

---

Институт вычислительных  
технологий СО РАН

Кафедра математического  
моделирования НГУ

Кафедра вычислительных  
технологий НГТУ

## ОБЪЕДИНЕННЫЙ СЕМИНАР

### ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (Численные методы механики сплошной среды)

*Основан в 1964 году академиком Н. Н. Яненко*

*Руководители: академик Ю. И. Шокин, д-р физ.-мат. наук профессор В. М. Ковеня*

---

## Аннотации докладов за осенний семестр 2018 г.

### Применение конформных и неконформных методов конечных элементов для многомасштабного моделирования процесса фильтрации в геологических средах (по материалам кандидатской диссертации)

С.И. МАРКОВ

*Новосибирский государственный технический университет*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,*

*Новосибирск (02.10.2018)*

Представлены результаты верификации и валидации разработанных и реализованных в виде программного комплекса вычислительных схем стабилизированного метода конечных элементов и разрывного метода Галёркина для решения задачи фильтрации однофазного флюида в многомасштабной геологической среде с анизотропной природой проницаемости. Предложен метод определения полного тензора абсолютной проницаемости второго ранга на базе решения обратной коэффициентной задачи, установлены границы применимости анизотропной и изотропной моделей абсолютной проницаемости геологической среды со слоистой и пористой структурой.

## **Математическое моделирование стационарных процессов электропроводности и упругой деформации в трехмерных гетерогенных средах с включениями (по материалам кандидатской диссертации)**

А.Ю. КУТИЩЕВА

*Новосибирский государственный технический университет*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,*

*Новосибирск (09.10.2018)*

Одним из этапов разработки и изучения гетерогенных сред является их математическое моделирование, позволяющее существенно расширить возможности исследователей, а в ряде случаев заменить дорогостоящие лабораторные испытания вычислительными экспериментами. На основе результатов, полученных в ходе численного моделирования, строятся процедуры гомогенизации, которые позволяют предсказать эффективные характеристики сред до их физической разработки или разрушения в ходе лабораторных экспериментов. Такое предсказательное моделирование гетерогенных естественных и искусственных сред осложняется как геометрической, так и физической многомасштабностью предметной области. Поэтому необходима разработка современных численных методов и вычислительных схем, ориентированных на многомасштабные и многофизичные процессы.

Целью данной работы является вычисление скалярных и тензорных эффективных свойств гетерогенных сред с микровключениями, характерных для горных пород, на основе результатов моделирования трехмерного электростатического поля и упругой деформации соответствующих объектов с возможностью применения в неразрушающих измерениях для геофизики.

Разработаны численные схемы гомогенизации электростатических и прочностных свойств гетерогенных сред, а также вычислительные схемы на базе современных многомасштабных методов конечных элементов для моделирования трехмерного электростатического поля и упругой деформации в расчетных областях с геометрической и физической многомасштабностью.

## **Вычислительные модели фильтрационного горения газа в режиме низких скоростей (по материалам кандидатской диссертации)**

Т. А. НОСОВА

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,*

*Новосибирск (16.10.2018)*

Доклад посвящен разработке вычислительных алгоритмов для моделирования процесса фильтрационного горения газа (ФГГ) в режиме низких скоростей. Предложены различные одно- и многомерные математические модели ФГГ. В частности, рассмотрена основанная на законах сохранения вычислительная модель ФГГ в таких терминах, как: температура каркаса — тепловой поток в каркасе, полная газовая энтальпия — поток энтальпии, масса недостающего компонента горючей смеси — диффузионный поток. Представлены алгоритмы, использующие равномерные и неравномерные пространственно-временные сетки, предложена схема расщепления для решения двумерной задачи. С помощью технологий OpenMP и MPI разработанные алгоритмы

адаптированы для параллельного исполнения на современных вычислительных системах. Кроме того, предложен устойчивый алгоритм определения мгновенной скорости распространения фронта горения. В результате численных экспериментов выявлены различные закономерности процесса ФГГ, полностью соответствующие теоретическим и экспериментальным данным, в частности, впервые в численной модели воспроизведен пульсационный режим ФГГ.

### **Разработка и экспериментальная апробация вычислительных технологий для моделирования процессов деформирования слоистых конструкций (по материалам кандидатской диссертации)**

М.Н. Данилов

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет*

(23.10.2018)

Работа посвящена развитию новых подходов к проектированию слоистых строительных конструкций из структурно-неоднородных материалов, основанных на применении современных вычислительных технологий и методов экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния конструкций.

Разработаны и экспериментально апробированы вычислительные технологии для моделирования физических процессов в слоистых конструкциях из структурно-неоднородных материалов, подверженных статическим, динамическим, в том числе ударно-волновым и температурным воздействиям.

Экспериментальное исследование процесса деформирования трехслойных пластин из структурно-неоднородных материалов проведено с использованием системы измерения полей деформаций Correlated Solutions Vic3D. Разработаны методика решения задач с применением программного обеспечения ANSYS Mechanical, математический метод моделирования процесса деформирования структурно-неоднородного материала и комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования процессов деформирования трехслойных пластин из структурно-неоднородных материалов.

### **Исследование и применение дискретных моделей фильтрации на различных масштабах пористой среды (по материалам кандидатской диссертации)**

П.В. Марков

*Тюменский государственный университет*

(13.11.2018)

Проектирование разработки месторождений нефти и газа включает в себя построение дискретных моделей процессов фильтрации в пористой среде. Требования детальности этих моделей и высокая неопределенность в исходных данных предполагают многовариантные расчеты и большие временные затраты. Наличие нескольких масштабов и их влияние на процесс фильтрации на макромасштабе месторождений вынуждает изучать процессы фильтрации на микромасштабе пористой среды с учетом перехода на макромасштаб. Целями данной работы являются разработка методов моделирования на микромасштабе пористой среды с последующим ремасштабированием на макромасштаб и разработка численных методов для ускорения расчетов в процессе ремасштабирования.

Для достижения поставленных целей разработан подход к ремасштабированию дискретных моделей микромасштаба для их использования на макромасштабе месторождений, включающий метод выделения регионов моделей поровых сетей на макромасштабе, метод стохастической генерации и метод адаптации моделей поровых сетей к заданным фильтрационно-емкостным характеристикам с помощью метода “роя частиц”. С использованием непрерывных групп симметрий разработан метод генерации численных решений для дискретных моделей фильтрации различных масштабов. Получены классификации дискретных моделей, для которых применим разработанный метод генерации численных решений: двумерные и трехмерные дискретные динамические системы, разностные схемы уравнения Рапопорта — Лиса и уравнения фильтрации идеального газа с учетом эффекта Клинкенберга.

## **Методы моделирования зарождения и распространения трещин (по материалам докторской диссертации)**

В.Н. ЛАПИН

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск*

(20.11.2018)

Предложена трехмерная модель криволинейного распространения трещины, включающая новую подмодель движения жидкости сложной реологии в узком двумерном канале и новый неявный критерий выбора направления распространения трещины при сложном нагружении. Разработан численный метод одновременного решения связанной системы нелинейных уравнений модели.

На основе реализованных в виде программного комплекса трех- и одномерных моделей решен ряд задач о распространении трещин. В частности, установлен эффект пережатия трещины при искривлении ее траектории, определены факторы, приводящие к его образованию и влияющие на процесс распространения трещины гидроразрыва пласта. Выявлены факторы, определяющие стойкость гидроизоляции скважин к повышению давления в пласте, разработана методика уточнения параметров трещиноватопористой среды по данным о потерях бурового раствора.

## **Современные проблемы математического моделирования гидроразрыва пласта**

Д.В. ЕСИПОВ

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск*

(27.11.2018)

Моделирование гидроразрыва имеет богатую историю и берет свое начало с пионерной работы С.А. Христиановича и Ю.П. Желтова (Известия АН СССР, 1955 г.). Интенсивные исследования в этой области подстегиваются как широким применением этой технологии при нефте- и газодобыче, так и сложностью моделирования, связанной с рассмотрением как минимум четырех взаимосвязанных процессов: течения жидкости в трещине, ее утечки в породу, упругой деформации породы и распространения трещины. Дополнительным фактором, усложняющим моделирование, является близкое к сингулярному, а во многих моделях и сингулярное поведение функций решения вблизи кончика трещины. В докладе представлен обзор основных математических моделей

гидроразрыва, численных методов их разрешения и основных полученных с их помощью результатов. Сформулированы задачи, на решении которых концентрируются основные усилия исследователей в этой области.

### **Стабилизация многошаговых схем высокого порядка точности для решения одностороннего волнового уравнения**

А.В. ТЕРЕХОВ

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск (04.12.2018)*

Рассмотрены спектрально-разностные методы высокого порядка точности для решения одностороннего волнового уравнения (one-way wave equation). Для обеспечения высокой пространственной точности и устойчивости расчетов разработан алгоритм решения на основе экстраполяции Ричардсона. Однако такой подход является вычислительно затратным, поэтому дополнительно рассмотрены алгоритмы на основе многошаговых схем Адамса.

Для обеспечения устойчивости сначала для одномерного, а затем и для двумерного случаев разработаны стабилизирующие процедуры на основе сплайн-интерполяции. Это позволило устойчиво реализовать метод типа предиктор-корректор, в рамках которого разностная задача для эллиптических уравнений высокого порядка заменяется на последовательность обращений разностных операторов для эллиптических уравнений второго порядка, что позволяет существенно снизить вычислительные затраты. Устойчивость и точность предлагаемых процедур исследованы на примере реализации алгоритма миграции в рамках задачи сейсмической разведки.

### **Развитие моделей, численных методов и комплексов программ решения задач гидродинамического расчета и оптимизации турбомашин (по материалам докторской диссертации)**

Д.В. ЧИРКОВ

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск (11.12.2018)*

В работе развиты модели, численные алгоритмы и комплекс программ для решения следующих задач проектирования турбомашин:

- оперативный расчет КПД в широком диапазоне режимов работы;
- определение зоны устойчивой работы;
- оптимизация формы рабочего колеса и отсасывающей трубы по критериям максимизации КПД и прочности при одновременной минимизации кавитации и металлоемкости.

Для решения этих задач предложены новая постановка и численная реализация граничных условий в задаче протекания, позволяющая проводить расчеты с постоянным напором. Усовершенствован численный метод искусственной сжимаемости для решения уравнений трехмерного турбулентного движения смеси жидкость — пар, позволивший в 1.5 раза ускорить расчеты. Разработана масштабируемая технология MPI-распараллеливания расчетов на блочно-структурированных сетках.

Численные модели реализованы в виде комплекса программ для прогнозирования КПД гидротурбин в широком диапазоне режимов работы. Выполнены верификация и валидация численной модели на ряде турбин различной быстроходности, определена область ее применимости.

Разработаны новые постановки задач, целевые функционалы и ограничения для задачи оптимизации формы проточного тракта гидротурбины, позволяющие одновременно максимизировать КПД турбины и прочность рабочего колеса, минимизировать кавитацию и металлоемкость конструкции. Оптимизационный комплекс протестирован на решении ряда важных для практического применения задач проектирования формы проточного тракта радиально-осевых и поворотно-лопастных гидротурбин.

Разработана методика определения зоны устойчивой работы турбины, основанная на 1D–3D-модели нестационарного кавитационного течения в проточном тракте ГЭС. Исследован механизм возникновения гидродинамической неустойчивости течения в системе напорный водовод – гидротурбина на режимах повышенной нагрузки. Исследовано влияние численных и режимных параметров, а также формы рабочего колеса на частоту и амплитуду установившихся автоколебаний.

## **Методы граничных элементов и критерии разрушения в трехмерных задачах зарождения и дальнейшего распространения трещин (по материалам кандидатской диссертации)**

Д.С. КУРАНАКОВ

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск*

*(18.12.2018)*

Построение и обоснование полных трехмерных численных моделей зарождения и дальнейшего распространения трещины является важной научной и прикладной проблемой. Прикладная значимость решения этой проблемы в первую очередь обусловлена усовершенствованием и созданием новых технологий гидроразрыва пласта (ГРП).

Разработаны два критерия зарождения трещин, которые учитывают влияние размера разрушаемого тела на его прочность: в первом осредненное по перпендикулярному к поверхности тела отрезку касательное напряжение сравнивается с прочностью материала на разрыв; во втором локальная прочность материала на разрыв зависит от минимального радиуса кривизны поверхности тела.

Для решения задач распространения трещин разработаны две модификации метода граничных элементов (МГЭ) решения внешней задачи упругости с полостями и трещинами: МГЭ, в котором вместо трещины рассматривается пропилен малой, но конечной ширины; дуальный МГЭ.

Разработан метод вычисления коэффициентов интенсивности напряжений повышенной точности, в котором аппроксимация разрыва смещений на прифронтных элементах трещины дает правильную асимптотическую зависимость, пропорциональную корню из расстояния до фронта.

С помощью разработанных методов решена задача зарождения трещины на поверхности скважины с перфорацией под действием давления закачиваемой в скважину жидкости гидроразрыва. Впервые для всевозможных ориентаций скважины и перфорации относительно главных напряжений залегания получены зависимости давления зарож-

дения трещины и ее местоположения. Показано, что ориентация скважины и перфорации влияет не только на давление зарождения, но и на местоположение и ориентацию зародившейся трещины.

*Место и время проведения заседаний:* по вторникам, в 16.00,

конференц-зал Института вычислительных технологий СО РАН

*Адрес:* просп. акад. Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090

*Секретарь семинара:* канд. физ.-мат. наук Олег Игоревич Гусев

*e-mail:* gusev\_oleg\_igor@mail.ru

*Интерактивная заявка доклада:*

<http://www.ict.nsc.ru/ru/education/seminar/seminar-page-ict>