

На правах рукописи

Ярославов Александр Олегович



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ  
НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ  
ПЛАСТАХ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИК СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
ГЕОЛОГО-ПРОМЫСЛОВОЙ ИНФОРМАЦИИ.

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Тюмень - 2003 г.

Работа выполнена в Тюменском филиале Института теоретической и прикладной механики СО РАН.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор,  
**Федоров Константин Михайлович.**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, доцент,  
**Захаров Александр Анатольевич;**  
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,  
**Степанов Сергей Викторович.**

**Ведущая организация:** Центр химической механики нефти  
АН РБ, г. Уфа.

Защита состоится 14 января 2003 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета К 212.274.01 при Тюменском государственном университете по адресу: г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета, г. Тюмень.

Автореферат разослан «    » декабря 2003 г.

**Ученый секретарь  
диссертационного совета:**

Бутакова Н.Н.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последние годы на месторождениях Западной Сибири стали широко применяться потокоотклоняющие технологии увеличения нефтеотдачи пластов. Эти технологии основаны на идее закачки различных химреагентов в призабойную зону скважины для перераспределения фильтрационных потоков между пропластками различной проницаемости. Большинство применяемых реагентов обладают неньютоновскими свойствами; некоторые из реагентов в призабойной зоне скважины образуют гели, т.е. жидкости с пластическими свойствами. Движение таких жидкостей в пористой среде пока изучено недостаточно полно. Поэтому теоретическое изучение некоторых особенностей движения нелинейно-вязких и пластических жидкостей и их распределение между разнопроницаемыми пропластками является актуальным направлением, которое поможет точнее прогнозировать оптимальные технологические параметры при применении потокоотклоняющих технологий.

В условиях больших объемов информации, для разработчиков нефтяных месторождений стоит проблема оперативного, автоматизированного выбора среди огромного количества скважин, наиболее подходящих под потокоотклоняющие технологии и другие геолого-технические мероприятия (ГТМ). Разработка и использование методик автоматизации выбора скважин под ГТМ, с привлечением статистического аппарата, различных алгоритмов фильтрации, сортировки и теории нечетких множеств, стоит в ряду наиболее перспективных направлений. Поэтому разработка программного комплекса «Storm-Analytica», как средства автоматизации анализа геолого-промысловой информации в задачах выбора скважин под ГТМ является также актуальным направлением.

**Цель работы** состоит в разработке математических моделей и методик прогнозирования оптимальных технологических параметров при проведении

геолого-технических мероприятий (ГТМ) по закачке потокоотклоняющих химреагентов для увеличения нефтеотдачи пласта. В разработке методик выбора наиболее подходящих скважин или участков под ГТМ и объединении разработанных методик и математических моделей в программный комплекс «Storm-Analytica».

**Задачи и методы исследования:**

- 1) Построение математической модели о закачке неньютоновских реагентов в призабойную зону слоисто-неоднородного пласта для прогнозирования конечного распределения объемов закачиваемого реагента между пропластками; теоретическое исследование наиболее подходящих реологических характеристик, которыми должен обладать реагент.
- 2) Разработка математической модели, описывающей поведение пластической жидкости (геля) в призабойной зоне скважины для прогнозирования эффективности перераспределения потоков фильтрации между пропластками при применении гелеобразующих композиций; теоретическое исследование влияния предельного напряжения сдвига, исходной концентрации реагентов и объема закачки на степень выравнивания профиля приемистости/притока.
- 3) Выработка критериев эффективности применения потокоотклоняющих технологий, циклического воздействия и других методов увеличения нефтеотдачи пласта на основе теоретических и статистических исследований.
- 4) Разработка специальных методик выбора наиболее подходящих скважин или участков для проведения геолого-технических мероприятий (ГТМ), в том числе и для применения потокоотклоняющих технологий.

**Научная новизна** результатов, полученных в работе:

1. Разработана математическая модель закачки нелинейно-вязких жидкостей в слоисто-неоднородный пласт; получены аналитические решения для двухкомпонентной жидкости с дилатантными, псевдопластическими и ньютоновскими свойствами. Выявлены реагенты с наиболее подходящими реологическими свойствами, обеспечивающими наилучшее выравнивание потоков фильтрации в слоисто-неоднородном пласте.

2. Разработана математическая модель поиска стационарных распределений гелевого барьера в слоисто-неоднородном пласте. Получены аналитические решения для всех принципиально возможных типов распределения концентрации гелевого барьера. Обнаружено негативное влияние пластичности геля на выравнивание фильтрационных потоков.

3. На основе теории нечетких множеств разработана методика выбора добывающих скважин для перевода их под нагнетание с учетом комплекса наиболее важных критериев, влияющих на эффективность данного ГТМ.

4. Разработана новая статистическая четырехслойная модель представления слоистого пласта. На основе этой модели выработаны критерии применимости с геологической точки зрения циклического воздействия.

5. Разработан и внедрен программный комплекс «Storm-Analytica» для анализа геолого-промысловой информации в задачах выбора скважин под ГТМ.

**Практическая ценность.** Результаты, полученные в диссертации, могут использоваться в качестве инженерных методик для прогнозирования технологических параметров и выбора скважин при проведении ГТМ. Задачи, приведенные в работе, выполнялись в рамках реальных проектных работ в ООО «НТЦ СибТехНефть», в том числе, и для повышения эффективности труда при анализе текущего состояния Поточного и Ватьеганского месторождений, при выработке рекомендаций и путей увеличения нефтеотдачи. Задачи, поддающиеся

ся формализации и алгоритмизации, заложены в программный комплекс «Storm-Analytica».

**Достоверность** полученных результатов подтверждается корректным использованием методов механики многофазных сред, численных методов, качественным сопоставлением частных решений с классическими аналогами, а также статистическим анализом. Дифференциальные уравнения и законы, используемые при решении задач, составляют фундамент подземной гидравлики и гидрогазодинамики. Полученные результаты не противоречат физическому смыслу при закладывании в расчет исходных данных в диапазоне практических величин.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях:

1. Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы развития топливно-энергетического комплекса Западной Сибири на современном этапе». – Тюмень, 2001 г.
2. Региональная научно-техническая конференция. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2001 г.
3. Тринадцатая научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов. – Тюмень, СибНИИ НП, 27.05.2002 г.
4. Пятая международная конференция и третья региональная конференция молодых ученых «Химия нефти и газа», – Томск, 22.09.2003 г.
5. Международная научно-техническая конференция «Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий», – Сочи, 20.10.2003 г.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, списка использованной литературы из 64 наименований, и приложения, включающего в себя иллюстрации программного комплекса. Текст изложен на 135 страницах, включая 39 рисунков и 6 таблиц.

Работа выполнена в Тюменском филиале Института Теоретической и прикладной механики СО РАН. Автор выражает глубокую признательность сотрудникам ОАО «СибНИИ НП», помогавшим в анализе текущего состояния Ватьеганского и Поточного месторождений.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены основные цели, задачи исследований, сформулирована научная новизна и практическая ценность проведенных работ.

**Первая глава** посвящена строгим математическим моделям, которые помогают прогнозировать оптимальные технологические параметры при проведении мероприятий по увеличению нефтеотдачи пласта. В ней рассмотрены два комплекса задач о закачке ньютоновских и неньютоновских (нелинейно-вязких) реагентов в слоисто-неоднородную призабойную зону скважины и поиске стационарных распределений гелевых барьеров в призабойной зоне такого пласта.

На практике обычно считается, что распределение потоков фильтрации слабо меняется в процессе закачки реагента и пропорционально гидропроводности пропластков в разрезе скважины. Такое допущение имеет место только для реагентов с ньютоновскими свойствами, вязкость которых слабо отличается от вязкости насыщающей пласт жидкости. Для неньютоновских реагентов влияние реологических свойств на характер и динамику изменения распределения фильтрационных потоков по пропласткам во время закачки слабо изучено. Именно этому вопросу посвящена первая задача.

Для решения задачи о закачке неньютоновских (нелинейно-вязких) реагентов в настоящей диссертационной работе рассмотрена одномерная модель плоскорадиальной однофазной фильтрации двухкомпонентного реагента в слоисто-неоднородном пласте, насыщенном водой. При построении модели были сделаны следующие допущения: пропластки гидродинамически не связаны между собой; закачиваемый раствор реагента смешивается с пластовой жидкостью, но различается с ней по вязкости, т.е. вязкость раствора реагента зависит от концентрации активного вещества; активное вещество (реагент) может адсорбироваться на скелете породы и, тем самым, снижать абсолютную проницаемость пористой среды; жидкость считается несжимаемой, скелет породы – недеформируемый; фильтрация изотермическая при постоянном перепаде давления между забоем скважины и контуром питания.

В такой постановке задачи, фильтрация ньютоновского и нелинейно-вязкого реагента в призабойной зоне скважины описывается следующей системой дифференциальных уравнений для одного пропластка:

$$\frac{\partial C_r}{\partial t} + \frac{Q(t)}{2r\pi h R} \frac{\partial C_r}{\partial r} = 0; \quad R = m + (1 - m) \left( \rho_{ro} / \rho_{mix}^0 \right) \Gamma, \quad (1)$$

$$m \bar{v} = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (2)$$

$$m \bar{v} = - \frac{k}{\varphi} \left| \frac{dp}{dr} \right|^{n-1} \frac{dp}{dr}, \quad (3)$$

$$\bar{v} m = \frac{Q(t)}{2\pi r h}, \quad (4)$$

где  $Q$  - объемное количество жидкости, закачиваемое в пропласток за единицу времени или просто темп закачки;  $\Gamma$  - константа Генри;  $\rho_{ro}$  - плотность скелета породы;  $\rho_{mix}^0$  - плотность закачиваемого раствора реагента;  $C_r$  - массовая концентрация реагента;  $h$  - толщина пропластка;  $m \bar{v}$  - линейная ско-

рость фильтрации;  $m$  - пористость пропластка;  $k$  - абсолютная проницаемость пропластка;  $n$  - степень, характеризующая тип реологии жидкости (при  $n < 1$  – дилатантная, при  $n = 1$  – ньютоновская, а при  $n > 1$  – псевдопластическая), а  $\varphi$  - параметр, определяющий вязкие свойства жидкости.

Уравнение (1) описывает изменение концентрации реагента в пласте; (2) и (3) являются законом Дарси в дифференциальной форме, соответственно, для ньютоновских и нелинейно-вязких жидкостей; уравнение (4) связывает объемный расход жидкости через радиально-цилиндрическое сечение радиусом  $r$  с вектором линейной скорости фильтрации направленном перпендикулярно сечению.

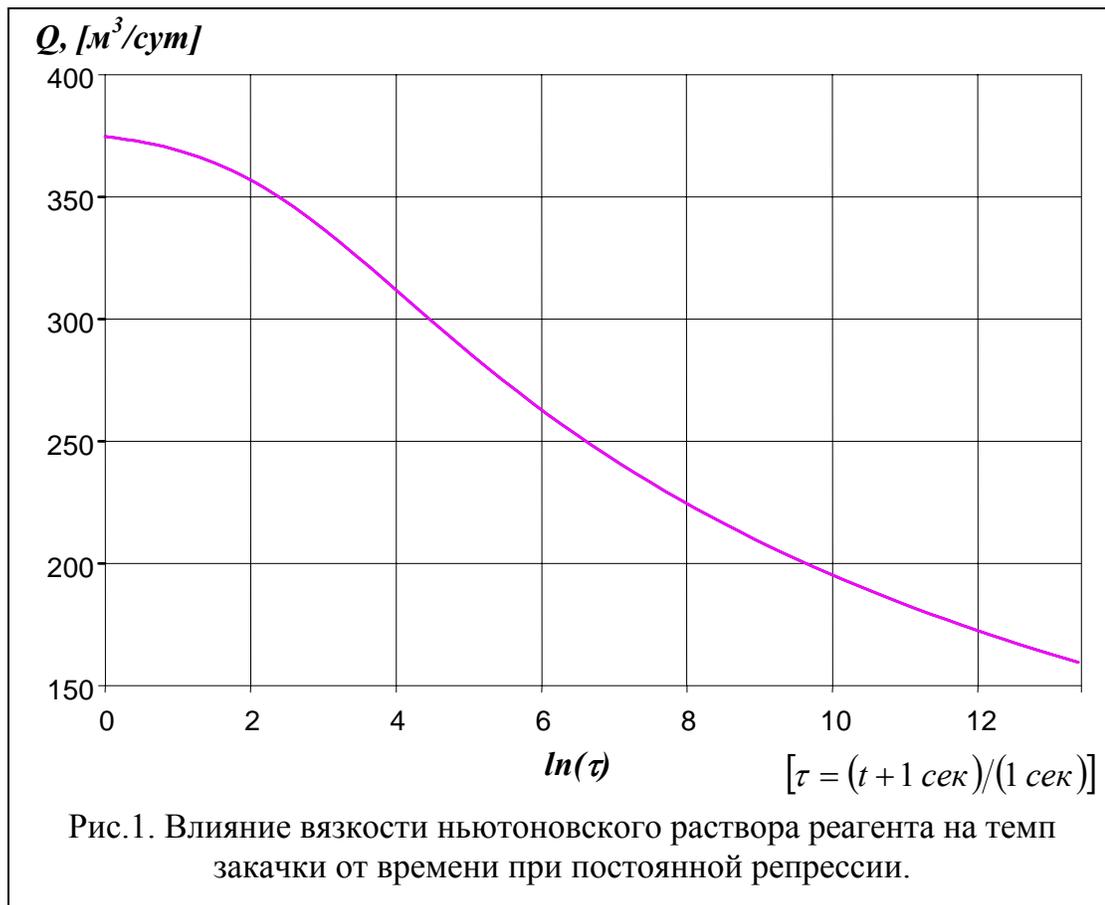
Граничные условия для задачи формулируются следующим образом:

$$p(t, r_w) = p_w, p(t, r_b) = p_b, C_r(t = 0, r_w \leq r) = 0, C_r(t > 0, r_w) = C_0,$$

$$Q(t = 0) = Q_0, \bar{v}(t = 0, r) = \frac{Q_0}{2\pi r h m},$$

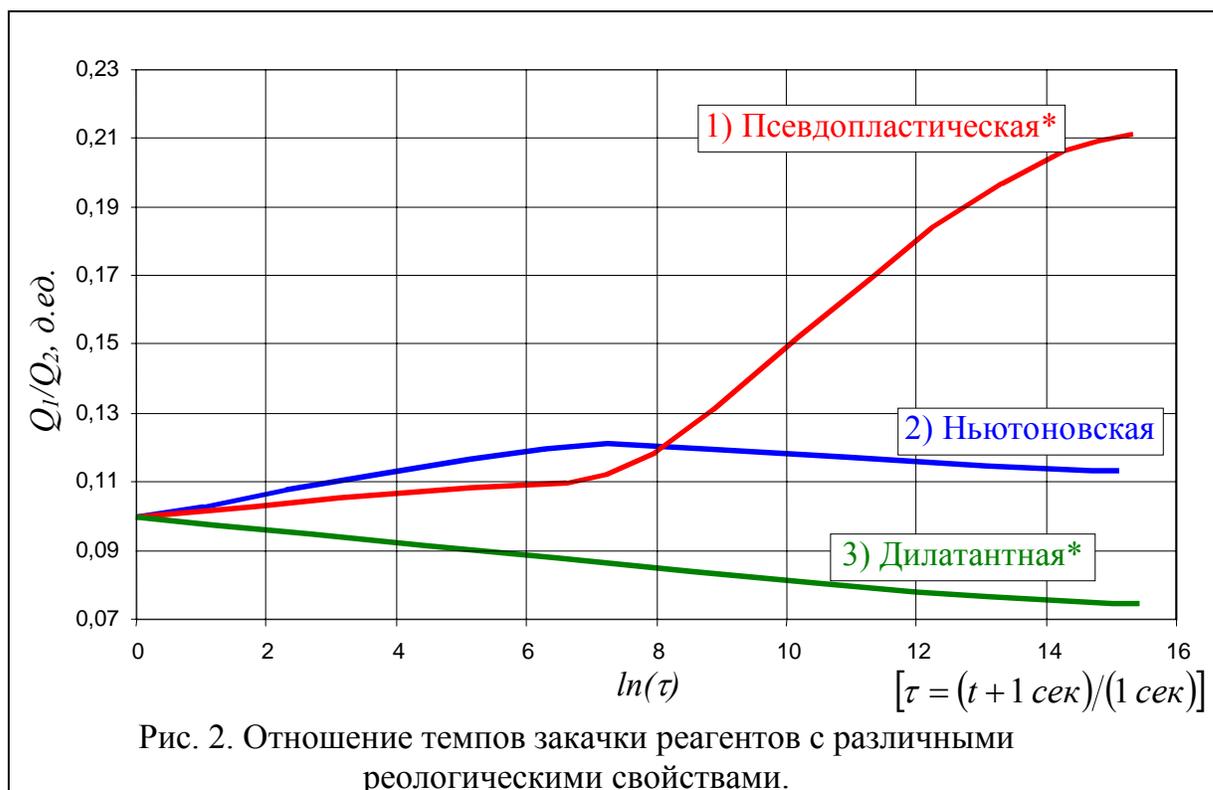
где  $Q_0$  - приемистость пропластка в начальный момент времени  $t = 0$ ;  $C_0$  - массовая концентрация закачиваемого раствора реагента.

Результат решения такой задачи сводится к определению функции расхода реагента от времени  $Q(t)$ . В работе было получено аналитическое решение задачи о закачке ньютоновской и нелинейно-вязкой жидкости в пласт. Рассмотрим сначала результаты решения задачи для одного пропластка. Для значений параметров  $h = 10\text{ м}$ ,  $m = 0.2$ ,  $k = 0.1\text{ мкм}^2$ ,  $p_w - p_b = 5\text{ МПа}$ ,  $R = 0.1778$ ,  $\mu_0 = 1\text{ МПа} \cdot \text{с}$ ,  $\mu_1 = 3\text{ МПа} \cdot \text{с}$ ,  $r_w = 0.1\text{ м}$  и  $r_b = 150\text{ м}$  зависимость расхода ньютоновского реагента от времени приведена на рис. 1.



Видно, что темп закачки со временем падает, так как закачиваемый реагент большей вязкости, чем вытесняемая вода. Примерно за 48 минут от начала закачки приемистость скважины падает с 375 до 225  $\text{m}^3/\text{сут}$ , а за 5 суток приемистость снижается до значения 160  $\text{m}^3/\text{сут}$ .

Учитывая общие граничные условия по давлению, аналитическое решение было обобщено на случай произвольной слоистой системы, некоторые результаты этого исследования для пласта, состоящего из двух пропластков, приведены на рис. 2-3, откуда следует, что распределение темпов закачки по пропласткам любого реагента со временем меняется. Ньютоновский реагент максимально отклоняется от величины  $(k_1 h_1 / k_2 h_2)$  только на 25 минуте. Отклонение от величины  $(k_1 h_1 / k_2 h_2)$  для нелинейно-вязких жидкостей со временем растет (не имеет оптимума), стремясь к некоторому пороговому значению.



При закачке псевдопластической жидкости, отклонение от величины  $(k_1 h_1 / k_2 h_2)$  растёт и, примерно через пять суток, доля расхода в низкопроницаемый пропласток увеличится в два раза.

С практической точки зрения важнее не текущее распределение потоков, а конечное распределение радиусов проникновения реагента в глубь пласта. На рис. 3. изображены три варианта распределения радиусов проникновения, соответственно, для дилатантного, ньютоновского и псевдопластического реагента в двухслойный пласт при идентичных условиях. Объем закачки во всех трех случаях равен  $300 \text{ м}^3$ , но время закачки разное. На рис. 3. видно, что меньше всего попадает в низкопроницаемый пропласток дилатантного реагента.

Кроме задачи о закачке нелинейно-вязкой жидкости в пласт **в первой главе** рассмотрен еще один класс задач, связанный с определением стационарных распределений гелевых барьеров, которые представляют собой систему оторочек пластической жидкости, способной через себя пропускать воду и нефть.



Была разработана математическая модель, описывающая поведение пластической жидкости (геля) в призабойной зоне скважины после ее пуска в работу. Исследованы стационарные распределения гелевых барьеров при различных режимах работы скважины, объемах закачки исходной композиции, исходной концентрации и т.п.

Рассмотрено влияние различных стационарных распределений концентрации гелевых барьеров на выравнивание фильтрационных потоков в системе из нескольких гидродинамически изолированных пропластков различной гидропроводности.

В случае радиальной фильтрации в однородном пласте градиент давления убывает с расстоянием от скважины. В непосредственной близости от скважины градиент давления может быть выше предельного значения. В этой области гель будет реструктуризироваться и, фильтруясь, удаляться от скважины до тех пор, пока не войдет в область, где градиент давления меньше либо равен предельно-

му значению ( $\text{grad } p \leq G$ ). Предельный градиент давления для пластических жидкостей введен А.М. Мирзаджанзаде и определяется из соображений размерности как  $G = (\alpha \cdot \tau_0) / \sqrt{k_0}$ , где  $\alpha$  - безразмерный эмпирический коэффициент ( $\alpha \approx 0.01$ );  $k_0$  - абсолютная проницаемость пористой среды;  $\tau_0$  - предельное напряжения сдвига.

Процесс установления стационарного распределения концентрации гелевого барьера описывается двухфазной фильтрацией воды (ньютоновской жидкости) и геля (пластической жидкости), изученность которой далека от завершенности. Обычно исследуются стационарные, установившиеся распределения пластической жидкости в пласте. Будем также рассматривать установившуюся фильтрацию воды в призабойной зоне скважины через стационарный гелевый барьер. Такой процесс описывается уравнением сохранения массы движущейся воды и законом Дарси:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot (1-a)m \bar{v}_w) = 0; \quad m(1-a)\bar{v}_w = -\frac{kk_w}{\mu} \frac{dp}{dr}, \quad (5)$$

где  $a$  - объемная концентрация геля в пористой среде;  $k_w$  - безразмерная относительная фазовая проницаемость по воде.

Связь между концентрацией геля и абсолютной проницаемостью пористой среды задается обобщенным законом Козени-Кармана  $k/k_0 = (m/m_0)^v = (1-a)^v$ , где  $k_0$  и  $m_0$  - начальные параметры среды;  $k$  и  $m$  - проницаемость и пористость среды по отношению к водной фазе после осаждения геля с концентрацией  $a$  на скелет породы;  $v$  - показатель Козени-Кармана.

Если исходить из условий убывания градиента давления с ростом радиуса и условий сохранения потока воды на границах соответствующих зон, то принципиально возможные типы решений для нагнетательной скважины имеют следующий вид, представленный на рис. 4, где пронумерованные зоны характеризуются следующим образом. Зона 1 соответствует области, из которой гель вы-

тесняется полностью ( $dp/dr > G$ ); в зоне 2 распределение концентрации геля имеет нетривиальный вид, при котором выполняется условие  $dp/dr = G$ ; в зоне 3 гель находится в исходном невозмущенном состоянии, так как с момента пуска скважины и до момента полного перераспределения геля в этой зоне  $dp/dr < G$ ; зона 4 является удаленной, геля в ней нет, но влияние перераспределенных фильтрационных потоков на данную зону также присутствует.

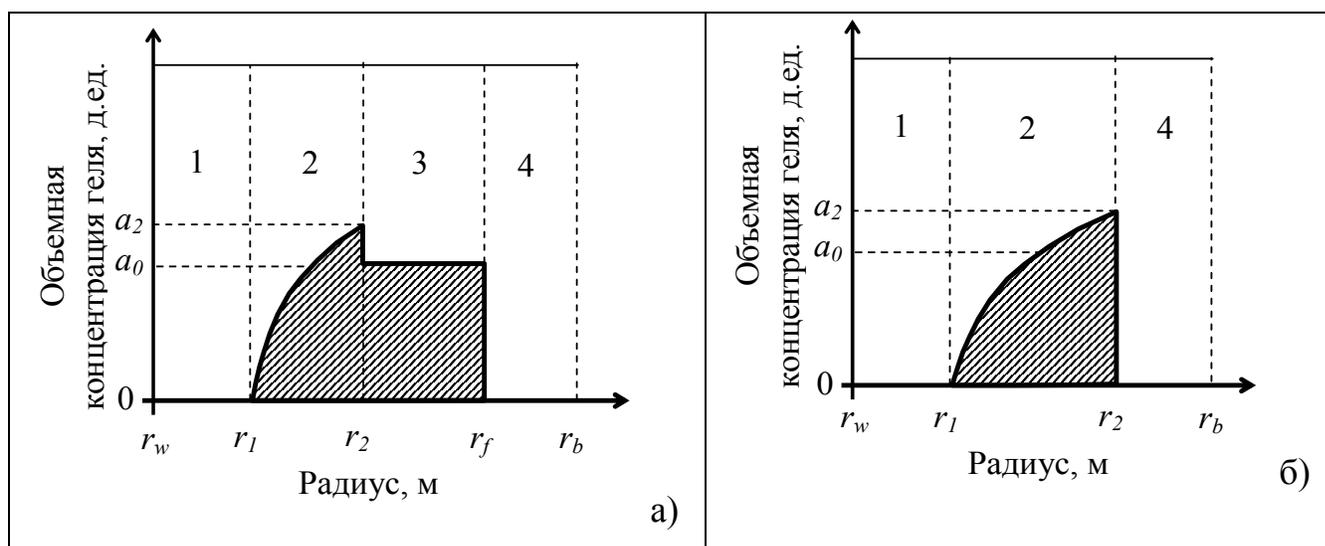


Рис 4. Схема принципиальных типов стационарных решений распределения концентрации геля в однородной призабойной зоне нагнетательной скважины.

а, б) – распределения первого и второго типа для нагнетательной скважины;

Аналитическое решение по рассмотренным распределениям сводится к системам трансцендентных уравнений относительно неизвестных величин  $r_1$  и  $r_2$ . Были получены аналитические решения, как для нагнетательной, так и для добывающей скважины. Из аналитического решения был найден безразмерный критерий  $R$ , по которому можно определять оптимальные значения предельного напряжения сдвига, перепада давления и объема закачки при проведении гелевой обработки скважины. Ниже представлены некоторые результаты расчетов для нагнетательной скважины. Общие значения параметров, закладываемые в расчет следующие:  $k_0 = 0.5 \text{ мкм}^2$ ,  $h = 1 \text{ м}$ ,  $V_{in} = 200 \text{ м}^3$ ,  $a_0 = 0.05$ ,

$(p_w - p_b) = 1 \text{ МПа}$ ,  $r_w = 0.1 \text{ м}$ ,  $r_b = 150 \text{ м}$ ,  $\nu = 6$ ,  $\tau_0 = 4 \text{ Па}$ , где  $V_{in}$  - объем гелеобразующего реагента;  $h$  - толщина пропластка;  $a_0$  - исходная концентрация геля в пласте.

График последовательных изменений стационарных распределений гелевых барьеров с переходами от одного типа к другому в зависимости от безразмерного параметра  $R = (p_w - p_b)/(r_f G)$  представлен на рис 5.

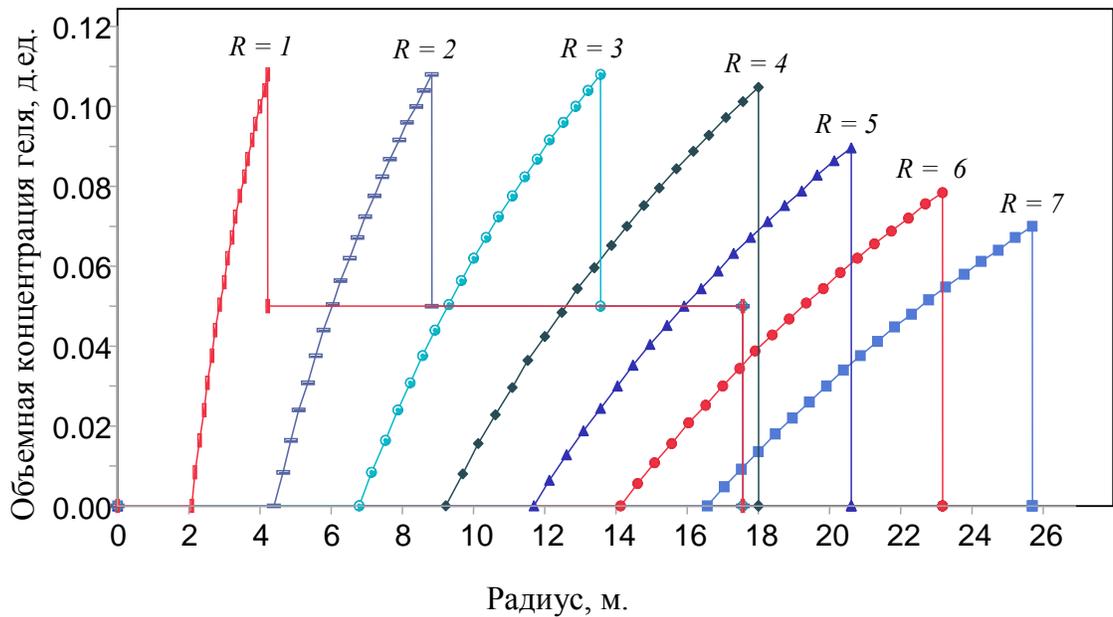


Рис. 5. Изменение стационарного распределения концентрации гелевого барьера в призабойной зоне пласта нагнетательной скважины с увеличением параметра R.

На практике, при обработке скважины гелеобразующим составом, наибольшее значение имеет высокая степень перераспределения потоков (выравнивающий эффект) при относительно небольшом снижении общей приемистости/продуктивности скважины. Степень выравнивания потоков для произвольной слоистой системы было предложено оценивать следующей величиной:

$$K_{sp} = (V_{p1} - V_{p2})/V_{p1}, \quad (6)$$

где  $V_{p1}$  и  $V_{p2}$  - коэффициенты вариации распределения потоков фильтрации по разрезу, соответственно, до и после обработки скважины. Распреде-

ние потоков можно определить по данным потокометрии или в результате решения предыдущей задачи о закачке нелинейно-вязких реагентов в пласт.

Изменение коэффициента продуктивности или приемистости задается отношением  $\bar{Q} = Q/Q_{\max}$ , где  $Q$  - суммарный дебит/расход жидкости после формирования в призабойной зоне стационарного распределения при заданном перепаде давления;  $Q_{\max}$  - суммарный дебит/расход жидкости до гелевой обработки при том же перепаде давления. Объединив два предыдущих критерия в один безразмерный нормализованный комплекс  $K_{\text{оп}} = \sqrt{K_{\text{сп}} \cdot \bar{Q}}$ , который и будет общим критерием оптимальности, можно построить характеристику  $K_{\text{оп}}(R')$ , где  $R' = (p_w - p_b)/(r_f^{\max} G^{\max})$ ;  $r_f^{\max}$  и  $G^{\max}$  - радиус проникновения гелевой оторочки и предельный градиент давления соответственно для пропластка с максимальной проницаемостью, рис 6.

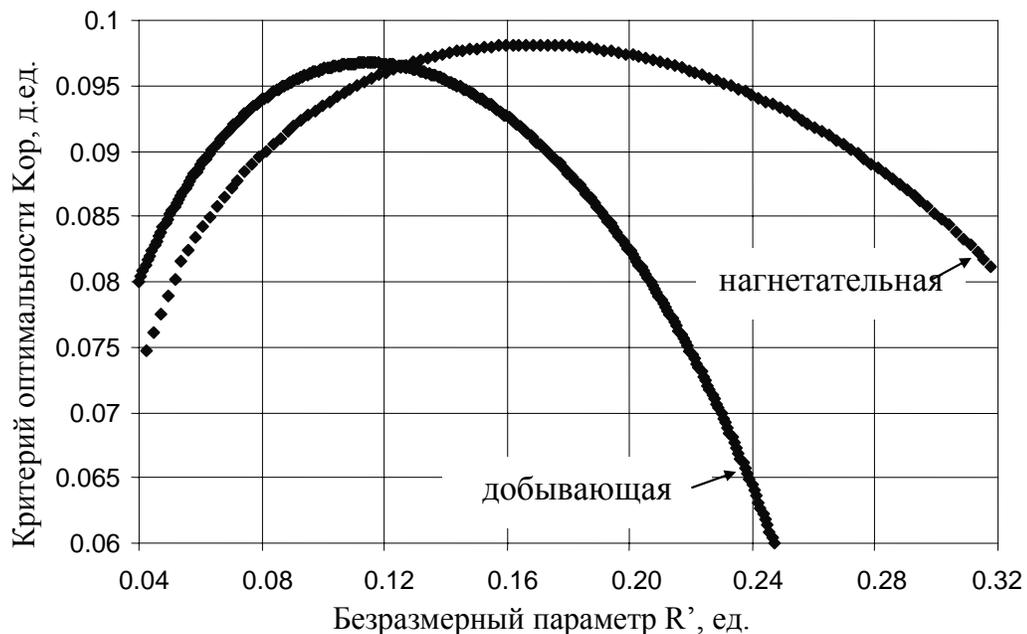


Рис 6. Характеристики оптимальности режима работы скважины и свойств геля.

Согласно характеристике, представленной на рис. 6, через комплексный безразмерный параметр  $R'$  можно определить оптимальный объем закачки реагента, предельное напряжение сдвига, которым должен обладать образующийся в пласте гель, и оптимальный перепад давления после пуска скважины обратно в работу.

**Во второй главе** рассмотрены смежные по тематике задачи выбора скважин или участков для проведения на них потокоотклоняющих технологий, циклического воздействия, форсированного отбора и других геолого-технических мероприятий (ГТМ) увеличения нефтеотдачи пласта. На нефтяных месторождениях Западной Сибири число скважин может варьироваться от ста до нескольких тысяч, в связи с этим остро стоит проблема автоматизированного выбора, среди этого огромного количества скважин, наиболее подходящих для проведения на них ГТМ. Для выбора какой-либо скважины, в зависимости от конкретного ГТМ, необходимо учесть большое количество различных критериев, например, таких как: герметичность обсадной колонны; кривизна ствола; забойное давление; текущий коэффициент нефтеотдачи; комплекс геологических параметров (проницаемость, расчлененность, песчанистость, глинистость и т.д.); степень контактности с подошвенными водами и т. д. Кроме большого количества критериев приходится иметь дело с некачественной исходной информацией, содержащей всевозможные неточности и ошибки. Для работы с подобным классом задач в последнее время стала применяться теория нечетких множеств, многомерная статистика, различные алгоритмические методы. С использованием этих современных направлений во второй главе разработаны две методики выбора скважин под ГТМ.

Первая методика основана на приложении теории нечетких множеств. В ней рассматривается выбор добывающих скважин для перевода под нагнетание, с учетом особенностей геологического строения и текущего состояния разработки Ватъеганского месторождения (объект АВ1-2). Были разработаны крите-

рии целесообразности перевода скважин под нагнетание; каждому критерию была сопоставлена соответствующая функция принадлежности к некоторому утверждению. Например, параметр, характеризующий пластовое давление, был сопоставлен с функцией принадлежности к высказыванию: «скважина в зоне пониженного пластового давления». По данной методике была определена и рекомендована группа скважин для перевода под нагнетание на Ватьеганском месторождении (объект АВ1-2) с целью совершенствования системы разработки.

Во второй методике разработан специальный алгоритм построения четырехслойной геологической модели пласта, которая используется для расчета комплексного геологического критерия  $F_{co}$  целесообразности циклического воздействия. Основным принцип построения четырехслойной модели заключается в классификации геологических слоев на четыре категории (на связные высоко- и низкопроницаемые и на несвязные высоко- и низкопроницаемые слои) и в выделении связной неоднородной части посредством объединения слоев по условию  $|k_1 - k_2| / (k_1 + k_2) < V_k \alpha$ , где  $k_1$  и  $k_2$  - проницаемости двух гидродинамически связных слоев;  $V_k$  - вариация проницаемости характерная для рассматриваемого участка скважин;  $\alpha$  - масштабный эмпирический коэффициент ( $\alpha \approx 0.5$ ). Несвязные слои отделены глинистой перемычкой. На Ватьеганском и Поточном месторождениях были построены карты распределения комплексного критерия  $F_{co}$ . По этим картам были локализованы зоны, благоприятные с геологической точки зрения для циклического воздействия. Эффективность применения критерия  $F_{co}$  было подкреплено результатами анализа фактически проведенных мероприятий по циклическому заводнению на Поточном месторождении. Критерий  $F_{co}$  был взят за эталон при сравнении с другой методикой, основанной на теории нечетких множеств, выбора скважин под циклическое воздействие. В которой использовался комплексный параметр, состоящий из коэффициента послойной вариации проницаемости, коэффициента вертикаль-

ной связности и проницаемости. Расхождение в результатах при сравнении этих двух методик составило не более 10% от количества выбранных скважин, что является очень хорошим показателем корректности предлагаемых подходов.

**В третьей главе** описан программный комплекс «Storm-Analytica», в который были заложены все, рассмотренные в предыдущих главах, математические решения и методики. Данная программа состоит из набора интегрируемых между собой модулей, в которые заложены следующие функциональные возможности:

1. Сбор, подготовка и фильтрация исходных данных, загружаемых из базы или файла.
2. Расчет геолого-промысловых критериев (параметров).
3. Нормирование геолого-промысловых критериев для построения функций принадлежности и статистического анализа.
4. Блок построения и сериализации функций принадлежности с соответствующими высказываниями и критериями.
5. Преобразование существующих критериев для оперирования с нечеткими множествами; создание комплексных критериев.
6. Модуль визуализации исходных и результирующих данных в виде таблиц, карт и различных статистических диаграмм.
7. Модуль прогноза эффективности ГТМ, куда входит задача о закачке нелинейно-вязких жидкостей в пласт и задача о поиске стационарных распределений гелевых барьеров.

Программный комплекс «Storm-Analytica» написан с использованием технологии «.Net» на языке C#. Используемые в работе информационные технологии являются одними из передовых и позволяют быстрее и качественнее разрабатывать программы любой сложности.

При написании программы особое внимание было уделено расчету специальных коэффициентов, используемых в качестве критериев для выбора скважин под ГТМ. Рассмотрим эти коэффициенты подробнее:

1. Коэффициент вертикальной гидродинамической связности коллектора. По В. А. Бадьянову этот коэффициент определяется вероятностью вертикальной гидродинамической связи между двумя произвольно взятыми по разрезу точками за вычетом вероятности попадания в глину. В работе была предложена следующая формула для расчета коэффициента вертикальной связности по данным интерпретации геофизических исследований:

$$K_{ec} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N H_i\right)^2}, \quad (7)$$

где  $H_i$  - гидродинамически связная по вертикали пачка слоев;  $N$  - расчлененность пласта.

2. Коэффициент полной вертикальной связности является модифицированным, специально разработанным в настоящей работе критерием для оценки вертикальных перетоков, который учитывает вероятность гидродинамической связи между расчлененными «тонкой» глиной слоями. Другими словами, в дополнение к вероятности  $K_{ec}$  прибавляется вероятность выклинивания глинистых перемычек на некотором расстоянии от скважины:

$$K_{nec} = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^N H_i\right)^2} \left[ \sum_{i=1}^N H_i^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N H_i H_j \exp\left\{-\left(\sum_{k=i}^{j-1} c_k\right)b\right\} \right], \quad (8)$$

где  $c_k$  - толщина  $k$ -й глинистой перемычки;  $b$  - коэффициент затухания толщины глинистого прослоя.

В формуле (8) нумерация глин и песчаных слоев идет в одном и том же направлении сверху вниз.  $K_{nec}$  всегда больше  $K_{ec}$ , а их разность – это некото-

рая вероятностная величина гидродинамической связи между расчлененными пропластками.

3. Коэффициент вариации какого-либо геологического параметра был использован в качестве меры неоднородности. По статистической теории, коэффициент вариаций определяется так:

$$V_i = \frac{\sqrt{D_i}}{M_i}, \quad (9)$$

где  $i$  – некоторый параметр (проницаемость, пористость и т.п.);  $D_i$  – дисперсия  $i$ -го параметра;  $M_i$  – математическое ожидание  $i$ -го параметра, (как правило, это средняя или средневзвешенная величина).

4. Коэффициент выравнивания профиля приемистости – предназначен для оценки эффективности применения какой-либо потокоотклоняющей технологии и, как уже отмечалось, он рассчитывается по формуле (6). Для его расчета в программе имеется возможность воспользоваться результатами решения задачи о закачке нелинейно-вязких жидкостей в пласт, описанной в первой главе.

В программе все перечисленные критерии реализованы на такой объектной архитектуре, которая позволяет использовать их в операциях с нечеткими множествами; можно задавать для каждого критерия высказывание, вес и соответствующую функцию принадлежности.

Программный комплекс «Storm-Analytica» был опробован в проектных работах по анализу текущего состояния Ватьеганского месторождения. С его помощью были классифицированы скважины по типам обводнения, были выбраны скважины под форсированный отбор и циклическое воздействие. Он также использовался в качестве оперативного визуализатора геолого-промысловой информации.

**Выводы и результаты.** Разработана математическая модель закачки нелинейно-вязких жидкостей в слоисто-неоднородный пласт. Установлен немонотонный характер изменения темпа закачки жидкости при постоянном перепаде

давления. Установлено, что распределение темпов закачки нелинейно-вязкого реагента между пропластками отклоняется от  $kh$ -фактора и это отклонение со временем растет. Продемонстрировано, что жидкости с псевдопластическими свойствами распределяются в слоисто-неоднородном пласте более равномерно, а с дилатантными свойствами, наоборот, менее равномерно по сравнению с ньютоновскими жидкостями. Поэтому для эффективного выравнивания профиля распределения потоков фильтрации потенциально выгоднее закачивать дилатантный реагент.

Разработана математическая модель поиска стационарных распределений гелевых барьеров в слоисто-неоднородном пласте. Установлено, что сдвинутый в глубь пласта на сколь угодно малое расстояние гелевый барьер всегда оказывает меньшее сопротивление фильтрующейся воде, чем неподвижная исходная оторочка с прямоугольным распределением концентрации. Для системы из нескольких разнопроницаемых пропластков, сдвиг гелевых оторочек во всех пропластках негативно влияет на степень выравнивания профиля приемистости/притока. После обработки скважины пластическим гелем максимальный эффект зависит только от перепада давления, однако еще до обработки скважины по разработанной в работе характеристике можно определить оптимальные величины объема закачки, концентрации и предельного напряжения сдвига, - это несомненно является более гибким подходом к прогнозированию эффективности потокоотклоняющих технологий.

Разработана новая статистическая четырехслойная модель представления слоистого пласта, на основе которой были выработаны критерии применимости с геологической точки зрения циклического воздействия. Эффективность применения критерия  $F_{co}$  было обосновано в результате анализа фактически проведенных мероприятий на Поточном месторождении.

Разработан программный комплекс «Storm-Analytica» для анализа геолого-промысловой информации и автоматизации выбора скважин под геолого-

технические мероприятия на основе нечетких множеств. В настоящее время программный комплекс успешно проходит апробацию в Центре Геолого-Гидродинамического Моделирования - ОАО «Лукойл».

**Публикации основных положений диссертации:**

1. Федоров К.М., Ярославов А.О. Прогнозирование целесообразности циклического заводнения на месторождениях ТПП «Лангепаснефтегаз». / Материалы Всероссийской научно-технической конференции: Проблемы развития топливно-энергетического комплекса Западной Сибири на современном этапе. – Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2001 г. - стр. 49.
2. Федоров К.М., Ярославов А.О. Закачка раствора реагента в слоисто-неоднородный пласт с учетом нелинейности закона фильтрации. / В сб. Природные и техногенные системы в нефтегазовой отрасли: Материалы региональной научно-технической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2001 г. – с. 33-41.
3. Ярославов А.О. Анализ некоторых статистических закономерностей по геологическим параметрам группы месторождений ТПП «Лангепаснефтегаза». /Материалы 13-й научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Тюмень: СибНИИ НП, 27.05.2002 г. – с. 82-89.
4. Федоров К. М., Ярославов А.О. Фильтрация нелинейно-вязких реагентов в призабойной зоне скважины. /В сб. Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий. Ч.3, т.1. – М: Радио и связь, 2003. – с. 51-52.
5. Федоров К. М., Ярославов А.О. Поведение химреагентов с пластическими свойствами в призабойной зоне скважины. / Материалы пятой международной конференции «Химия нефти и газа». – Томск: ИХН СО РАН, 22.09.2003 г. с. – 275-278.

Соискатель \_\_\_\_\_



\_\_\_\_\_ А.О. Ярославов.