

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ им. акад. А.И. ГУСЕЙНОВА**

На правах рукописи

ГАМЗАЕВ ХАНЛАР МЕХВАЛИ ОГЛЫ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ
И В ТРУБЕ**

1203.01 – Компьютерные науки

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Баку 2013

Работа выполнена в Институте Кибернетики им. А.И.Гусейнова
Национальной Академии Наук Азербайджана.

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор **К.Р. Айда-заде**

Официальные оппоненты: член–корреспондент НАНА, доктор
технических наук **Г.И. Джалалов**

доктор технических наук, профессор
А.Б. Гасанов

доктор наук по математике **А.Я. Ахундов**

Ведущая организация: **Институт “Neftqazemittədqiqatlayihə”**

Защита состоится « 20 » декабря 2013 года в 14⁰⁰ часов
на заседании диссертационного совета D 01.121 при Институте Кибернетики
Национальной Академии Наук Азербайджана по адресу: AZ 1141, Баку, ул.
Б. Вахабзаде, 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
Кибернетики Национальной Академии Наук Азербайджана.

Автореферат разослан « 19 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.ф.-м.н, доцент

А.Б. Пашаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. С проблемой течения флюидов в пористых средах и по трубам связаны важные теоретические и прикладные задачи нефтегазодобычи, трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, гидротехники, гидромелиорации, гидрогеологии, химической технологии, аэрокосмической техники т.п. Эти проблемы являются наиболее актуальными для теории и практики нефтегазодобычи, трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

Экспериментальное изучение процессов течения флюидов в пористых средах и по трубам связано не только с большими материальными затратами, но с значительными техническими трудностями, причем в ряде случаев определение некоторых важных характеристик этих процессов принципиально не представляется возможным. Математическое моделирование является одним из основных инструментов для исследования течения флюидов в пористых средах и по трубам, для обоснованного принятия стратегических и тактических решений по управлению разработкой месторождений.

Современное состояние и перспективы дальнейшего развития нефтегазовой промышленности характеризуется переходом на интенсивные методы разработки месторождений, усложнением горно–геологических условий их эксплуатации и в связи с этим многообразием гидродинамических, тепловых и физико–химических методов воздействия на природные резервуары и насыщающие их флюиды в целях повышения степени извлечения углеводородов из недр. Все это требует разработки новых математических моделей, учитывающих реальные пластовые условия, совершенствование как существующих математических моделей, так и методов их численной реализации, методов решения возникающих обратных

краевых задач, задач оптимального управления и неклассических краевых задач.

Исследованию течения флюидов в пористых средах и в трубах посвящены многочисленные работы зарубежных и отечественных ученых, среди которых следует отметить М.Т.Абасова, З.Я.Аббасова, Х.Азиза, К.Р.Айда-заде, Г.И.Баренблатта, К.С.Басниева, В.Я.Булыгина, Г.Г.Вахитова, Г.П.Гусейнова, М.А.Гусейн-заде, М.А.Гулиева, Р.С.Гурбанова, Г.И.Джалалова, К.Н.Джалилова, В.М.Ентова, Ю.В.Желтова, С.Н.Закирова, Р.Коллинза, Г.Б.Кричлоу, М. Маскета, А.Х.Мирзаджанзаде, В.Г.Мусаева, В.Г.Пирмамедова, Э.Э.Рамазанова, Т.Ш.Салаватова, Э.Сеттари, М.А.Таирова, В.Б.Таранчука, Х.А.Фейзуллаева, И.А.Чарного, Э.Шейдеггера, К.Ф.Ширинова, В.Н.Щелкачева и др.

Обратные задачи по определению неизвестных коэффициентов и правых частей дифференциальных уравнений в частных производных изучены во многих работах, в частности, Г.Б.Алексеева, О.М.Алифанова, Е.А.Артюхина, А.Я.Ахундова, П.Н.Вабищевича, Г.И.Джалалова, А.Д.Искендерова, М.В.Клибанова, М.М.Лаврентьева, Ж.Л.Лионса, Г.И.Марчука, В.Г.Романова, А.Н.Тихонова, М.Х.Хайрулина и других.

Цель работы.

- 1) Разработка математических моделей течения однофазных и двухфазных систем в пористых средах, трубах и методов их численной реализации.
- 2) Разработка численных методов для решения обратных задач, задач оптимального управления, неклассических краевых задач однофазного и двухфазного течения в пласте и в трубе.
- 3) Разработка методов численного моделирования гидродинамических, физико-химических и тепловых методов воздействия на нефтяные пласты.

Методы исследования. Основным инструментом исследования является технология численного моделирования, заключающаяся в исследовании математических моделей на компьютерах на основе численных

методов. В работе используются фундаментальные положения теории гидрогазодинамики, термодинамики, методы математической физики, теории численных методов и оптимального управления.

Научная новизна.

1. Предложен закон фильтрации, учитывающий инерционные эффекты, проявляемые при высоких скоростях фильтрации жидкостей в пористой среде.
2. Предложен новый подход к моделированию притока жидкости к гидродинамически несовершенным по характеру вскрытия пласта скважинам и разработана методика расчета упругого режима разработки пласта.
3. Для определения продолжительности оптимальной разработки нефтяного пласта в упругом режиме сформулирована задача оптимального управления по быстродействию и предложен численный метод ее решения.
4. На основе капиллярной модели пористой среды предложена математическая модель процесса инфильтрации при разливе нефти и нефтепродуктов в грунт.
5. В рамках модели поршневого вытеснения и модели двухфазного течения разработан численный метод решения обратных задач по восстановлению граничного режима в процессах вытеснения нефти из пласта водой.
6. Разработан численный метод решения граничных и гранично–ретроспективных обратных задач, возникающих при упругом режиме разработки пласта, при тепловых и физико–химических воздействиях на продуктивные пласты.
7. Предложена математическая модель движения частиц выбуренной породы в потоке вязкопластической жидкости, поднимающейся вертикально вверх по кольцевому межтрубному пространству. Разработан численный метод решения задачи по определению средней скорости потока вязкопластической жидкости, обеспечивающей транспорт частицы по заданному условию.

8. Предложена математическая модель движения газожидкостной смеси в подъемной трубе и на основе этой модели предложен метод определения технологического режима работы газлифтных скважин.

9. Для описания упруговодонапорного режима разработки пласта предложена модель типа Стефана и разработан численный метод решения граничных обратных задач в рамках этой модели.

10. На основе математической модели стационарного движения сжимаемой жидкости по трубопроводу предложен метод обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов, возникающих при повреждении трубопроводов. Получены явные формулы по определению массового расхода на утечку и места утечки в трубопроводе.

11. Разработана математическая модель процесса растекания нефтяной пленки, образующейся при разливе нефти в море. Получены в явном виде формулы для определения размеров нефтяной пленки.

12. На основе модели турбулентной фильтрации жидкости в пласте предложен метод определения радиуса распространения системы трещин, образовавшихся при гидравлическом разрыве пласта.

Практическая ценность. Практическая ценность выполненных исследований состоит в принятии научно обоснованных решений по управлению разработкой нефтяных месторождений и трубопроводным транспортом нефти и нефтепродуктов.

Предложенные численные методы решения граничных обратных задач и задач оптимального управления однофазным и двухфазным течением могут быть использованы как при проектировании систем разработки, так и в период эксплуатации нефтяных месторождений для прогнозирования показателей разработки.

Разработанный метод решения гранично–ретроспективных обратных задач может непосредственно использоваться для выяснения эффективности физико–химических и тепловых методов воздействия на нефтяные пласты.

Предложенную математическую модель движения газожидкостной смеси в подъемной трубе можно применять при определении технологического режима работы газлифтных скважин.

Для обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов, возникающих при повреждении трубопроводов, можно воспользоваться предложенной математической моделью стационарного движения сжимаемой жидкости по трубопроводу.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались: на XI Республиканской конференции молодых ученых по математике и механике, Баку, 1995; на Республиканской научной конференции «Новые информационные технологии и проблемы прикладной математики», Баку, 1997; на международном симпозиуме «Проблемы математического моделирования, управления и информационных технологий в нефтегазовой промышленности», Баку, 1998; на Республиканских научных конференциях «Современные проблемы информатизации, кибернетики и информационных технологий», Баку, 2003, 2004; на международных научно-практических конференциях «Хазарнефтгазятаг», Баку, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008; на международной научно-технической конференции «Наука-образование-производство в решении экологических проблем», Уфа, 2002; на международных конференциях «Международное и региональное значение трубопровода Баку-Тбилиси-Джейхан», Баку, 2002; «Control and Optimization with Industrial Application», COIA, Баку, 2005, 2008; «Problems of Cybernetics and Informatics», PCI, Баку, 2006, 2008; на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы математики, механики и теории управления», Алматы, 2009; на VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Информационные технологии и математическое моделирование», Томск 2009; на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Математика и математическое моделирование», Саранск, 2011; на международном конгрессе «IV Congress of the Turkic World

Mathematical Society», Баку, 2011; на международных конференциях «Новые технологии нефтегазодобычи», Баку, 2012; «Problems of Cybernetics and Informatics», PCI, Баку, 2012; «Проблемы информатики и моделирования», Ялта, 2012; на XI Всероссийской научной конференции с международным участием «Краевые задачи и математическое моделирование», Новокузнецк, 2012 и на протяжении ряда лет на семинарах кафедры «Прикладная математика» Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии и Института Кибернетики НАН Азербайджана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 65 работ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 203 наименований. Работа содержит 249 страниц печатного текста, в том числе 7 рисунков и 24 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований по теме диссертации, формулируются основные цели, излагается краткое содержание и основные результаты диссертационной работы.

Первая глава диссертации посвящена моделированию однофазного фильтрационного потока упругой жидкости в пористой среде.

Известно, что для моделирования процессов, происходящих при разработке продуктивных пластовых систем в упругом режиме, в качестве закона фильтрации в основном используется эмпирический закон Дарси. Однако многочисленные экспериментальные исследования показывают, что при высоких скоростях фильтрации силы инерции становятся существенными и преобладают над силами вязкости, что приводит к нарушению закона Дарси. В связи с этим в первом разделе главы предлагается закон фильтрации, учитывающий инерционные эффекты,

проявленные при высоких скоростях фильтрации жидкостей в пористой среде

$$u = -\frac{k_f}{g} \frac{\partial P}{\partial s} - k_f \frac{\partial z}{\partial s} - \frac{k_f}{g} u \frac{\partial u}{\partial s},$$

где u – скорость фильтрации; $g = rg$ – вес единицы объема жидкости; g – ускорение свободного падения; r – плотность жидкости; z – расстояние от рассматриваемого сечения до некоторой фиксированной поверхности отсчета; P – давление; k_f – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом фильтрации.

На основе предложенного закона фильтрации определяются основные характеристики стационарных прямолинейно–параллельных и плоскорадиальных фильтрационных потоков.

При моделировании упругого режима разработки пластов традиционно предполагают, что все скважины являются гидродинамически совершенными и условия на скважинах, точнее на забоях скважин, известны или реализуются по заранее заданной программе. Однако на практике эти предположения, как правило, не выполняются. Во-первых, режим работы эксплуатационных скважин, т.е. их дебиты и забойные давления устанавливаются в зависимости от условий в системе «пласт–скважина», а также в результате взаимодействия скважин. Во-вторых, при разработке пластовых систем продуктивные пласты из-за технических и технологических причин вскрываются скважинами, гидродинамически несовершенными по характеру вскрытия пласта. Во втором и третьем разделах главы рассматриваются вопросы моделирования упругого режима разработки пластов системой скважин, гидродинамически несовершенных по характеру вскрытия пласта. Предлагается математическая модель притока жидкости к гидродинамически несовершенным по характеру вскрытия пласта скважинам, определяется условие совместимости течения жидкости в пласте и в стволах скважин. На основе предложенной модели

разработан вычислительный алгоритм для расчета упругого режима разработки двумерных пластовых систем.

В четвертом разделе главы исследуется задача однофазной фильтрации в цилиндрическом пласте с неклассическими краевыми условиями:

$$b \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k(r, z)}{m} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k(r, z)}{m} \frac{\partial P}{\partial z} \right),$$

$$(r, z, t) \in G_T = \{r_w < r < R, 0 < z < H, 0 < t \leq T\},$$

$$2p \int_0^H r \frac{k(r, z)}{m} \frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=r_w} dz = Q(t),$$

$$P \Big|_{r=r_w} = f(t),$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0,$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0.$$

Здесь $P = P(r, z, t)$ – давление в пласте; $k(r, z)$ – абсолютная проницаемость пласта; m – вязкость жидкости; b – коэффициент упругоёмкости пласта; H – мощность пласта; $Q(t)$ – суммарный расход жидкости на скважине; r_w – радиус скважины; R – радиус пласта.

Подобные краевые задачи возникают при исследовании скважин и при математическом моделировании процессов фильтрации в слоистых пластах, при отборе жидкостей через трещину и т.д. В качестве краевого условия задается суммарный расход жидкости через скважину, а давление на скважине считается неизвестным. Предлагается численный метод решения подобного класса неклассических краевых задач однофазной фильтрации.

В пятом разделе главы исследуется вопрос неединственности решения одной краевой задачи фильтрации однофазной жидкости в двухпластовой системе. Показано, что краевые задачи однофазной фильтрации с квадратичными нелинейностями могут иметь не единственное решение.

В шестом и седьмом разделах главы исследуются вопросы определения поля давления при упругом режиме разработки пластов на основании информации, полученной из скважин.

В шестом разделе главы рассматривается движение однофазной жидкости в круговом пласте в процессе его разработки системой L скважин, одна из которых расположена в центре:

$$Hb \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rH \frac{k}{m} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial q} \left(H \frac{k}{m} \frac{\partial P}{\partial q} \right) - \frac{1}{r} \sum_{l=1}^{L-1} Q_l d(r-r_l, q-q_l), \quad (1)$$

$$(r, q) \in G = \{0 < r < R, 0 < q < 2p\}, \quad t \in (0, T],$$

$$P|_{t=0} = j(r, q), \quad (r, q) \in G, \quad (2)$$

$$P(r, 0, t) = P(r, 2p, t), \quad \frac{\partial P}{\partial q} \Big|_{q=0} = \frac{\partial P}{\partial q} \Big|_{q=2p}, \quad t \in [0, T], \quad (3)$$

$$2pHr \frac{k}{m} \frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = Q_0, \quad P|_{r=r_w} = p_w(t), \quad t \in [0, T], \quad (4)$$

Здесь $P = P(r, q, t)$ – давление в пласте; $k(r, q)$ – абсолютная проницаемость пласта; $Q_l = Q_l(t)$ – расход жидкости на l -ой скважине; (r_l, q_l) – координаты l -ой скважины.

Распределение давления на внешней границе пласта считается неизвестным. Задача (1)–(4) относится к классу граничных обратных задач. Для численного решения обратной задачи (1)–(4) на отрезке $0 \leq t \leq T$ вводится равномерная сетка по переменной t

$$t_n = nDt, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_t,$$

с шагом $Dt = T/N_t$ и каждый отрезок $[t_n, t_{n+1}]$, $n = \overline{0, N_t - 1}$ точкой $t_{n+1/2} = t_n + Dt/2$ делится на две части. В соответствии с методом покомпонентного расщепления задача (1)–(4) в каждом отрезке $[t_n, t_{n+1}]$ редуцируется в систему двух последовательно решаемых одномерных задач

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial q} \left(s \frac{\partial P}{\partial q} \right) - \frac{1}{2r} f, \quad t_n < t \leq t_{n+1/2}, \quad (5)$$

$$P|_{q=0} = P|_{q=2p}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial q}\Big|_{q=0} = \frac{\partial P}{\partial q}\Big|_{q=2p}. \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r s \frac{\partial P}{\partial r} \right) - \frac{1}{2r} f, \quad t_{\frac{n+1}{2}} < t \leq t_{n+1}, \quad (8)$$

$$P\Big|_{r=r_w} = p_w(t), \quad (9)$$

$$2prs \frac{\partial P}{\partial r}\Big|_{r=r_w} = q_0, \quad (10)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N_t - 1,$$

$$P(r, q, 0) = j(r, q),$$

где $s(r, q) = \frac{k(r, q)}{mb}$, $q_l = \frac{Q_l}{bH}$, $l = \overline{0, L-1}$, $f(r, t) = \sum_{l=1}^{L-1} q_l d(r - r_l, q - q_l)$.

В результате расщепления двумерной некорректно поставленной задачи (1)–(4) на каждом отрезке $[t_n, t_{n+1}]$ получена не двумерная, а одномерная некорректно поставленная задача (8)–(10). Из схемы расщепления видно, что для вычисления $P(r, q, t_{n+1})$ –решения системы (1)–(4) при $t = t_{n+1}$ по заданному $P(r, q, t_n)$, $n = 0, 1, 2, \dots, N_t - 1$, необходимо сначала найти $P(r, q, t_{n+1/2})$ –решение одномерной задачи (5)–(7) при $t = t_{n+1/2}$ по заданному $P(r, q, t_n)$, а затем по уже вычисленному $P(r, q, t_{n+1/2})$ найти $P(r, q, t_{n+1})$ –решение одномерной некорректно поставленной задачи (8)–(10) при $t = t_{n+1}$. Построены разностные аналоги задач (5)–(7) и (8)–(10) и предложен метод их численной реализации.

В седьмом разделе главы рассматривается задача определения поля давления в пласте при неизвестных начальных и граничных условиях по заданной информации о давлении в отдельных точках двумерной расчетной области:

$$c(x) \frac{\partial P}{\partial t} = \operatorname{div}(s(x) \nabla P) - \sum_{l=1}^L q_l(t) d(x - x^l), \quad x = (x_1, x_2) \in W \subset E^2, \quad 0 < t \leq T,$$

$$P\Big|_{t=0} = j(x), \quad x \in \overline{W},$$

$$s(x) \frac{\partial P}{\partial n} = w(x,t)H(x) \quad (\text{или } P(x,t) = f(x,t)), \quad x \in \partial W, \quad 0 \leq t \leq T,$$

$$P(x^l, t) = p^l(t), \quad l = \overline{1, L},$$

где W – двумерная область фильтрации с гладкой границей ∂W , $\overline{W} = W + \partial W$; $c(x) = bH(x)$, $s(x) = k(x)H(x)/m$; $x^l = (x_1^l, x_2^l)$ – координаты и дебит l -ой скважины.

Для решения поставленной задачи предлагается вычислительный метод, основанный на использовании вариационной формулировки задачи и алгоритма регуляризации.

Вторая глава диссертации посвящена определению некоторых технологических параметров разработки нефтяных пластов на основе численных экспериментов. Известно, что для рациональной разработки нефтяного пласта необходимо знать время изменения режима разработки пласта. Знание времени смены упругого режима разработки на режим растворенного газа особенно важно для нефтяных пластов с высоким содержанием парафина. В первом разделе главы определение продолжительности разработки нефтяного пласта в упругом режиме сформулировано как задача оптимального управления по быстродействию: требуется найти такие управления $q_l(t)$, $l = \overline{1, L}$, удовлетворяющие условиям

$$0 \leq q_l(t) \leq \overline{q}_l, \quad l = \overline{1, L},$$

для которых решение уравнения

$$c(x) \frac{\partial P}{\partial t} = \operatorname{div}(s(x) \nabla P) - \sum_{l=1}^L q_l(t) d(x - x^l), \quad x = (x_1, x_2) \in W \subset E^2, \quad t > 0,$$

с начальным условием

$$P|_{t=0} = j(x), \quad x \in \overline{W},$$

и граничным условием

$$\frac{\partial P}{\partial n} \Big|_s = 0, \quad t \in [0, T],$$

удовлетворяло бы условию

$$\int_W (P(x, T) - p_s)^2 dx \leq e$$

за минимальное время T . При этом должно выполняться неравенство

$$P(x^l, t) \geq p_s, \quad l = \overline{1, L},$$

где W – двумерная область фильтрации с гладкой границей S , $\overline{W} = W + S$, p_s – давление насыщения нефти газом.

Для решения поставленной задачи оптимизации предложен подход, основанный на использовании методов проекции градиента в пространстве управляющих воздействий и половинного деления отрезка по временной переменной. Для численного решения краевой задачи используется метод переменных направлений.

Для выбора правильной стратегии разработки нефтяных месторождений, находящихся на поздней стадии разработки очень важной является оценка извлекаемых запасов нефти. В связи с этим во втором разделе рассматривается задача по определению извлекаемого запаса нефти на основании данных динамического ряда накопленного отбора нефти пластовой системы. Для описания изменения накопленного отбора нефти используется модель Гомпертца:

$$\frac{dQ}{dt} = Q(e - r \ln Q),$$

где t – время (год); $Q = Q(t)$ – описывает во времени изменение накопленного отбора нефти; e , r – параметры модели.

Для решения задачи определения извлекаемых запасов нефти, сводящейся к определению неизвестных параметров модели e , r предложен численный метод.

В третьем разделе исследуется вопрос определения технологического режима работы скважин при упругом режиме разработки пластов. На практике стремятся определить технологический режим таким образом, чтобы не происходил вынос частиц песка в скважину. Для этого необходимо

знать закономерность взаимодействия фильтрационных потоков с частицами песка в пористой среде. Предлагается и обосновывается следующая математическая модель движения твердой, сферической частицы песка в фильтрационном потоке однофазной жидкости в пористой среде:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{6m}{d_p r_p b} (u - v) - \frac{bg(r_p - r_f)}{r_p},$$

где $v(t)$ – скорость движения частицы; u – средняя скорость потока; d_p – диаметр частицы; b – коэффициент сопротивления; m – вязкость жидкости; b – расстояние, отсчитываемое от поверхности частицы; r_p, r_f – плотности частицы и жидкости. На основе предложенной модели исследуется движение частицы в фильтрационном потоке и определяется критическое значение скорости потока, при которой частица от неподвижного состояния переходит к движению. Полученные формулы позволяют определить тот технологический режим работы скважин, в котором не происходит вынос частиц песка в скважину.

При проектировании систем разработки и эксплуатации нефтяных месторождений необходимо знать термодинамические параметры. Параметрами, определяющими соотношение жидких и газообразных углеводородов в пласте, необходимых для подсчета запасов нефти и обоснования темпов добычи нефти, целесообразности применения методов воздействия на пласт, являются давление насыщения и объемный коэффициент нефти. В четвертом разделе рассматриваются вопросы определения давления насыщения и объемного коэффициента нефти на основе численного моделирования с использованием эксплуатационных данных скважин. Для определения давления насыщения предлагается использовать математическую модель движения газожидкостной смеси в стволе скважины

$$\frac{dp}{dz} = g[r_o(1-j) + r_g j], \quad 0 < z < L,$$

$$j = \frac{Q_g}{Q_g + Q_o}, \quad Q_g = [G_o - a(p - p_o)]Q_o \frac{p_o}{p}, \quad G_o = a(p_s - p_o),$$

где $p = p(z)$ – давление в точке z ствола скважины длиной L ; r_o, r_g – плотности нефти и газа; j – объемная концентрация газа; Q_o, Q_g – объемы нефти и свободного газа; a – коэффициент растворимости газа в нефти; p_o – атмосферное давление; Q_o – начальный газовый фактор, т.е. объем газа, растворенный в единице объема нефти при давлении насыщения p_s .

При этом давление на устье и на забое скважины считаются заданными

$$p|_{z=0} = p_1, \quad p|_{z=L} = p_2.$$

Получена явная формула для вычисления давления насыщения

$$p_s = \frac{(1 + G_o)(p_2 - p_1) - Lgr_o / p_o}{p_2 - p_1 + G_o \ln(p_2 / p_1) - Lgr_o / p_o}.$$

Для определения объемного коэффициента нефти предлагается метод, основанный на использовании математической модели нестационарного плоскорадиального течения однофазной жидкости в пористой среде.

Гидравлический разрыв пласта является одним из самых распространенных технологий извлечения нефти из низко проницаемых коллекторов. При проведении в скважине гидравлического разрыва пласта вокруг нее формируется система трещин. Для практики нефтедобычи важное значение имеет определение радиуса распространения системы трещин, образовавшейся при гидравлическом разрыве пласта. Традиционно для оценки гидродинамической эффективности гидравлического разрыва пласта используется уравнение притока нефти к скважине при стационарном режиме. В пятом разделе главы для определения радиуса распространения системы трещин предлагается использовать уравнение турбулентной фильтрации жидкости разрыва в пласте

$$c \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU) = 0,$$

$$-\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{m}{k}U + brU^2,$$

где $P = P(r, t)$ – давление; $U = U(r, t)$ – скорость фильтрации жидкости; b – коэффициент турбулентности; c – коэффициент сжимаемости пористой среды.

Получены формулы для определения радиуса распространения системы трещин и оценки гидродинамической эффективности гидравлического разрыва пласта.

Известно, что при проектировании и разработке многопластовых месторождений необходимо учитывать наличие гидродинамической связи между пластами. Однако в реальных нефтяных месторождениях определить условие на поверхности контакта между пластами практически не представляется возможным. В связи с этим важное значение имеет вопрос численного исследования многопластовых систем с учетом обменных процессов между пластами. В шестом разделе главы исследуется процесс фильтрации однофазной жидкости в двухпластовой системе при наличии гидродинамической связи между пластами. Сформулировано граничное условие на контакте между пластами с учетом обменного процесса между пластами. Предложен численный метод решения поставленной задачи.

Третья глава диссертации посвящена численному моделированию взаимного вытеснения жидкостей в пористой среде. Известно, что добыча нефти в большинстве случаев происходит при замещении ее в поровом пространстве продуктивного пласта водой как при естественных режимах эксплуатации, так и при искусственных методах поддержания пластового давления заводнением.

В первом разделе главы рассматривается вопрос моделирования процесса вытеснения нефти из пласта водой на основании информации, полученной из нагнетательной скважины или галереи в рамках модели двухфазного течения. Задача определения распределения давления и насыщенности вытесняющей фазы в процессе вытеснения сводится к следующей обратной задаче,

связанной с восстановлением граничного условия относительно уравнений двухфазного течения в пласте:

$$f \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(I(S_w) \frac{\partial P}{\partial x} \right),$$

$$\frac{\partial m S_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(I_w(S_w) \frac{\partial P}{\partial x} \right)$$

$$G = \{0 < x < L, 0 < t \leq T\},$$

$$P|_{t=0} = p_o(x), \quad S_w|_{t=0} = s_o(x),$$

$$P|_{x=0} = p_w(t), \quad -I_w(S_w) \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_w(t),$$

$$S_w|_{x=0} = s_w(t), \quad -I_o(S_w) \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_o(t),$$

где $S_w(x, t)$ – насыщенность вытесняющей фазы; $f = dm/dP$ – коэффициент объемной упругости пласта; $I_w(S_w) = kk_w(S_w)/m_w$, $I_o(S_w) = kk_o(S_w)/m_o$, $I(S_w) = I_w(S_w) + I_o(S_w)$; $m = m(P)$ – пористость пласта; m_w, m_o – вязкости воды и нефти; $k(S_w), k(S_o)$ – относительные фазовые проницаемости для воды и нефти; $q_o(t)$ – скорость фильтрации нефти на границе $x = L$.

Функция $q_o(t)$ считается неизвестной и подлежит определению вместе с функциями $S_w(x, t)$ и $P(x, t)$. Построен разностный аналог задачи с использованием метода «неявный по давлению, явный по насыщенности» и предложен вычислительный алгоритм решения полученной системы разностных уравнений. Предложенный численный метод позволяет в каждом временном слое последовательно определить распределение давления в пласте, скорость фильтрации нефти на границе пласта и распределение насыщенности вытесняющей фазы.

Проблема регулирования движения границы раздела двух жидкостей в режиме поршневого вытеснения нефти из пласта водой и в упруговодонапорном режиме является весьма актуальной при эксплуатации нефтяных месторождений.

Во втором разделе главы данная проблема формулируется в виде граничной обратной задачи для системы уравнений поршневого вытеснения нефти из пласта водой, заключающейся в определении давления в нагнетательной галерее, обеспечивающего перемещение границы раздела жидкостей по заданному закону:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_w}{\partial t} &= c_w \frac{\partial^2 P_w}{\partial x^2}, \quad (x,t) \in W^- = \{0 < x < s(t), 0 < t \leq T\}, \\ \frac{\partial P_o}{\partial t} &= c_o \frac{\partial^2 P_o}{\partial x^2}, \quad (x,t) \in W^+ = \{s(t) < x < L, 0 < t \leq T\}, \\ s(0) &= 0, \quad P_w|_{t=0} = 0, \quad P_o|_{t=0} = j(x), \\ P_w|_{x=0} &= f(t), \quad P_o|_{x=L} = x(t), \\ P_w|_{x=s(t)} &= P_o|_{x=s(t)}, \quad \frac{k}{m_w} \frac{\partial P_w}{\partial x} \Big|_{x=s(t)} = \frac{k}{m_o} \frac{\partial P_o}{\partial x} \Big|_{x=s(t)}, \\ m \frac{ds}{dt} &= - \frac{k}{m_i} \frac{\partial P_i}{\partial x} \Big|_{x=s(t)}, \quad i = w, o, \end{aligned}$$

где $c_w = k/(m_w b_w)$; $c_o = k/(m_o b_o)$, $P_w(x,t)$ – давление в водоносной части пласта; $P_o(x,t)$ – давление в нефтеносной части пласта; L – длина пласта; m – коэффициент пористости; $s(t)$ – текущее положение границы раздела жидкостей; k – коэффициент абсолютной проницаемости пласта; m_w – вязкость воды; m_o – вязкость нефти; b_w – коэффициент упругости водоносной части пласта; b_o – коэффициент упругости нефтеносной части пласта.

Закон перемещения границы раздела жидкостей $s(t)$ считается известным и задача состоит в определении функций $f(t)$, $P_w(x,t)$, $P_o(x,t)$.

Для приближенного решения обратной задачи предлагается вычислительный алгоритм, основанный на использовании методов выпрямления фронтов и разностной аппроксимации.

В третьем разделе главы проблема регулирования движения границы раздела двух жидкостей в упруговодонапорном режиме формулируется в

виде следующей граничной обратной задачи для уравнения упругого режима с активным продвижением контурных вод, заключающейся в определении давления в эксплуатационной галерее, обеспечивающего перемещение границы раздела жидкостей по заданному закону

$$\frac{\partial P}{\partial t} = c \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (x, t) \in W_s = \{0 < x < s(t), 0 < t \leq T\},$$

$$s(0) = L, \quad P|_{t=0} = j(x), \quad 0 \leq x \leq s(0),$$

$$P|_{x=0} = f(t), \quad P|_{x=s(t)} = p_s(t),$$

$$m \frac{ds}{dt} = - \frac{k}{m} \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=s(t)},$$

где $c = \frac{k}{mbm}$; $s(t)$ – текущее положение границы раздела вода–нефть; m – вязкость нефти; b – коэффициент объемного сжатия нефти.

Закон перемещения границы раздела жидкостей $s(t)$ считается известным и задача состоит в определении функций $f(t), P(x, t)$. Путем замены переменной $y = \frac{x}{s(t)}$, поставленная задача сводится к решению следующей

задачи

$$\frac{\partial P}{\partial t} = r(t) \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + u(y, t) \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (y, t) \in W = \{0 < y < 1, 0 < t \leq T\},$$

$$P|_{t=0} = j(y), \quad 0 \leq y \leq 1,$$

$$P|_{y=1} = p_s(t), \quad 0 < t \leq T,$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{y=1} = w(t), \quad 0 < t \leq T,$$

$$P|_{y=0} = f(t), \quad 0 < t \leq T,$$

$$\text{где } r(t) = \frac{c}{s^2(t)}; \quad u(y, t) = \frac{y}{s(t)} \frac{ds}{dt}; \quad w(t) = - \frac{ms(t)m}{k} \frac{ds}{dt}.$$

Применяя метод разностной аппроксимации, последняя задача сводится к решению системы разностных уравнений. Для решения полученной системы разностных уравнений предлагается вычислительный алгоритм.

В настоящее время физико-химические методы воздействия на нефтяные пласты считаются наиболее перспективными методами повышения нефтеотдачи пластов. При моделировании многие процессы физико-химического воздействия представляются как процесс фильтрации одной фазы с двумя компонентами и для описания этих процессов используют дифференциальное уравнение конвективной диффузии. Для определения охвата пласта воздействием при осуществлении физико-химических методов, а также для расчета всех технологических показателей процесса необходимо знать поля концентрации растворителя в пласте. В четвертом разделе главы для определения поля концентрации растворителя в пласте при физико-химическом воздействии используется одномерное уравнение конвективной диффузии:

$$m \frac{\partial c}{\partial t} = Dm \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - u \frac{\partial c}{\partial x}, \quad 0 < x < L, t > 0, \quad (11)$$

где $c = c(x, t)$ – объемная концентрация растворителя в пласте; D – коэффициент диффузии; m – коэффициент пористости; u – скорость фильтрации.

Предполагается, что концентрация растворителя на галерее, а также скорость нагнетания растворителя в пласт через галерею изменяются с течением времени по заданным законам:

$$c|_{x=0} = c_w(t), \quad t \geq 0, \quad (12)$$

$$-mD \frac{\partial c}{\partial x} + uc|_{x=0} = v(t), \quad t \geq 0. \quad (13)$$

Начальное распределение концентрации, а также концентрация растворителя на границе пласта считаются неизвестными. Задача (11)–(13) относится к классу гранично–ретроспективных обратных задач.

Для численного решения поставленной гранично–ретроспективной обратной задачи предлагается использовать следующую явную разностную схему

$$(1-g)\frac{c_i^{j+1} - c_i^j}{t} + g\frac{c_i^j - c_i^{j-1}}{t} = \frac{c_{i+1}^j - 2c_i^j + c_{i-1}^j}{h^2} - u\frac{c_i^j - c_{i-1}^j}{h}, \quad (14)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N-1,$$

$$c_0^j = c_w(t_j), \quad -\frac{c_1^j - c_0^j}{h} + uc_0^j = v(t_j), \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (15)$$

которая при $g < 1/2$ совпадает с разностной аппроксимацией уравнения гиперболического типа

$$e \frac{\partial^2 c_e}{\partial t^2} + \frac{\partial c_e}{\partial t} = \frac{\partial^2 c_e}{\partial x^2} - u \frac{\partial c_e}{\partial x}, \quad (16)$$

с начальными условиями

$$c_e|_{x=0} = c_w(t), \quad (17)$$

$$-\frac{\partial c_e}{\partial x} + uc_e|_{x=0} = v(t), \quad (18)$$

где $e = t(1-2g)/2$.

Предполагая существование решения задачи (16)–(18), доказывается ее единственность в треугольнике определенности дифференциального уравнения (16). Так как разностное уравнение (14) однозначно определяет c_{i+1}^j , поэтому численная реализация разностной схемы (14), (15) осуществляется по формулам

$$c_{i+1}^j = \frac{h^2(1-g)}{t}c_i^{j+1} - \frac{h^2g}{t}c_i^{j-1} - (1+hu)c_{i-1}^j + \left(2 + hu + \frac{(2g-1)h^2}{t}\right)c_i^j,$$

$$c_0^j = c_w(t_j), \quad c_1^j = (1+uh)c_0^j - hv(t_j).$$

Получено условие устойчивости разностной схемы (14), (15), налагающее на шаги h и t ограничение

$$\frac{h^2}{t} \leq \frac{2}{1-2g}.$$

Предложенный численный метод позволяет найти распределение концентрации растворителя в пласте при физико-химическом воздействии в любой момент времени.

В повышении эффективности разработки месторождений с нефтями повышенной вязкости важная роль отводится тепловым методам воздействия. Однако для установления оптимального технологического режима теплового воздействия необходимо знать температурное поле пласта. В пятом разделе главы рассматривается задача определения температурного поля, возникающего в нефтяном пласте при тепловом воздействии:

$$(mc_f + (1-m)c_p) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(I \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{q}{bH} c_f \frac{\partial T}{\partial x}, 0 < x < L, t > 0,$$

$$T|_{x=0} = T_w(t), \quad t \geq 0,$$

$$-bHI \frac{\partial T}{\partial x} + qc_f T|_{x=0} = Q(t), \quad t \geq 0,$$

где $T = T(x, t)$ – температура в пласте; $I = I(x)$ – коэффициент теплопроводности пласта; m – коэффициент пористости; c_f, c_p – объемные теплоемкости нефти и скелета пласта; $q(t)$ – дебит галереи.

Распределение температуры в начальный момент времени, а также температура на внешней границе пласта считаются неизвестными. Поставленная задача относится к классу граничных обратных задач без начальных условий. Для численного решения поставленной обратной задачи предлагается использовать следующую явную разностную схему

$$(1-g) \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{t} + g \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{t} =$$

$$= \frac{I}{h} \left[I_{i+1/2} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{h} - I_{i-1/2} \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{h} \right] + q^j \frac{T_{i+1}^j - T_{i-1}^j}{2h},$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N-1,$$

$$T_0^j = T_w(t_j),$$

$$-I(0) \frac{T_1^j - T_0^j}{h} + q^j T_0^j = Q(t_j), \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots$$

которая совпадает с разностной аппроксимацией уравнения гиперболического типа

$$e \frac{\partial^2 T_e}{\partial t^2} + \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(I \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) + q \frac{\partial T_e}{\partial x},$$

где $e = t(1 - 2g) / 2$.

Предложенный метод позволяет найти распределение температуры в пласте в любой момент времени.

Четвертая глава диссертации посвящена моделированию процессов течения различных сред по трубам.

В первом разделе главы исследуется процесс стационарного течения сжимаемой вязкой жидкости в горизонтальной цилиндрической трубе. На основе математической модели исследуемого процесса зависимость между перепадом давления и средней скоростью течения путем введения безразмерного коэффициента гидравлического сопротивления записывается в виде уравнения Дарси–Вейсбаха. Получена явная формула для коэффициента гидравлического сопротивления. Из формулы следует, что при стационарном течении сжимаемой вязкой жидкости в трубе коэффициент гидравлического сопротивления зависит не только от числа Рейнольдса, но и от одной безразмерной величины – от числа Маха, которое может быть рассмотрено как мера сжимаемости протекающей жидкости.

Известно, что все современные промышленные способы бурения нефтяных и газовых скважин как одну из обязательных технологических операций предусматривают промывку забоя. Промывка скважин заключается в выносе частиц выбуренной породы восходящим потоком промывочной жидкости на поверхность земли. Очевидно, что для управления процессом промывки забоя скважин необходимо знать закономерности движения частиц выбуренной породы в потоке промывочной жидкости.

Во втором разделе главы рассматривается движение одиночной сферической частицы выбуренной породы в потоке вязкопластической жидкости, поднимающейся вертикально вверх по кольцевому межтрубному пространству. Используя полуэмпирическую теорию турбулентности Прандтля, разработана математическая модель рассматриваемого процесса

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(r_f - r_p)g}{r_p} + \frac{3}{Rr_p} \left[t_0 + h \frac{U - V}{b} + r_f l^2 \left(\frac{U - V}{b} \right)^2 \right],$$

где $V = V(t)$ – скорость движения частицы; U – средняя скорость потока вязкопластической жидкости; r_p, r_f – плотности частицы и жидкости; b – расстояние, отсчитываемое от поверхности частицы; $l = cy$, c – универсальная постоянная Кармана; y – наименьшее расстояние от стенок кольцевого канала до поверхности частицы; t_0 – динамическое напряжение сдвига; h – пластическая вязкость; R – радиус частицы.

На основе предложенной модели получена явная формула для скорости движения частицы

$$V(t) = U + \frac{bh}{2r_f l^2} - \frac{bg(l - 1^{-kt})}{1 + 1^{-kt}},$$

а также скорость установившегося движения частицы

$$V_\infty = U + \frac{bh}{2r_f l^2} - bg.$$

Исследовано влияние средней скорости потока и реологических параметров вязкопластической жидкости на скорость установившегося движения частицы. Предложен численный метод решения задачи по определению средней скорости потока вязкопластической жидкости, обеспечивающей транспортировку частицы по заданному условию.

С течением двухфазных сред в трубах приходится сталкиваться почти во всех отраслях нефтегазового производства, в том числе при газлифтном способе эксплуатации нефтяных скважин. При газлифтном способе

эксплуатации нефтяных скважин важным является определение технологического режима работы газлифтного подъемника.

В третьем разделе главы исследуется движение двухфазной газожидкостной смеси в подъемной трубе газлифтной скважины. Для описания исследуемого процесса предложена следующая модель

$$\frac{dp}{dz} = g(j r_g + (1-j) r_o) + \frac{l}{2d} (j r_g v_g^2 + (1-j) r_o v_o^2) - \left(j v_g r_g \frac{dv_g}{dz} + (1-j) v_o r_o \frac{dv_o}{dz} \right), \quad 0 < z < L,$$

$$s j r_g v_g = Q_g r_g = const,$$

$$s(1-j) r_o v_o = Q_o r_o = const,$$

$$\frac{j}{1-j} = \frac{v_g}{v_o}, \quad Q_g = \frac{p_a}{p} Q_g^a, \quad p = r_g g R T \bar{Z}, \quad r_o = const,$$

где $p = p(z)$ – давление; j – концентрация газовой фазы; v_g, r_g и v_o, r_o – соответственно скорость и плотность газовой и нефтяной фазы; l – коэффициент гидравлического сопротивления; d – диаметр подъемной трубы; Q_g – объем закачиваемого газа; Q_o – дебит по нефти; $s = pd^2/4$; R – газовая постоянная, Q_g^a – объем закачиваемого газа при атмосферном давлении p_a .

На основе предложенной модели разработан численный метод определения технологического режима работы газлифтных скважин.

В четвертом разделе главы исследуются некоторые задачи трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. В 4.4.1 рассматривается задача выбора режима работы насосной станции, расположенной на участке трубопровода. Для математического описания данной задачи используется одномерная математическая модель стационарного движения вязкой жидкости по трубопроводу

$$ru \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} - p_x d(x-x) = \frac{4}{d} t_m,$$

$$\frac{du_r}{dx} = 0,$$

$$p|_{x=0} = p_0, \quad p|_{x=l} = p_l,$$

$$Sur|_{x=0} = m, \quad Sur|_{x=l} = m,$$

где $p = p(x)$ – давление в точке x ; $u = u(x)$ – средняя по поперечному сечению трубопровода скорость движения перекачиваемой жидкости; $d(x)$ – дельта функция Дирака; t_m – касательное напряжение на стенке трубопровода; S – площадь поперечного сечения трубопровода; x – точка расположения насосной станции; p_x – давление на выходе насосной станции. Давление на выходе насосной станции p_x считается неизвестным. Предложен аналитический метод решения поставленной задачи и получена явная формула для определения режима работы насосной станции

$$p_x = \left(1 - \frac{m^2 b}{r_a S^2}\right)(p_l - p_0 + kl),$$

где $k = \frac{32m/d^2}{Sr_a/m - bm/S}$.

В 4.4.2 исследуется задача обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов в трубопроводах. Для математического описания этой задачи используется следующая одномерная математическая модель стационарного движения вязкой жидкости по трубопроводу

$$ru \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} = \frac{4}{d} t_m,$$

$$\frac{dur}{dx} = -\frac{m_x}{S} d(x-x),$$

$$p|_{x=0} = p_0, \quad p|_{x=l} = p_l,$$

$$Sur|_{x=0} = m_0, \quad Sur|_{x=l} = m_l,$$

где m_x – массовый расход на утечку за единицу времени.

Предполагается, что место утечки x и массовый расход в ней m_x не известны и подлежат определению. Предложен аналитический метод

решения задачи и получены явные формулы для определения массового расхода на утечку и места утечки в трубопроводе

$$m_x = m_0 - m_l,$$

$$x = \frac{p_0 - p_l - k_+ l}{k_- - k_+},$$

где $k_- = \frac{32m/d^2}{Sr_a/m_0 - bm_0/S}$, $k_+ = \frac{32m/d^2}{Sr_a/m_l - bm_l/S}$.

Известно, что в процессе промывки скважин невыполнение ряда технологических ограничений может привести к гидравлическому разрыву пласта, т.е. уходу промывочной жидкости из кольцевого пространства скважины в пласт. В таких ситуациях важное значение имеет определение места возникновения гидравлического разрыва пласта.

В пятом разделе главы рассматривается задача определения места возникновения гидравлического разрыва пласта при промывке скважин. Предложена математическая модель процесса транспортировки частиц, выбуренных пород потоком промывочной жидкости в кольцевом пространстве скважины в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dp}{dz} = g(j r_p + (1-j) r_f) + \frac{l}{2(d_1 - d_2)} (j r_p v^2 + (1-j) r_f u^2) -$$

$$- \left(j r_p v \frac{dv}{dz} + (1-j) r_f u \frac{du}{dz} \right), \quad 0 < z < L,$$

$$\frac{d}{dz} (j r_p v) = 0,$$

$$\frac{d}{dz} ((1-j) r_f u) = \frac{m_f}{s} d(z-x),$$

$$r_p = const, \quad r_f = const, \quad \frac{j}{1-j} = \frac{v}{u},$$

где $p = p(z)$ — давление; r_f, u и r_p, v — соответственно плотность и средняя по поперечному сечению кольцевого пространства скорость движения

промывочной жидкости и частиц выбуренных пород; I – коэффициент гидравлического сопротивления; d_1, d_2 – наружный и внутренний диаметры кольцевого пространства; s – площадь поперечного сечения кольцевого пространства; j – объемная концентрация частиц выбуренных пород в потоке промывочной жидкости; m_f – масса промывочной жидкости, поглощаемая пластом за единицу времени вследствие гидравлического разрыва.

Давление и массовые расходы промывочной жидкости и частиц выбуренных пород на устье и на забое скважины считаются заданными :

$$\begin{aligned} p|_{z=0} &= p_0, & p|_{z=l} &= p_l, \\ sj r_p v|_{z=0} &= sj r_p v|_{z=l} = M_p, \\ s(I-j) r_f u|_{z=0} &= M_0, & s(I-j) r_f u|_{z=l} &= M_l. \end{aligned}$$

При этом координаты гидравлического разрыва пласта, а также массовый расход промывочной жидкости на поглощение считаются неизвестными. Построено аналитическое решение полученной системы и получена явная формула для определения места возникновения гидравлического разрыва пласта.

При исследовании и практических расчетах трубопроводов в качестве одной из исходной величин задается объемный расход жидкости, который служит основной характеристикой производительности трубопровода. С другой стороны важнейшим показателем функционирования любого трубопровода является перепад давления, знание которого диктуется эксплуатационной необходимостью. Определение перепада давления при заданных расходах жидкости является одной из основных задач исследования течения жидкости в трубопроводах. В шестом разделе главы предлагается метод определения перепада давления для заданного расхода жидкости, основанный на использовании математической модели нестационарного течения неньютоновской жидкости в трубе

$$r \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r F \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) \frac{\partial u}{\partial r} \right] + f(t), \quad 0 < r < R, \quad 0 < t \leq T,$$

$$u(r, 0) = j(r),$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=0} = 0,$$

$$u(R, t) = I(t), \quad \int_0^R 2pru dr = Q(t),$$

где $F(z) = k|z|^{g-1}$; $u(r, t)$ – скорость течения жидкости; ρ – плотность,

$f(t) = -\frac{\partial P}{\partial x}$ – закон изменения перепада давления; R – радиус трубы; k, g –

параметры консистенции, характеризующие отклонения свойств данной жидкости от закона Ньютона (если $g = 1$, то уравнение описывает течение вязкой жидкости, а при $g < 1$ и $g > 1$ – соответственно, псевдопластической и дилатантной жидкостей).

Аналогичная задача рассматривается для процесса нестационарного течения несжимаемой ньютоновской жидкости в горизонтально расположенной цилиндрической трубе

$$r \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{m}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial u}{\partial r} \right] + f(t), \quad 0 < r < R, \quad 0 < t \leq T,$$

$$u(r, 0) = j(r), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad u(R, t) = 0,$$

$$\int_0^R 2pru dr = Q(t).$$

Для определения перепада давления $f(t)$ получена следующая формула

$$f(t) = \frac{r}{\rho R^2} \frac{dQ}{dt} - \frac{2r}{R^2} \frac{dW(R, t)}{dt},$$

где функция $W(r, t)$ является решением краевой задачи

$$r \frac{\partial W}{\partial t} = m \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} - \frac{m}{r} \frac{\partial W}{\partial r}, \quad r \in (0, R), \quad t \in (0, T],$$

$$W(r, 0) = y(r), \quad r \in [0, R],$$

$$W(0,t) = 0, \quad t \in (0,T],$$

$$-\frac{\partial W}{\partial r} + \frac{2}{R}W \Big|_{r=R} = \frac{Q}{pR}, \quad t \in (0,T].$$

Пятая глава диссертации посвящена построению и исследованию гидродинамических моделей в нефтегазовой экологии. Известно, что утечка нефти и нефтепродуктов, возникающая при повреждении магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов, резервуаров, а также разливы нефти при авариях различного нефтяного оборудования приводят к загрязнению прилегающих грунтовых участков. Как последствия, так и связанные с ними материальные убытки определяются размерами и степенью загрязнения грунтовой среды. В первом разделе для исследования и оценки глубины загрязнения грунтовой среды при растекании нефти и нефтепродуктов по дневной поверхности предлагается следующая математическая модель процесса инфильтрации нефти и нефтепродуктов в грунт:

$$\frac{d^2 h^2}{dt^2} + a \frac{dh^2}{dt} = 2gh + 2gH(1 - e^{-t/T}) + c(1 - e^{-t/T}), \quad t \in (0,T],$$

$$h|_{t=0} = 0, \quad \frac{dh}{dt} \Big|_{t=0} = 0,$$

где $a = \frac{8m}{r_o R^2}$; $c = \frac{4s \cos q_o}{r_o R}$; $h = h(t)$ – глубина просачивания нефти в

грунт; $\frac{dh}{dt}$ – скорость движения; r_o – плотность нефти; H – толщина нефтяной пленки; s – коэффициент поверхностного натяжения нефти; T – время релаксации процесса смачивания; R – радиус капилляра.

На основе предложенной модели разработан вычислительный алгоритм по определению глубины просачивания нефти и нефтепродуктов в грунт.

Проблема загрязнения морей и океанов нефтью и нефтепродуктами входит в число актуальных мировых проблем. При планировании и проведении работ по борьбе с аварийными нефтяными разливами в море возникает необходимость в прогнозировании распространения нефти в море.

Во втором разделе главы рассматривается процесс растекания нефтяной пленки, образовавшейся при разливе нефти в морскую среду. Предложена математическая модель данного процесса в виде нелинейного дифференциального уравнения с частными производными

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h^4}{\partial r} \right),$$

где $a = \frac{r_o b g}{4m}$; $h = h(r, t)$ – толщина нефтяной пленки; $b = (r_w - r_o) r_o^{-1}$,

r_w, r_o – плотность воды и нефти соответственно; r – радиальная координата.

Начальное распределение пленки представляется в виде сосредоточенного мгновенного источника с мощностью V_0 . Принимается следующее граничное условие:

$$h(r, t) = 0 \text{ при } r \rightarrow \infty, t \geq 0.$$

Предложен метод построения аналитического решения поставленной задачи и получены явные формулы для определения размеров нефтяной пленки

$$h(r, t) = \begin{cases} \frac{\sqrt[3]{3}}{4} \left(\frac{V_0}{2pat} \right)^{1/4} \left[x_0^2 - \frac{r^2}{(V_0^3 at / 8p^3)^{1/4}} \right]^{1/3}, & r \leq r_k(t), \\ 0, & r \geq r_k(t), \end{cases}$$

$$r_k(t) = x_0 \left(\frac{V_0^3 at}{8p^3} \right)^{1/8}, \quad h(0, t) = \frac{\sqrt[3]{3}}{4} \left(\frac{V_0}{2pat} \right)^{1/4} x_0^{2/3},$$

где $r_k(t)$ – радиус круга нефтяной пленки; $h(0, t)$ – максимальная толщина нефтяной пленки.

На практике для ограничения площади загрязнения и сохранения разлившейся нефти чаще всего используют защитные дамбы. Однако обычные защитные дамбы из однородного грунта могут применяться только в течении непродолжительного времени вследствие фильтрации нефти. Поэтому при построении как временных, так и постоянных земляных дамб с целью ограничения площади загрязнения и сохранения разлившейся нефти очень важно знать время фильтрации нефти через тело дамбы. В третьем

разделе главы рассматривается процесс фильтрации нефти через прямоугольную дамбу из однородного грунта на непроницаемом горизонтальном основании, построенную с целью ограничения площади загрязнения и сохранения разлившейся при аварии нефти. На основе гидравлической теории безнапорного движения составлена математическая модель данного процесса:

$$m \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(kH \frac{\partial H}{\partial x} \right), \quad 0 < x < L, \quad t > 0,$$

$$H|_{t=0} = 0, \quad 0 \leq x \leq L,$$

$$H|_{x=0} = H_a(t), \quad t > 0,$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad \text{при} \quad t \leq t_0,$$

где $H = H(x, t)$ – глубина потока; $k(x)$ – коэффициент фильтрации; m – пористость грунта.

Учитывая особенности нелинейного уравнения, для численного решения поставленной задачи используется дифференциально–разностный метод. В результате исходная задача сводится к задаче Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. На основе предложенного метода проведены численные эксперименты по определению основной характеристики процесса – времени прорыва нефти на выходном сечении дамбы. С помощью численного эксперимента изучено влияние различных параметров на время фильтрации нефти через тело дамбы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложен численный метод определения перепада давления для заданного расхода при нестационарном течении неньютоновской жидкости в трубе.
2. Исследована краевая задача фильтрации однофазной жидкости в двухпластовой системе, для которой выявлено условие неединственности

решения стационарной и нестационарной краевых задач с квадратичными нелинейностями.

3. Разработан численный метод решения задачи фильтрации однофазной жидкости в цилиндрическом пласте с неклассическим краевым условием.

4. Предложена математическая модель, учитывающая инерционные эффекты, проявляемые при высоких скоростях фильтрации жидкостей в пористой среде. Определены основные характеристики стационарных прямолинейно-параллельных и плоскорадиальных фильтрационных потоков.

5. Предложена математическая модель притока жидкости к гидродинамически несовершенным по характеру вскрытия пласта скважинам, выведено условие совместимости течения жидкости в пласте и в стволах скважин.

6. Предложен метод определения технологического режима работы газлифтных скважин, основанный на использовании математической модели движения газожидкостной смеси в подъемной трубе.

7. Предложена математическая модель процесса инфильтрации нефти и нефтепродуктов в грунт. Исследован процесс загрязнения грунтовой среды при растекании нефти и нефтепродуктов по дневной поверхности.

8. Предложен метод обнаружения места утечки нефти и нефтепродуктов при трубопроводном транспорте, основанный на использовании одномерной математической модели стационарного движения сжимаемой жидкости по трубопроводу.

9. Построена и исследована математическая модель движения частиц выбуренной породы в потоке вязкопластической жидкости, поднимающейся вертикально вверх по кольцевому межтрубному пространству.

10. Определение продолжительности разработки нефтяного пласта в упругом режиме сформулировано как задача оптимального по быстродействию управления и предложен численный метод ее решения.

11. На основе математической модели турбулентной фильтрации однофазной жидкости в пласте предложен метод определения радиуса распространения системы трещин, образовавшейся при гидравлическом разрыве пласта.

Получена формула для оценки гидродинамической эффективности гидравлического разрыва пласта.

12. Предложена и исследована математическая модель процесса растекания нефтяной пленки, образовавшейся при разливе нефти в море.

13. Предложен численный метод решения обратной задачи по восстановлению граничного режима в процессе поршневого вытеснения нефти из пласта водой по заданному закону движения границы раздела жидкостей.

14. Для описания упруговодонапорного режима разработки пласта предложена математическая модель типа Стефана с неизвестной границей раздела жидкостей. Предложен вычислительный алгоритм для решения обратной задачи по восстановлению условия на границе раздела жидкостей.

15. Разработан вычислительный алгоритм для решения обратной задачи, связанной с восстановлением начального и граничного условий, возникающей при тепловых и физико-химических методах воздействия на нефтяные пласты.

16. Предложен численный метод решения обратных задач, связанных с восстановлением граничных условий для уравнения однофазного и двухфазного течений в пласте.

В заключении выражаю глубокую благодарность своему научному консультанту д.ф.–м.н., профессору К.Р. Айда-заде за постоянное внимание к работе, ценные обсуждения и поддержку.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гамзаев Х.М. Решение задачи о притоке жидкости к укрупненной скважине// **Материалы XI Республиканской конференции молодых ученых по математике и механике**, Баку, 16-17 июнь 1994, с.53–56.

2. Гамзаев Х.М., Ширинов К.Ф. К моделированию течения неньютоновской жидкости в трубе// **Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук**, 1995, Т. XVI, №1-2, с.52–57.

3. Гамзаев Х.М., Широнов К.Ф., Исмаилов С.Р. Идентификация модели фильтрации вязкопластичной жидкости// **Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук**, 1995, Т. XVI, №5-6, с.65–69.
4. Гамзаев Х.М. О неединственности решений одной краевой задачи фильтрации//**Нефть и газ**, 1996, №1-2, с.58–61.
5. Гамзаев Х.М., Гусейнзаде С.О, Керимова С.Р., Широнов К.Ф. Решение одного класса неклассических краевых задач теории фильтрации//Труды конференции **«Новые информационные технологии и проблемы прикладной математики»**, Баку: Издательство Бакинский университет, 1997, с.38–39.
6. Гамзаев Х.М., Широнов К.Ф. Об одном методе моделирования двумерных пластовых систем// **Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук**, 1997, Т. XVII, №1-3, с.64–68.
7. Гамзаев Х.М., Широнов К.Ф. К моделированию двухфазного течения в пористой среде// **Труды международного симпозиума «Проблемы математического моделирования, управления и информационных технологий в нефтегазовой промышленности»**, Баку 21-26 сентября 1998, с.144–146.
8. Гамзаев Х.М., Гусейнзаде С.О., Камбаров А.А., Алиев В.С. Об одном подходе к решению одной неклассической задачи теории фильтрации// **Труды международного симпозиума «Проблемы математического моделирования, управления и информационных технологий в нефтегазовой промышленности»**, Баку 21-26 сентября 1998, с.146–148.
9. Gamzaev Kh.M., Yusifov S.I., Agayev F.H., Aliev I.M., Kuliyeв R.A. On Liquid Chaotic Flow//**Third International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing**, Wiesbaden, Germany, October 5-7, 1998, pp.309–311.
10. Гамзаев Х.М., Юсифов С.И. Определение характеристики газлифтной скважины на основе численного эксперимента//**Материалы международной**

научно-практической конференции « Хазарнефтегазятаг- 1998», Баку, 10-13 ноября 1998, с. 37–38.

11. Гамзаев Х.М., Юсифов С.И. К моделированию газлифта// **Азербайджанское нефтяное хозяйство**, 1998, №4, с.32–33.

12. Гамзаев Х.М., Широнов К.Ф. К определению коэффициента гидравлического сопротивления// **Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук**, 1998, Т. XVIII, №6, с.143–146.

13. Гамзаев Х.М., Широнов К.Ф. Обобщение закона фильтрации однофазных жидкостей// **Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук**, 1998, Т. XVIII, №6, с.77–81.

14. Гамзаев Х.М., Широнов К.Ф. Об одном численном методе определения характеристик газлифтной скважины// **Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук**, 1999, Т. XIX, №3-4, с.33–36.

15. Гамзаев Х.М., Гамбаров А.А. К определению давления насыщения// **Азербайджанское нефтяное хозяйство**, 1999, №5, с.5–7.

16. Гамзаев Х.М. Моделирование фильтрационных процессов в пласте с учетом инерционных эффектов// **Тезисы докладов международной научно-практической конференции « Хазарнефтегазятаг- 2000»**, Баку, 2000, с. 107.

17. Гамзаев Х.М., Широнов К.Ф., Рустамова С.А. Численный метод определения объемного коэффициента жидкости при давлении насыщения// **Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук**, 2000, Т. XX, №2-3, с.44–49.

18. Гамзаев Х.М., Широнов К.Ф. Численное моделирование двухфазного течения в пласте с учетом инерционных эффектов// **Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук**, 2001, Т. XX1, №3, с.42–46.

19. Гамзаев Х.М., Исмаилов Г.Г., Гусейнзаде С.О. Моделирование процесса распространения утечек из нефтепроводов в окружающей среде// **Материалы международной конференции «Международное и региональное значение трубопровода Баку-Тбилиси-Джейхан»**, Баку, 6-7 июня 2002, с. 84–85.

20. Гамзаев Х.М., Исмаилов Г.Г. О моделировании процесса загрязнения грунта при повреждении нефтепроводов// **Материалы международной научно-технической конференции «Наука-образование-производство в решении экологических проблем»**, Уфа, 2002, с. 44–46.
21. Гамзаев Х.М., Бабаева Е.А. Численное моделирование однофазного течения в пласте по обобщенному закону фильтрации// **Известия Высших Технических Учебных Заведений Азербайджана**, 2002, №1(17), с.22–26.
22. Гамзаев Х.М., Исмаилов Г.Г. Моделирование процесса инфильтрации при разливе нефти в грунт// **Азербайджанское нефтяное хозяйство**, 2002, №4, с.58–61.
23. Гамзаев Х.М. Численное исследование упругого режима разработки пластов// **Материалы международной научно-практической конференции «Хазарнефтегазтаг- 2002»**, Баку, 18-20 ноября 2002, с. 146-150.
24. Гамзаев Х.М., Широин К.Ф. Численный метод решения одной неклассической задачи математической физики// **Труды Республиканской научной конференции «Современные проблемы информатизации, кибернетики и информационных технологий»**, III том, Баку, 28-30 апреля 2003, с.27–28.
25. Гамзаев Х.М. Об одной модели течения однофазной жидкости в пласте// **Известия Высших Технических Учебных Заведений Азербайджана**, 2003, №1, с.16–19.
26. Гамзаев Х.М. Моделирование притока жидкости к скважине, гидродинамически несовершенной по характеру вскрытия пласта// **Азербайджанское нефтяное хозяйство**, 2003, №5, с.2–5.
27. Гамзаев Х.М. Моделирование однофазного течения в системе пласт-скважина// **Материалы международной научно-практической конференции «Хазарнефтегазтаг- 2004»**, Баку, 2004, с. 323-327.
28. Гамзаев Х.М. Моделирование нестационарного движения однофазных жидкостей к перфорированной скважине// **Труды II Республиканской научной конференции «Современные проблемы информатизации,**

кибернетики и информационных технологий», III том, Баку, 26-28 октября 2004, с.18–20.

29. Gamzaev Kh.M. Investigation of solutions of one Class of Optimal Control Problems with Distributed Parameters // **Abstracts the 1st International Conference on « Control and Optimization with Industrial Applications», COIA-2005**, Baku, May, 22-25, 2005, p.50.

30. Гамзаев Х.М., Ширинов К.Ф. Численный метод решения двумерного уравнения фильтрации в полярных координатах//**Материалы международной конференции «Проблемы Кибернетики и Информатики»**, Баку, 24-26 октября 2006, с. 101–104.

31. Гамзаев Х.М. Об одном численном методе исследования скважин// Сборник тезисов **международной научно-практической конференции « Хазарнефтегазтаг- 2006»**, Баку, 25-26 октября 2006, с. 90–91.

32. Гамзаев Х.М. Метод определения извлекаемых запасов нефти по данным разработки// **Нефтяное хозяйство**, Москва, 2007, №3, с.70–71.

33. Гамзаев Х.М. Моделирование движения одиночной частицы в восходящем потоке вязкопластической жидкости// **Математическое моделирование**, Москва, 2007, Т. 19, №3, с.87–93.

34. Гамзаев Х.М. Некоторые задачи трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов// http://www.ogbus.ru/authors/Gamzaev/Gamzaev_2pdf. **Нефтегазовое дело, электронный научный журнал**, 28.12.2007.

35. Гамзаев Х.М., Мехтиев Ш.Г. Метод численного моделирования течения однофазной жидкости в двумерном круговом пласте//**Материалы международной научно-практической конференции « Хазарнефтегазтаг- 2008»**, Баку,2008, с. 58–60.

36. Гамзаев Х.М., Гусейнзаде С.О. Метод расчета гидравлического разрыва пласта //**Материалы международной научно-практической конференции « Хазарнефтегазтаг- 2008»**, Баку,2008, с. 60–62.

37. Gamzaev Kh.M. A Numerical Method of Solving an Inverse Problem of the Theory of Single-Phase Fluid Filtration Process// **Abstracts the 2nd International**

Conference on « Control and Optimization with Industrial Applications», COIA-2008, Baku, June, 2-4, 2008, p.99.

38. Gamzaev Kh.M. A Numerical Method of the Decision of an Incorrect Problem Two Phase Flow in a Layer// The 2nd International Conference «Problems of Cybernetics and Informatics», PCI-2008, Baku, September, 10-12, 2008, pp.72–75.

39. Gamzaev Kh.M. Optimal Control of the Elastic Development of an Oil Pool//**Automatic Control and Computer Sciences**, 2008, Vol.42, №2, pp.83–88//www.springer.com/computer/.

40. Гамзаев Х.М. Метод обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов в трубопроводах//**Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности**, Москва, 2008, №2, с. 24–25.

41. Гамзаев Х.М. О технологическом режиме работы скважин//**Нефтепромысловое дело**, Москва, 2008, №10, с.45–48.

42. Гамзаев Х.М. Моделирование упругого режима разработки пластов системой гидродинамически несовершенных скважин// **Электронное моделирование**, Киев, 2008, т.30, №5, с.107–114.

43. Gamzaev Kh.M. Numerical Solution of Incorrect Problem of Single-Phase Flow in Two-Dimensional Oil Pool//**Journal of Automation and Information Sciences**, 2008, Vol.40, №9, pp.36–47//www.begellhouse.com/journals/.

44. Гамзаев Х.М. Метод определения места гидравлического разрыва пласта при промывке скважин//**Газовая промышленность**, Москва, 2008, №11, с.86–87.

45. Гамзаев Х.М. Определение технологического режима работы газлифтных скважин//**Автоматизация и современные технологии**, Москва, 2009, №1, с.25–28.

46. Гамзаев Х.М. Метод расчета земляных дамб, применяемых при аварийных разливах нефти// **Нефтяное хозяйство**, Москва, 2009, №2, с.122–123.

47. Gamzaev Kh.M. Modeling the Spread of an Oil Slick on the Sea Surface//**Journal of Applied Mechanics and Technical Physics**, 2009, Vol.50, №3, pp.466–469// www.springer.com/physics/.
48. Gamzaev Kh.M. One Method of Calculation of the Hydraulic Fracturing of a Formation//**Journal of Engineering Physics and Thermophysics**, 2009, Vol.82, №6, pp.1110–1113// www.springer.com/physics/.
49. Гамзаев Х.М. Разностный метод решения одной обратной задачи двухфазной фильтрации//Материалы международной научно-практической конференции «**Актуальные проблемы математики, информатики, механики и теории управления**», Алматы, 19-20 ноября 2009, часть 1, с.141–143.
50. Гамзаев Х.М. Численный метод решения гранично-ретроспективной обратной задачи для параболических уравнений//Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «**Информационные технологии и математическое моделирование**», Томск, 12-13 ноября 2009, часть 2, с.198–201.
51. Гамзаев Х.М. Численное моделирование фильтрации однофазной жидкости в двухпластовой системе// **Нефтепромышленное дело**, Москва, 2010, №2, с.16–18.
52. Gamzaev Kh.M. Determination of the Temperature Field in a Seam while Thermal Effects on the Basis Solving the Inverse Problem //**Journal of Automation and Information Sciences**, 2010, Vol.42, №5, pp.53–60//www.begellhouse.com/journals/.
53. Гамзаев Х.М. Численный метод решения одной обратной задачи смешивающегося вытеснения//Сборник научных трудов «**Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии**», Киев: НПВК Триакон, 2010, №2(4), с. 216–219.
54. Гамзаев Х.М. Моделирование стационарного течения однофазной жидкости в пласте с учетом инерционных эффектов//Тематический сборник

научных статей «**Краевые задачи и математическое моделирование**», Новокузнецк: НФИ ГОУ Кем.ГУ, Т.2, 2010, с.5–9.

55. Gamzaev Kh.M. Difference Method of Solving an Inverse Problem for the convective diffusion equation//**Journal of Engineering Physics and Thermophysics**, 2011, Vol.84, №3, pp.526–532// www.springer.com/physics/.

56. Gamzaev Kh.M. Numerical Method of Solution to a Boundary Inverse Problem of Two-Phase Flow// **Book of Abstracts Congress of the Turkic World Mathematical Society**. Баку, 1-3 July 2011, p.374.

57. Гамзаев Х.М. Метод численного моделирования прямолинейно-параллельного фильтрационного потока упругой жидкости в пласте// Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «**Математика и математическое моделирование**», Саранск, 13-14 октября 2011, Мордовский государственный педагогический институт имени М.Е.Евсевьева, с.52–56.

58. Гамзаев Х.М., Шукюрова Н.А., Бабаева Е.А. Метод численного моделирования двухфазного течения в двухмерном пласте//Сборник научных трудов «**Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии**», Киев: НПВК Триакон, 2011, №3(8), с. 57–60.

59. Гамзаев Х.М. Определение нестационарного поля давлений при упругом режиме пласта по данным точечных наблюдений//**Электронное моделирование**, Киев,2012, т.34, №4, с.79–87.

60. Gamzaev Kh.M. Numerical Method of Solving the Inverse Problem of Water-Oil Plug Displacement from an Oil Pool//**Journal of Engineering Physics and Thermophysics**, 2012, Vol.85, №5, pp.1004–1010// www.springer.com/physics/.

61. Gamzayev H.M. Restoration of Boundary Mode for Two-phase Flow in Oil Pool// **Journal of Automation and Information Sciences**, 2012, Vol.44, №8, pp.22–31//www.begellhouse.com/journals/.

62. Гамзаев Х.М. Ободной модели поршневого вытеснения нефти из пласта водой//Тезисы докладов II международной научно-практической

конференции «**Новые технологии в нефтегазодобыче**», Баку, 6-7 сентября 2012, с.120–121.

63. Gamzaev Kh.M., Babaev A.M., Huseynzade S.O. Method of Numerical Modelling of Elastic Water Drive Mode of Development of Layer// PCI'2012, IV International Conference «**Problems of Cybernetics and Informatics**», Vol. III, September 12-14, 2012, Baku, p.26–28.

64. Гамзаев Х.М. Численное моделирование упруговодонапорного режима пласта//Тезисы 12-ой международной научно-технической конференции «**Проблемы информатики и моделирования**», Ялта, 24-30 сентября 2012, с.21.

65. Гамзаев Х.М. Численный метод решения обратной задачи упруговодонапорного режима разработки пласта//**Вычислительная механика сплошных сред**, 2012, Т.5, №4, с.392–396//www.icmm.ru/journal/.

Личный вклад соискателя в работах, выполненных в соавторстве :

[2]–разработка метода численного моделирования течения неньютоновской жидкости в трубе;

[3]–разработка алгоритма идентификации модели фильтрации вязкопластичной жидкости;

[5],[8],[24]–разработка численного метода решения определенного класса неклассических краевых задач теории фильтрации;

[6],[7],[13],[18],[21],[58]–построение математической модели фильтрации жидкостей с учетом инерционных эффектов и разработка методов численного моделирования однофазного и двухфазного течений в пласте;

[9],[36]–построение математической модели хаотического движения жидкостей в трубе и в пористой среде;

[10],[11],[14]–построение математической модели течения газожидкостной смеси в подъемной трубе;

[12]–разработка метода определения коэффициента гидравлического сопротивления на основе модели течения сжимаемой жидкости в трубе;

- [15],[17]–разработка моделей и методов для определения давления насыщения и объемного коэффициента жидкости при давлении насыщения;
- [19],[20],[22]–построение математической модели процесса инфильтрации при разливе нефти в грунт;
- [30],[35]–построение алгоритма численного решения двумерного уравнения фильтрации в полярных координатах;
- [63]–построение математической модели упруговодонапорного режима разработки пласта.

HƏMZƏYEV XANLAR MEHVƏLİ OĞLU
MAYELƏRİN MƏSAMƏLİ MÜHİTDƏ VƏ BORUDA AXINI PROSESLƏRİNİN
ƏDƏDİ MODELLEŞDİRMƏ ÜSULLARININ İŞLƏNMƏSİ
XÜLASƏ

Mayelərin məsaməli mühitdə və boruda axını problemləri neftqazçıxarma, neft və neft məhsullarının boru xətləri ilə nəqli, hidrotexnika, hidrogeologiya və digər sahələrin mühüm nəzəri və praktiki məsələləri ilə əlaqədardır. Məsaməli mühitdə və boruda maye axınları ilə bağlı problemlərin həlli yeni riyazi modellərin qurulmasını, mövcud modellərin və onların ədədi realizə üsullarının təkmilləşdirilməsini, meydana çıxan tərs məsələlərin, optimal idarəetmə və qeyri klassik sərhəd məsələlərinin həll üsullarının işlənməsini tələb edir. Dissertasiya işi sadalanan problemlərin tədqiqinə həsr edilmişdir.

Dissertasiya işində mayelərin layı açma xarakterinə görə hidrodinamik natamam quyulara süzülmə prosesinin riyazi modeli və bu model əsasında layların elastik işlənmə rejiminin hesablanması üsulu işlənmişdir. Neft laylarının elastik rejimdə işləmə müddətinin təyin edilməsi tez təsirə görə optimal idarəetmə məsələsi şəklində qoyulmuş və onun ədədi həll üsulu təklif edilmişdir.

Layların elastik və elastik su basqı rejimlərində, laylara fiziki-kimyəvi, istilik təsiri zamanı meydana çıxan sərhəd və sərhəd-retrospektiv tərs məsələlərin, lay neftinin su ilə sıxışdırılması prosesinin porşen və ikifazlı modelləri əsasında sərhəd rejiminin təyini tərs məsələlərinin həll üsulu işlənmişdir.

Neft və neft məhsullarının dəniz səthində yayılması, torpağa və torpaq bəndindən süzülməsi proseslərinin riyazi modelləri qurulmuş, bu modellər əsasında baxılan proseslərin əsas xarakteristikaları təyin edilmişdir.

Sıxılan mayenin boruda stasionar hərəkətinin riyazi modeli əsasında neft və neft məhsullarının boru kəmərlərində sızma yerinin, sıxılmayan mayenin boruda qeyri stasionar hərəkətinin riyazi modeli əsasında isə mayenin sərfinə görə təzyiqliq qradientinin təyin edilməsi üsulları təklif edilmişdir.

Bərk hissəciklərin şaquli boru ilə yuxarı qalxan özlü-plastik və məsaməli mühitdə süzülən özlü mayedəki hərəkətinin riyazi modelləri qurulmuş və bu proseslərin əsas göstəricilərinin təyin edilməsi üsulu işlənmişdir.

KH.M.Gamzaev

The Development of Methods of Numerical Simulation of Fluid Flow in Porous Medium and in a Pipeline

SUMMARY

The problems of fluid flow in porous medium and in pipelines are related to important theoretical and practical problems of oil production, the transportation of oil and oil products, of hydraulic engineering, of hydrogeology etc. The solution of the problems related to fluid flow in porous medium and in pipelines requires the construction of new mathematical models, the improvement of existing models, and the development numerical methods for solving them, the development of solution methods for non-correct, optimal control and non-classical boundary-value problems. The dissertation work is devoted to the study of these problems.

Due to the nature of the layer tunneling by liquid, the mathematical model of the filtration process in the hydrodynamic incomplete well and on the base of this model the calculation of the elastic development regimes of layers are investigated in the dissertation work. The determination of the time of oil layers operation in the elastic mode is established in the form of quick-impact optimal control problem, its numerical method is proposed.

The solution method for the inverse boundary and boundary-retrospective problems arising during the physical, chemical and thermal effects on the layers is developed for the flexible and elastic water discharge modes of layers, the inverse problems to determine the boundary regimes is developed on the base of piston and two-phase models for the processes of displacement of layer oil by water.

We build the mathematical models of the distribution of oil and oil products on the surface of the sea, the filtration of oil and oil products to the land, we determine the base characteristics of these processes on the base of these models.

The methods of determining the fluid leakage of oil and oil products in oil pipelines on the base of mathematical model of stationary flow of isotropic liquid, the pressure gradient according to the fluid consumption on the base of mathematical model of non-stationary flow of anisotropic fluid in oil pipelines are suggested in the work.

We build the mathematical models of the movement of solid particles in viscous liquid that flows in vertical direction along a pipe in viscous-plastic and porous medium. We also develop the method of determining the primary characteristics for these processes.

AZƏRBAYCAN MİLL ELMLƏR AKADEMİYASI
Akademik Ə. . HÜSEYNOV adına KİBERNETİKALARIN İNŞAATI

Əlyazması hüququnda

HƏMZƏYEV XANLAR MEHVƏLİ OĞLU

**MAYELƏRİN MƏSAMƏLİ MÜHİTDƏ VƏ BORUDA AXINI
PROSESLƏRİNİN ƏDƏDİ MODELLEŞDİRMƏ ÜSULLARININ
İŞLƏNMƏSİ**

1203.01 – Kompüter elmləri

Texnika elmləri doktoru alimlik dərəcəsi almaq
üçün təqdim olunmuş dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I

BAKİ– 2013