

На правах рукописи



Астракова Анна Сергеевна

**ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ
ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ**

05.13.18 «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Черный Сергей Григорьевич

Официальные оппоненты: Ельцов Игорь Николаевич
доктор технических наук,
доцент, Институт нефтегазовой геологии и
геофизики СО РАН

Фёдоров Александр Владимирович
доктор физико-математических наук,
профессор, Институт теоретической и
прикладной механики СО РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт вычислительной
математики и математической геофизики
СО РАН, г. Новосибирск

Зашита состоится 16 сентября 2014 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук
<http://www.ict.nsc.ru/sitepage.php?PageID=17>

Автореферат разослан июня 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

 А.С. Лебедев

Общая характеристика работы

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов решения обратных задач, в значительном количестве возникающих в различных областях науки и техники. В диссертации рассмотрены четыре таких задачи. При решении **первой задачи** находится оптимальное расположение датчиков для обнаружения волн цунами по критериям минимизации времени обнаружения и фиксации возмущений с максимальной амплитудой. Метод решения данной задачи может быть применен для более общего случая мониторинга и своевременного обнаружения воздействия опасных природных и антропогенных факторов. От решения задачи зависит успешность работ по предупреждению и эвакуации населения, а минимизация количества устанавливаемых датчиков позволит сэкономить значительные финансовые ресурсы. В связи с этим построение функционалов, одновременная минимизация которых обеспечит выполнение указанных выше критериев, а также разработка метода решения впервые предложенной в диссертации задачи представляют значительный интерес. **Вторая задача** посвящена проектированию формы проточного тракта гидротурбины, удовлетворяющей более совершенному критерию эффективности её работы и впервые сформулированному критерию минимизации динамических нагрузок, вызванных прецессирующим вихревым жгутом. Актуальность этой работы обусловлена необходимостью создания новых перспективных гидротурбин с повышенными требованиями к КПД и отсутствием вибрации и шума при их работе. **Третья задача** заключается в определении параметров трещиновато-пористой среды в окрестности скважины по давлению в скважине и потерям бурового раствора при её бурении. **Четвертая задача** состоит в определении структуры прискважинной области по результатам высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования. Актуальность третьей и четвертой задач напрямую связана с совершенствованием технологии нефтедобычи, так как их решение сопряжено с разработкой инструментария для определения с высокой точностью свойств породы в окрестности скважин. При решении третьей задачи была построена наиболее полная на сегодняшний день численная модель (математическая модель и численный метод для её реализации) неуставновившейся фильтрации упругой жидкости Гершеля-Балкли в упругой пористой среде, позволившая максимально точно на сегодняшний день описать фильтрацию бурового раствора в трещиновато-пористую среду. При решении четвертой задачи предложена модификация генетического алгоритма нахождения экстремумов в методе оптимизационного проектирования, позволившая избегать локальные экстремумы, ускорившая сходимость и повысившая точность нахождения глобального экстремума.

Разрабатываемый в диссертации оптимизационный метод решения обратных задач и подходы к решению перечисленных задач представляются актуальными и значимыми еще в связи с тем, что они относятся к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ и перечню крити-

ческих технологий РФ¹. Первая задача относится к разделу «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения» перечня. Вторая — к разделу «Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая природную энергетику» перечня и разделу «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» приоритетных направлений. Третья и четвертая задачи — к разделу «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи» перечня и разделу «Рациональное природопользование» приоритетных направлений.

Решение приведенных выше задач призвано способствовать дальнейшему развитию методологии решения обратных задач и созданию передовых технологий в перспективных областях науки и техники.

Объект исследования. Прямая задача моделирования каких-либо процессов (в том числе описанных выше) может быть представлена схематично

$$\mathbf{V} = f(\mathbf{x}), \quad (1)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$ — параметры модели, \mathbf{V} — характеристики процесса, f — математическая модель процесса и метод её реализации. Тогда обратная задача моделирования записывается как

$$\mathbf{x} = f^{-1}(\mathbf{V}^*), \quad (2)$$

где \mathbf{V}^* — требуемые характеристики процесса. Непосредственное решение уравнения (2) называется **прямым методом решения** обратной задачи. Решение оптимизационной задачи

$$\min_{\mathbf{x}} |F_1|, \dots, \min_{\mathbf{x}} |F_M|, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{F} = \mathbf{V}^* - f(\mathbf{x}) = (F_1, \dots, F_M),$$

называется **оптимизационным методом решения** обратной задачи (2). Объектом исследований диссертационной работы являются обратные задачи моделирования процессов (2).

Предметом исследований являются закономерности и особенности работы оптимизационного метода решения обратных задач.

Целью работы является разработка и обоснование оптимизационного метода решения обратных задач и решение следующих задач:

- определение расположения датчиков, фиксирующих максимальные по амплитуде возмущения от источников за минимальное время;
- проектирование проточной части гидротурбины по критериям эффективности её работы и минимизации динамических нагрузок, вызванных прецессирующим вихревым жгутом;
- определение параметров трещиновато-пористой среды по замеренным временными зависимостям давления и потерь бурового раствора в скважине на основе разработанной в диссертации численной модели фильтрации;
- определение структуры прискважинной области по результатам индукционного каротажа.

¹ Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации: Указ Президента Рос. Федерации от 7 июля 2011 г. № 899 // Собр. законодательства Рос. Федерации. — 2011. — № 28. — Ст. 4168.

Задачи, решенные для достижения цели:

1. Модификация оптимизационного метода решения обратных задач на основе улучшенного генетического алгоритма.
2. Формулировка и обоснование новой постановки задачи оптимизационного проектирования формы лопасти гидротурбины, обеспечивающей максимальное КПД при минимальных амплитудах пульсаций давления, вызванных прецессирующим вихревым жгутом.
3. Постановка задачи расположения датчиков, фиксирующих максимальные по амплитудам волны цунами за минимальное время.
4. Создание и обоснование модели неустановившейся фильтрации жидкости Гершеля-Балкли в трещиновато-пористой среде с вытеснением поровой жидкости.
5. Построение абсолютно устойчивой консервативной разностной схемы для нелинейного уравнения пьезопроводности модели фильтрации и её адаптация в методе решения задачи определения параметров трещиновато-пористой среды.
6. Разработка алгоритмов решения поставленных задач и программных комплексов их реализации.
7. Верификация разработанных численных алгоритмов.
8. Решение перечисленных выше задач и анализ результатов.

Метод исследования. Основные результаты диссертации получены с применением современных методов математического моделирования, вычислительной математики, теории дифференциальных уравнений, теории оптимизации. В основу метода нахождения экстремумов функционалов положено решение прямой задачи для каждой вариации \mathbf{x} и построение улучшенных вариаций \mathbf{x} следующего поколения с помощью модифицированной стратегии генетического алгоритма, обеспечивающей сходимость к глобальному экстремуму задачи.

На защиту выносятся следующие результаты, соответствующие четырем пунктам (1,3,4,5) паспорта специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по физико-математическим наукам.

1. Модифицированный метод решения обратных задач на основе улучшенного генетического алгоритма и полученные по нему решения задач: расположения датчиков, фиксирующих максимальные по амплитудам возмущения от источников за минимальное время; проектирования проточной части гидротурбины по критериям эффективности её работы и минимизации динамических нагрузок, вызванных прецессирующим вихревым жгутом; определения параметров трещиновато-пористой среды по замеренным временными зависимостям давления и потерь бурового раствора в скважине; определения структуры прискважинной области по результатам индукционного каротажа.

2. Модель неустановившейся фильтрации жидкости Гершеля-Балкли в трещиновато-пористой среде с вытеснением поровой жидкости.

3. Абсолютно устойчивая консервативная разностная схема для нелинейного уравнения пьезопроводности с разрывными коэффициентами модели фильтрации.

4. Программные комплексы для решения поставленных обратных задач.

Научная новизна выносимых на защиту результатов заключается в следующем.

Модифицированный на основе улучшенного генетического алгоритма оптимационный метод решения обратных задач позволил найти решения новых актуальных задач.

Впервые предложены и обоснованы постановки задачи оптимального расположения датчиков, фиксирующих возмущение с максимальной амплитудой за минимальное время.

Предложена и обоснована новая постановка задачи оптимизационного проектирования проточной части гидротурбины по усовершенствованному критерию эффективности её работы и впервые сформулированному критерию минимизации динамических нагрузок, вызванных прецессирующим вихревым жгутом.

Построена наиболее полная на сегодняшний день модель неустановившейся фильтрации жидкости Гершелля-Балкли в трещиновато-пористой среде с вытеснением поровой жидкости и предложена новая абсолютно устойчивая консервативная разностная схема для её численной реализации.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности применения её результатов (методик, алгоритмов и их программной реализации, результатов расчетов) для развития новых технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, создания технологий использования возобновляемых источников энергии, поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.

Результаты диссертационной работы используются в филиале ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» (г. Санкт-Петербург), ООО «Технологическая Компания Шлюмберже» (г. Новосибирск) и National Oceanic and Atmospheric Administration Center of Tsunami Research (г. Сиэтл, США), что подтверждают приложенные в конце диссертации акты об использовании научных результатов в практической деятельности.

Достоверность и обоснованность основных результатов, полученных в диссертации, основывается на строгом математическом описании используемых численных алгоритмов, детальных методических расчетах при решении известных и рекомендуемых тестовых задач, сопоставлении результатов численных расчетов с данными экспериментов и результатами, полученными другими авторами.

Представление работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на объединенном научном семинаре ИВТ СО РАН «Информационно-вычислительные технологии (численные методы механики сплошной среды)» под руководством академика РАН Ю.И. Шокина и профессора В.М. Ковени, на научном семинаре ИВМиМГ СО РАН «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» под руководством чл.-корр. РАН С.И. Кабанихина, на научном геофизическом семинаре

ИНГ СО РАН, а также были представлены на 20 всероссийских и международных научных конференциях: Международная конференция International Workshop of Destruction (Япония, г. Йокогама, 2007); Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» XLVI, XLVII, XLVIII (Новосибирск, 2008-2010); Международная молодежная научная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, 2009, 2012, 2013); Всероссийская конференция с участием иностранных учёных «Проблемы мониторинга окружающей среды» (Кемерово, 2009); Летняя школа для аспирантов «3rd Nordic EMW Summer School for PhD Students in Mathematics» (Финляндия, г. Турку, 2009); Международная конференция International Tsunami Symposium, (Новосибирск, 2009); Международная конференция по математическому моделированию (Якутск, 2011), Третья научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (Петропавловск-Камчатский, 2011); Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященной 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко (Новосибирск, 2011); Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2011, 2012), Всероссийская научная конференция с международным участием «Краевые задачи и математическое моделирование» (Новокузнецк, 2012), Летняя школа Gene Golub SIAM Summer School (США, г. Монтерей, 2012, Китай, г. Шанхай, 2013), VI Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (Новосибирск, 2013), Международная конференция High Performance Computing (Украина, г. Киев, 2013); а также на научных встречах финалистов конкурса Google Anita Borg (Швейцария, г. Цюрих, 2008-2010).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 28 печатных работах, в том числе (в скобках в числителе указан общий объём этого типа публикаций, в знаменателе – объем принадлежащий лично автору) 5 статей в изданиях рекомендованных ВАК [1-5] для представления основных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора или кандидата наук (9.44/5.7), 8 – в трудах международных и всероссийских конференций [6-13] (8.63/4.9), 2 – в свидетельствах о регистрации программ [14-15], 13 – в тезисах международных конференций (1.19/0.65).

Личный вклад автора. Результаты, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора заключается в обсуждении постановок задач и выбора метода их решения, в разработке и усовершенствовании алгоритмов и компьютерных программ, их верификации, численном моделировании, создании программно-методического обеспечения, проведении численных экспериментов и оптимизационных расчетов с использованием разработанных программ и интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация общим объемом 157 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений, списка сокращений и списка литературы, включающего 78 наименований. Диссертация содержит 68 рисунков и 25 таблиц.

Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследований, формулируются объекты и предметы исследования, излагаются цель работы и задачи, которые необходимо решить для её достижения, указаны методы их решения, охарактеризована научная новизна и практическая значимость работы, дано ее краткое содержание. Формулируются основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу известных оптимизационных методов решения обозначенных во введении классов обратных задач и построению модифицированного метода на основе генетического алгоритма.

В §1.1 определяются прямые и обратные задачи моделирования абстрактных процессов, а затем введенные понятия конкретизируются для указанных в цели работы четырех задач.

В §1.2 рассматриваются два класса методов решения обратных задач: прямые и оптимизационные методы. Последние в работе называются методами оптимизационного проектирования. Обосновывается использование метода оптимизационного проектирования для решения сформулированных четырех обратных задач. Анализируются методы решения оптимизационных задач, которые подразделяются на детерминированные и стохастические методы. Характерными представителями первого класса методов являются градиентные методы, развиваемые в работах С.И. Кабанихина, А.Л. Карчевского, А.Ф. Латыпова, Ю.В. Никуличева и др. Метод градиентного спуска применялся для решения задачи оптимизационного проектирования лопасти гидротурбины². Задача определения структуры прискважинной области по результатам индукционного каротажного зондирования решалась как оптимизационная с использованием детерминированного метода деформируемых многоугранников (Нелдера-Мида) М.И. Эповым, И.Н. Ельцовым и другими авторами. Классические градиентные методы спуска подходят для решения задач с непрерывными функционалами и малым числом варьируемых параметров. Методы Нелдера-Мида недостаточно надежно отыскивают глобальные экстремумы функционалов. Задача расположения датчиков своевременного обнаружения волн цунами решалась³ как частично оптимизационная: фиксировались шесть возможных мест их расположения, а затем в них помещались датчики от одного до шести и определялось максимальное время обнаружения волн от источников их генерации. Если датчиков было меньше шести, осуществлялся ручной перебор их возможных расположений в шести заданных местах. То есть минимизация времени обнаружения по местам расположения датчиков не проводилась. Постановка и решение обратной задачи фильтрации жидкости Гершеля-Балкли в трещиновато-пористой среде, предлагаемые в диссертации, являются новым результатом.

Стochastic оптимизационные методы получили в последнее время более широкое распространение, чем детерминированные, так как в них не

² Лобарева, И.Ф. Об одном подходе к оптимизации формы лопасти гидротурбины / И.Ф. Лобарева, В.А. Скороспелов, П.А. Турук, С.Г. Черный, Д.В. Чирков // Вычислительные технологии. – 2005. – Т. 10, № 6. – С. 52-73.

³ Braddock, R. D. Network properties of DEEP-SEA tsunami detectors / R. D. Braddock // 22nd IUGG Intern. Tsunami Symposium, Chania, 2005. – P. 43-48.

требуется гладкость целевых функционалов, они обладают способностью не останавливаться в локальных экстремумах и применяются для решения многокритериальных задач. Среди стохастических методов наиболее приемлемым для решения методом оптимизационного проектирования обозначенных в §1.1 четырех обратных задач является эволюционный генетический алгоритм. Он осуществляет поиск оптимального решения, одновременно анализируя множество текущих наборов параметров \mathbf{x} (1), называемых индивидуумами, которые эволюционируют на протяжении многих поколений в соответствии с предписанными правилами. Необходимость большого числа вычислений целевых функционалов компенсируется возможностью параллельного расчета. Генетический алгоритм успешно применялся для решения задачи оптимизационного проектирования рабочего колеса гидротурбины⁴. Поэтому его модифицированный вариант используется в диссертационной работе для решения этой же задачи, но с новыми улучшенными критериями. Также он применяется для решения остальных рассмотренных в работе обратных задач.

В §1.3 ставится оптимизационная задача, обобщающая все четыре рассмотренные в диссертации обратные задачи. В общем случае требуется найти вектор параметров

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N) \in \mathbf{X},$$

обеспечивающий минимумы функционалам

$$\min F_1(\mathbf{x}), \dots, \min F_M(\mathbf{x}), \quad (4)$$

при наличии фазовых ограничений

$$x_{L,i} \leq x_i \leq x_{R,i}, \quad i = 1, \dots, N$$

и целевых ограничений

$$\varphi_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, J.$$

В §1.4 предлагается схема решения задачи (4) (рисунок 1). Сначала случайным образом формируется начальное поколение $\mathbf{x}_s^{(1)}, \dots, \mathbf{x}_s^{(k)}, \dots, \mathbf{x}_s^{(p)}$, состоящее

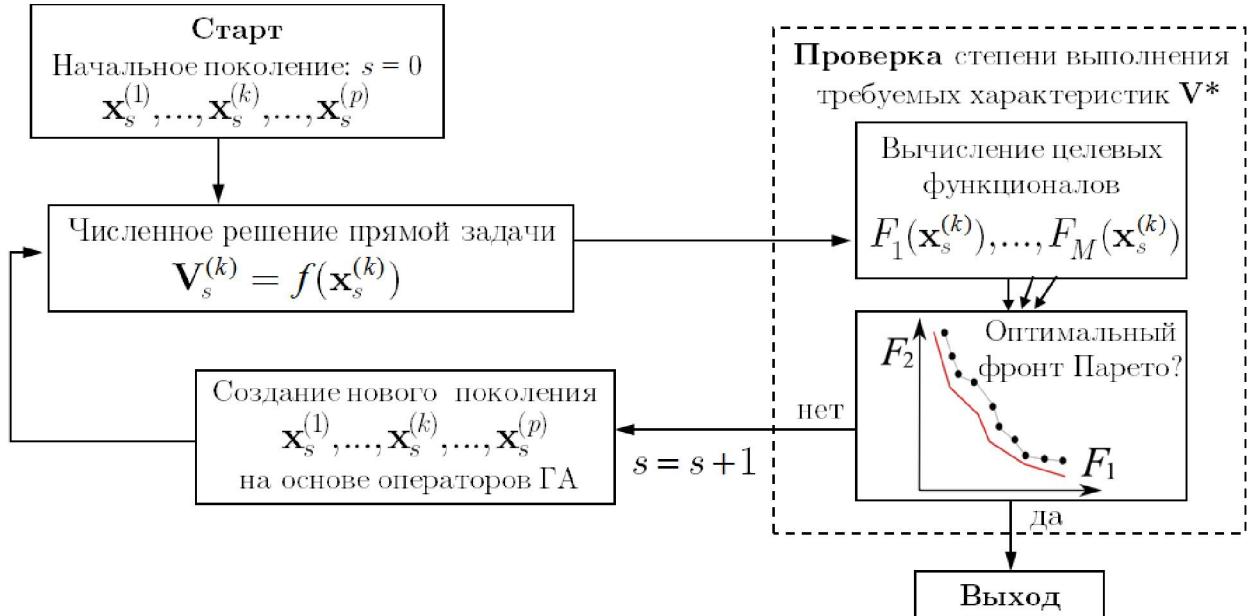


Рисунок 1 – Схема решения оптимизационной задачи

⁴ Банников, Д.В. Оптимизационное проектирование ротора гидротурбины по критериям эффективность-прочность / Д.В. Банников, Д.В. Есипов, С.Г. Черный, Д.В. Чирков // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 4. – С. 651-658.

щее из p индивидуумов. Для каждого индивидуума поколения решается прямая задача $\mathbf{V}_s^{(k)} = f(\mathbf{x}_s^{(k)})$, проверяется степень выполнения требуемых характеристик и создается улучшенное поколение на основе операторов генетического алгоритма. Далее цикл повторяется, пока не будет достигнута сходимость к оптимальному фронту Парето.

Операторы селекции и рекомбинации генетического алгоритма играют ключевую роль при создании нового поколения индивидуумов, максимально приближенного к индивидуумам фронта Парето. На основе многочисленных расчетов, проведенных в диссертационной работе, установлена зависимость параметра Tr от p в операторе селекции, формирующем множество наилучших родительских $Tr \cdot p$ индивидуумов текущего поколения, которые будут участвовать в создании следующего поколения. Зависимость задается выражением $Tr \cdot p = K$, где число K подобрано для каждой из рассмотренных задач. Минимальное значение $K = 30$ получено для задач оптимального расположения датчиков и проектирования проточных частей гидротурбин. Для задачи определения параметров трещиновато-пористой породы по потерям бурового раствора $K = 50$, а для задачи определения структуры прискважинной области по индукционному каротажу $K = 100$. При этом p варьировалось от 100 до 1000.

Отбор наилучших индивидуумов проводится с помощью функции качества $F_{\text{sum}}(F_1, \dots, F_M) : R^M \rightarrow R$, выстраиваемой по рангу индивидуума и учитывающей ограничения.

В диссертации модифицирован оператор рекомбинации, который по индивидуумам $\mathbf{x}'_s = (x'_{s,1}, \dots, x'_{s,N})$ и $\mathbf{x}''_s = (x''_{s,1}, \dots, x''_{s,N})$, случайно выбранным из $Tr \cdot p$ лучших индивидуумов, формирует индивидуум нового поколения $\mathbf{x}_{s+1} = (x_{s+1,1}, \dots, x_{s+1,N})$. В отличие от ранее использовавшегося⁴ оператора, в котором \mathbf{x}_{s+1} случайным образом выбирался из окрестности с центром, расположенным ровно посередине между индивидуумами \mathbf{x}'_s и \mathbf{x}''_s , в модифицированном операторе центр окрестности смешен к индивидууму, имеющему наименьшую функцию качества. Формула, по которой определяется каждая из компонент \mathbf{x}_{s+1} , имеет вид

$$x_{s+1,i} = \begin{cases} x'_{s,i} + \alpha_i(x'_{s,i} - x''_{s,i}), & \text{если } F_{\text{sum}}(\mathbf{x}'_s) < F_{\text{sum}}(\mathbf{x}''_s), \\ x''_{s,i} + \alpha_i(x''_{s,i} - x'_{s,i}), & \text{если } F_{\text{sum}}(\mathbf{x}'_s) \geq F_{\text{sum}}(\mathbf{x}''_s), \end{cases} i = 1, \dots, N,$$

где α_i – равномерно распределенная на отрезке $[-d, 1+d]$ непрерывная случайная величина. Величина $d \geq 0$ называется параметром рекомбинации и задавалась $d = 0.7$. Оператор рекомбинации выполняется p раз, чтобы сформировать новое поколение из p индивидуумов.

Модифицированный таким образом оптимизационный метод при решении обратной задачи о структуре прискважинной области позволил найти глобальный минимум задачи, который не определялся алгоритмом без модификации. Кроме того, в задачах, где алгоритм без модификации позволял найти точное решение, новый алгоритм работает в 5 раз быстрее. Несмотря на элементы случайности в формировании начального и последующих поколений, модификация обеспечила стабильность нахождения глобального минимума при каждом запуске оптимизационного расчета.

В **Главе 2** ставится и решается многоцелевая оптимизационная задача расположения заданного числа датчиков для наискорейшего обнаружения волн цунами с максимальной амплитудой.

В § 2.1 даются общая и математическая постановки задачи. Вводятся понятия множества источников волн цунами $\mathbf{P} = (\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_P)$ и конфигурации заданного числа L датчиков $\mathbf{Q} = (\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_L)$. Источники возмущений \mathbf{p}_j и датчики \mathbf{q}_i располагаются в подобласти \mathbf{D} плоской акватории с переменной глубиной h . Требуется определить конфигурацию \mathbf{Q} , которая позволяет за минимальное время обнаружить возмущения из любой точки множества \mathbf{P} с как можно большей амплитудой. Критерии, обеспечивающие выполнение необходимых требований, формулируются как условия минимизации M функционалов (4). Вектору параметров \mathbf{x} в (4) отвечает конфигурация \mathbf{Q} с набором координат L датчиков, т.е. N из (4) равно $2L$.

В § 2.2 строятся функционалы и ограничения задачи (4). Минимальное время $\tau(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i)$ добегания волны цунами от точки \mathbf{p}_j до датчика \mathbf{q}_i определяется с использованием длинноволнового приближения для локальной скорости распространения возмущения \sqrt{gh} . Гарантированное время обнаружения конфигурацией \mathbf{Q} возмущения, возникающего в любой из точек множества \mathbf{P} , есть $T(\mathbf{Q}) = \max_{1 \leq j \leq P} \min_{1 \leq i \leq L} \tau(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i)$. Функция $T(\mathbf{Q})$ берется в качестве первого функционала в (4). Второй функционал отвечает за максимизацию амплитуды улавливаемых возмущений. Полагается, что каждый из рассмотренных в настоящей работе очагов цунами Курило-Камчатской акватории имеет типичное для этой зоны начальное смещение поверхности дна, возникающее вследствие землетрясения магнитудой 7.5 с характерным сейсмическим механизмом. При этом порождается «эталонная» волна, эволюция которой рассчитывается на основе модели мелкой воды. По полученной зависимости формы волны от времени на достаточно большом временном интервале строится профиль, огибающий сверху эту зависимость, который дает амплитуду возмущения $A(\mathbf{p}_j, \mathbf{x})$ от источника \mathbf{p}_j в точке \mathbf{x} . Для нахождения конфигурации \mathbf{Q} , обнаруживающей возмущения с как можно большей амплитудой хотя бы одним датчиком, надо минимизировать в (4) функционал $F_2(\mathbf{Q}) = -\min_{1 \leq j \leq P} \max_{1 \leq i \leq L} A(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i)$.

Критерий приближенной фиксации хотя бы одним датчиком возмущений от каждого источника с амплитудой, не меньшей порога d , формулируется как условие минимизации функции $F_3(\mathbf{Q}) = \max_{1 \leq j \leq P} \min_{1 \leq i \leq L} \psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i)$, где $\psi(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } A(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i) > d; \\ d - A(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i), & \text{если } A(\mathbf{p}_j, \mathbf{q}_i) \leq d \end{cases}$. Критерий точного определения формулируется как целевое ограничение в (4) с $\varphi_1(\mathbf{Q}) \equiv F_3(\mathbf{Q})$. На тестовых задачах проводится верификация созданных алгоритмов. Для Алеуто-Аляскинской области возникновения волн цунами найдено расположение трех датчиков, уменьшающее время гарантированного обнаружения волн по сравнению с реально установленными глубоководными датчиками предупреждения о цунами в два раза. Для Курило-Камчатской акватории найдено минимальное число датчиков, при котором гарантированное время обнаружения возмущений остается одинаковым для постановок задачи с ограничением снизу на порог амплитуды возмущений $\varphi_1(\mathbf{Q}) \leq 0$, $d = 0.1$ и без него (рисунок 2).

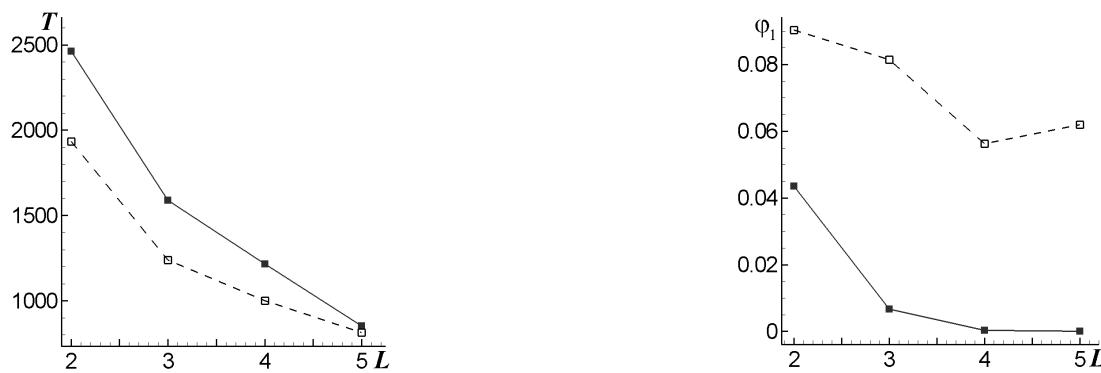


Рисунок 2 – Зависимости гарантированного времени обнаружения T (слева) и функции φ_1 (справа) от количества датчиков: сплошная линия – решение задачи с ограничением; штриховая – решение задачи без ограничения

Глава 3 посвящена оптимизационному проектированию проточного тракта гидротурбины по критериям эффективности её работы и минимизации динамических нагрузок, вызванных прецессирующим вихревым жгутом за рабочим колесом.

В § 3.1 вводятся понятия, характеризующие течение в проточном тракте гидротурбины, и определяются режимы работы гидротурбины набором параметров: напора H , частоты вращения рабочего колеса n , расхода воды Q . Приводится важный инструментарий проектирования гидротурбины – универсальная характеристика, содержащая линии уровней КПД гидротурбины и линии постоянных открытых направляющего аппарата в плоскости приведенных переменных Q и n . На универсальной характеристике задаются режимы работы гидротурбины, после чего формулируется многорежимная и многоцелевая задача оптимизационного проектирования формы проточного тракта: отыскание таких геометрий проточного тракта, которые удовлетворяли бы на заданных режимах работы гидротурбины соответствующим наборам критериев качества и целевых ограничений. Если общее для всех режимов гидротурбины количество целевых функционалов есть M , а гидродинамических ограничений – J , то задача оптимизационного проектирования формулируется как (4), в которой вектор $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$ задает геометрию проточного тракта, а пространство \mathbf{X} состоит из геометрий \mathbf{x} , полученных варьированием N её параметров.

В § 3.2 описывается численный метод решения прямой задачи (1) расчета стационарного течения несжимаемой жидкости в направляющем аппарате и рабочем колесе гидротурбины. Метод обладает высокой разрешающей способностью, абсолютной устойчивостью и экономичностью⁴. В диссертационной работе расчет течения проводится в одном межлопаточном канале направляющего аппарата и в одном межлопастном канале рабочего колеса при предположении циклической повторяемости течений в остальных каналах. Используется более совершенная постановка условий во входном и выходном сечениях исследуемой области: в них задаются полные энергии потоков, связанные фиксированным напором H . Это позволяет правильно определять расход Q для данной геометрии, который заранее неизвестен.

Параметризация формы рабочего колеса, включающая 28 параметров для варьирования его проточного тракта и формирования пространства допустимых геометрий \mathbf{X} , проводится в § 3.3.

Новые критерии качества и гидродинамические ограничения оптимизационной задачи строятся в § 3.4. Поскольку режим работы гидротурбины, на котором проводится оптимизация её формы, задается открытием направляющего аппарата, и расход Q при новой постановке условий во входном и выходном сечениях может при решении прямой задачи отклоняться от режимного (фиксированного на универсальной характеристике), то в качестве гидродинамического ограничения формулируется условие изменения расхода в допустимой окрестности режимного значения. При этом прежний критерий эффективности⁴ становится неприемлемым из-за отбора им в следующее поколение вариаций геометрии с КПД, незначительно превосходящими КПД прототипа, но с расходами отличными от режимного. Так как при новом расходе КПД у прототипа может возрасти, то КПД вариации может оказаться недостаточным. Поэтому предложен новый критерий эффективности гидротурбины, который учитывает зависимость КПД прототипа от расхода, и в случае отклонения расхода у вариаций критерий будет отбирать только такие из них, которые обладают КПД, превосходящим КПД прототипа при данном отклоненном от режимного расходе. В процессе оптимизационного проектирования непосредственно оценивать величину амплитуды пульсаций давления, вызванных прецессирующими вихревым жгутом, для каждой вариации геометрии невозможно в силу значительных затрат времени на решение прямой задачи в нестационарной постановке. Однако предварительно проведенные многочисленные расчеты прямых задач показали, что чем сильнее возрастает при приближении к втулке рабочего колеса осреднённая в окружном направлении осевая составляющая скорости, тем меньше становится амплитуда пульсаций давления, вызванных жгутом. На основании этого в диссертации сформулирован косвенный критерий минимизации динамического воздействия жгута: линейная аппроксимация зависимости осевой скорости от радиальной координаты должна возрастать к оси рабочего колеса.

В § 3.5 представлены результаты решения задачи оптимизационного проектирования рабочего колеса по сформулированным выше критериям. За прототип взято рабочее колесо гидротурбины с зависимостью амплитуды пульсации $A(N)$ от мощности N , представленной на рисунке 3. На этом же рисунке отмечены три режима оптимизационного проектирования: 1 – $N = 200$ МВт (неполной загрузки); 2 – $N = 275$ МВт (большой неполной загрузки); 3 – $N = 350$ МВт (максимального КПД).

На каждом из трех режимов удовлетворялись оба сформулированных критерия, а также ограничения на изменение расхода и допустимую площадь кавитации $S_{\text{кав}} / S_{\text{тыльн}} - 0.15 \leq 0$, не позволяющее площади $S_{\text{кав}}$ с давлением меньшим давления насыщенного пара превосходить 15% площади всей тыльной стороны лопасти $S_{\text{тыльн}}$. На рисунке 3 символом \times представлены амплитуды пульсации у одной из спроектированных геометрий, полученные прямыми расчетами нестационарных течений в ней для указанных режимов. На рисунке 4 приведены зависимости КПД от расхода для прототипа и четырех геометрий с фронта Парето: 1 – наилучшая по эффективности; 4 – обладающая минимальными амплитудами пульсаций давления; 2, 3 – геометрии «золотой середины», улучшенные по сравнению с прототипом по обоим критериям.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что созданный инст-

рументарий оптимизационного проектирования успешно работает в случае многорежимной и многоцелевой постановки.

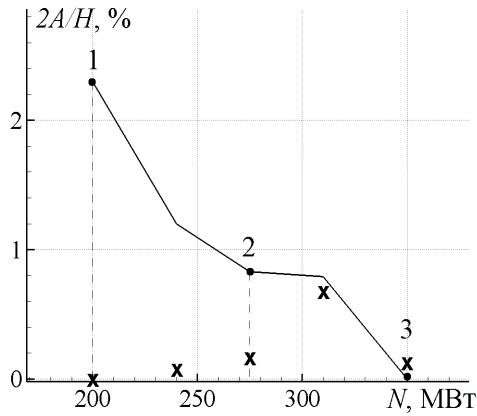


Рисунок 3 – Амплитуды пульсаций давления в точке конуса ОТ в прототипе (сплошная кривая) и в оптимальной геометрии (x)

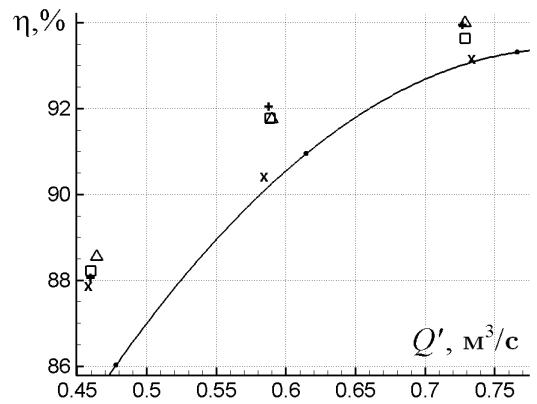


Рисунок 4 – Зависимости КПД $\eta(Q')$: прототипа (—) и геометрий с фронта Парето (Δ – 1; $+$ – 2; \square – 3; x – 4)

В Главе 4 строится наиболее полная на сегодняшний день модель нестационарной фильтрации жидкости Гершеля-Балкли в трещиновато-пористой среде с вытеснением поровой жидкости. Затем на её основе ставится и решается обратная задача определения параметров трещиновато-пористой среды.

Поведение бурового раствора наиболее точно описывается моделью жидкости Гершеля-Балкли $\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$, где τ – касательное напряжение, τ_0 – предельное напряжение сдвига, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, K – консистентность, n – индекс течения. Ранее другими авторами были построены модели неуставновившейся фильтрации для Бингама-Шведова ($n = 1$), «степенной» ($\tau_0 = 0$) и Гершеля-Балкли жидкостей. В последнем случае градиент давления задавался заранее, что существенно ограничивало возможности модели.

В § 4.1 при предположении плоскорадиальной фильтрации жидкости Гершеля-Балкли в слоистой среде выводится обобщенный закон Дарси

$$w = -\frac{k}{K} \left[\frac{\partial p}{\partial r} + \tau_1 \right]^{1/n}, \quad \tau_1 = \tau_0 \cdot \frac{1}{K} \frac{1}{1+n} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{(4n+2)^{1/(1+n)} n^{n/(1+n)}}{n+1} \left(\frac{m}{k} \right)^{n/(1+n)},$$

где w – проницаемость и пористость среды, k – проницаемость и пористость среды, m – проницаемость и пористость среды, t – время, r – радиус, p – давление, ρ – плотность, β – сжимаемость, α – коэффициент диффузии, σ – напряжение, τ – касательное напряжение, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, K – консистентность, n – индекс течения. Уравнение неразрывности $\frac{\partial(\rho m)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho w)}{\partial r} = 0$ дает уравнение пьезопроводности для давления $\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{\beta^* r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{rk}{K} \left(\frac{\partial p}{\partial r} + \tau_1 \right)^{1/n} \right) = 0$. Здесь $\beta^* = m_0(\beta_{\text{п}} + \beta_{\text{ж}})$, m_0 – пористость среды

при давлении, равном давлению поровой жидкости, $\beta_{\text{п}}$ и $\beta_{\text{ж}}$ – сжимаемости породы и жидкости соответственно. Система уравнений фильтрации бурового раствора в трещиновато-пористую среду состоит из двух таких уравнений, записанных для трещиноватой и пористой частей, дополненных свободными членами, отвечающими за переток жидкости из одной среды в другую. Особое внимание в параграфе уделено способу вычисления выражения $(\partial p / \partial r + \tau_1)^{1/n}$, который правильно передает реологию жидкости Гершеля-Балкли. Для описания процесса вытеснения поровой жидкости буровым раствором вводится

граница их раздела $r = R_b(t)$. Её движение описывается уравнением $dR_b / dt = u(R_b, t)$, в котором u – действительная скорость движения раствора в трещиноватой части среды. Уравнение пьезопроводности и закон Дарси, описывающие фильтрацию неньютоновской жидкости Гершеля-Балкли для раствора и ньютоновской – для поровой жидкости, имеют одинаковую структуру и отличаются только значениями коэффициентов. Поэтому процесс вытеснения моделируется уравнениями, которые решаются сквозным счетом во всей области от скважины до удаленной в области поровой жидкости границы с переключением значений коэффициентов на границе раздела.

В § 4.2 для решения существенно усложнившегося нелинейного уравнения пьезопроводности с разрывными на границе раздела коэффициентами предложена и обоснована консервативная абсолютно устойчивая схема. Она позволила рассчитать фильтрацию бурового раствора в случае большого значения отношения проницаемости среды к её пористости ($k / m_0 = 3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 / 0.001 = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ по сравнению с типичным его значением порядка 10^{-10} м^2), который не мог быть рассмотрен при использовании явной устойчивой схемы из-за необходимости задания в ней очень маленького шага по времени. Построенная схема имеет 2-й порядок аппроксимации как по времени, так и по пространству.

В § 4.3 для верификации построенной численной модели решается известная задача теории упругого режима фильтрации, имеющая аналитическое решение. Максимальная погрешность полученных численных значений расхода и скорости фильтрации не превышает 1%.

В § 4.4 иллюстрируется работа предложенной итерационной схемы и поведение решений уравнений пьезопроводности в самом общем случае фильтрации жидкости Гершеля-Балкли в трещиновато-пористую среду с вытеснением поровой жидкости. Показаны быстрая сходимость итерационных процессов и хорошее приближение бурового раствора моделью жидкости Гершеля-Балкли.

В § 4.5 на основе экспериментальных замеров давления $p_{well}(t)$ (рисунок 5) и потерь бурового раствора $Q_{well}^{exp}(t)$ (рисунок 6) от времени ставится обратная задача определения параметров трещиновато-пористой среды. Зависимость $p_{well}(t)$ используется для задания краевых условий для давления в трещиноватой и пористой частях на скважине при решении уравнений пьезопроводности в прямой задаче фильтрации. Зависимость $Q_{well}^{exp}(t)$ является эталоном, к которому подгоняется расчетная зависимость потерь $Q_{well}^{comp}(t, \mathbf{x})$ путем поиска генетическим алгоритмом шестнадцати параметров трещиновато-пористой среды и реологий бурового раствора и поровой жидкости вектора \mathbf{x} .

В § 4.6 представлены результаты решения оптимизационной задачи с одним минимизируемым функционалом $F(\mathbf{x}) = \left[\int_0^T (Q_{well}^{exp}(t) - Q_{well}^{comp}(t, \mathbf{x}))^2 dt \right]^{1/2}$. Показано, что наибольшее влияние на $Q_{well}^{comp}(t, \mathbf{x})$ оказывают 3 из 16 параметров: проницаемость k_t и пористость m_{0t} трещиноватой части и консистенция поровой жидкости K_{nop} . Оптимальные их значения $k_t = 1.084 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $m_{0t} = 0.0129$,

$K_{nop} = 0.00249 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ дали зависимость $Q_{well}^{comp}(t, \mathbf{x})$, приведенную на рисунке 6.

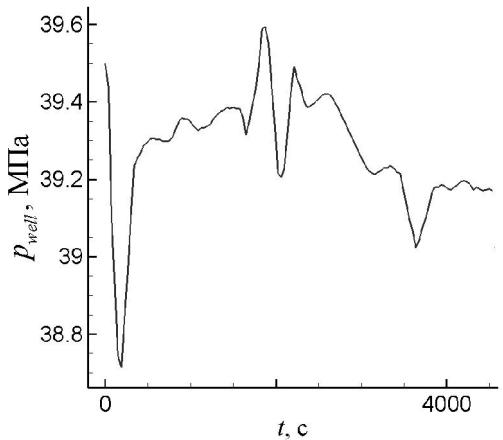


Рисунок 5 – Замеренная зависимость давления в скважине от времени

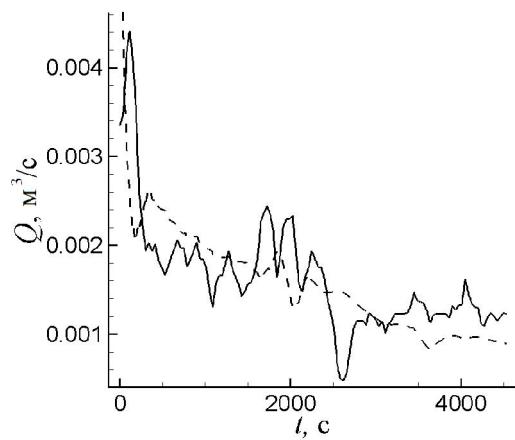


Рисунок 6 – Замеренная $Q_{well}^{exp}(t)$ (—) и полученная в оптимизационном расчете $Q_{well}^{comp}(t, \mathbf{x})$ (---) зависимости расходов от времени.

В Главе 5 ставится и решается задача определения структуры прискважинной области по результатам высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ).

В § 5.1 определяется плоскорадиальная структура прискважинной области, состоящая из I цилиндрических слоёв, имеющих ширины $w_1, \dots, w_{I-1}, \infty$, удельные электрические сопротивления ρ_1, \dots, ρ_I и диэлектрические проницаемости $\epsilon_1, \dots, \epsilon_I$. Вектор \mathbf{x} , компонентами которого являются $3I - 1$ указанных параметров прискважинной области, задает её структуру и свойства.

В § 5.2 описывается технология ВИКИЗ, которая по реальной структуре \mathbf{x}^e дает вектор $\mathbf{P}^e(\mathbf{x}^e) = (P_1^e(\mathbf{x}^e), \dots, P_{2L}^e(\mathbf{x}^e))$, компоненты которого $P_k^e = \{\Delta\varphi_k, k = 1, \dots, L; A_{k-L}, k = L + 1, \dots, 2L\}$ представляют L разностей фаз $\Delta\varphi_k$ и L относительных амплитуд A магнитного поля, полученных с помощью L зондов, участвующих в ВИКИЗ.

В § 5.3 приводится математическая модель⁵, основывающаяся на уравнениях Максвелла и дающая теоретические значения $\mathbf{P}(\mathbf{x}) = (P_1(\mathbf{x}), \dots, P_{2L}(\mathbf{x}))$ по абстрактной структуре \mathbf{x} . Данная модель используется в диссертации для решения прямых задач расчета разностей фаз и амплитуд магнитного поля.

В § 5.4 ставится обратная оптимизационная задача определения структуры \mathbf{x} по результатам ВИКИЗ: найти структуру \mathbf{x} , обеспечивающую $\min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} F(\mathbf{x})$, где $F(\mathbf{x}) = \|\mathbf{P}^e(\mathbf{x}^e) - \mathbf{P}(\mathbf{x})\|$. Использование метода деформируемых многогранников (Нелдера-Мида)⁵ для решения данной задачи требует специальных приемов, например разбиения общей многопараметрической задачи на серию малопараметрических (декомпозиция). В этом случае параметры комбинируются из соображений сопоставимости их значимости. Разработанный в диссертации оптимизационных метод на основе модифицированного генетического

⁵ Эпов М.И. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах / М.И. Эпов, И.Н. Ельцов // Препринт №2 ОИГГМ СО РАН. – Новосибирск. – 1992. – 31 с.

алгоритма позволяет решать задачу одновременно для всех параметров задачи, не применяя декомпозицию.

В § 5.5 решаются тестовые задачи, в которых задаются три и четыре слоя с известными свойствами. Сначала решается прямая задача с 9 зондами. Полученные значения вектора $\mathbf{P}(\mathbf{x}) = (P_1, \dots, P_{18})$ берутся в качестве $\mathbf{P}^e(\mathbf{x}^e)$ для обратной задачи. Глобальный минимум функционала $F(\mathbf{x})$ надежно находится при каждом оптимизационном расчете.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Предложена модификация оптимизационного метода решения обратных задач на основе улучшенного генетического алгоритма. Улучшение достигнуто за счет уточнения на основе многочисленных расчетов параметра селекции и построения нового оператора рекомбинации, учитывающего значимость индивидуумов, участвующих в формировании индивидуума последующего поколения. Модифицированный метод позволил ускорить отыскание глобальных минимумов функционалов, в том числе, в сильно нелинейной задаче определения структуры прискважинной области по результатам индукционного каротажа.

2. Для решения задачи оптимального расположения датчиков обнаружения волн цунами сформулированы новые постановки с оригинальными функционалами и ограничениями, учитывающими как время обнаружения, так и амплитуду улавливаемых возмущений. Для Алеуто-Аляскинской области возникновения волн цунами найдено расположение трех датчиков, уменьшающее время гарантированного обнаружения волн по сравнению с установленными DART-станциями в два раза. Для Курило-Камчатской акватории найдено минимальное число датчиков, при котором гарантированное время обнаружения возмущений остается одинаковым для постановок с ограничением снизу на порог амплитуды возмущений и без него.

3. Предложены два новых критерия оптимизационного проектирования рабочего колеса гидротурбины. Первый критерий позволяет максимизировать КПД с сохранением характерного поведения его зависимости от режима работы гидротурбины. Второй критерий минимизирует интенсивность прецессирующего вихревого жгута через формирование возрастающего к оси рабочего колеса профиля расходной составляющей скорости за лопастями колеса. Улучшенный этими критериями комплекс оптимизационного проектирования позволил спроектировать рабочее колесо, амплитуды пульсаций давления которого снижены более чем в 10 раз и КПД которого не меньше, чем у прототипа.

4. Построена наиболее полная на сегодняшний день модель нестационарной фильтрации жидкости Гершеля-Балкли в трещиновато-пористой среде с вытеснением поровой жидкости. До этого были модели либо отдельно для вязкопластической жидкости (Бингама-Шведова), либо отдельно для «степенной» жидкости. Для решения существенно усложнившегося нелинейного уравнения пьезопроводности с разрывными на границе раздела бурового раствора и поровой жидкости коэффициентами предложена и обоснована консервативная абсолютно устойчивая схема. Созданная новая численная модель позволила рассчитать фильтрацию бурового раствора для случая большого

значения отношения проницаемости среды к её пористости, который не мог быть рассмотрен при использовании явной условно устойчивой схемы из-за необходимости задания в ней очень маленького шага по времени. За счет более точного описания процесса фильтрации бурового раствора построенная модель позволила успешно решить обратную задачу определения параметров трещиновато-пористой среды.

5. На основе предложенных методов созданы программные комплексы решения перечисленных обратных задач, которые внедрены и используются в ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» (г. Санкт-Петербург), ООО «Технологическая Компания Шлюмберже» (г. Новосибирск) и National Oceanic and Atmospheric Administration Center of Tsunami Research (г. Сиэтл, США).

В **приложении А** показана возможность существования локального минимума в задаче определения структуры прискважинной области по результатам индукционного каротажа, а также приведены таблицы с результатами оптимизационных расчетов для различных операторов рекомбинации. В **приложении В** представлены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и три акта об использовании научных результатов диссертационной работы.

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Астракова, А.С. Применение генетического алгоритма к задаче оптимального расположения датчиков / А.С. Астракова, Д.В. Банников, М.М. Лаврентьев (мл), С.Г. Черный // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14. – № 5. – С. 3-17.
2. Астракова, А.С. Математическая модель своевременного обнаружения воздействия опасных факторов на природу/ А.С. Астракова, Д.В. Банников, М.М. Лаврентьев (мл), С.Г. Черный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Отдельный выпуск №17. – М: «Горная книга». – С. 45-49.
3. Астракова, А.С. Модель фильтрации вязкопластической жидкости в задаче определения параметров трещиновато-пористой среды / А.С. Астракова, В.Н. Лапин, С.Г. Черный, О.А. Алексеенко // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2013. – Т. 11, № 2, – С. 18-35.
4. Астракова, А.С. Расположение датчиков для своевременного обнаружения волн цунами с максимальной амплитудой / А.С. Астракова, М.М. Лаврентьев (мл), С.Г. Черный // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. – 2013. – Т. 3, № 4. – С. 73-94.
5. Астракова, А.С. Численные методы оптимизационного проектирования проточных частей гидротурбин / А.С. Астракова, Д.В. Банников, С.Г. Черный, Д.В. Чирков // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 20-39.

Публикации в трудах международных и всероссийских конференций

6. Lavrentiev, M.M. Jr. Optimal sensor network on example: fast tsunami wave detection / M.M. Jr. Lavrentiev, S.G. Cherny, D.V. Bannikov, A.S. Astrakova // Proc. of Intern. Workshop of Destruction. – COE, Keio University, Yokohama, Japan, 2007. – P. 13-28.
7. Astrakova, A.S. The determination of the optimal sensors' location using genetic algorithm / A.S. Astrakova, D.V. Bannikov, S.G. Cherny, M.M. Jr. Lavrentiev // Proc. of 3rd Nordic EWM Summer School for PhD Students in Mathematics. – TUCS General Publ., University of Turku, Finland, 2009. – № 53. – P. 5-22.

8. Астракова, А.С. Расположение датчиков для своевременного обнаружения волн цунами с их амплитудной фильтрацией / А.С. Астракова, Д.В. Банников, М.М. Лаврентьев (мл), С.Г. Черный // Труды Межд. конф. "Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика", посвященной 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко. – Новосибирск. – 2011. <http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/37246/45269/Astrakova.pdf>
9. Астракова, А.С. Метод оптимизационного расположения датчиков регистрации возмущений с заданным порогом амплитуды за минимальное время / А.С. Астракова, Д.В. Банников, М.М. Лаврентьев (мл), С.Г. Черный // Труды третьей научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 430-434.
10. Астракова, А.С. Численная модель фильтрации бурового раствора с вытеснением поровой жидкости в задаче определения параметров среды / А.С. Астракова, В.Н. Лапин, С.Г. Черный // Труды XIII Всерос. конф. молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям: труды конф. – Новосибирск: ИВТ СО РАН. – 2012. http://conf.nsc.ru/files/conferences/ym2012/fulltext/137871/139437/AstrakovaAS_proceedings.pdf
11. Астракова, А.С. Учет вытеснения поровой жидкости при моделировании утечек бурового раствора для определения параметров породы / А.С. Астракова, В.Н. Лапин, С.Г. Черный // Труды XI Всерос. научной конф. с международным участием «Краевые задачи и математическое моделирование». – Новокузнецк. – 2012. – С. 16-25.
12. Астракова, А.С. Оптимизационный метод определения структуры прискважинной области по результатам каротажного зондирования / А.С. Астракова, С.Г. Черный // Труды VI Всерос. школы-семинара по электромагнитным зондированиям земли им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна – ЭМЗ-2013. – Новосибирск. – 2013. <http://ems2013.ipgg.sbras.ru/>
13. Avdyushenko, A. High-perfomance computations in problems of simulation and optimization of turbine hydrodynamics / S. Cherny, A. Astrakova, D. Chirkov, A. Lyutov // Proc. of Third International Conference "High Performance Computing" HPC-UA 2013. – Ukraine, Kiev, 2013. – P. 28-35. <http://hpc-ua.org/hpc-ua-13/files/proceedings/5.pdf>

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

14. Черный, С.Г. Программа оптимизационного проектирования рабочего колеса и отсасывающей трубы гидротурбины CADRUN-opt/2013 / С.Г. Черный, Д.В. Чирков, В.Н. Лапин, А.С. Астракова // Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2013611575. Роспатент.
15. Черный, С.Г. Программа расчета напряженно-деформированного состояния произвольного упругого тела методом граничных элементов CADBEM/2013 / С.Г. Черный, Д.В. Есипов, В.Н. Лапин, Д.С. Куранаков, А.С. Астракова // Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2013811577. Роспатент.

Подписано в печать 16.06.2014 г. Печать цифровая.

Бумага офсетная. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1.

Тираж 120 экз. Заказ № 218.

Отпечатано в типографии «Срочная полиграфия»

ИП Малыгин Алексей Михайлович

630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6/1, оф. 104

Тел. (383) 217-43-46, 8-913-922-19-07