

На правах рукописи



Стрекалов Александр Владимирович

КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОСИСТЕМАМИ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО
ДАВЛЕНИЯ

05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тюмень – 2010

Работа выполнена на кафедре разработки и эксплуатации нефтяных месторождений государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тюменский государственный нефтегазовый университет»

Научный консультант	доктор технических наук, профессор Грачев Сергей Иванович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Захаров Александр Анатольевич
	доктор физико-математических наук, профессор Кузнецов Гений Владимирович
	доктор технических наук, профессор Файзуллин Рашит Тагирович
Ведущая организация	ГОУ ВПО Томский государственный университет, г.Томск

Защита состоится « 28 » октября 2010 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.274.14 при Тюменском государственном университете по адресу 625003, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Перекопская, д. 15А, ауд.410.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н.Н. Бутакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования способов контроля и управления системами поддержания пластового давления (ППД), имеющими сложную сетевую структуру, нелинейные характеристики элементов и гидродинамическую связь с продуктивными пластами. Строение и функционирование систем ППД характеризуется развитой уникальной для каждого месторождения сетью трубопроводных элементов, высокой суммарной протяженностью (до 700 км), существенными уровнями энергопотребления (до 150 МВт), гидравлической связью с системой продуктивных пластов.

Особенный интерес для разработок в области моделирования представляют сложные системы с развитой структурой и состоящие из множества элементов, которые объединяют процессы теплопереноса и движения жидкостей в наземных трубопроводных сетях, скважинах с фильтрационно-энергетическими процессами пластовых систем. Целевые параметры такого рода систем обычно трудно предсказуемы и сильно изменяются при изменении свойств хотя бы одного элемента системы.

В связи с тем, что наибольший уровень воздействия на пластовую систему и наибольшую энергоемкость имеют системы заводнения, основным аспектом практического применения описанных в данной работе моделей, алгоритмов и программ, является повышение эффективности систем ППД с позиции минимизации энергетических затрат и максимизации эффективности процесса нефтеизвлечения.

Процесс заводнения обеспечивается техногенной (технической) гидросистемой (ТГС) поддержания пластового давления, включающей в себя объекты водозабора, системы очистки, насосные станции, сети трубопроводов, запорной и дросселирующей арматуры, оборудования устья нагнетательных скважин, дренируемые и заводняемые зоны пласта или пластовую гидросистему в целом.

Нагнетаемая в продуктивные пласты жидкость фильтруется совместно с пластовыми флюидами в соответствии с законами сохранения энергии и материального баланса в области дренирования пласта добывающими скважинами.

Вследствие явной взаимосвязи ТГС с системой продуктивных пластов необходимо создание модели ТГС и модели гидросистемы продуктивных пластов (ГПП), которые должны интегрироваться в комплексную модель.

В области моделирования гидравлических систем, в настоящее время не сформирована теоретическая основа для построения унифицированных моделей гидросистем, связанных с системами продуктивных пластов. Также не существует унифицированного подхода к математическому и алгоритмическому описанию моделей гидросистем с произвольными свойствами элементов, вследствие чего создаваемые модели и их программные реализации используются исключительно в отраслевом контексте с большими ограничениями на описание свойств элементов системы и граничных условий.

С математической стороны, большинство ограничений в известных моделях теории гидравлических цепей связаны с фиктивными граничными условиями,

ограничениями на вид структуры системы, требованиями к виду функций (замыкающих отношений), отсутствие взаимосвязи между гидравлическими режимами и важными техническими показателями элементов.

Со стороны учета технических и природных факторов данные модели не учитывают: гидродинамическое взаимодействие с природными системами, перемерзание участков сети, аварийные режимы работы насосных агрегатов, изменение состояния обратных клапанов, переход гидравлической энергии в тепловую и т.п.

Цель работы. Разработка и применение унифицированных математических моделей гидравлических систем с произвольными свойствами элементов и структурой, объединяющей эти элементы в единую природно-техногенную систему.

Задачи исследования.

1. Анализ показателей функционирования гидравлических систем и их элементов, а также анализ применимости известных ранее моделей гидравлических систем и выявление причин потери их универсальности.

2. Создание комплексной математической модели гидросистем поддержания пластового давления в условиях неизотермического нестационарного течения сжимаемых сред в трубопроводных сетях и фильтрации в продуктивных пластах.

3. Разработка и математическое описание методов оптимизации систем поддержания пластового давления с позиции максимизации к.п.д. и минимизации технологических отклонений.

4. Разработка численных методов решения, алгоритмизация и создание программного комплекса, реализующего разработанные модели и методы оптимизации.

Научная новизна.

1. Впервые предложен унифицированный подход к структурному анализу гидросистем по характеру воздействия их элементов на текучие среды, исходя из наиболее универсального математического описания задач потоко- и термораспределения для сетевых и изотропных структур, который позволил:

- моделировать реальные физические структуры гидравлических систем без фиктивного заикливания;
- ввести понятие «активный узел», отражающее модели накопителей текучей среды, через которые может осуществляться течение за пределы системы, причем с заранее неизвестным направлением потока и расходом;
- ввести понятие «путь» гидравлической цепи – последовательность звеньев, связывающих любую пару активных узлов;
- формализовать запись закона сохранения энергии и неразрывности в виде системы уравнений, описывающей потокораспределение без фиктивных граничных условий для разомкнутых структур с включением замыкающих отношений, описывающих полноценное воздействие элементов на энергию текучих сред;
- описать гидравлические модели элементов в виде функций «полных гидравлических характеристик» (замыкающих отношений), которые отражают характер воздействия на энергию потока во всем спектре

- расходов, давлений и температур в номинальных и аварийных режимах;
- теоретически обосновать модели сложносоставных элементов – скважин с различными способами эксплуатации и возможными осложнениями (дефекты колонны, аварийная циркуляция и т.п.);
 - ввести понятие функций «обобщенных индикаторных линий», отражающих совместную схему нагнетания и отбора из нескольких пластов в одной скважине с учетом возможных перетоков между пластами в стволе;
 - теоретически описать новые модели элементов, ранее не учитываемые в теории гидравлических цепей: обратные клапаны, регуляторы расхода и регуляторы давления;
 - описать модели обратимых и необратимых насосных агрегатов с учетом условий их возможной аварийной работы.
2. Впервые предложена система граничных условий, позволяющая описать однозначную гидродинамическую взаимосвязь гидросистемы продуктивных пластов, скважин и наземной сети в сочетании с совместностью решения.
3. Разработана новая математическая модель неизотермического течения сжимаемой текучей среды технических гидросистемах сетевой структуры, которая включает:
- математическое описание комплексного теплообмена в разомкнутых гидросистемах с учетом двунаправленной взаимосвязи кинематической вязкости и плотности текучих сред с температурой, давлением и скоростью потоков;
 - факторы диссипации гидравлической энергии движения текучих сред в элементах гидросистем.
4. Разработана новая математическая модель гидросистемы продуктивных пластов в условиях неустановившейся изотермической фильтрации сжимаемых текучих сред в многопластовых залежах нефти, которая включает:
- новые методы аппроксимации и интерполяции для построения трехмерных геологических моделей;
 - специфическую систему уравнений относительно, неизвестных массовых расходов между конечными элементами, давлениями и фильтрационно-емкостными свойствами, позволяющую решать задачу динамического распределения фильтрационно-емкостных показателей с неограниченным оперативной памятью ЭВМ числом элементов;
 - изменение пористости и проницаемости в условиях деформации порового пространства вследствие изменения давления;
 - нелинейный закон фильтрации в сочетании с условиями течения сред с реологическими свойствами;
 - динамическое спонтанное формирование и распространение трещин при превышении градиента давления разрыва, рассчитываемое на основе статистического анализа результатов целенаправленного разрыва пласта.
5. Впервые математически формализованы методы адресной и комплексной оптимизации систем поддержания пластового давления.
6. Впервые поставлена и решена задача поиска системы с кратчайших

линейно-независимых путей, охватывающих все ветви орграфа, определенного матрицей инцидентности.

7. Разработан новый метод и алгоритмы численного решения задачи совместного потоко- и термораспределения с диссипацией гидравлической энергии, отличающийся изменением функций замыкающих отношений непосредственно в итерационном процессе на каждом итерационном шаге и особым управлением приращениями для вычисления частных производных в конечных разностях в зависимости от приближения к корню.

8. Впервые разработанные модели интегрированы в комплексную динамическую модель, сочетающую модель технических гидросистем с моделью гидросистем продуктивных пластов при помощи взаимо-расчетных двойных граничных условий: давлений в активных узлах технической гидросистемы, функций давления водонапорного горизонта от времени и функции забойного или устьевого давлений от времени.

Практическая значимость работы заключается в применении разработанных моделей, методов оптимизации и программного комплекса, реализующего полученные результаты для управления системами поддержания пластового давления или любыми другими гидросистемами, эксплуатация которых соответствует условиям использования предлагаемых моделей. Практическая ценность результатов, изложенных в данной работе заключается в применении разработанных подходов к анализу и моделированию широкого спектра гидросистем подобных системам ППД: системы сбора и транспорта нефти и газа, а также в использовании предложенной унифицированной модели для контроля и управления техническими гидросистемами с существенным гидродинамическим взаимодействием с пластовой системой.

Апробация результатов исследований. Основные положения докладывались и обсуждались: на международной конференции «Биология, симметрология и синергетика в естественных науках» (г. Тюмень, 2001 г.); на всероссийской научно-технической конференции; Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование технологических процессов бурения, добычи и транспортировки нефти и газа на основе современных информационных технологий», посвященной 40-летию Тюменского государственного нефтегазового университета (г. Тюмень, 2002 г.); на семинарах ТПП «Урайнефтегаз» (г. Урай, 2001 г.), НИИ «СибГеоТех» (г. Нижневартовск, 2001 г.); на международной научно-технической конференции: Нефть и Газ Западной Сибири (г. Тюмень, 2005 г.); на семинаре ОАО «Славнефть-Мегионнефтеза» (г. Мегион, 2006 г.); на III-ем международном научно-техническом семинаре «Информационные системы и технологии в геологии и нефтегазодобыче» (г. Тюмень, 2007 г.); на региональной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Тюменского государственного нефтегазового университета «Новые технологии для ТЭК Западной Сибири» (г. Тюмень, 2007 г.); на III-й международной научно-технической конференции. «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании» (г. Тюмень, 2008 г.); на научном семинаре Тюменского государственного университета (г. Тюмень, 2009 г.); на международной академической

конференции «Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири» (г. Тюмень, 2009 г.); на семинаре совместного заседания кафедр «Геология и разработка нефтяных месторождений» и «Бурение скважин» Томского политехнического университета (г. Томск, 2009 г.); на девятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург 2010 г.).

Реализация и внедрение полученных результатов. Результаты проделанной научной работы реализованы в виде программного комплекса (Свидетельство № 2002611864 программы для ЭВМ – Комплекс универсального моделирования технических гидравлических систем поддержания пластового давления – Hydra'Sym), который является законченным программным продуктом и внедрен в ОАО «Славнефть-Мегионнефтегаз» (Договор 06/05/306ММ от 28.02.2005 – «Внедрение и адаптация программного комплекса – Hydra'Sym имитации гидросистем к системе поддержания пластового давления Северо-Покурского месторождения»), ООО «Лукойл» (в рамках работ по гранту некоммерческой организации «Благотворительный фонд Лукойл», 2006 г.), НИИ «СибГеоТех» (2003 г.), учебном процессе по дисциплинам «Моделирование процессов разработки нефтяных и газовых месторождений» кафедры «Разработки и эксплуатации нефтяных месторождений» института нефти и газа Тюменского государственного нефтегазового университета.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 50 работ, в том числе 3 монографии, 13 статей в журналах рекомендованных ВАК РФ, один патент, одно свидетельство о регистрации программы ЭВМ и 2 патента на полезную модель.

Объем и структура работы

Материалы работы излагаются в шести главах на 439 страницах и приложениях на 58 страницах. Работа содержит 308 рисунков, 28 таблиц и 337 формул.

В первой главе рассматриваются общие свойства технических гидросистем, их классификация и основные проблемы контроля и управления трубопроводными гидросистемами, имеющими гидродинамическую связь с продуктивными пластами.

В отношении проблем эксплуатации систем ППД следует отметить следующие факторы: достаточно динамическое изменение структуры системы; осложненные условия эксплуатации трубопроводов, запорной арматуры и насосных агрегатов обусловленные абразивно-коррозионной активностью перекачиваемой воды с высокими давлениями и расходами; сложности комплексного контроля гидравлических режимов и состояния элементов системы; динамические изменения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пластовой системы; проблемы оптимального управления, связанные с отсутствием достоверных моделей для принятия адекватных решений.

Здесь же приводится ряд типовых проблем эффективного регулирования систем ППД, которые возможно разрешить только с использованием полноценных моделей, отражающих системную взаимосвязь процессов течения в

наземной трубопроводной сети и пластовой системе.

Одним из весомых негативных факторов эксплуатации систем ППД является технологический аспект формирования систем заводнения. Вследствие экономических тенденций к формированию систем площадного, очагового и рядного заводнения, на одну нагнетательную приходится не менее четырех добывающих скважин. Таким образом, для компенсации отбора жидкости группой добывающих скважин в одной нагнетательной скважине необходим расход воды, как минимум равный суммарному дебиту. Вследствие этого свойства пласта в районе воздействия нагнетательных скважин интенсивно изменяются: происходит гидравлический разрыв пласта в районе забоев нагнетательных скважин, так как для обеспечения материального баланса приходится закачивать большие объемы воды при высоком давлении нагнетания на забоях (в среднем 35–45 МПа); формируются промывы продуктивных коллекторов и образование каналов высокой проводимости, вследствие чего пластовое давление в зоне действия нагнетательных скважин дестабилизируется, а обводненность продукции резко растет; в скважинах с высокой приемистостью зачастую наблюдаются, так называемые, заколонные перетоки.

В системах ППД сформированы достаточные условия для эффективного управления: относительно несложная технология и оборудование, большие мощности насосных станций и потенциальная возможность прогнозирования комплексного и детализированного состояния этих систем. Главными отрицательными факторами эффективного управления системами ППД являются: низкая оснащенность контрольно-измерительными приборами и недостаток информации о технологических и энергетических режимах; низкий уровень контроля за гидродинамическими характеристиками отдельных элементов; низкий уровень контроля за функционированием системы в целом; количественная непредсказуемость поведения системы при изменении ее структуры или свойств отдельных элементов.

В данной работе рассматриваются возможности повышения уровня контроля и управления системами ППД посредством создания наиболее универсальной модели, с помощью которой стало возможно контролировать систему и предсказывать ее состояние при внесении каких-либо изменений. Использование этой модели, прежде всего, позволит повысить энергоэффективность систем и точность соответствия текущих режимов номинальным технологическим режимам заводнения за счет комплексной оптимизации, т.е. решения «обратной задачи».

Основной посылкой для возможности выполнения этих задач является высокая потенциальная управляемость систем ППД, которая может быть использована при планировании мероприятий по регулированию или модернизации, а также системой тотального автоматизированного контроля и управления в сочетании с комплексной моделью системы.

Во второй главе приводится обзор ранее известных математических моделей ТГС и ГПП, а также описываются общие понятия, принципы построения и использования моделей в свете ряда новых представлений о моделях и их применении для принятия решений при проектировании и управлении

гидросистемами.

Основой записи уравнений материального и энергетического баланса для нахождения величин расходов и давлений в ТГС нашли применение правила Кирхгоффа теории электрических цепей для замкнутых электрических схем.

Развитию способов математического описания и методов решения в гидравлических системах сетевой структуры посвящены работы известных ученых в области моделирования систем тепло-, водо- и газоснабжения: Д. Мюрга, В. Блесса, Ф.Е. Максименко, М.С. Ясюковича, Е.Б. Батурина, Н.Н. Абрамова, Б.Л. Шифринсона, С.Ф. Копьева, Л.А. Мелентьева, Л.Г. Скрицкого, Е.Я. Соколова, Н.К. Громова, А.Л. Сафонова, Е.П. Шубина, П.Н. Каменева, Н.М. Зингера, М.М. Андрияшева, Х. Кросса, В.Г. Лобачева, Я.И. Алихашкина, А.Р. Юшкина, К.П. Вишневого, К.С. Андреевой, М.А. Маханьковой, А.М. Левина, В.А. Смирнова, А.Я. Черкасовой, Е.Р. Ставровского, М.Г. Сухарева, Б.Н. Пшеничного, Меренкова А.В., В.Я. Хасилева, Ш. Дюбена, Н.У. Койда, Ю.И. Максимова, М.П. Васильченко, А.Е. Белана, С. Цоя, Г.К. Рязанцева.

Позднее в теории гидравлических цепей (ТГЦ) модели ТГС были названы гидравлическими цепями (г.ц.) в работах А.П. Меренкова и В.Я. Хасилева. В ТГЦ была принята за основу вся математическая база теории электрических цепей. В связи с тем, что большинство гидросистем имеют разомкнутые структуры, ученым пришлось приводить такие схемы к замкнутому виду с целью формализации математического описания: «Циклическая схема — расширенная связная схема г.ц. без притоков и стоков, полностью отображающая «круговорот» при движении среды в системе. Она может быть получена из исходной схемы **соединением всех ее источников и потребителей дополнительными условными ветвями с одним и тем же опорным узлом**».

Несмотря на некоторые подобия между электрическими и гидравлическими цепями, гидросистемы имеют серьезные отличия в математическом описании замыкающих отношений, которые в моделях ТГС являются нелинейными и зачастую немонотонными функциями. В связи с этим в ТГЦ сложилась ситуация, характеризующаяся следующими ограничениями и неточностями: обязательная нечетность функций замыкающих отношений, которые аппроксимируются функциями $-\Delta p = f(q) = s \cdot q|q|$, где Δp — перепад давления на концах элемента (ветви), q — установившийся объемный расход, s — эквивалентное сопротивление; обязательное указание фиктивных величин напоров в узлах системы; наличие фиктивных ветвей, доводящих исходную схему до замкнутой; описание граничных условий в виде постоянных притоков/оттоков среды в системе.

Особенности эксплуатации ТГС ППД, обусловленные аварийными режимами (в том числе из-за некорректного управления, дисбаланса пластовых давлений или выхода из строя части оборудования) и динамической связью с ГПП, требуют устранения вышепоказанных ограничений и неточностей моделей, а также математического описания гидродинамической взаимосвязи наземной трубопроводной сети с ГПП на различных уровнях детализации, вплоть до фильтрационных процессов внутри ГПП до забоев или устьев добывающих скважин.

На текущий момент известен ряд широко используемых унифицированных

моделей ГПП, описанию которых посвящены работы отечественных: И.С. Закирова, С.Н. Закирова, Э.С. Закирова, И.М. Индрупского, В.Я. Гордона, Б.М. Палатника, П.А. Юфина, В.П. Майера, и зарубежных ученых: Азиза Х. и Сеттари Э.

Известные модели ГПП также имеют ряд ограничений, связанных с независимостью граничных условий от состояния наземных гидравлических систем, скважинного оборудования и, как следствие, не учитывают влияние систем ППД на техногенное формирование трещин и изменение основных ФЕС – абсолютной проницаемости и пористости.

В связи с тем, что гидравлические системы, предназначенные для транспортировки текучих сред и передачи энергии технологическим объектам (это ГПП в случае систем ППД), имеют сетевые и матричные структуры, представленные множеством техногенных и природных элементов, необходимо максимально близко к физике процессов математически описать материальный и энергетический баланс, граничные условия и замыкающие отношения. Далее разработать численный метод, приспособленный к таким наиболее жестким условиям поставленной задачи.

Устойчивость метода решения не должна зависеть от структуры системы и набора исходных свойств элементов. Известно, что иногда методы «поконтурной» и «узловой увязки» не работают при большом разбросе сопротивлений участков – *s*. Ш. Дюбен на Международном конгрессе по водоснабжению отметил, что оба увязочных метода имеют одинаковые недостатки. Особенно сильно недостатки известных методов отмечаются в смешанных – разомкнуто-закольцованных схемах.

В третьей главе рассмотрен модульный анализ структуры гидравлических систем, дано краткое описание ранее разработанных автором классификаций элементов гидравлических систем и свойств некоторых из представителей этих элементов.

Несмотря на разнообразие гидросистем, отличающихся назначением, структурой, гидравлическими и размерными характеристиками, по мнению автора, все они содержат одинаковое число элементов и формирующих полный модуль гидросистемы. По назначению и принципу действия на текучую среду, элементы гидросистем можно разделить на:

–накопители текучей среды (атмосфера, водоемы, емкости, насыщенные пласты) (**НТС**);

–аппараты сообщения или поглощения энергии текучей среды с определенной технологической целью (различного типа насосы, компрессоры, гидродвигатели, турбины) (**АСП**);

–устройства управления потоком текучей среды (штуцеры, гидравлические регуляторы, задвижки, клапаны, краны и т.п. трубопроводная арматура) (**УУ**);

–каналы связи перечисленных выше элементов (открытые каналы ирригационных систем, трубопроводы, добывающие и нагнетательные скважины) (**КС**);

–приборы для регистрации параметров потока и свойств текучей среды (расходомеры, манометры, термометры) (**ПР**).

Полезность данной классификации продиктована необходимостью типизировать множество элементов ТГС и их моделей для унифицированной модели, так как каждый элемент имеет особенности в математическом описании граничных условий или замыкающих отношений.

Накопители текучей среды – замкнутые объемы естественного и искусственного происхождения, служащие для вмещения текучей среды и придающие ей относительно стабильный энергетический потенциал. НТС характеризуются пренебрежимо малыми скоростями течения сред, которые не влияют на функционирование рассматриваемой системы.

Аппараты для сообщения или поглощения энергии текучей среды – аппараты, служащие для целенаправленного преобразования различных видов энергий в энергию текучей среды и наоборот. К АСП следует относить любые устройства и приспособления, служащие для:

1. сообщения энергии текучей среде: а) приведение текучей среды в движение: насосы и компрессоры кинетического и силового действия; б) нагрев текучей среды: различного рода котлы, теплообменники и т.п.;

2. преобразования (поглощения) энергии текучей среды: а) поглощение гидравлической энергии текучей среды: турбины гидроэлектростанций, гидродвигатели, гидроусилители и др.; б) поглощение тепловой энергии текучей среды: радиаторы, конвекторы и т.п.

Автором предлагается наиболее полная классификация аппаратов по сообщению и поглощению энергии текучей среды в работах [2, 3]. Необходимость данной классификации для построения унифицированной модели вытекает из необходимости моделирования аварийных ситуаций, при которых насосы силового и кинетического действия ведут себя принципиально по-разному. Поэтому описание функций замыкающих отношения также различно.

Устройства по управлению потоком текучей среды – устройства, служащие для изменения свойств потока. Этими устройствами являются задвижки, клапаны, распределители потоков, штуцеры, регуляторы расхода и давления и т.п. Устройства по управлению потоком также подразделяются на два типа: устройства, служащие для изменения направления потока (УН) текучей среды (задвижки, клапаны, распределители и т.п.) и устройства для изменения гидравлических параметров потока (УП) текучей среды (штуцеры, регуляторы расхода и давления и т.п.). В работе [3] автором приведена новая классификация УУ, которая также является основой для математического описания моделей УУ.

Каналы связи – сооружения, необходимые для обеспечения направленного движения текучей среды от одного элемента гидросистем к другому.

Четвертая глава посвящена математическому и алгоритмическому описанию моделей гидросистем и их элементов с учетом процессов неизотермического течения сжимаемой жидкости и двусторонней связью между техническими или природными свойствами элементов и их гидравлическими параметрами.

При математическом описании комплексной модели системы ППД, состоящей из некоторого произвольного структурированного множества устройств наземной части и скважин с определенными техническими

показателями, а также с определенной структурой и распределением начальных ФЕС гидросистемы продуктивных пластов, найти следующее.

I. Модель ТГС: массовые – M_i и объемные – q_i расходы текучей среды во всех элементах (звеньях); давления – p_j во всех узлах структуры; перепады давления – Δp_i между точками входа и выхода текучей среды элементов; плотности – ρ_i и динамические вязкости – μ_i во всех элементах; распределение температур по длине во всех элементах; температуры – T_j во всех узлах структуры; величины рассеиваемой на гидравлическое сопротивление и вырабатываемой насосными агрегатами гидравлических мощностей – N_i ; обобщенные гидравлические и энергетические показатели гидросистемы, такие как: целевая и общая гидравлическая мощность, коэффициент полезного действия системы и т.п.

II. Модель ГПП: динамику распределения пластового давления – $P(x, y, z, t)$; динамику распределения массовых нефте- – $n^H(x, y, z, t)$ и водонасыщенностей – $n^B(x, y, z, t)$; динамику распределения открытой пористости $m^{\text{отк}}(x, y, z, t)$; динамику распределения абсолютной проницаемости – $k(x, y, z, t)$; динамику приемистостей/дебитов – $Q_k(t)$ или забойных давлений (в зависимости от выбора граничных условий модели) – $P_z(t)$ нагнетательных и добывающих скважинах.

III. Комплексная модель (ТГС+ГПП): динамику всех количественных показателей, выделенных для обеих моделей.

Модели элементов (объекты – устройства) ТГС будем называть звеньями, а точки их соединения узлами, аналогично терминологии теории графов – ветви и узлы.

Распределение расходов и давлений в модели ТГС, при установившемся движении несжимаемой жидкости описывается, во-первых, линейными соотношениями, аналогичными законам Кирхгофа для электрических цепей, и, во-вторых, нелинейными уравнениями связи между перепадами давления на концах звеньев и расходами в них, которые будем называть замыкающими соотношениями или полными гидравлическими характеристиками звеньев.

Рассматривается ТГС с произвольной структурой, состоящей из m узлов, из которых t узлов являются транзитивными, n звеньев и s путей возможного перемещения текучей среды между активными узлами. Будем считать, что для каждого звена $i \in [j_{ib}, j_{ie}]$ (звена i принадлежащего узлам j_{ib} и j_{ie}), где j_{ib} и j_{ie} его начальный и конечный узлы, задан закон гидравлического воздействия, связывающий перепад давления $\Delta p'_i$ (обусловленный техническими свойствами элемента i) на концах звена и установившийся расход q_i :

$$\Delta p'_i = f_i(q_i). \quad (1)$$

Функции $f_i(q_i)$ характеризуют взаимосвязь перепада давления от расхода обусловленную внутренними параметрами звена i . Вид $f_i(q_i)$ например, зависит от параметров гидравлического сопротивления КС, УУ, производительности АСГ и т.д.

Полный перепад давления на концах звена i будет зависеть от функции $f_i(q_i)$ и гидростатического перепада, при условии нахождения ТГС в поле

гравитации

$$\Delta p_i = \Delta p'_i - \Delta z_i = f_i(q_i) - \Delta z_i, \quad (2)$$

где Δz_i – гидростатический перепад давления $\Delta z_i = \rho g(z_{j_{ib}} - z_{j_{ie}})$, где ρ – плотность текучей среды, g – ускорение свободного падения, $z_{j_{ib}}$ и $z_{j_{ie}}$ – высоты узлов j_{ib} и j_{ie} над уровнем моря. Влияние факторов «гидростатического парадокса» во внимание не принимается.

Однозначность потокораспределения в рассматриваемой модели гидросистем следует из обобщения теоремы Максвелла о принципе наименьшего энергетического воздействия на нелинейные цепи.

Для потокораспределения необходимо описать систему уравнений, связывающих граничные условия и замыкающие отношения относительно неизвестных расходов в звеньях или давлений в узлах. В зависимости от выбора неизвестными тех или других, вытекает два метода в наиболее универсальной постановке, предлагаемых здесь: метод «путевой увязки» и метод «узловой увязки»

Согласно методу «**путевой увязки**» для любого потокораспределения должны выполняться следующие условия. Во-первых, в каждом транзитивном (соединенным с более, чем одним звеном) узле j должен соблюдаться материальный баланс, отвечающий принципу неразрывности (сплошности) потока текучей среды:

$$\sum_{i \in j} q_i = 0, j = 1, 2, \dots, t, \quad (3)$$

где слева стоит алгебраическая сумма расходов по всем звеньям, имеющим общий (независимо от того, конечный это или начальный) транзитивный узел j . Причем, если звено входит в узел, то знак перед q_i берется положительным, а если выходит – отрицательным. Для активных узлов уравнения материального баланса не записываются.

Во-вторых, сумма перепадов давления $\Delta p'_i$ на концах звеньев, входящих в путь r , должна быть равна сумме гидростатических перепадов давления на концах звеньев, входящих в этот путь и перепадов давления между узлом начала пути и узлом конца пути. Ими являются активные узлы, символизирующие НТС, давление в которых задано на момент расчета. Для пути r можно записать:

$$\sum_r \Delta p'_i = \sum_r f_i(q_i) = P_{rb} - P_{re} + \sum_r \Delta z_i, \quad (4)$$

где слева стоит алгебраическая сумма перепадов давления (обусловленных техническими свойствами объектов) на концах звеньев, входящих в путь r ; справа – разность давлений в активных узлах, образующих путь (P_{rb} – давление в узле начала обхода пути, P_{re} – давление в узле конца обхода) и сумма гидростатических перепадов давления на концах звеньев, входящих в путь.

Направление «обхода» пути задается выбором одного из пары активных узлов начальным, а другого конечным. Т.е. как и в звеньях, но уже для цепочки от одного НТС до другого. Поскольку активные узлы отражают элемент НТС, то согласно первому свойству НТС, значения P_{rb} и P_{re} , характеризующие стабилизированный потенциал текучей среды, должны быть заданы на текущий

момент времени (давления в точках возможного притока/оттока – в реках, озерах, емкостях, пластах и т.д.).

Текущее состояние притока/оттока среды в активных узлах определяется в результате решения задачи потокораспределения.

Введем вектор \bar{Q} расходов, вектор перепадов давлений \bar{Y}' , обусловленных внутренними свойствами элементов, вектор полных перепадов давлений \bar{Y} , вектор \bar{P} давлений во всех узлах модели и вектор \bar{Z} гидростатических перепадов давлений на концах всех звеньев:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_i \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}; \quad \bar{Y}' = \begin{bmatrix} y_1' \\ y_2' \\ y_i' \\ \vdots \\ y_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta p_1' \\ \Delta p_2' \\ \Delta p_i' \\ \vdots \\ \Delta p_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(q) \\ f_2(q) \\ f_i(q_i) \\ \vdots \\ f_n(q_n) \end{bmatrix}; \quad \bar{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_j \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix},$$

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_i \\ \vdots \\ \Delta z_n \end{bmatrix}; \quad \bar{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_i \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \Delta p_i \\ \vdots \\ \Delta p_n \end{bmatrix} = \bar{Y}' - \bar{Z} = \begin{bmatrix} \Delta p_1' \\ \Delta p_2' \\ \Delta p_i' \\ \vdots \\ \Delta p_n' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_i \\ \vdots \\ \Delta z_n \end{bmatrix},$$

где i – номер звена; n – количество звеньев в структурной схеме; j – номер узла; m – количество узлов в структурной схеме ТГС.

Введем известную в ТГЦ и теории графов матрицу A соединений m узлов и n звеньев, однозначно описывающую структуру системы, безотносительно к конкретным параметрам звеньев и геометрическим координатам узлов. В данной матрице на пересечении строки j , отвечающей узлу j , и столбца i , соответствующего звену i , помещается элемент:

$$a_{ji} = \begin{cases} 0, & \text{если звено } i \text{ не соединено с узлом } j; \\ -1, & \text{если звено } i \text{ исходит из узла } j; \\ +1, & \text{если узел } i \text{ является для звена } i. \end{cases}$$

Размерность полной матрицы будет $m \times n$;

Введем матрицу путей B , где на пересечении столбца i , соответствующего звену i и строки r , соответствующей пути r , помещается элемент:

$$b_{ri} = \begin{cases} 0, & \text{если звено } i \text{ не существует в пути } r; \\ +1, & \text{если звено } i \text{ входит в путь } r \text{ и} \\ & \text{ориентировано согласно обходу этого пути;} \\ -1, & \text{если звено } i \text{ входит в путь } r \text{ и} \\ & \text{ориентировано против обхода этого пути.} \end{cases}$$

Система уравнений в общем матричном виде.

$$\begin{cases} A \cdot \bar{Q} = 0 \\ B \cdot \bar{Y}' = \bar{E} + \bar{U} \end{cases} \quad (5)$$

Здесь вектор \bar{E} , составлен из разностей давлений $P_{rb} - P_{re}$ между активными узлами соответствующего пути r , а вектор \bar{U} из гидростатических перепадов между этими активными узлами.

Принципиально, что из матрицы A исключаются строки, соответствующие

активным узлам, что необходимо для обеспечения энергетического баланса гидравлических энергий: разность суммы гидравлических энергий в единицу времени, поступающих в активные узлы извне, и суммы гидравлических энергий в единицу времени, исходящих из активных узлов в рассматриваемой гидросистеме, должна равняться сумме гидравлических мощностей N_s звеньев

гидросистемы $N_s = \sum_{i=1}^n \Delta p_i q_i = \sum_{i=1}^n f_i(q_i) q_i - \Delta z_i q_i$. Иначе это выглядит так

$$s(\bar{Q}) = A\bar{Q} = \left\{ s_j(\bar{Q}) = \sum_j q_i = a_j^r q \right\},$$

$$j = 1, 2, \dots, t$$

$$v(\bar{Q}) = B\bar{Y}^r - \bar{E} - \bar{U} = \left\{ \begin{aligned} v_r(\bar{Q}) &= \sum_r f_i(q_i) - e_r - u_r = \\ \sum_r b_r^r f_i(q_i) - e_r - u_r \end{aligned} \right\},$$

$$r = 1, 2, \dots, c,$$

где \sum_j и \sum_r означают суммирование по всем звеньям i , инцидентным соответственно транзитивному узлу j или пути r ; a_j^r и b_r^r – строки j и r соответственно матриц A и B .

Таким образом, имеем неоднородную систему нелинейных уравнений относительно неизвестных установившихся расходов – \bar{Q} . Единственным недостатком исходной системы уравнений (5) является необходимость поиска системы из c линейно-независимых путей. Решение системы (5) осуществляется численным методом Ньютона при нулевом начальном приближении с коррекцией приращений для определения частных производных замыкающих отношений (1) в конечном виде.

Метод «узловой увязки» потокораспределения. Наиболее часто используемым при моделировании гидросистем является метод «поузловой увязки» удобный тем, что для записи системы уравнений нет необходимости в анализе структуры, т.е. поиска системы линейно-независимых контуров для классической теории или путей для предлагаемой формы представления сетей.

Здесь предлагается новая форма записи системы уравнений и метод ее решения. Так как давления в активных узлах заданы, а приток и отток гидросистемы определяется в процессе решения, система уравнений записывается относительно неизвестных давлений в транзитивных узлах. Основным отличием предлагаемого метода и его математического описания является использование произвольных замыкающих отношений $f(q)$, описанных в табулированном виде или полученных в результате решения уравнений моделей элементов, вместо аппроксимирующих зависимостей, которые хотя и удобны в использовании, но являются весьма неточными.

Основой для системы уравнений является материальный баланс в транзитивных узлах, выраженный через зависимости $q_i = S_i(\Delta p_i)$ расхода в звене i от перепада давления на его концах. Функция $S(\Delta p)$ является обратной функции $f(q)$, т.е. для ее определения в произвольной точке $-\Delta p_0$ необходимо в общем

случае решить нелинейное уравнение $f(q) - \Delta p_0 = 0$ относительно неизвестного расхода q .

Необходимость в численном решении, обусловлена тем, что алгебраически отразить обратную зависимость невозможно хотя бы потому, что зачастую замыкающие отношения – $f(q)$ задаются «кусочно» для различных режимов течения. В описываемом методе подразумевается максимально точное нахождение обратных зависимостей.

Выразив неизвестные расходы в (3) через функции $q_i = S_i(\Delta p_i)$ и заменив $\Delta p_i = p_{j_{ib}} - p_{j_{ie}}$, получим уравнения для t транзитивных узлов, где в каждом уравнении суммируются $S_i(\Delta p_i)$ для звеньев, соединенных (смежных) с транзитивным узлом j .

$$\sum_{i \in j} S_i(p_{j_{ib}} - p_{j_{ie}}) = 0, j = 1, 2, \dots, t, \quad (6)$$

Причем, давления в транзитивных узлах является неизвестными, а давления в активных узлах константами или функциями от времени, которые рассчитываются через модель ГПП.

Для отражения влияния гидростатических перепадов в (6) необходимо добавить компоненты вектора \bar{Z} :

$$\sum_{i \in j} S_i(p_{j_{ib}} - p_{j_{ie}} + \Delta z_i) = 0, j = 1, 2, \dots, t.$$

После приведения (6) к более удобному для решения виду окончательно получим однородную систему нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) относительно неизвестных давлений в транзитивных узлах:

$$\begin{cases} F_1(p_1, p_2, \dots, p_j, p_m) = 0 \\ F_2(p_1, p_2, \dots, p_j, p_m) = 0 \\ \vdots \\ F_j(p_1, p_2, \dots, p_j, p_m) = 0 \\ \vdots \\ F_t(p_1, p_2, \dots, p_j, p_m) = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где $F_j(p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_m)$ функция зависимости суммы массовых или объемных расходов потоков, сходящихся в транзитивном узле j от давлений в смежных с ним узлах (в том числе и активных).

Данный подход к формированию системы уравнений, как и в классическом методе «поузловой увязки», является более универсальным, так как не требует предварительного анализа структуры, однако, многократное вхождение в систему уравнений обратных исходным нелинейным замыкающим отношениям порождает проблемы устойчивости и точности ее численного решения.

Для описания условий сжимаемости текучей среды необходимо функционально определить зависимость физических свойств среды, влияющих на распределение потоков от давления. Для учета факторов неизотермического течения воды систем ППД автором получены эмпирические зависимости

$$\rho(p, T) = 1000.26 - 0.009T^{1.837 - 0.0002135p} + 0.4306p, \quad (8)$$

$$\nu(p, T) = 0.1846 + \frac{1.5778}{e^{0.03131 \cdot T}} - p \frac{0.00138}{T^{0.238}}, \quad (9)$$

где p – безразмерное давление равновеликое абсолютному, 1 д.е.=1 МПа; T – температура равновеликая абсолютной, 1 д.е.= 1 °С; ρ – плотность, кг/м³; ν – кинематическая вязкость, мм²/с. Эмпирические константы берутся с соответствующей размерностью.

В модели течения сжимаемых сред необходимы другие замыкающие отношения – функции $S'_i(p_{jib}, p_{jie}, z_{jib}, z_{jie})$, связывающие массовый расход M_i , давления и отметки высот концов звеньев. Подставив данные функции в (6) получим систему из уравнений вида

$$\sum_{i \in j} a_{ji} S'_i(p_{jib}, p_{jie}, z_{jib}, z_{jie}) = 0, \quad (10)$$

где z_{jib} , z_{jie} – абсолютные отметки положения узлов начала и конца звена i относительно отсчетной плоскости.

Задавшись вектором абсолютных отметок всех узлов –

$$\bar{V} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_i \\ \dots \\ z_m \end{pmatrix},$$

в матрично-векторном представлении (10) будет

$$A \cdot \bar{S}'(\bar{P}, \bar{V}) = 0. \quad (11)$$

Для нахождения зависимостей $S'_i(p_{jib}, p_{jie}, z_{jib}, z_{jie})$ при формировании модели каждого звена необходимо численно решить уравнение, связывающее массовый расход в звене i с давлениями на его концах. Разделим звено i на N частей. Будем нумеровать каждый участок звена индексом k , начиная от узла начала (рис. 1).

На каждом малом участке звена – $\Delta l = \frac{l}{N}$ будем полагать величины плотности и кинематической вязкости постоянными, т.е. независимыми от изменения давления в пределах участка. Рассматривая функцию зависимости перепада давления на участке Δl звена i от массового расхода в звене M_i , плотности ρ и кинематической вязкости ν на этом участке в виде функции $f_i(M_i, \rho, \nu, \Delta l)$, получим следующее соотношение

$$w_i(M_i) = \sum_{k=1}^N f_i(M_i, \rho_k, \nu_k, \Delta l, \Delta z_k) = p_0 - p_N = p_{jib} - p_{jie}, \quad (12)$$

где $M_i = q_{i_k} \rho_k$ – массовый расход в звене равный произведению объемного расхода на участке k на плотность; $\rho_k = \rho(\bar{p}_k)$ – средняя плотность на участке k ; $\nu_k = \nu(\bar{p}_k)$ – средняя кинематическая вязкость на участке k ;

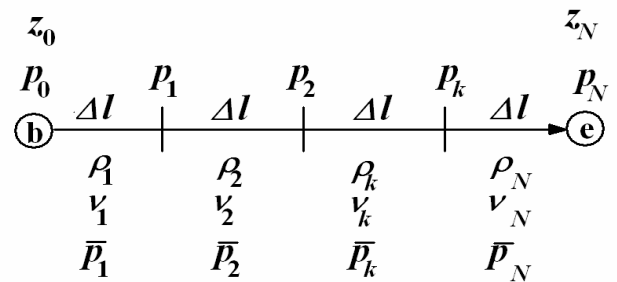


Рис. 1. Схема расчета для условий сжимаемости текучей среды

$$\Delta z_k = \frac{z_0 - z_N}{N} \rho_k g = \Delta l \frac{z_0 - z_N}{l} \rho_k g \text{ – гидростатический перепад давления на участке } k.$$

Здесь $\bar{p}_k = \frac{p_k + p_{k-1}}{2}$ – среднее давление на участке k . Давления к началу

следующего участка определяются последовательно, на основании замыкающих отношений (1) для несжимаемой ТС:

$$p_k = p_{k-1} - f_i(q_{i_k}, \rho_k, v_k, \Delta l) + \Delta z_k.$$

При решении (12) в момент нахождения входящих в (10–11) $S'_i(p_{j_{ib}}, p_{j_{ie}}, z_{j_{ib}}, z_{j_{ie}})$ величины p_0, z_0 и p_N, z_N являются константами, однозначно определяющими вид зависимости от M_i слева. Таким образом, функцию $w_i(M_i)$ посредством численного решения можно обратить, т.е. решить относительно неизвестных давлений в виде функции $M_i = S'_i(p_{j_{ib}}, p_{j_{ie}}, z_{j_{ib}}, z_{j_{ie}})$.

Порядок расчета $w_i(M_i)$ зависит от соотношения направления потока и ориентации звена. Так, при противоположной ориентации звена потоку, последовательность расчета p_k следует начинать с узла – конца звена, так как причинно-следственная связь прослеживается согласно направлению потока. Вследствие этого вид функций $S'_i(p_{j_{ib}}, p_{j_{ie}}, z_{j_{ib}}, z_{j_{ie}})$ будет несколько изменяться в ходе численного решения (10–11).

Для систем ППД учет теплообмена с внешней средой и внутри потока важен, вследствие необходимости учета изменения свойств текучей среды и выявления возможных фактов замерзания участков ТГС.

Допустим, что для каждого звена i известно распределение температуры окружающей среды по длине звена l , описываемое функциональной зависимостью $H_i(l)$. Такие зависимости могут быть представлены в произвольном виде: алгебраически, табулированного множества $[H_k, l_k]$, в виде констант, интерполяционной зависимостью эмпирических данных и т.д. Предполагается, что теплопередача между текучей средой в звене и окружающей это звено средой происходит под действием перепада температуры потока и окружающей среды и может быть описана для каждого участка Δl звена, исходя из его морфологических свойств (например, площади поверхности контакта сред – ψ), свойств материала (например, коэффициент теплопередачи – γ), свойств текучей среды и перепада температуры между потоком и окружающей средой – Δt в виде функций $G_i(M_i, \Delta l, \gamma, \psi, \Delta t)$.

Также предполагается, что нагрев потока обусловлен переходом части гидравлической энергии потока в тепловую («термогидравлический» переход) вследствие гидравлического сопротивления, а также, вследствие кинетического воздействия активных элементов насосов на поток. Для звеньев – элементов КС и УУ, термогидравлический переход энергии будет описываться, исходя из потерь гидравлической энергии в звене i на участке Δl для несжимаемой жидкости в единицу времени, как

$$g_i(M_i, \Delta l) = f_i\left(\frac{M_i}{\rho}, \Delta l\right) \frac{M_i}{\rho}, \text{ Вт.}$$

Для участка k длиной Δl звена i изменение температуры будет складываться из двух составляющих: рост температуры вследствие гидротермического перехода $\Delta T_{i_k}^{(g,\Delta l)}$ и рост или падение температуры вследствие передачи тепла между потоком и окружающей средой $\Delta T_{i_k}^{(m,\Delta l)}$.

$$\begin{aligned}\Delta T_{i_k}^{(g,\Delta l)} &= \frac{g_i(M_i, \Delta l)}{M_i C_v} = \frac{[1 - \Omega(\omega)] f_i \left(\frac{M_i}{\rho}, \Delta l \right) \frac{M_i}{\rho}}{M_i C_v} = \\ &= \frac{[1 - \Omega(\omega)] f_i \left(\frac{M_i}{\rho}, \Delta l \right)}{\rho C_v},\end{aligned}$$

где C_v – удельная теплоемкость текучей среды, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Изменение температуры вследствие теплопередачи с окружающей средой на участке k длиной Δl звена i – $\Delta T_{i_k}^{(m,\Delta l)} = \frac{G_i [M_i, \Delta l, \gamma, \psi, \Delta t_k]}{M_i C_v}$, где $\Delta t_k = T_k - H_i(l_k)$ –

разность температур потока и окружающей среды в звене i на участке k . Таким образом, для нахождения температуры потока на участке k звена i , необходимо суммировать все приращения температуры на участках s от 1 до k :

$T_{i_k} = T_{i_{jb}} + \sum_{c=1}^k (\Delta T_{i_c}^{(g,\Delta l)} + \Delta T_{i_c}^{(m,\Delta l)})$, причем, если полагать постоянство вязкости и

плотности на участке, то величина $\Delta T_{i_k}^{(g,\Delta l)}$ по звену изменяться не будет. Здесь $T_{i_{jb}}$ – температура в узле (он может быть начальным или конечным для звена), в котором поток входит в звено. Для определения температуры на выходе из звена:

$$T_{i_{je}} = T_{i_{jb}} + \sum_{k=1}^N (\Delta T_{i_k}^{(g,\Delta l)} + \Delta T_{i_k}^{(m,\Delta l)}).$$

Для трубопроводов без учета гидротермического перехода в зависимости от температуры потока предыдущего участка k

$$T_{i_{k+1}} = T_M + (T_{i_k} - T_M) e^{\frac{-\psi \cdot \gamma \cdot \Delta l}{M_i C_v}},$$

где T_M – температура окружающей среды звена i на участке k ; γ – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $\psi = \pi \cdot \Delta l \cdot d_2$ – поверхность контакта потока и внешней среды для труб круглого сечения, м^2 .

Таким образом, после замены T_M на $H_i(\Delta l \cdot k)$, окончательно получим формулу для определения температуры потока в звене – круглом трубопроводе для несжимаемой жидкости на участке k относительно участка $k-1$:

$$\begin{aligned}T_{i_k} &= H_i(\Delta l \cdot k) + [T_{i_{k-1}} - H_i(\Delta l \cdot k)] e^{\frac{-\Delta l \cdot \pi \cdot \gamma \cdot d_2}{M_i C_v}} + \\ &+ \frac{[1 - \Omega(\omega)] f_i \left(\frac{M_i}{\rho}, \Delta l \right) k}{\rho C_v N},\end{aligned}$$

где $\Omega(\omega)$ – функция, описывающая долю рассеиваемой части гидравлической энергии, которая не переходит в тепловую, в зависимости от скорости потока ω .

Для расчета комплексного потокораспределения при неизотермическом течении сжимаемой или несжимаемой жидкости необходимо совместить потоко- и теплораспределение в системе. Для этого описанные выше зависимости для каждого звена i интегрируются в функции $\Delta T_i = \theta_i(M_i, T_{j_0})$, описывающие перепад температуры ΔT_i потока между температурой на входе – T_{j_0} и выходе из звена. Например, для трубопровода этой функцией будет

$$\theta_i(M_i, T_{j_0}) = \sum_{k=1}^N \left\{ \begin{aligned} & H_i(\Delta l \cdot k) + [T_{i_{k-1}} - H_i(\Delta l \cdot k)] e^{\frac{-\Delta l \cdot \pi \cdot \gamma \cdot d_2}{M_i C_v}} + \\ & + \frac{1}{M_i C_v} \left[1 - \Omega\left(\frac{q_{i_k}}{\psi}\right) \right] \Delta p_{i_k} q_{i_k} \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Причем здесь при $k=0$: $T_{i_0} = T_{j_0}$, т.е. температура на входе в звено.

Рассмотрим задачу термораспределения при некотором текущем потокораспределении. Допустим, после решения (11) имеем распределение давлений \bar{P} и массовых расходов \bar{M} для всех узлов и звеньев модели. Также заданы граничные условия термораспределения: температуры в активных узлах, в которых происходит приток (при данном потокораспределении) в гидросистему. На основании зависимостей (13) для каждого звена i возможно рассчитать распределение температуры во всей системе.

Вводятся функция температуры $\tau_j(T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_m)$, определяющие на основании (13) всех звеньев, зависимость температуры в узле j от температуры во всех окрестных узлах.

$$\tau_j(T_{k1 \in j}, T_{k2 \in j}, \dots, T_{kn \in j}) = \frac{\sum_{k \in j}^n |M_{iek}| \cdot [T_k + \theta_{iek}(M_{iek}, T_k)]}{\sum_{k \in j}^n M_{iek}}, \quad (14)$$

где $k \in j$ – индексы узлов инцидентных узлу j , из которых в узел j есть приток; $i \in k$ – индексы звеньев соединяющих узлы k и узел j ; n – количество узлов инцидентных узлу j , из которых в узел j есть приток. Причем задающими температуру в узле j считаются узлы, смежные с ним, из которых в узел j имеет место приток.

Для нахождения температур T_j в узлах имеем СНАУ

$$\left\{ \begin{aligned} & \vdots \\ & \tau_j(T_{k1 \in j}, T_{k2 \in j}, \dots, T_{kn \in j}) = \frac{\sum_{k \in j}^n |M_{iek}| \cdot [T_k + \theta_{iek}(M_{iek}, T_k)] + x_j \varepsilon_j}{\sum_{k \in j}^n M_{iek} + x_j} \\ & \vdots \\ & \tau_m(T_{k1 \in m}, T_{k2 \in m}, \dots, T_{kn \in m}) = \frac{\sum_{k \in m}^n |M_{iek}| \cdot [T_k + \theta_{iek}(M_{iek}, T_k)] + x_m \varepsilon_m}{\sum_{k \in m}^n M_{iek} + x_m} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Система (15) решается методом простой итерации. На рис. 2 показаны зависимости распределения температуры по длине звена от массового расхода при $H(l)=\text{const}=5$ °С. Как видно из графиков, учет термогидравлического перехода вносит существенные уточнения модели течения: по мере увеличения M_i проявление термогидравлического перехода увеличивается, а проявление передачи тепла во внешнюю среду падает. Причем существует такое распределение температур, что охлаждение потока со стороны внешней среды будет полностью компенсироваться нагревом потока вследствие гидравлического трения. Для нашего примера при M_i от 500 до 1000 т/сут.

Для использования комплексной модели системы ППД необходимо объединение граничных условий модели ТГС (МТГС) и модели ГПП. С этой целью для МТГС удобно в наиболее простой схеме рассматривать давление в активных узлах в виде зависимости от времени – $P(t)$, которая будет обуславливаться моделью ГПП, а для модели ГПП в качестве граничного условия удобно задать зависимость $Q(t)$ приемистости от времени для каждого звена – скважины.

Необходимо также учитывать динамику проводимостей или замыкающих отношений $f(q)$ для призабойных зон пласта (ПЗП) нагнетательных скважин. Следует полагать, что проницаемость ПЗП также должна описываться зависимостью $k(t)$, которая будет рассчитываться в модели ГПП на каждом шаге времени. При пересчете комплексного потокораспределения – $KПР$ во времени будем иметь динамику термогидравлического состояния ТГС в виде комплексных функции $KПР(t)$, зависящих, как от внутренних свойств ТГС так и от состояния ГПП.

В данной главе, помимо математического описания основной системы уравнений для каждого типа модели, приводятся модифицированные автором методы и алгоритмы численного решения данных систем.

Решение системы (5) сводится к последовательному определению приращений Δq_i ко всем неизвестным расходам q_i вектора \bar{Q} на каждом итерационном шаге. Очередное приближение к корню системы определяется следующим образом: $q_i^{(I+1)} = q_i^{(I)} + \Delta q_i^{(I+1)}$, где I – номер итерации.

В отличие от классического метода Ньютона для СНАУ, сходимость которого обусловлена выбором начального приближения неизвестных $q_i^{(0)}$, в

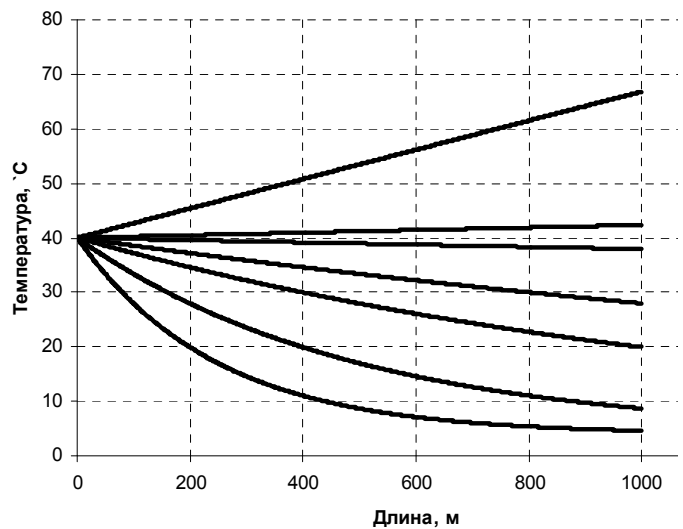


Рис. 2. Зависимость распределения температуры по длине трубопровода от массового расхода жидкости: снизу – вверх 10, 20, 50, 100, 500, 1100, 3000 т/сут

предлагаемом методе «путевой» и «узловой» увязки выбирается нулевое начальное приближение – $q_i^{(0)} = 0$, $p_j^{(0)} = 0$.

На каждом итерационном шаге для определения текущих приращений Δq_i неизвестных расходов составляется система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) таким образом, что первая часть (3) входила в СЛАУ также как и в исходную систему, а вторая часть (4) в виде частных производных замыкающих отношений $\frac{\partial f_i(q_i^{(l)})}{\partial q_i^{(l)}}$. Таким образом, на каждом шаге – l решается СЛАУ

$J \cdot \overline{\Delta Q} = W$, где J – неполный Якобиан $n \times n$, в котором первые t строк заполняются из t строк матрицы A , а следующие s строк есть произведение вектора производных замыкающих отношений всех звеньев на матрицу B ; W – вектор правых частей СЛАУ размерностью n . В развернутом виде части данной СЛАУ выглядят следующим образом для узла j и пути r

$$\begin{cases} \sum_{i \in j} \Delta q_i^{(l+1)} A_{ji} = \sum_{i \in j} q_i^{(l)} A_{ji} \\ \sum_{i \in r} \frac{\partial f_i(q_i^{(l)})}{\partial q_i} \Delta q_i^{(l+1)} = -\sum_{i \in r} f_i(q_i^{(l)}) + E_r + U_r \end{cases} \quad (16)$$

Классическая схема проверки точности в итерационном процессе Ньютона для случая (16) не подходит из-за того, что текущее приближение $q^{(l)}$ для некоторых звеньев может «западать» в районе ближайшего к корню экстремума. При этом величины текущих приращений могут быть достаточно малыми для выполнения условия точности и, следовательно, решение может казаться достигнутым,

Предлагается проводить оценку истинной погрешности и условия соблюдения точности для первой части системы (5) в виде $\gamma_j^{(l)} = \left| \sum_{i \in j} q_i^{(l)} \right| < absQ$.

Для второй части, если $E_r + U_r \neq 0$, то

$$\varphi_r^{(l)} = \frac{\left| \sum_{i \in r} f_i(q_i^{(l)}) - (E_r + U_r) \right|}{|E_r + U_r|} < \alpha,$$

а если $E_r + U_r = 0$, то

$$\varphi_r^{(l)} = \left| \sum_{i \in r} f_i(q_i^{(l)}) - (E_r + U_r) \right| < absP.$$

Здесь $absQ$, $absP$ – величины расходов и давлений, принимаемые в качестве допущения, как ноль. Такой способ вычисления текущей погрешности заведомо исключает возникающие ранее «сбои», однако потребует дополнительных ресурсов ЭВМ, так как возникает необходимость постоянного пересчета функций $f_i(q)$.

Еще одним важным моментом адаптации метода Ньютона к поставленной задаче является способ вычисления частных производных функций, входящих во вторую часть СЛАУ (5), т.е. вычисления выражений

$$\frac{\partial f_i(q_i^{(l)})}{\partial q_i} \approx \frac{f_i(q_i^{(l)} + h_i) - f_i(q_i^{(l)})}{h_i},$$

где h_i – величина смещения по оси расходов звена i .

В работе предлагается «алгоритм динамического подбора смещения» h_i суть, которого сводится к анализу истории сходимости итерационного процесса и выбору оптимальных величин h_i (рис.3).

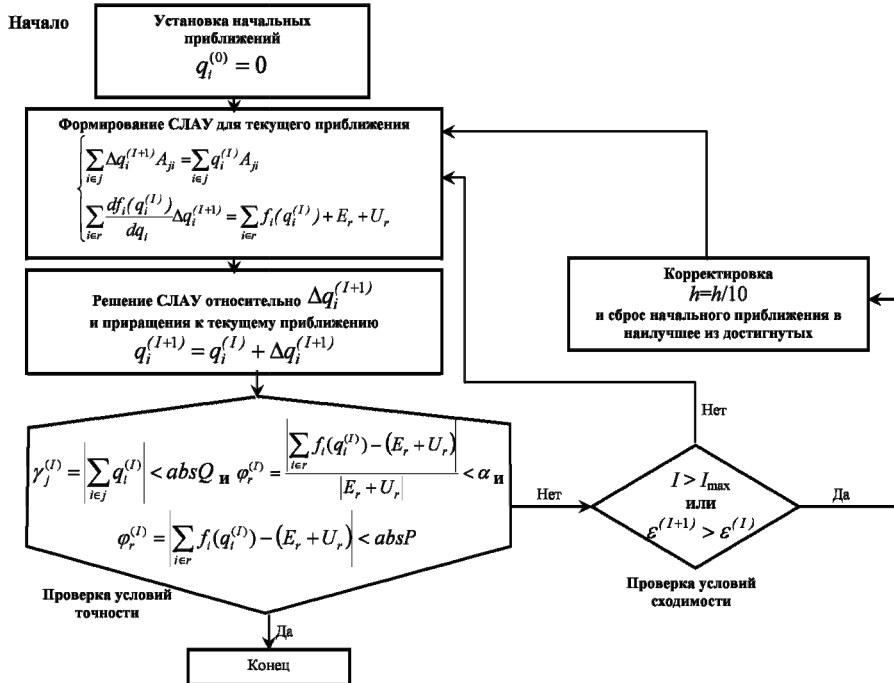


Рис. 3. Схема алгоритма численного решения потокораспределения методом «путевой увязки» (АПУН)

Предлагаемый метод численного решения системы (11) строится посредством линеаризации функций F_j из (7) на каждом шаге. На каждом шаге строится матрица Якобиан которая в системе СЛАУ умножается на вектор текущих приращений $\Delta p_j^{(l)}$ и приравнивается вектору текущих значений функций F_j

$$\begin{cases} \vdots \\ \frac{\partial F_j(p_1^{(l)}, p_2^{(l)}, \dots, p_j^{(l)}, p_m^{(l)})}{\partial p_1} \Delta p_1^{(l+1)} + \dots + \frac{\partial F_j(p_1^{(l)}, p_2^{(l)}, \dots, p_j^{(l)}, p_m^{(l)})}{\partial p_j} \Delta p_j^{(l+1)} + \dots + \\ + \frac{\partial F_j(p_1^{(l)}, p_2^{(l)}, \dots, p_j^{(l)}, p_m^{(l)})}{\partial p_i} \Delta p_i^{(l+1)} = F_j(p_1^{(l)}, p_2^{(l)}, \dots, p_j^{(l)}, p_m^{(l)}) \\ \vdots \end{cases} \quad (17)$$

Величины давлений в активных узлах являются константами на всех итерациях. Способ нахождения частных производных фактически полностью определяет скорость и качество сходимости метода. При реализации метода Ньютона СНАУ частные производные могут определяться в конечно-разностном виде

$$\frac{\partial F_j(p_1^{(l)}, p_2^{(l)}, \dots, p_j^{(l)}, p_m^{(l)})}{\partial p_j} \approx \frac{F_j(p_1^{(l)}, p_2^{(l)}, \dots, p_j^{(l)} + h_j^{(l)}, p_m^{(l)}) - F_j(p_1^{(l)}, p_2^{(l)}, \dots, p_j^{(l)}, p_m^{(l)})}{h_j^{(l)}},$$

однако это, в отличие от метода «путевой увязки», далеко не всегда приводит к инвариантной сходимости по причине особого вида функций (7) (рис. 4), который зачастую ведет к потере сходимости в окрестности корня. В работе предлагается модификация метода Ньютона, заключающаяся в специфической линеаризации

замыкающих отношений (1).

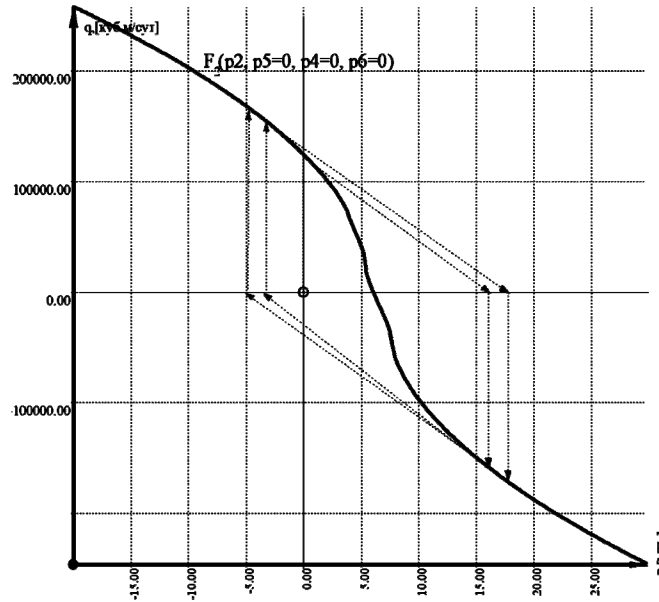


Рис. 4. Пример замыкающего отношения из СНАУ(7)

Вместо функций $f_i(q_i)$ на каждой итерации I используется их линейное преобразование $f_i^L(q_i^{(I)})$:

$$f_i^L(q_i^{(I)}) = \frac{f_i(q_i^{(I)} + H^{(I)}) - f_i(q_i^{(I)} - H^{(I)})}{2H^{(I)}} q_i^{(I)} + f_i(0),$$

или для условия течения сжимаемой среды

$$f_i^L(M_i^{(I)}) = \frac{f_i(M_i^{(I)} + H^{(I)}) - f_i(M_i^{(I)} - H^{(I)})}{2H^{(I)}} M_i^{(I)} + f_i(0).$$

Причем $H^{(I+1)} = H^{(I)} / D$, где D – параметр (рычаг) сходимости, который чем больше, тем меньше скорость сходимости, но больше стабильность. Оптимальными значениями D с точки зрения автора, является $D \in [1.5, 3]$.

Таким образом, замыкающие отношения, будучи линеаризованными, используются на следующих этапах вычислений текущей итерации.

Применение такого рода линеаризации позволяет избежать постоянного решения (на каждой итерации) нелинейных уравнений $f(q) - \Delta p = 0$ для нахождения функций $q = S(\Delta p)$, они будут описываться линейным соотношением

$$S_i^{(I)}(\Delta p_i) = \frac{\Delta p_i - f_i(0)}{1} \frac{2H^{(I)}}{f_i(q_i^{(I)} + H^{(I)}) - f_i(q_i^{(I)} - H^{(I)})},$$

или для условия течения сжимаемой ТС

$$S_i^{(I)}(\Delta p_i) = \frac{\Delta p_i - f_i(0)}{1} \frac{2H^{(I)}}{f_i(M_i^{(I)} + H^{(I)}) - f_i(M_i^{(I)} - H^{(I)})}$$

Такого рода прием относится и к нахождению функций $S'_i(p_{jib}, p_{jie}, z_{jib}, z_{jie})$, вычисление которых основано на расчетах $f_i(q)$, и, следовательно, подразумевает замену. Начальное приближение данного метода принимается нулевым, т.е. $p_j^{(0)} = 0$. Предлагаемый метод сочетает в себе высокую скорость сходимости метода Ньютона и высокую надежность сходимости при нулевом начальном

приближении, метода «бисекций» с исключением требования к охвату области корня величиной $H^{(l)}$. На рис. 5 представлен алгоритм данного метода.

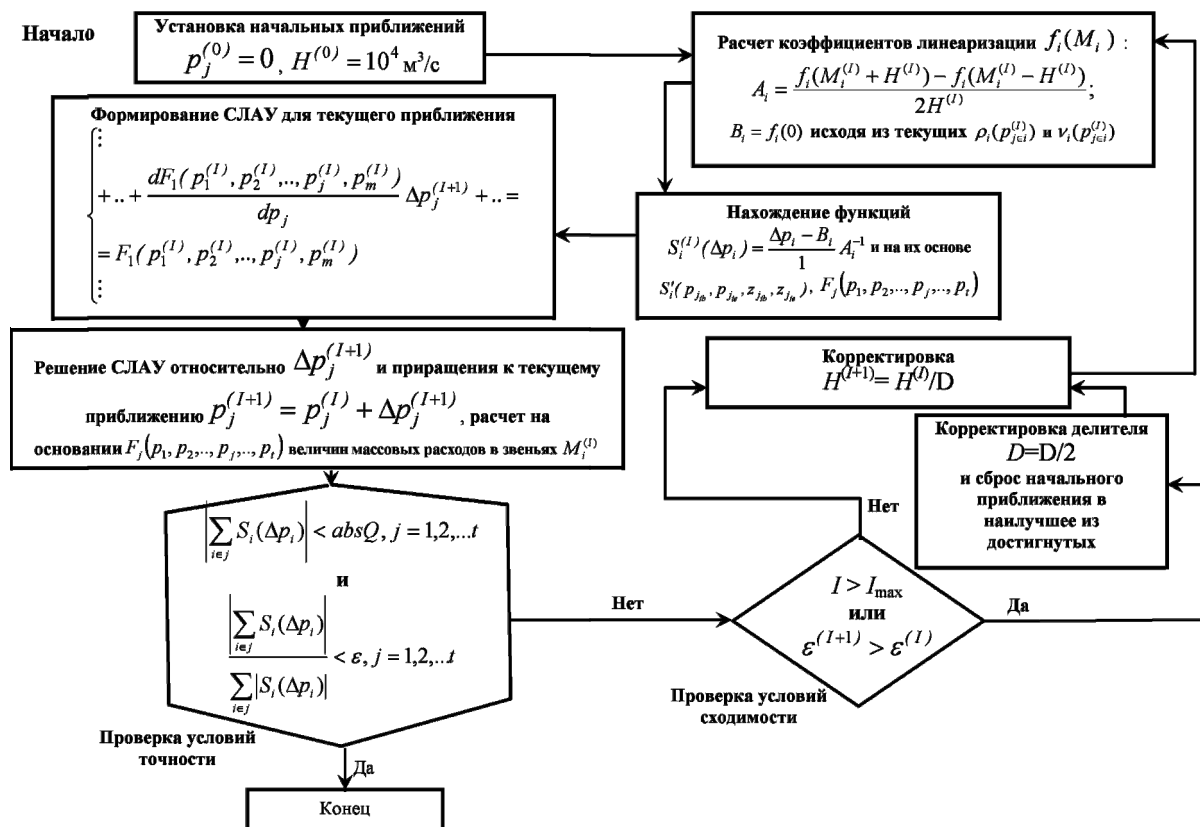


Рис. 5. Схема алгоритма адаптивной линейризации для метода «узловой увязки» условия течения сжимаемой ТС (АЛУС)

Расчет комплексного потокораспределения неизотермического течения сводится к последовательным потокораспределениям в виде решения (5) алгоритмом «АПУН» или (11) алгоритмом «АЛУС» при заданном текущем приближении термораспределения. Расчет потокораспределения повторяется до тех пор, пока не выполнится условие точности: соответствие потокораспределения и термораспределения с условиями распределения свойств жидкости во всех звеньях модели, зависящих от температуры и давления – $\rho(p, T)$ и $v(p, T)$ (см. рис. 6).

В работе также рассматриваются алгоритмы динамической модели, учитывающей потоко- и термораспределение в динамике, обусловленной моделью ГПП.

В четвертой главе достаточно подробно рассмотрены новые и модифицированные математические модели основных элементов, составляющих модуль технической гидросистемы: модели насосных агрегатов, учитывающие аварийные режимы; модели трубопроводов; модели скважин с различными схемами притока/оттока и оборудованием.

В частности для трубопроводов автором предлагается использовать формулу для расчета коэффициента сопротивления – λ для закона Дарси-Вейсбаха, описывающую три режима течения

$$\lambda = \frac{64}{Re} + 0.11 \left(A \cdot \bar{\Delta} + \frac{68}{Re} \right)^{0.38} + 0.0047,$$

где $A = \frac{0.002}{\bar{\Delta}} - \frac{0.261}{\bar{\Delta}^{0.5}} + \frac{2.0}{\bar{\Delta}^{0.25}} - \frac{112 \cdot 10^{-8}}{\bar{\Delta}}$; $\bar{\Delta}$ – относительная шероховатость.

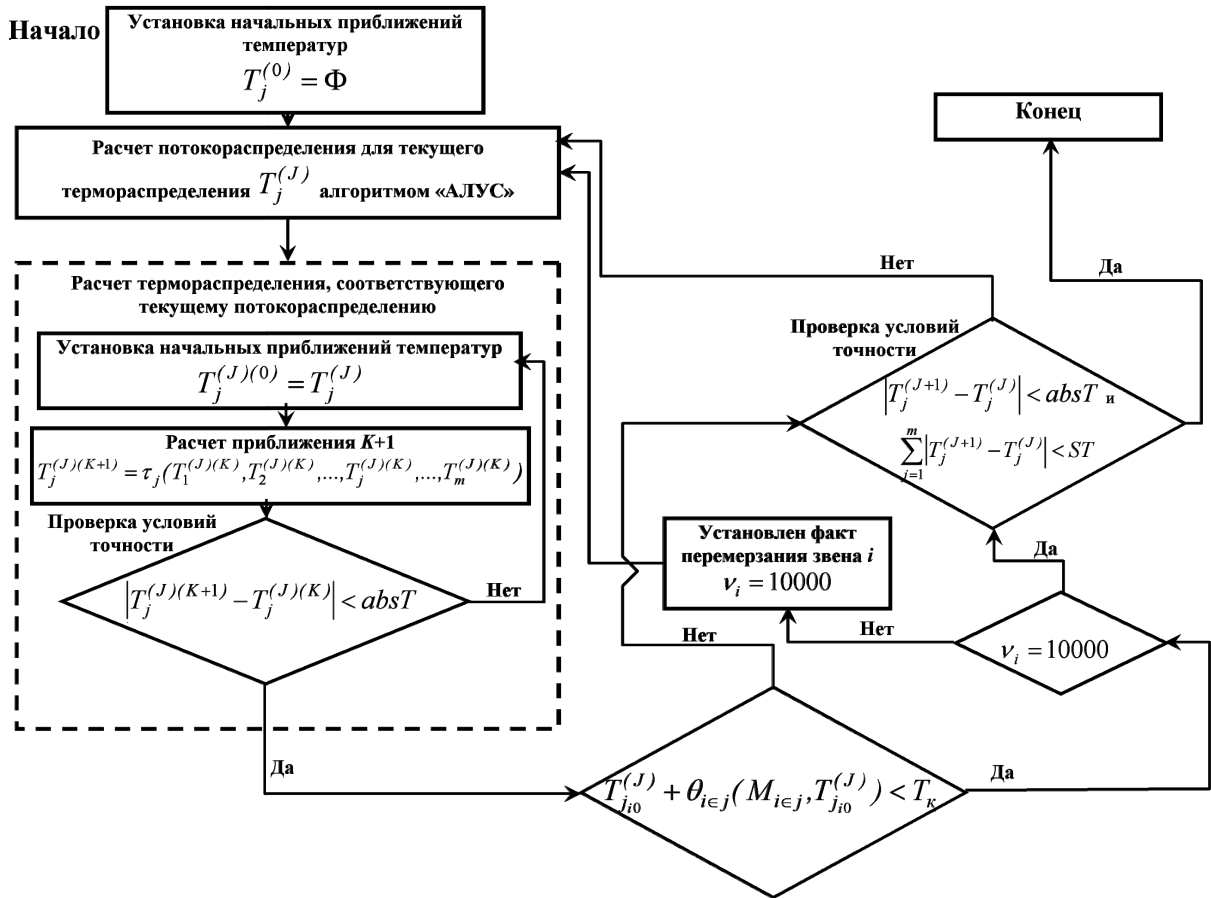


Рис. 6. Алгоритм «АКПР» комплексного потокораспределения (КПР)

Расчет замыкающих отношений для скважин, вскрывающих более одного пласта, предлагается строить решением системы уравнений для распределения расходов и давлений (рис.7). Система (18) решается предложенным методом последовательных приближений с линеаризацией замыкающих отношений, входящих в схему звеньев, на каждом шаге. В результате полученная зависимость перепада давления между узлом забоя – (3) (рис.7) и любым узлом на контуре зоны воздействия скважины (ЗВС) от расхода жидкости, поступающей в узел (3).

$$\begin{cases} q - q_0 - q_4 = 0 \\ q_4 - q_1 - q_5 = 0 \\ q_5 - q_2 - q_3 = 0 \\ -f_A(q_0) + f_4(q_4) + f_5(q_5) + f_3(q_3) = P_{nl}^A - p_{j_{ie}} + \frac{z_n^A + z_{\kappa}^A}{2} - z_{j_{ie}} \\ -f_B(q_1) + f_5(q_5) + f_3(q_3) = P_{nl}^B - p_{j_{ie}} + \frac{z_n^B + z_{\kappa}^B}{2} - z_{j_{ie}} \\ -f_C(q_2) + f_3(q_3) = P_{nl}^C - p_{j_{ie}} + \frac{z_n^C + z_{\kappa}^C}{2} - z_{j_{ie}} \end{cases} \quad (18)$$

Так как данные модели входят в общую систему уравнений – модели гидросистемы, при желании их вид может быть изменен с целью описания новых

явлений практически произвольно, что снимает ограничения на дальнейшее развитие предлагаемой модели.

Здесь также рассматриваются аспекты построения геологической модели месторождения, где предлагается ряд методов распределения геометрических и фильтрационно-емкостных характеристик пластов на основе данных геофизических и гидродинамических исследований. В данной главе также описывается математическая модель ГПП месторождения, описывающая неустановившуюся фильтрацию двухкомпонентной (вода+нефть) среды. Данная модель увязывается с моделью ТГС и позволяет детализировать взаимодействие технической и пластовой гидросистем в условиях изменения фильтрационно-емкостных свойств многопластового месторождения и технических характеристик элементов наземной системы.

Предложенная в работе модель ГПП (рис. 8) относится к моделям конечно-разностных схем и элементов пластов при явном расчете пластовых давлений. Основным отличием предлагаемой модели от ранее известных является учет нелинейного закона фильтрации, прямой взаимосвязи с ТГС и изменений пористости, проницаемости, а также формирования трещин в зависимости от распределения градиентов разрыва.

Вследствие высоких давлений в элементах модели пласта, входящих в зоны воздействия нагнетательных скважин, формируются существенные градиенты давлений, предполагающие нагрузку на породы, слагающие пласт в данных зонах. В связи с этим, макроэлементы пласта разрушаются именно из-за высоких перепадов давления между условными поверхностями, геологически отделяющими отдельные части пласта (например, прожилки иных пород, тектонические нарушения, барьеры давления и т.п.). Дополнительным фактором формирования трещин в зонах нагнетания также является запоздалый запуск закачки, вследствие чего пластовое давление может быть сильно снижено, что обуславливает тенденцию в направлении трещин от нагнетательных скважин к добывающим.

Учитывая хотя и конечные, но малые размеры ячеек, при моделировании трещинообразования будем полагать, что все трещины ячейке будут иметь прямоугольную форму и возможен обратный процесс: смыкание трещины при условии, когда давление внутри трещины будет меньше давления в окружающей породе, т.е. давление в центре ячейки меньше давлений на гранях по оси перпендикулярной плоскости трещины.

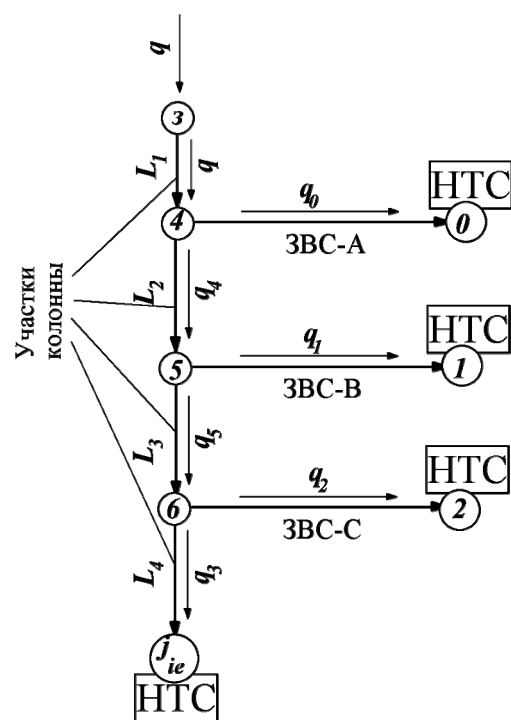


Рис. 7. Структурная схема подсистемы скважины, вскрывшей три пласта: А, В и С

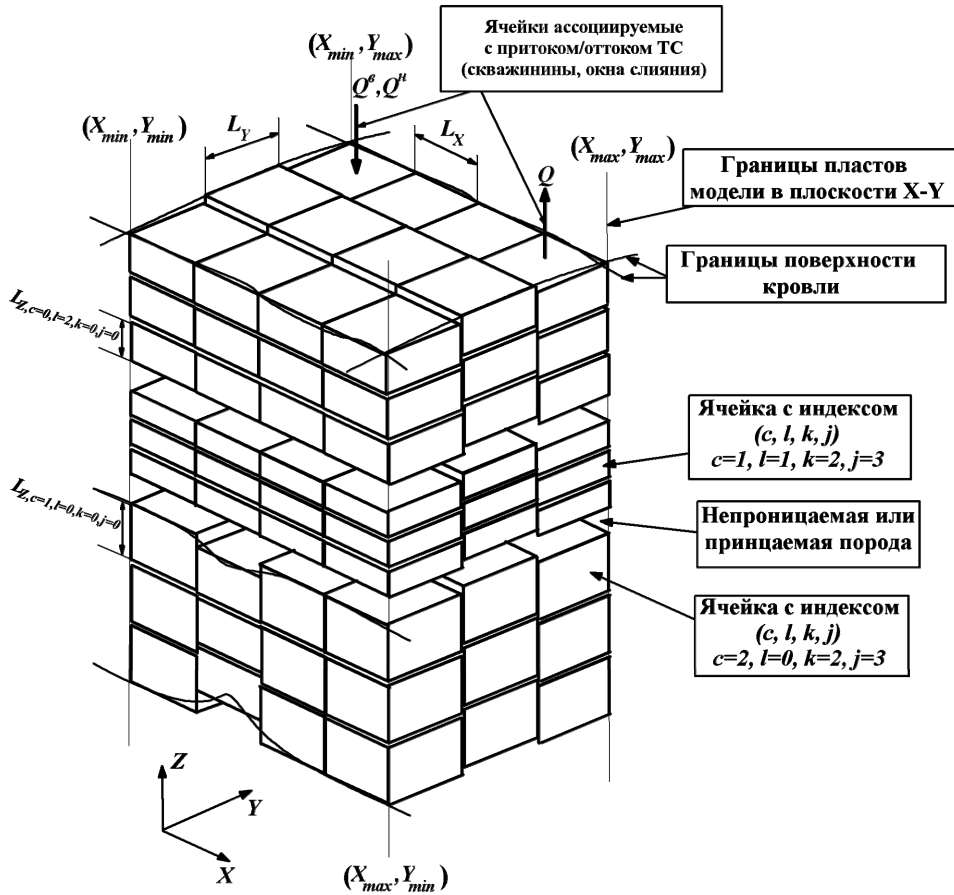


Рис. 8. Пример схемы предлагаемой модели ГПП, состоящей из трех слоев, разбитых по вертикали на 4 слоя, по оси X на 4 ячеек, по оси Y на 3 ячейки

Согласно принятым допущениям: 1 – возможно формирование только вертикальных трещин в направлении двух перпендикулярных плоскостей – XZ, YZ; 2 – трещины могут формироваться от центра ячейки к одной из ее граней (полутрещины), при выполнении условия для ее формирования вдоль оси S ($S=X$ или $S=Y$)

$$gp_i^{(S-e)} = 2 \frac{|p_i - p_{S-e}|}{L_S} > gp_2^{(S)} \quad (19)$$

и противоположном направлении

$$gp_i^{(S-b)} = 2 \frac{|p_i - p_{S-b}|}{L_S} > gp_2^{(S)}, \quad (20)$$

где $gp_i^{(S-e)}$, $gp_i^{(S-b)}$ – текущие модули градиентов давления между давлением центра ячейки i и давлениями на ее гранях (e – вдоль оси, b – против оси), находящихся по направлению и против оси S , $gp_2^{(S)} \approx 2 \frac{|\Delta p_c|}{L_S}$ – предельный градиент разрыва (L_S – линейный размер ячейки по оси S).

Величина $gp_2^{(S)}$ будет зависеть как от прочностных свойств породы, так и от напряжений сформированных литологическими условиями. Далее употребляя gp_2 , будем полагать градиент разрыва относящийся к соответствующему направлению. Будем считать gp_2 известным для всех направлений и ячеек модели ГПП.

В зависимости от текущих давлений на гранях ячейки p_{Xe} , p_{Xb} , p_{Ye} , p_{Yb} и выполнения условий (19–20), в ячейке могут быть образованы трещины в нескольких комбинациях (рис. 9), т.е. совместные трещины.

При моделировании трещин возможно использования условий (19–20) в двух вариантах: 1 – разрыв происходит во всех направлениях, где выполняются данные условия; 2 – разрыв происходит в направлении максимального из всех градиентов давления, соответствующих данным условиям.

Раскрытость трещины будем описывать толщиной в зависимости от текущего перепада давления – Δp_{S_1} согласно некоторой функции $H(\Delta p_{S_1}, A_1, D, A_0)$, где D – коэффициент раскрытия трещины, зависящий от характера деформации ячейки и размеров ячейки, 1/Па; A_0 – минимальная толщина трещины при смыкании, образуемая вследствие остаточной деформации, м; A_1 – коэффициент раскрытия трещины, зависящий от упругости породы ячейки, м/д.е.; Δp_{S_1} – перепад давления между давлением в центре ячейки и средним давлением на гранях, противоположных по оси S_1 : $\Delta p_{S_1} = p_i - \frac{p_{S_1-e} + p_{S_1-b}}{2}$, причем $S_1 \perp S$ (т.е. S_1 перпендикулярна направлению трещины).

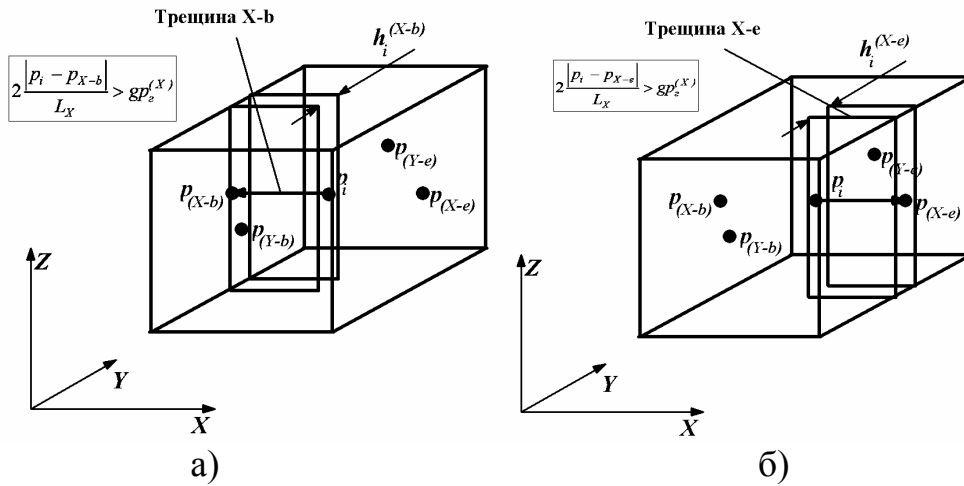


Рис. 9. Возможные вариации образования полутрещин в ячейке: а – полутрещина от центра до грани b вдоль оси X ; б – полутрещина от центра до грани e вдоль оси X

В качестве функции $H(\Delta p_{S_1}, A_1, D, A_0)$ можно использовать зависимость для каждого пласта, входящего в модель:

$$\text{при } \Delta p_{S_1} > 0 \quad h_{S-U} = H(\Delta p_{S_1}, A_1, D, A_0) = A_1 \ln(\Delta p_{S_1} \cdot D + 1) + A_0,$$

$$\text{а при } \Delta p_{S_1} < 0 \quad h_{S-U} = H(\Delta p_{S_1}, A_1, D, A_0) = A_0 \text{ (смыкание)}. \quad (21)$$

Вследствие возникновения в ячейке трещин в различных направлениях, сопротивление фильтрации каждого компонента – Φ также изменится. Т.е. при возникновении в ячейке i трещины толщиной h_{iS-U} в направлении оси S к грани U , сопротивление фильтрации компонента Φ через ячейку от центра до этой грани изменится в соответствии с параллельным соединением проводников – поровой части, согласно и сопротивления трещины. Причем, для нахождения сопротивления трещины следует учитывать направление рассматриваемой фильтрации, так как в зависимости от направления (например, от центра влево или вправо, вверх или вниз), сопротивление трещины будет рассчитываться по-

разному.

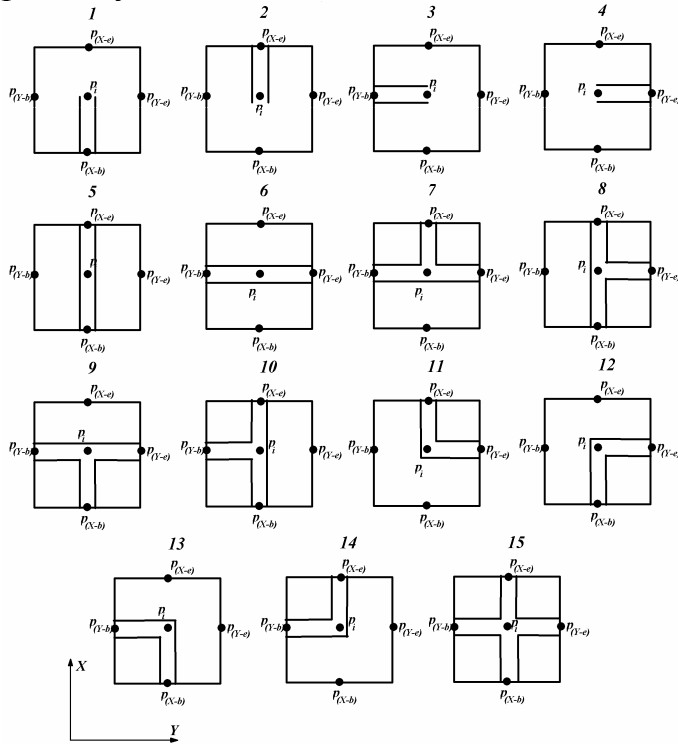


Рис. 10. Возможные комбинации полутрещин в ячейке при совместном выполнении условий (19–20)

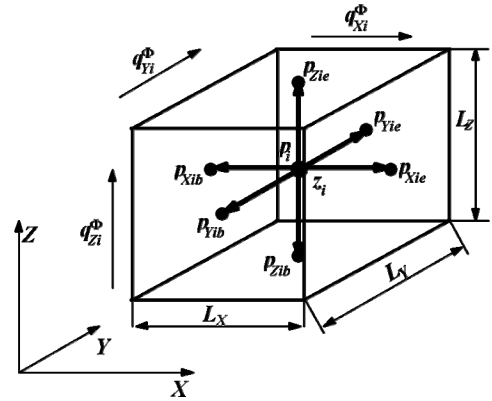


Рис. 11. Схема модели элемента пласта

Например, для притока/оттока из центра ячейки к грани b по оси X

$$R_{i_{mp}}^{(X-b, \Phi)} = \mu_{\Phi}(p_i) \frac{1}{2} \frac{L_X}{\bar{k}_{\Phi i} \cdot k_{mp} h_{iX-b} L_Z},$$

где k_{mp} – абсолютная проницаемость трещины.

Проницаемость трещин будем считать одинаковой во всех направлениях. При наличии таких вертикальных трещин также изменится сопротивление фильтрации по оси Z , при этом сопротивление трещины будет складываться исходя из параллельного течения во всех (максимум четыре) полутрещинах по вертикали

$$\frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, \Phi)}} = \frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, X-b, \Phi)}} + \frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, X-e, \Phi)}} + \frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, Y-b, \Phi)}} + \frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, Y-e, \Phi)}},$$

где $R_{i_{mp}}^{(Z, X-b, \Phi)} = \mu_{\Phi}(p_i) \frac{1}{2} \frac{L_Z}{\bar{k}_{\Phi i} \cdot k_{mp} h_{iX-b} L_Y / 2}$ и т.п.

Получив сопротивления трещин по направлениям, для нахождения общего сопротивления фильтрации в ячейке i , согласно параллельному соединению, получим сопротивление для каждого направления

$$R_i^{(S-U, \Phi)} = \frac{R_{i_{mp}}^{(S-U, \Phi)} \cdot \frac{1}{2} R_i^{(S, \Phi)}}{R_{i_{mp}}^{(S-U, \Phi)} + \frac{1}{2} R_i^{(S, \Phi)}},$$

где $R_i^{(S, \Phi)}$ – сопротивление фильтрации в поровой части ячейки (рис. 11), полученные согласно

$$R_i^{(S, \Phi)} = \mu_{\Phi i} \frac{L_{Si}}{\bar{k}_{\Phi i} \cdot k_i^{(S)} F_{Si}},$$

где $\bar{k}_{\Phi i}$ – относительная проницаемость компонента Φ ; $\mu_{\Phi i}$ – динамическая вязкость компонента Φ в ячейке i ; $k_i^{(S)}$ – абсолютная проницаемость породы ячейки i вдоль оси S ; L_{Si} – длина ячейки i вдоль оси S ; F_{Si} – площадь сечения ячейки i перпендикулярно оси S .

Для моделирования процессов трещинообразования необходимо проведение экспериментов на образцах керна для получения более точных зависимостей (21).

На рис. 12 показан пример применения модели ГПП с учетом трещинообразования.

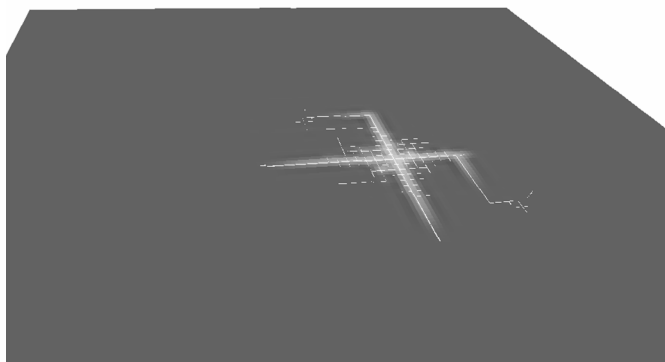


Рис. 12. Трещина в ЗВС нагнетательной скважины через 150 сут (заливка по водонасыщенности)

В конце главы описываются комплексные энергетические показатели технических гидросистем, являющиеся основными индикаторами эффективности эксплуатации техногенных гидросистем. Показаны результаты внедрения модели и программного комплекса на примере Северо-Покурского месторождения (1461 звеньев, 1415 узлов МТГС, 150000 элементов модели ГПП). Относительное среднее отклонение для условий изотермического установившегося потокораспределения несжимаемой жидкости составило 13.3 %, а для условий неизотермического установившегося потокораспределения сжимаемой жидкости составило 8.4 %.

Пятая глава посвящена вопросам адаптации предлагаемых моделей к фактическому состоянию гидросистем: фактическим режимам, фиксируемым по приборам телеметрии и определяемым по данным геофизических и гидродинамических исследований фильтрационно-емкостным свойствам пластов. Здесь предлагается ряд модификации известных методов поиска фильтрационно-емкостных свойств пластов в условиях совместного заводнения множества пластов. Также здесь рассматриваются некоторые задачи определения технического состояния систем: трубопроводов и насосных агрегатов. В заключение пятой главы рассматриваются алгоритмы анализа структуры сети в виде поиска системы с линейно-независимых путей для ТГС и примеры схематизации моделей ТГС и ГПП.

В шестой главе рассматриваются вопросы применения предлагаемых моделей для контроля и управления на примерах систем поддержания пластового давления различной структуры с различными свойствами элементов. В частности рассмотрены основные методы и примеры ручной и автоматизированной оптимизации гидросистемы. В отдельных разделах рассмотрены примеры и результаты использования модели гидросистемы продуктивных пластов отдельно от технической гидросистемы (рис. 13 – б) и совместно (рис. 13 – а).

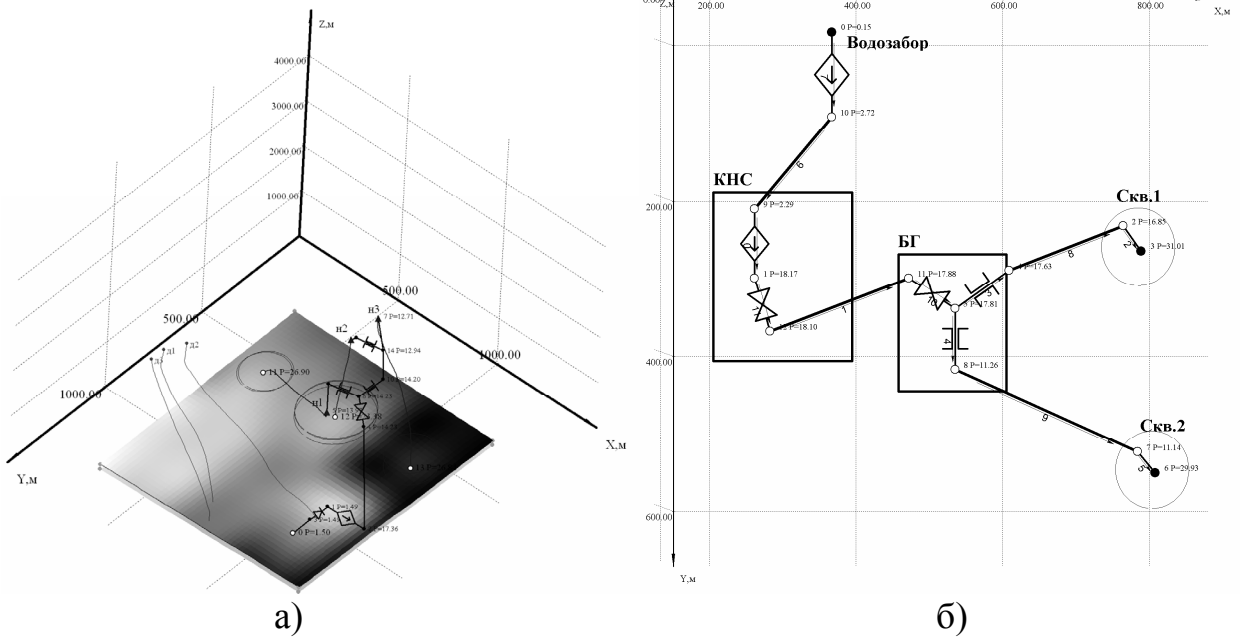


Рис. 13. Пример гидросистемы ППД с одной КНС при заводнении пласта двумя скважинами: а – комплексная модель ТГС+ГПП; б – модель ТГС

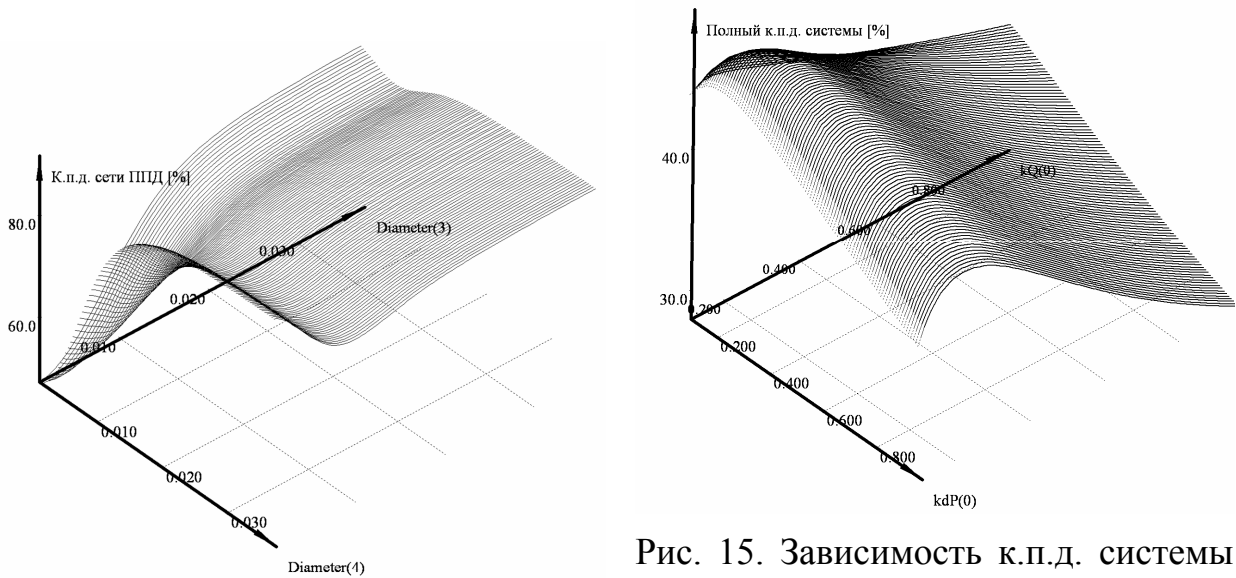


Рис. 14. График зависимости к.п.д. системы от диаметров штуцеров 3 и 4 – $\psi_{\eta_c}(d_3, d_4)$

Рис. 15. Зависимость к.п.д. системы от коэффициентов коррекции характеристик насосной станции – $\psi_{\eta_{np}}(kQ_0, kdP_0)$

На рис. 13 показан пример модели типовой системы ППД, на которой в результате проведения вычислительных экспериментов получены прототипы регулировочных зависимостей, получаемых расчетным путем на предложенной модели (рис. 14).

Как видно из результатов вычислений предложенной модели зависимость к.п.д. системы от технических показателей элементов показывает возможность решения задачи оптимизации.

Здесь также рассматриваются предлагаемые методы оптимизации систем ППД посредством подбора штуцеров и свойств насосных станций, выраженных в

коэффициентах коррекции исходной гидравлической характеристики по оси расходов – kQ и давлений – kdP :

$$f'(q) = kdP \cdot f(q \cdot kQ),$$

где $f'(q)$ – скорректированное замыкающее отношение насоса (насосной станции); $f(q)$ – исходное замыкающее отношение.

Задача оптимизации сводится к поиску максимума $(N+2M)$ -мерной функции

$$\psi_{\bar{K}_{эфф}}(d_{S_0}, \dots, d_{S_k}, \dots, d_{S_{N-1}}, kQ_{P_0}, \dots, kQ_{P_j}, \dots, kQ_{P_{M-1}}, kdP_{P_0}, \dots, kdP_{P_j}, \dots, kdP_{P_{M-1}}),$$

где S – множество индексов звеньев-штуцеров; P – множество индексов звеньев-насосов; d – технический показатель дросселирующей арматуры (например, штуцеров); N – количество нагнетательных скважин и соответствующих штуцеров или дросселирующих арматур; M – количество кустовых насосных станции или насосов, работающих в единую сеть трубопроводов.

Область определения аргументов ограничена: $d_{S_k} \in [d_{min}, d_{max}]$, $kQ_{P_j} \in [kQ_{min}, kQ_{max}]$ и $kdP_{P_j} \in [kdP_{min}, kdP_{max}]$, где $d_{min}=0.001$ м; $d_{max}=0.050$ м; $kQ_{min}=0.1$; $kQ_{max}=20$; $kdP_{min}=0.1$; $kdP_{max}=20$.

Для формирования более четкого описания аргументы целевой функции нормируются:

$$\bar{d}_{S_k} = \frac{d_{S_k} - d_{min}}{d_{max} - d_{min}}, \bar{kQ}_{P_j} = \frac{kQ_{P_j} - kQ_{min}}{kQ_{max} - kQ_{min}}, \bar{kdP}_{P_j} = \frac{kdP_{P_j} - kdP_{min}}{kdP_{max} - kdP_{min}}$$

Таким образом, искомый оптимум достигается решением задачи нелинейного программирования

$$\psi_{\bar{K}_{эфф}} \left(\begin{array}{l} \bar{d}_{S_0}, \dots, \bar{d}_{S_k}, \dots, \bar{d}_{S_{N-1}}, \\ \bar{kQ}_{P_0}, \dots, \bar{kQ}_{P_j}, \dots, \bar{kQ}_{P_{M-1}}, \\ \bar{kdP}_{P_0}, \dots, \bar{kdP}_{P_j}, \dots, \bar{kdP}_{P_{M-1}} \end{array} \right) \rightarrow \max. \quad (22)$$

$\psi_{\bar{K}_{эфф}}$ – целевая функция, зависимости нормированного коэффициента эффективности эксплуатации системы, получаемого расчетным путем на основании комплексного потокораспределения и формулы

$$\bar{K}_{эфф} = \eta_{\phi} \cdot \theta(S_g) = \eta_{\phi} \cdot 0.64057 \left[\frac{\sin(e^{-\varepsilon \cdot S_g} \cdot \pi \cdot \chi) + 3e^{-\varepsilon \cdot S_g}}{2} \right],$$

где χ – безразмерный аппроксимационный коэффициент равный 96.1;

ε – коэффициент чувствительности к отклонению от технологии заводнения $\in [0.05, 1]$; S_g – рассчитанный в модели коэффициент среднего относительного отклонения от требуемых по технологии приемистостей скважин, д.е.; η_{ϕ} – рассчитанный в модели полный к.п.д. системы.

Здесь следует сделать некоторое уточнение: предполагается, что коэффициенты kQ и kdP , корректирующие гидравлическую характеристику насосных агрегатов, изменяют также кривые потребляемой мощности и к.п.д. В частности кривая зависимости к.п.д. от расхода жидкости изменяется следующим образом

$$\eta'(q) = \eta(q \cdot kQ),$$

где $\eta'(q)$ – модифицированная кривая зависимости измененного к.п.д. насоса; $\eta(q)$ – известная кривая зависимости к.п.д. насоса (например, с завода-изготовителя).

Кривая потребляемой электрической мощности модифицируется следующим образом

$$N'_s(q) = N_s(q \cdot kQ) \cdot kQ \cdot kdP,$$

где $N'_s(q)$ – модифицированная кривая зависимости потребляемой электрической мощности насоса; $N_s(q)$ – известная кривая зависимости потребляемой электрической мощности насоса (например, завода-изготовителя).

Задача (22) решается в программном комплексе Hydra'Sym известным методом нелинейного программирования **LBFGS**. Результаты решения показали на примере Северо-Покурского месторождения рост к.п.д. с 44.77 до 46.7 % и снижение энергопотребления на 1.2 МВт.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В результате элементного анализа гидравлических систем любой структуры выявлено, что потеря универсальности известных моделей связана с недостаточно корректным выделением типовых элементов и, как следствие, не оправданными топологическими преобразованиями исходной структуры, фиктивными граничными условиями, строго регламентированными замыкающими отношениями, не устойчивыми методами численного решения и не учетом ряда физических процессов.

2. Для идентификации комплексной математической модели гидравлических систем и построения иерархии моделей элементов предложены:

- классификация элементов, составляющих все гидросистемы и, выделяющих подмножества способов математического описания их моделей;
- искусственная классификация гидросистем по их назначению;
- усовершенствованы естественные классификации аппаратов по сообщению гидравлической энергии и устройств по управлению потоком текучей среды.

3. Математически описана комплексная унифицированная модель систем поддержания пластового давления, охватывающая наземную систему сетевой структуры, скважины и пласты, которая имеет следующие факторы и показатели:

- описание структуры и граничных условий, позволяющее моделировать реальные физические структуры гидравлических систем «так, как они есть» без фиктивного зацикливания топологической схемы;
- унифицированное для всего множества элементов математическое описание замыкающих отношений, выраженных в виде функций второго и более порядка, отражающих полномерный характер воздействия элементов на систему – во всем спектре расходов и давлений;

- математические модели обратных клапанов, скважин, насосов широкого спектра и гидравлических регуляторов;
- учет теплообмена с внешней средой и перехода гидравлической энергии в тепловую, обусловленного сопротивлением трубопроводов, дросселирующей и запорной арматуры и работой насосных агрегатов;
- учет перемерзания участков гидросистемы и соответствующего ему потокораспределения;
- учет изменения свойств жидкости в гидросистеме от давления и температуры, обусловленные рассчитываемым потокораспределением, диссипацией гидравлической энергии и теплообменом с внешней среды;
- математическое описание (на основе методов конечных элементов) пространственной нестационарной фильтрации сжимаемых жидкостей в пластах, исходя из условий нарушения линейного закона Дарси, изменения проводимости пористой среды от давления, формирования трещин и проявления реологических свойств.

4. При алгоритмизации модели создан программный расчетный комплекс HydraSym, в котором реализованы:

- метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений для наиболее жестких условий – немонотонности, негладкости, возможной неопределенности на всей числовой оси, несимметричности (не «нечетности») функций замыкающих отношений и их производных;
- алгоритмы и методы решения задачи комплексного потоко- и термораспределения в произвольных технических гидросистемах с установившимся течением в условиях изменяющихся замыкающих отношениях непосредственно в итерационном процессе;
- новый метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений, который позволяет решить задачу потокораспределения в постановках методов «путевой» и «узловой» увязки при любых граничных условиях;
- алгоритм поиска системы путей, исходя из адекватности результирующей матрицы путей – B ;
- алгоритмы систематизации и обработки исходных и выходных данных модели;
- метод расчета комплексных энергетических показателей технических гидросистем: к.п.д. сети, к.п.д. гидросистемы и полный к.п.д. гидросистемы.

4. В качестве модели принятия решений для оптимизации систем поддержания пластового давления реализованы методы решения задач автоматической оптимизации с использованием методов нелинейного программирования: подбора диаметров штуцеров и характеристик насосных станций согласно номинальным приемистостям скважин и максимизации «полного к.п.д. системы».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих наиболее значимых работах:

а) монографии

1. Стрекалов А.В. Системный анализ и моделирование гидросистем поддержания пластового давления. Тюмень, ИФ «Слово», 2002. 324 с.
2. Стрекалов В.Е. Стрекалов А.В., Завьялов В.В. Инновационная техника и технология гидросистем нефтяных промыслов. СПб., «Наука», 2006. 328 с.
3. Стрекалов А.В. Математические модели гидравлических систем для управления системами поддержания пластового давления. Тюмень, 2007. ОАО Тюменский дом печати. 664 с.

б) статьи в научно-технических изданиях рекомендованных ВАК

4. Стрекалов А.В. Метод математического моделирования гидросистем поддержания пластового давления. "Нефть и Газ" 5/2002, С. 70–80.
5. В.Е. Стрекалов, Стрекалов А.В. Биниология элементов гидравлических систем нефтяных промыслов. "Нефть и Газ" 5/2002, С. 95–99.
6. Стрекалов А.В., А.Б. Рублев. Расчет режима совместной эксплуатации нескольких гидродинамически изолированных пластов "Нефть и Газ" 6/2004, С. 28–41.
7. Стрекалов А.В. Расчет потокораспределения сложных гидравлических систем посредством формирования и решения неоднородной системы уравнений "Нефть и Газ" 2/2007, С 9–19.
8. Стрекалов А.В. Особенности задач расчета в управлении сложных гидравлических систем "Нефть и Газ" 3/2007. С 17–28.
9. И.П. Пуртова, М.Ю. Савастыин, Стрекалов А.В. Анализ и интерпретация динамики режимов работы скважин М., ВНИИОЭНГ "Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 6/2007. с 34–36.
10. И.П. Пуртова, Стрекалов А.В. Проблемы учета совместной эксплуатации гидравлически изолированных пластов М., ВНИИОЭНГ "Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 6/2007. с 36–40.
11. Стрекалов А.В. Метод численного решения задачи потокораспределения в сетевых гидравлических системах. Вестник Тюменского государственного университета, 06`2009 «Физико-математические науки, информатика, химия. С. 169–176.
12. Грачева С.К., Стрекалов А.В. Влияние неустановившегося изменения фильтрационно–емкостных свойств на режимы эксплуатации пластовой системы. Нефтяное хозяйство, 1/2009. 12 с.
13. Стрекалов А.В., Королев М.С. Динамика гидравлических систем сетевой структуры. Естественные и технические науки № 6 (44). 2009.С. 29–36.
14. А.С. Ушаков, А.В. Стрекалов, М.С. Королев. Обоснование показателей гидроразрыва пласта для горизонтальных скважин. «Территория нефтегаз». № 5. 2010. С 14–16.
15. Стрекалов А.В., Королев М.С., Фоминых О.Ф. Контроль, регулирование и оптимизация гидросистем заводнения нефтяных пластов. Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело", 2010 (электронный журнал).

http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov_1.pdf – 18 с.

16. А.В. Стрекалов, М.С. Королев. Использование моделей гидравлических систем для регулирования систем поддержания пластового давления. Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. № 4. 2010. ВНИИОНГ. С 51–55.

в) статьи в рецензируемых научно-технических изданиях

17. Стрекалов А.В., Королев М.С. Оптимизация систем поддержания пластового давления на основе их моделей. Техника и технология – 2008 №3. С. С. 36–39.

18. Стрекалов А.В., Королев М.С. Показатели эффективности эксплуатации технических гидросистем поддержания пластового давления. Техника и технология. 2008. № 3. С. 40–43.

19. Стрекалов А.В. Имитационное математическое моделирование гидросистем поддержания пластового давления. Межвузовский сборник научных трудов: "Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири". Тюмень, ТюмГНГУ, 2002, с 19–34.

20. Стрекалов А.В. Нахождение замыкающих отношений при моделировании нагнетательных скважин. Межвузовский сборник научных трудов: "Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири". Тюмень, ТюмГНГУ, 2002, с 34–48.

21. Стрекалов А.В., И.Н.Батищев. Управление режимами работы гидросистем поддержания пластового давления. Материалы международной научно-технической конференции: Нефть и Газ Западной Сибири. Тюмень, 2005. С. 45–51.

22. Стрекалов А.В. Модель неизотермического установившегося течения в трубопроводных сетях, связанных с системой продуктивных пластов. Сборник научных трудов. Выпуск № 11. Математическое и информационное моделирование. Тюмень 2009. С 131–144.

г) авторские свидетельства и патенты на изобретения

23. Стрекалов А.В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2002611864. Комплекс универсального моделирования технических гидравлических систем поддержания пластового давления (Hydra'Sym). М. 2002.

24. Стрекалов А.В., И.Н. Батищев. Патент на изобретение № 2303807 "Регулятор расхода жидкости". МПК8 G05D7/01 Бюл. №20–7с.

Соискатель



А.В. Стрекалов