологии. Основное внимание в докладе уделяется результатам вычислительных экспериментов, демонстрирующих особенности учета двухтемпературной гетерогенности. В случае однотемпературной постановки для задачи

филтрации двухфазной жидкости соответствующие результаты опубликованы в статье [1]. Часть экспериментов для модели филтрационного горения газа приведена в статье [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ivanov M. I., Kremer I. A., Laevsky Yu. M.* Explicit–implicit schemes for non-isothermal filtration problem: Single-temperature model // *J. Comp. Appl. Math.* 2024, V. 440, P. 115639.
2. *Laevsky Yu. M., Nosova T. A.* Computational models of filtration gas combustion Article // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2017, V. 32(2), P. 115-125.

ЗАДАЧА О РАВНОВЕСИИ НЕОДНОРОДНОГО ДВУМЕРНОГО УПРУГОГО ТЕЛА С ДВУМЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ТОНКИМИ ЖЕСТКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Лазарев Н. П.

¹*Северо-Восточный Федеральный университет, Якутск, Россия;*

nyurgunlazarev@yandex.ru

Предложена нелинейная математическая модель, описывающая равновесие двумерного упругого тела с двумя взаимодействующими тонкими жесткими включениями. Тонкие жесткие включения задаются прямолинейными отрезками. В исходном состоянии тела оба включения находятся в контакте в одной точке разрыва. Модель допускает перемещения включений в рамках условий в виде систем неравенств, описывающих возможный контакт включений. Эти три системы неравенств для бесконечно малых жестких перемещений соответствуют трем возможным случаям взаимных конфигураций включений в состоянии равновесия. Включения отслаиваются вблизи точки разрыва включений от упругой матрицы, иными словами, по обе стороны от тонких включений имеются трещины заданной длины. На кривых, определяющих трещины, накладываются условия непроникания типа Синьорини [1], [2]. На части внешней границы задаются условия защемления. Задача формулируется в виде минимизации функционала энергии над невыпуклым множеством возможных перемещений, заданных в подходящем пространстве Соболева. Доказано существование решения задачи. Получены условия оптимальности решения при условии достаточной гладкости решения [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Khudnev A., Kovtunenkov V.* Analysis of Cracks in Solids WIT-Press. 2000, WIT-Press, Southampton.
2. *Ito H., Kovtunenkov V. A., Rudoy E. M.* Three-field mixed formulation of elasticity model nonlinear in the mean normal stress for the problem of non-penetrating cracks in bodies // *Appl. Eng. Sci.*, 2021, V. 7, P. 100060.
3. *Lazarev N., Semenova G., Efimova E.* Equilibrium problem for an inhomogeneous two-dimensional elastic body with two interacting thin rigid inclusions // *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2024, V. 438, P. 115539.

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оседедец И.В.¹

¹ Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия;

ivan.oseledets@gmail.com

В докладе я расскажу про современные подходы к приближенному решению прямых и обратных задач с помощью методов машинного обучения. В первую очередь, мы сфокусируемся на подходах, связанных с нейронными операторами, а также общей схеме, связывающих байесовские подходы и генеративные подходы.

АЛГОРИТМЫ ОБРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА

Пененко А. В.^{1,2,3}, Русин Е. В.^{1,3}, Емельянов М. К.^{1,2,3},

Пененко В. В.¹

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,

Новосибирск, Россия; aleks@ommgr.sccc.ru

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия; ³ Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия;

Многомерные модели переноса и трансформации примеси позволяют реалистично моделировать процессы в атмосфере, но вместе с тем требуют задания большого количества априорной информации и существенных вычислительных ресурсов. При решении обратных задач и задач усвоения данных (задач обратного моделирования) необходимая для моделирования информация восполняется за счет доступных данных измерений.

Для создания алгоритмов обратного моделирования развит подход на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряжённых уравнений, реализованный в системе Inverse Modeling Data Assimilation Framework [1]. Реализация алгоритмов на машинах с распределённой памятью позволяет работать с трехмерными моделями переноса и трансформации примесей в реалистичных «городских» и «региональных» сценариях [2]. Для работы с данными дистанционного зондирования в системе реализован учет нелинейных операторов измерений. Благодаря свойствам операторов чувствительности, позволяющим предварительно оценивать результат решения обратной задачи, разработаны алгоритмы оценки информативности системы мониторинга и на основе методов машинного обучения реализован алгоритм по уточнению результатов обратного моделирования в части учета априорной информации о типе источников [3].

Работа поддержана государственным заданием Министерства науки и высшего образования РФ FWNM-2022-0003 (ИВМиМГ СО РАН) в части разработки алгоритмов усвоения данных и решения обратных задач для трехмерной модели и FENG-2023-0004 (ЮГУ) в части работы с нелинейными операторами измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пененко А. В., Гочаков А. В., Антохин П. Н. Алгоритм усвоения данных на основе оператора чувствительности для трехмерной модели переноса и трансформации примесей в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2024, Т. 37(9), С. 719–728.
2. Penenko A., Rusin E. Parallel Implementation of a Sensitivity Operator-Based Source Identification Algorithm for Distributed Memory Computers // Mathematics, 2022, V. 10(23), P. 4522.
3. Penenko A., Emelyanov M., Rusin E., Tsybenova E., Shablyko V. Hybrid Deep Learning and Sensitivity Operator-Based Algorithm for Identification of Localized Emission Sources // Mathematics, 2024, V. 12(1), P. 78.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ДОБЫЧЕ, ТРАНСПОРТИРОВКЕ И ХРАНЕНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ

Рожин И.И.¹ Иванов Г.И.²

¹ *Институт проблем нефти и газа СО РАН, ФИЦ ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия;*

ii_rozhin@mail.ru

² *Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия;*

ivganya@mail.ru

Последние десятилетия развитие нефтегазовой промышленности РФ в основном определяется разведкой и освоением месторождений, расположенных на Северо-Востоке и на Арктическом шельфе. Эти месторождения расположены в криолитозоне и характеризуются сложным геологическим строением продуктивных горизонтов, расположенных на большой глубине, что увеличивает риск техногенных аварий и катастроф и приводит к повышению себестоимости добываемой продукции. В свою очередь эти обстоятельства требуют более тщательной подготовки технологических проектов, которые должны быть основаны на современных научных достижениях соответствующих разделов механики жидкости и газа, а также – вычислительной математики. Более того, перед исследователями, изучающими особенности данных процессов методами математического моделирования, возникают новые задачи, соответствующие более глубокому физическому описанию этих процессов. Так, при добыче и транспортировке природного газа в северных регионах такие природные факторы как низкие климатические температуры и наличие мощной толщи многолетней мерзлоты в значительной степени определяют технологические режимы добычи газа. Это вызвано тем, что природный газ при низких температурах и высоких давлениях, соединяясь с водой, образует твердые кристаллические соединения – газовые гидраты, которые могут образовываться как в призабойной зоне, так и в стволе скважин. Гидратообразование в призабойной зоне приводит к снижению продуктивности скважин, тогда как их образование в стволе может привести к полному прекращению подачи газа. Алгоритм обратной задачи определения массового расхода газа в системах добычи и транспорта природного газа по замерам давления на выходе был обобщен на случай гидратообразования в магистральном газопроводе [1] и в скважине [2]. В данной работе предложен алгоритм, основанный на методе половинного деления, который обладает безусловной сходимостью. Исследовано влияние учета изменений давления

и температуры пласта-коллектора на процесс образования и отложения гидратов природного газа на стенках добывающей скважины. Задача сводится к решению дифференциальных уравнений, описывающих неизотермическое течение реально-го газа в пористой среде и в скважине, распространение тепла в горных породах с соответствующими условиями сопряжения. Проведено сравнение результатов расчета для случаев, когда давление на забое скважины: 1) остается постоянным; 2) изменяется со временем в процессе отбора газа. Показано, что учет изменений пластовых условий приводит к существенному перераспределению времени полной закупорки скважины гидратами газа: в 1-м случае продолжительность работы скважины обратно пропорционально депрессии; а во 2-ом случае данная зависимость немонотонна. В рамках задачи нагнетания газа в пористые коллекторы изучается возможность подземного хранения природного газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах. Создание таких хранилищ газа будет способствовать многократному снижению объема хранилищ и повышению их стабильности по сравнению с обычными подземными хранилищами, а подошва многолетнемерзлых пород будет служить естественным непроницаемым для газа экраном. Вычислительный эксперимент выполнен на основе математической модели неизотермической фильтрации газа и воды, в которой наиболее полно учтены основные физические особенности процесса: реальные свойства газа, эффект дросселирования, совместное движение воды и газа в однородной пористой среде, массообмен между газом и водой с гидратом. Оценивается динамика изменения основных показателей процесса: температуры, давления, водонасыщенности и гидратонасыщенности пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. 1. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Argunova K.K. A new algorithm of mass flow rate determination in gas production and transport systems via pressure measurement // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2017, V. 58(5), P. 853–861.
2. 2. Borisova N.N., Rozhin I.I. Method for determining the mass flow for pressure measurements of gas hydrates formation in the well // Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics. 2021, V. 14(2), P. 193–203.

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ДАРСИ-ФОРХГЕЙМЕРА С ОНЛАЙН КОРРЕКЦИЕЙ В ТРЩЕИНОВАТЫХ СРЕДАХ

Спиридонов Д. А.¹

¹Северо-Восточный федеральный университет, Лаборатория "Вычислительные технологии и искусственный интеллект", Якутск, Россия;

d.stalnov@mail.ru

В этом исследовании мы представляем алгоритм Онлайн обобщенного многомасштабного метода конечных элементов (online-GMsFEM) для модели Дарси-Форхгеймера в трещиноватых средах. Математическая модель описывает нелинейное течение Дарси с высоким инерционным эффектом и скоростью фильтрации. Аппроксимация мелкой сетки выполняется методом конечных элементов (FEM), а для аппроксимации трещин пониженной размерности используется дискретную

модель трещин (DFM). Применяется подход понижения порядка модели, называемый онлайн-GMsFEM, который основан на локальных невязках локальных областей. Онлайн-многомасштабные базисные функции строятся в каждой локальной области на основе невязок. Такие онлайн-многомасштабные базисные функции позволяют учитывать эффекты нелинейных коэффициентов в уравнении Дарси-Форхгеймера. Представлены численные результаты в двумерной неоднородной трещиноватой области. Проведено исследование точности метода в зависимости от влияния нелинейности. Численные эксперименты показывают, что онлайн-GMsFEM имеет высокую точность для таких нелинейных задач. Точность слабо зависит от величины нелинейной части уравнения.

МНОГОМАСШТАБНЫЙ ПОДХОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВНО-НЕЯВНОЙ ВРЕМЕННОЙ СХЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

Степанов С. П.¹, Никифоров Д. Я.²

¹Северо-Восточный федеральный университет, Якутск, Россия; Сere2a@inbox.ru

²Северо-Восточный федеральный университет, Якутск, Россия; dju92@mail.ru

В данной работе разработан метод решения задачи теплопередачи с учетом фазовых переходов в пористых средах, основанный на бессеточном обобщенном многомасштабном методе конечных элементов (Meshfree GmsFEM) с использованием явно-неявной временной схемы. Основное внимание уделено гибриднему подходу, который включает частичное обучение. В рамках метода нейронная сеть обучается для вычисления значений температуры в определенных узлах на каждом временном слое, в то время как оставшиеся значения решения рассчитываются с помощью явной временной схемы. Такой подход обеспечивает высокую эффективность при моделировании сложных гетерогенных сред с трещинами и высококонтрастными особенностями. Численные эксперименты демонстрируют эффективность предложенного метода для решения двумерной задачи теплопередачи с применением тепловых стабилизаторов.

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ОНЛАЙН-МНОГОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ЗАДАЧИ ПОРОУПРУГОСТИ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Тырылгин А. А.¹, Бай Х.², Ян И.²

¹Северо-Восточный Федеральный Университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия;
aa.tyrylgin@mail.ru

²Факультет математики и вычислительной науки, Университет Сянтань, Сянтань,
Китай;

202331510101@smail.xtu.edu.cn

В этом исследовании мы рассматриваем задачу пороупругости в неоднородных средах, которая включает связанную систему уравнений для давлений и перемещения жидкости. Эта задача имеет решающее значение в геомеханике для моделирования взаимодействия между потоком жидкости и деформацией в пористых средах, с приложениями, охватывающими нефтяные и газовые резервуары,

системы подземных вод и производство геотермальной энергии. Мы представляем инновационный подход путем интеграции методов машинного обучения для обучения онлайн-многомасштабных базисных функций, улучшая обобщенный многомасштабный метод конечных элементов (GMsFEM). Эта методология позволяет адаптивно и эффективно представлять как макроскопические, так и локальные неоднородности в системе, значительно сокращая вычислительные затраты. Оффлайн-многомасштабные базисные функции предварительно вычисляются с использованием локальных спектральных задач, в то время как онлайн-базисные функции динамически обновляются с использованием моделей машинного обучения, обученных на основе невязки. Этот подход обеспечивает быстрое снижение погрешности и надежную сходимость, используя вычислительную эффективность машинного обучения. Мы демонстрируем эффективность этого метода с помощью численных экспериментов, демонстрируя его потенциал в развитии моделирования задач пороупругости в неоднородных средах.

ЛЕКТОРЫ

1. Четверушкин Борис Николаевич, академик РАН, научный руководитель Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН;
2. Кабанихин Сергей Игоревич, член-корреспондент РАН, директор Международного математического центра ИМ СО РАН;
3. Лаевский Юрий Миронович, профессор, заведующий лабораторией Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
4. Оселедец Иван Валерьевич, профессор РАН, профессор Сколковского Института науки и технологий;
5. Пененко Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
6. Владимиров Леонид Николаевич, член-корреспондент РАН, президент Академии наук Республики Саха(Якутия);
7. Рожин Игорь Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института Проблем Нефти и Газа СО РАН;
8. Саввина Надежда Валерьевна, профессор, заведующая кафедрой “Организация здравоохранения и профилактическая медицина”, Медицинского института СВФУ;
9. Слепцова Снежана Спиридоновна, академик АН РС(Я), доктор медицинских наук, заведующая кафедрой “Инфекционные болезни, фтизиатрия и дерматовенерология”, Медицинского института СВФУ;
10. Лазарев Нюргун Петрович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института математики СВФУ;
11. Егоров Иван Егорович, профессор, главный научный сотрудник – директор Научно-исследовательского института математики СВФУ.

УЧАСТНИКИ (МОЛОДЫЕ УЧЕНЫЕ)

1. Алексеев Валентин Николаевич — Лаборатория «Вычислительные технологии и искусственный интеллект», Северо-Восточный Федеральный университет;
2. Аммосов Альберт Владимирович — ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»;
3. Аммосов Дмитрий Андреевич — Лаборатория «Вычислительные технологии и искусственный интеллект», Северо-Восточный Федеральный университет;
4. Григорьев Василий Васильевич — Лаборатория «Вычислительные технологии и искусственный интеллект», Северо-Восточный Федеральный университет;
5. Гуринов Айтал Иванович — ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»;
6. Иванов Дьулус Харлампьевич — ЯО РНОМЦ «Дальневосточный центр математических исследований»;
7. Ильина Кюнней Павловна — кафедра «Вычислительные технологии», Северо-Восточный Федеральный университет;
8. Калачикова Уйгулаана Семеновна — Лаборатория «Вычислительные технологии и искусственный интеллект», Северо-Восточный Федеральный университет;
9. Никифоров Дьулустан Яковлевич — ЯО РНОМЦ «Дальневосточный центр математических исследований»;
10. Саввин Антон Васильевич — ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»;
11. Сивцева Вера Ильинична — Лаборатория «Многомасштабное математическое моделирование и вычислительные технологии», Северо-Восточный Федеральный университет;
12. Спиридонов Денис Алексеевич — Лаборатория «Вычислительные технологии и искусственный интеллект», Северо-Восточный Федеральный университет;
13. Степанов Сергей Павлович — Лаборатория «Вычислительные технологии и искусственный интеллект», Северо-Восточный Федеральный университет;
14. Тырылгин Алексей Афанасьевич — Лаборатория «Вычислительные технологии и искусственный интеллект», Северо-Восточный Федеральный университет;
15. Bai Huiran — Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова;
16. Zhenwei Guo — Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова;
17. Dong Zhang — Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.