

На правах рукописи



ВЫДЫШ ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ
КОМПОЗИЦИЙ В НЕФТЕДОБЫЧЕ**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2026

Работа выполнена на кафедре Моделирования физических процессов
и систем Тюменского государственного университета

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

Официальные оппоненты: **Рамазанов Айрат Шайхуллинович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры геофизики ФГБОУ ВО
«Уфимский университет науки и технологий»

Никифоров Анатолий Иванович,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией
математического моделирования процессов
фильтрации Института механики и
машиностроения – обособленного
структурного подразделения ФГБУН «ФИЦ
«КазНЦ РАН»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»**

Защита состоится «24» июня 2026 г. в 15:00 на заседании
диссертационного совета Д. 24.2.418.02 при ФГАОУ ВО «Тюменский
государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень,
ул. Перекопская, д. 15а, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО
«Тюменский государственный университет» и на сайте:
<https://diss.utmn.ru/sovet/diss-sovet-212-274-10/zashchita>

Автореферат разослан « » апреля 2026 г.

Телефон: +7 (992) 311-22-74

Электронная почта: vydysh3d@gmail.com

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 24.2.418.02,
д. ф.-м. н.

С. Ю. Удовиченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Особенностью развития нефтяной промышленности Российской Федерации является широкое применение технологий заводнения нефтяных пластов с самых ранних этапов разработки месторождений. Поддержание пластового давления при помощи заводнения влечёт за собой проблему, связанную с ранним прорывом воды в добывающие скважины. Из-за наличия слоистой неоднородности пласта наиболее проницаемые пропластки быстро обводняются, в результате чего значительно повышается обводнённость добываемой продукции.

Для борьбы с данной проблемой применяют технологии выравнивания профиля приёмистости или потокоотклоняющие технологии, основанные на закачке осадко-гелеобразующих композиций в нагнетательную скважину, которые под действием пластовых условий формируют в призабойной или межскважинной зоне пласта барьеры со сниженной проницаемостью. Последующая закачка воды сопровождается перераспределением потоков воды из высоко в низкопроницаемые слои и области пласта.

Главной особенностью указанных технологий является наличие двух принципиальных компонентов, которые при взаимодействии друг с другом образуют высоковязкий гель или твёрдый, нерастворимый водой, осадок. Для прогноза применения данных технологий применяют различные физико-математические модели. Массоперенос описывается уравнением неразрывности подвижного компонента с источниками, определяющими кинетику реакций, уравнением неразрывности для выпадающего неподвижного геля или осадка, а также уравнением импульса в виде закона Дарси, который учитывает изменение скорости фильтрации в пористой среде при образовании геля или осадка.

В настоящее время активно внедряются термогелеобразующие композиции, главным фактором для которых является определённая пластовая температура. При определённой температуре активируется химическая реакция поликонденсации с образованием низкопроницаемого геля. Причём скорость химической реакции тем выше, чем выше пластовая температура. В этом случае, к вышеперечисленным уравнениям необходимо добавить уравнение притока тепла и решать задачу тепломассопереноса. Поэтому прогноз результатов применения таких технологий основан на решении комплексных задач теплофизики и гидродинамики, что является новым элементом в инструментарии инженеров нефтяников, применяемом для предварительного прогноза и проектирования разработки.

Цель работы

Создание теплофизических основ эффективного применения термогелеобразующих композиций для снижения обводнённости продукции и повышения охвата нефтяного пласта заводнением.

Задачи исследования

1. Решить прямую задачу о тепловом поле в вертикальной нагнетательной скважине при движении в ней жидкости с температурой отличной от температуры окружающих пород. На основе решения обратной задачи определить коэффициент теплопередачи между жидкостью в нагнетательной скважине и окружающими породами.

2. Проанализировать основные механизмы формирования теплового поля при закачке жидкости в нефтяной пласт с температурой отличной от пластовой в упрощённой квазидвумерной постановке. Разработать алгоритм решения обратной задачи по определению коэффициента теплопередачи пласта с окружающими породами.

3. Провести критериальный анализ скоростей распространения теплового и гидродинамического полей как в латеральном, так и в вертикальном направлениях.

4. Разработать упрощённую неизоэнтальпическую модель фильтрации на случай закачки в слоисто-неоднородный пласт термогелеобразующей композиции с учётом химической реакции гелеобразования, зависящей от температуры. Исследовать основные теплофизические особенности формирования низкопроницаемого гелевого барьера и его влияние на перераспределение потоков в слоисто-неоднородном пласте.

5. На основе разработанной модели неизоэнтальпической фильтрации изучить влияние образования низкопроницаемого гелевого барьера на коэффициент охвата пласта заводнением.

Объектом исследования являются тепловые поля в скважине и пласте, окружённые горными породами.

Предметом исследования являются особенности и закономерности формирования термогидродинамических полей в нагнетательной скважине и слоисто-неоднородном пласте при наличии химической реакции гелеобразования, зависящей от температуры.

Научная новизна

1. Проанализированы различные подходы к описанию теплопередачи между жидкостью, движущейся в нагнетательной скважине, и окружающими породами. Показано, что коэффициент теплопередачи определяет основные параметры распределения температуры в нагнетательной скважине.

2. Проведена верификация аналитического решения задачи об

эволюции теплового поля в приближении Ловерье с расчётами в программном комплексе tНавигатор. На основе сопоставления численного решения термогидродинамической задачи и аналитического решения установлена степенная зависимость коэффициента теплопередачи от времени.

3. Сформулированы и сопоставлены по величине безразмерные критерии, отражающие характерные составляющие гидродинамических и тепловых потоков в латеральном и вертикальном направлениях.

4. Разработана физико-математическая модель тепломассопереноса в слоисто-неоднородном пласте при закачке термогелеобразующей композиции с учётом химической реакции гелеобразования. Установлено, что стационарное распределение объёмного содержания выпавшего геля чувствительно в первую очередь к величине энергии активации химической реакции.

5. Разработан алгоритм интеграции аналитических решений задач о тепломассопереносе оторочки термогелеобразующей композиции в слоисто-неоднородном пласте. На основе расчётов установлено, что локализация и структура формируемых низкопроницаемых гелевых барьеров снижает обводнённость продукции на некотором интервале процесса и влияет на коэффициент извлечения нефти через повышение коэффициента охвата пласта заводнением.

Практическая значимость работы

1. Результаты исследований могут быть основой программных комплексов для прогнозирования процессов применения термогелеобразующих композиций с целью совершенствования процессов заводнения нефтяных пластов.

2. Полученные в результате исследования аналитические решения теплофизических и гидродинамических задач создают возможность решения оптимизационных задач повышения эффективности разработки нефтяных месторождений.

Достоверность работы подтверждается соответствием физико-математической модели исследуемых процессов основным положениям теплофизики, термодинамики и теории фильтрации в пористых средах, обоснованным применением выдвинутых допущений, качественным соответствием полученных результатов имеющимся физическим представлениям о характере изучаемых процессов.

Методология и методы исследований

Методологической основой диссертационного исследования являются научные работы по физико-математическому моделированию тепломассопереноса в нагнетательной скважине и пласте, в том числе

работы А.А. Боксермана, Ю.В. Желтова, К.Х. Коатса, Ю.А. Котенёва, Х.А. Ловерье, Г.Е. Малофеева, Р.И. Нигматулина, Л.И. Рубинштейна, К.М. Фёдорова, Э.Б. Чекалюка, А.Б. Шабарова и других. Численные методы исследования, использованные в работе, взяты из книги А.А. Самарского.

Для моделирования процесса тепломассопереноса в слоисто-неоднородном пласте используется система уравнений механики многофазных систем, включающая законы сохранения массы для фаз, однотемпературное уравнение притока тепла в пористой среде и уравнение импульса в виде закона Дарси. Тепловое взаимодействие потоков теплоносителя с окружающими породами описывается по закону Ньютона-Рихмана. Гомогенная химическая реакция гелеобразования описывается в рамках закона Гульдберга-Вааге. Объединение тепловой и гидродинамической задач происходит посредством температурной зависимости константы скорости химической реакции от температуры по закону Аррениуса.

Для аналитического решения дифференциальных уравнений используются методы разделения переменных и характеристик с предварительным обезразмериванием переменных и выделением комплексов подобия, определяющих закономерности процессов. В работе выведен алгоритм упрощённого однотемпературного квазидвумерного описания процесса распространения температурного поля в слоисто-неоднородном пласте. Обратные задачи решаются с помощью метода простой итерации, метода наименьших квадратов и гидродинамического симулятора tНавигатор. Дополнительное фильтрационное сопротивление породы рассчитывается при помощи метода трапеций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Численно-аналитический алгоритм для определения коэффициента теплопередачи по данным единичного замера температуры в нагнетательной скважине и известной геотерме.

2. Решение прямой задачи об эволюции температурного поля в пласте при закачке жидкости с температурой отличной от пластовой в упрощённой квазидвумерной постановке. Алгоритм решения обратной задачи по определению зависимости коэффициента теплопередачи от времени.

3. Безразмерные критерии, характеризующие неоднородность теплового и гидродинамического потоков в слоисто-неоднородном пласте, анализ которых показывает возможность формулировки неизотермической модели фильтрации, в которой тепловое поле выравнивается по вертикали мгновенно, а гидродинамические потоки рассчитываются с учётом

различной скорости фильтрации в пропластках.

4. Физико-математическая модель тепломассопереноса в слоисто-неоднородном пласте при закачке термогелеобразующей композиции с учётом химической реакции гелеобразования, зависящей от температуры.

5. Зависимость локализации низкопроницаемых барьеров от структуры теплового поля при закачке термогелеобразующей композиции и их влияние на коэффициент охвата слоисто-неоднородного пласта заводнением.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации – 115 страниц, имеется 30 рисунков.

Личный вклад автора состоит в установлении безразмерного критерия, описывающего степень неоднородности теплового и гидродинамического полей; решении прямых задач об эволюции теплового поля в нагнетательной скважине и слоисто-неоднородном пласте; решении обратных задач об определении коэффициентов теплопередачи между жидкостью и окружающими породами в нагнетательной скважине и слоисто-неоднородном пласте; разработке физико-математической модели процесса закачки термогелеобразующего состава в слоисто-неоднородный пласт с учётом реакции гелеобразования, зависящей от температуры; проведении расчётов с использованием разработанной модели; анализе результатов исследования.

Апробация

Результаты диссертационной работы и её основные положения докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийской конференции «XI Школа-семинар молодых учёных по теплофизике и механике многофазных систем «Трансформация нефтегазового комплекса 2030» в 2024 году, Международной научно-практической конференции Д.И. Менделеева в 2024 и 2025 годах, Международной научно-практической конференции «Нефть и газ: технологии и инновации» в 2025 году, II Всероссийской научно-практической конференции «Всероссийские студенческие Ломоносовские чтения – 2025» в 2025 году, VIII Всероссийской молодёжной научной конференции «Актуальные проблемы нефти и газа» в 2025 году.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 2 в изданиях, входящих в международные базы данных.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному

руководителю, доктору физико-математических наук, профессору, профессору кафедры моделирования физических процессов и систем Константину Михайловичу Фёдорову, идеи которого легли в основу диссертации, своей супруге Дарье и дочке Марии за поддержку и понимание в ходе работы над диссертационным исследованием.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы и поставлены основные задачи исследования, указана научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные технологии теплового воздействия на пласты, проанализированы основные механизмы формирования теплового поля в пласте такие как конвекция или перенос тепла движущимся флюидом, теплопроводность (кондукция) или молекулярный перенос теплоты, потери тепла в выше- или нижележащие слои через кровлю и подошву пласта.

Показано, что для оценки влияния теплового воздействия на пласт чаще всего применяют аналитическое решение, полученное в приближении Х.А. Ловерье, удобное для инженерных расчётов и не требующее огромных компьютерных мощностей для получения необходимого результата.

Подробно описан вывод уравнения притока тепла для многофазной среды с учётом адиабатического и Джоуля-Томсона эффектов для флюидов, подчиняющихся уравнению состояния реальных жидкостей и газов:

$$\begin{aligned} \rho_i c_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} + \rho_i c_{pi} \vec{v}_i \cdot \vec{\nabla} T_i - \rho_i c_{pi} \eta_i \frac{\partial p_i}{\partial t} - \rho_i c_{pi} \eta_i \vec{v}_i \cdot \vec{\nabla} p_i = \\ = \vec{\tau}_{ik} \cdot \nabla_k \vec{v}_i - \nabla_k q_{ik} + \rho_i W_i + \sum_{j=1}^N L_{ji} \quad (i = 1, 2, \dots, N), \end{aligned} \quad (1)$$

где i – номер фазы, t – время, T – температура, ρ – плотность, c_p – удельная изобарная теплоёмкость, v – скорость, p – давление, τ – касательные напряжения, η – адиабатический коэффициент, q – приток тепла, W – работа сил немеханической природы, L_{ij} – интенсивность выделения теплоты, в результате фазового перехода из j -ой в i -ую фазу ($i \neq j$).

Во второй главе представлены решения прямых и обратных задач об эволюции тепловых полей в нагнетательной скважине и круговом пласте

при закачке жидкости с температурой отличной от пластовой.

В разделе 2.1 представлено аналитическое решение прямой задачи об эволюции теплового поля в работающей нагнетательной скважине в квазидвумерной постановке. Тепловые потери в окружающие породы описываются законом Ньютона-Рихмана с учётом геотермического градиента. Полученное стационарное решение в безразмерных переменных имеет вид:

$$\theta = Z - \left(\theta_0 + \frac{1}{St} \right) (1 - e^{-StZ}), \quad (2)$$

где θ – безразмерная температура, Z – безразмерная вертикальная координата, θ_0 – безразмерная устьевая температура, St – безразмерный коэффициент теплопередачи (число Стэнтона).

Из решения следует, что распределение температуры в скважине определяется безразмерным числом Стэнтона, характеризующим отношение тепловых потерь в окружающие породы к конвективному переносу тепла жидкостью в скважине.

Показано, что подход к сведению двумерных тепловых задач к квазидвумерным, даёт возможность с достаточной степенью точности заменять закон Фурье для теплопотерь законом Ньютона-Рихмана. Результаты сопоставления расчётов теплового поля в работающей нагнетательной скважине, полученного в двумерной и квазидвумерной постановках приведены на рисунке 1.

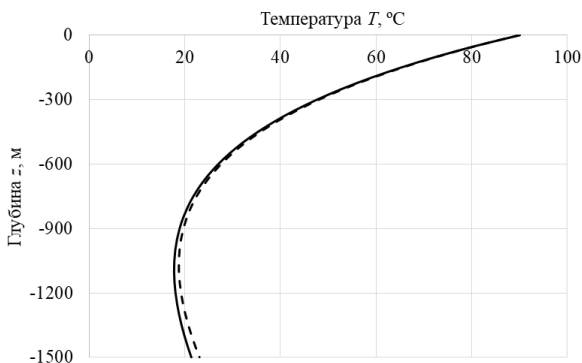


Рисунок 1 – Сопоставление распределения температурного поля, полученного в двумерной (пунктирная линия) и квазидвумерной постановках (сплошная линия)

В разделе 2.2 полученное ранее решение прямой задачи используется для определения коэффициента теплопередачи жидкости с окружающими нагнетательную скважину породами путём единичного замера температуры в нагнетательной скважине. Такая обратная задача сводится к трансцендентному уравнению, которое представлено ниже:

$$St = \frac{1}{\left(\frac{1 - \theta_w}{1 - e^{-St}}\right) - \theta_0}, \quad (3)$$

где θ_w – безразмерное значение температуры.

Это уравнение решается итерационным методом. Первым шагом рассчитываются безразмерные температуры θ_0 и θ_w . Далее выбирается начальное приближение числа Стэнтона St_0 и задаётся необходимая точность решения ε . Следующим шагом начальное приближение подставляется в правую часть уравнения (3) и находится новое значение числа Стэнтона St_c . Если St_c – решение уравнения (3), то должно выполняться условие $|St_c - St_0| \leq \varepsilon$. Если условие не выполняется, то $St_0 = St_c$ и итерационная процедура продолжается. Последним шагом, учитывая определение числа Стэнтона, рассчитывается коэффициент теплопередачи жидкости с окружающими скважину породами.

В разделе 2.3 проводятся сравнительные оценки скоростей распространения теплового и гидродинамического полей в слоисто-неоднородном пласте. Сформулированы безразмерные критерии соотношения скоростей в горизонтальном и вертикальном направлениях. Установлено, что выравнивание температуры в вертикальном сечении происходит гораздо быстрее, чем гидродинамические перетоки между пропластками. Оценки также показали, что в рассматриваемых процессах эффекты Джоуля-Томсона и адиабатического расширения жидкостей не играют заметной роли и ими можно пренебречь. В рассматриваемых задачах фазы считаются несжимаемыми.

Выведено уравнение притока тепла для насыщенной пористой среды в однотемпературном приближении без учёта работы вязких сил, эффектов Джоуля-Томсона и адиабатического расширения при отсутствии фазовых переходов:

$$H_r \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{i=w,o} H_i \vec{v}_i \cdot \vec{\nabla} T = \lambda \nabla^2 T, \quad (4)$$

где индексы w , o , r – обозначают теплофизические параметры,

относящиеся к воде, нефти и скелету пористой среды, а объёмные теплоёмкости флюидов, насыщающих пористую среду H_i , объёмная теплоёмкость насыщенной пористой среды H_r и теплопроводность насыщенной пористой среды λ определяются по формулам (5) – (7):

$$H_i = m S_i \rho_i c_i, \quad (5)$$

$$H_r = (1 - m) \rho_r c_r + \sum_{i=w,o} H_i, \quad (6)$$

$$\lambda = (1 - m) \lambda_r + m \sum_{i=w,o} S_i \lambda_i. \quad (7)$$

На основе этого уравнения получено аналитическое решение прямой задачи об эволюции теплового поля в круговом пласте в квазидвумерном приближении, когда тепловые потери в кровлю и подошву пласта описываются законом Ньютона-Рихмана, которое в безразмерных переменных имеет вид:

$$\theta = 1 - e^{-StX}, \quad Fo \geq 3 \quad (8)$$

где θ – безразмерная температура, X – безразмерная радиальная координата, St – безразмерный коэффициент теплопередачи (число Стэнтона), Fo – безразмерное время (число Фурье).

Показано, что распределение температуры в пласте определяется безразмерным числом Стэнтона.

В разделе 2.4 представлены алгоритмы для решения обратной задачи по определению коэффициента теплопередачи жидкости с окружающими слоисто-неоднородный пласт породами.

Аналитический алгоритм основан на аналитическом решении задачи о распространении температурного поля в окружающие породы. С одной стороны, тепловые потери описываются законом Фурье, с другой стороны, тепловые потери можно задать в виде закона Ньютона-Рихмана. Приравняв оба выражения, определяется зависимость коэффициента теплопередачи α_r от времени распространения теплового фронта t :

$$\alpha_r = \frac{\lambda_c}{\sqrt{\pi a t}}, \quad (9)$$

где λ_c и a – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности окружающих горных пород.

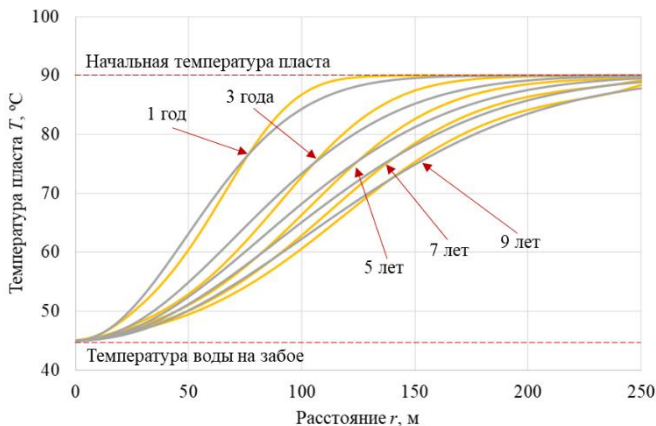


Рисунок 2 – Температурные профили пласта, рассчитанные численно в симуляторе (жёлтые кривые) и полученные аналитически (серые кривые), с коэффициентом теплопередачи, определённым по методу наименьших квадратов

Численный алгоритм основан на численном решении задачи теплопереноса в слоисто-неоднородном пласте в трёхмерной постановке при помощи гидродинамического симулятора. Моделируется непрерывная закачка воды в слоисто-неоднородный пласт с температурой отличной от пластовой. Для определения зависимости коэффициента теплопередачи жидкости с окружающими пласт породами от времени выбираются контрольные (временные) точки расчёта. Следующим шагом для каждой контрольной точки методом наименьших квадратов, основанном на минимизации суммы квадратов отклонений аналитического решения (8) от численного, определяется значение коэффициента теплопередачи. Пример проведения такой операции представлен на рисунке 2.

Зависимость коэффициента теплопередачи от времени по полученным точкам определялась в виде степенной функции от времени:

$$\alpha_r = c_1 t^{c_2}, \quad (10)$$

где c_1 и c_2 – множители, определяемые методом наименьших квадратов.

Комплексный алгоритм, является комбинацией аналитического и численного алгоритмов. Согласно численному алгоритму, определяется значение коэффициента теплопередачи для каждой контрольной точки.

Зависимость коэффициента теплопередачи от времени записывается в виде аналитического выражения (9) с множителем c_3 , определяемым с помощью метода наименьших квадратов:

$$\alpha_r = c_3 \frac{\lambda_c}{\sqrt{\pi a t}}. \quad (11)$$

Сопоставление результатов определения зависимости коэффициента теплопередачи от времени, полученных по каждому алгоритму (рисунок 3) показало, что аналитический алгоритм даёт результаты в 3-5 раза выше, чем численный алгоритм. Это говорит о том, что для определения коэффициента теплопередачи не совсем корректно приравнять тепловые потери из пласта в окружающие породы, определённые по дифференциальному закону Фурье и алгебраическому закону Ньютона-Рихмана. Поэтому при наличии крупномасштабной модели объекта, из которой можно получить секторную синтетическую модель, рекомендуется применение численного или комплексного алгоритма.

Таким образом, достаточно сделать один численный расчёт решения задачи теплопереноса в полной постановке, а затем, после решение обратной задачи, применять аналитическое решение задачи в упрощённой квазидвумерной постановке (8).

В разделе 2.5 представлены основные выводы по второй главе.

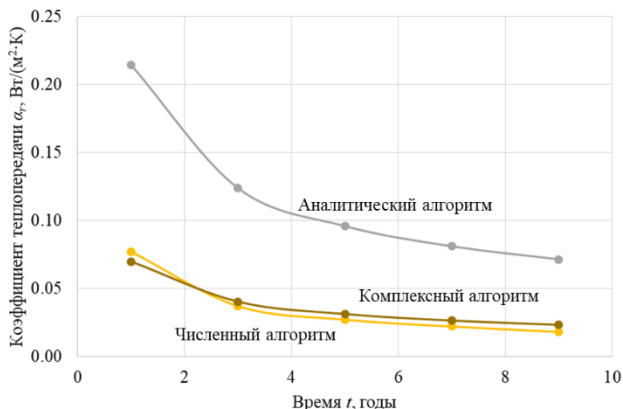


Рисунок 3 – Сопоставление результатов определения зависимости коэффициента теплопередачи от времени, полученных по каждому алгоритму

В третьей главе рассматривается развитие упрощённой неизотермической модели фильтрации на случай закачки в слоисто-неоднородный пласт термогелеобразующей композиции (ТГК) с учётом химической реакции гелеобразования, зависящей от температуры.

В разделе 3.1 рассмотрены технологии выравнивания профиля приёмистости, применяемые для перераспределения потоков воды из высоко в низкопроницаемые слои и области пласта. Показано, что локализация барьеров на удалении от нагнетательной скважины может более заметно влиять на эффективность охвата пласта заводнением.

В разделе 3.2 представлена физико-математическая модель тепломассопереноса в слоисто-неоднородном пласте при закачке ТГК с учётом химической реакции гелеобразования, зависящей от температуры, в которую интегрированы аналитические решения тепловой и гидродинамической задач.

Рассмотрена задача на примере вертикальной нагнетательной скважины, вскрывающей слоисто-неоднородный пласт, который состоит из N вертикально не связанных пропластков с абсолютной проницаемостью k_i , толщиной h_i и пористостью m_i , где i – номер пропластка. В скважину при постоянном расходе Q_0 закачивается оторочка ТГК объёмом V , вязкость которого при температуре закачиваемого раствора, практически равна вязкости пластовой жидкости. Оторочка проталкивается водой вглубь пласта до тех пор, пока не попадает в область повышенных температур, где и происходит формирование гелевого осадка.

Считается, что рассматриваемая реакция имеет первый порядок по полимеру и протекает при избытке воды. Тогда закон действующих масс сводится к виду:

$$J = z\rho_w c, \quad (12)$$

где c – массовая концентрация полимера в подвижной водной фазе, ρ_w – плотность воды, а z – константа скорости реакции, зависимость от температуры которой описывается законом Аррениуса:

$$z = Ae^{-\frac{E}{RT}}, \quad (13)$$

где A – кинетический коэффициент, E – энергия активации реакции, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Формирование геля в пласте моделируется на основе принципа «возникающих реагентов (гомогенного осаждения)». На первом этапе в пласте, за счёт его тепловой энергии, постепенно образуются зародыши

гелевой фазы – мономерные единицы. Размер мономеров, по сравнению с радиусом пор, достаточно мал, поэтому осаждения не происходит. На втором этапе, при достижении температуры гелеобразования T_a , активируется реакция поликонденсации мономерных единиц, результатом которой является формирование и осаждения геля.

Такой двухэтапный механизм моделируется зависимостью константы скорости реакции от температуры в виде ступенчатой функции:

$$z = \begin{cases} 0, & T < T_a, \\ Ae^{-\frac{E}{RT}}, & T \geq T_a. \end{cases} \quad (14)$$

Зависимость температуры от расстояния моделируется полученным в разделе 2.3 аналитическим решением задачи о распределении температуры в круговом пласте при закачке жидкости с температурой отличной от пластовой.

Рассматриваются зрелые этапы процесса заводнения, тогда вблизи нагнетательной скважины подвижна только вода, а нефть находится в капиллярно-защемлённом состоянии при остаточной нефтенасыщенности S_{or} , которая принимается одинаковой для каждого пропластка. Считается, что матрица породы недеформируемая, а пластовые жидкости несжимаемые. Вертикальными перетоками жидкости по сравнению с латеральным течением пренебрегается. Считается, что температурное поле в слоисто-неоднородном пласте во время закачки ТГК и формировании геля в пласте со временем не меняется, следовательно, коэффициент теплопередачи постоянный. Это связано с тем, что на проведение такой обработки требуется от нескольких дней до нескольких недель, в то время как на существенное изменение температурного поля требуется от нескольких месяцев до нескольких лет.

В данной модели не учитываются механизмы захвата частиц реагента пористой средой, такие как адсорбция, механическое удерживание, недоступный поровый объём, а также возможность размыва гелевого барьера после его формирования. Изменением температуры пласта из-за процесса гелеобразования пренебрегается ввиду большой теплоёмкости насыщенной пористой среды.

С учётом вышеперечисленных допущений, процесс осесимметричной фильтрации и осаждения оторочки ТГК в слоисто-неоднородном пласте для i -го слоя, описывается законами сохранения массы полимера (15), выпавшего неподвижного геля (16), а также законом Дарси (17), в который включено увеличение гидравлического сопротивления породы при выпадении геля:

$$m_i(1 - S_{or}) \frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r U_i c_i)}{\partial r} = -z c_i, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial t} = z \frac{\rho_w}{\rho_p} c_i, \quad (16)$$

$$U_i = - \frac{k_i k_{rw}(S_{or})}{\mu(1 + \beta \sigma_i)} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (17)$$

где t – время, r – радиальная координата, ρ_p – плотность полимера, U_i – скорость фильтрации в i -ом слое, k_{rw} – относительная фазовая проницаемость воды при остаточной нефтенасыщенности, μ – динамическая вязкость закачиваемого реагента, β – коэффициент загрязнения пористой среды, σ_i – объёмная концентрация выпадающего неподвижного геля в единице объёма пористой среды, P – поровое давление.

Обобщённый закон Дарси (17) и коэффициент загрязнения пористой среды β определяются эмпирически, путём проведения лабораторных экспериментов на керне. Плотность полимера близка к плотности воды поэтому соотношение плотностей в уравнении (16) считается равным единице.

При закачке оторочки полимера в пласт с расходом Q_0 происходит её разделение между пропластками из-за слоистой неоднородности пласта. Расход жидкости в i -ый пропласток Q_{0i} считается пропорциональным его проводимости. Поэтому низкопроницаемый барьер будет формироваться в каждом слое в разные моменты времени. С учётом вышесказанного начальные и граничные условия для системы уравнений (15) – (17) записываются в виде:

$$t = 0, r_w \leq r \leq r_c: c_i = 0, \sigma_i = 0, \quad (18)$$

$$t_i \leq t \leq t_i + t_0, r = r_a: c_i = c_0, \quad (19)$$

$$t > t_i + t_0, r = r_a: c_i = 0, \quad (20)$$

где $t_0 = V/Q_0$ – время закачки оторочки ТГК, r_c – радиус контура питания или расстояние до добывающих скважин, c_0 – начальная концентрация ТГК в потоке, t_i – время прихода переднего фронта оторочки до расстояния от нагнетательной скважины r_a в i -ом слое, на котором начнёт формироваться гель.

Репрессия на пласт после обработки Δp определяется из равенства расходов воды в нагнетательную скважину до и после формирования гелевого барьера:

$$\Delta p = \Delta p_0 \frac{\sum_j k_j h_j}{\sum_j \frac{k_j h_j}{g_j}}. \quad (21)$$

где Δp_0 – репрессия на пласт до закачки ТГК, g_i – дополнительное фильтрационное сопротивление, которое появляется при формировании низкопроницаемого барьера в i -ом слое и для плоскорадиального течения определяется следующей формулой:

$$g_i = \frac{1}{\ln\left(\frac{r_c}{r_w}\right)} \int_{r_w}^{r_c} \frac{(1 + \beta \sigma_i)}{r} dr. \quad (22)$$

Считается, что вытеснение нефти водой – поршневое. Нефть вытесняется до значения остаточной нефтенасыщенности S_{or} . Тогда, согласно закону сохранения массы, можно определить обводнённость добываемой продукции W по следующей формуле:

$$W = \frac{Q_w}{Q_0}, \quad (23)$$

где Q_w – суммарный расход воды в полностью обводнённые слои.

Коэффициент охвата пласта заводнением $K_{охв}$ определяется как отношение заполненного водой объёма пропластков ко всему объёму пласта:

$$K_{охв} = \frac{\sum_i \pi h_i (r_i^2 - r_w^2)}{\pi h (r_c^2 - r_w^2)}, \quad (24)$$

где r_i – расстояние, которое прошла вода в i -ом слое в момент времени t , которое определяется по формуле:

$$r_i = \sqrt{r_w^2 + \frac{1}{m_i(1 - S_{or})\pi h_i} \int_0^t Q_i(t) dt}. \quad (25)$$

В разделе 3.3 получено аналитическое решение системы уравнений тепломассопереноса для поставленной задачи в безразмерном виде при

помощи метода характеристик.

Распределения безразмерных объёмных концентраций реагента в потоке C_i и осаждённого в пористой среде геля S_i определяются по следующим формулам:

$$C_i = \exp\left(-\frac{D}{K_i} I(X)\right), \quad (26)$$

$$S_i = \left(T - \frac{m_i(1 - S_{or})}{K_i} (X - X_a)\right) \frac{D \exp\left(-\frac{E_r}{\theta_r - e^{-stX}}\right)}{m_i(1 - S_{or})} c_0 C_i(X), \quad (27)$$

$$I(X) = \frac{1}{St} \left[\Delta \text{Ei}_1 - e^{-\frac{E_r}{\theta_r}} \Delta \text{Ei}_2 \right], \quad (28)$$

$$\Delta \text{Ei}_1 = \text{Ei}\left(-\frac{E_r}{\theta_r - e^{-stX}}\right) - \text{Ei}\left(-\frac{E_r}{\theta_r - e^{-stX_a}}\right), \quad (29)$$

$$\Delta \text{Ei}_2 = \text{Ei}\left(\frac{E_r}{\theta_r} - \frac{E_r}{\theta_r - e^{-stX}}\right) - \text{Ei}\left(\frac{E_r}{\theta_r} - \frac{E_r}{\theta_r - e^{-stX_a}}\right), \quad (30)$$

$$X_a + \frac{K_i(T - T_0)}{m_i(1 - S_{or})} \leq X \leq X_a + \frac{K_i T}{m_i(1 - S_{or})}, \quad (31)$$

где X – безразмерная радиальная координата, T – безразмерное время, K_i – отношение проницаемости i -го слоя к средневзвешенной проницаемости пласта, St – безразмерное число Стэнтона, θ_r – отношение начальной температуры пласта к разнице температур пласта и закачиваемой воды на забое скважины, E_r – отношение энергии активации к разнице энергий теплового движения молекул при температуре пласта и температуре закачиваемой воды на забое скважины, D – отношение характерного времени фильтрации к характерному времени химической реакции, X_a – безразмерная координата, на которой начинается химическая реакция гелеобразования, T_0 – безразмерное время закачки оторочки ТГК.

После прокачки большого объёма воды устанавливается стационарное распределение объёмного содержания геля в пористой среде, которое для $X \geq X_a$ имеет вид:

$$S_i = T_0 \frac{D \exp\left(-\frac{E_r}{\theta_r - e^{-stX}}\right)}{m_i(1 - S_{or})} c_0 C_i(X). \quad (32)$$

Дополнительное фильтрационное сопротивление (22) в данной постановке задачи аналитически не определяется, поэтому для

вычисления применялся метод трапеций.

Расчёты по полученному решению показали, что стационарное распределение объёмного содержание геля очень «чувствительно» к величине энергии активации, рисунок 4. При малом изменении энергии активации конфигурация меняется от монотонно убывающей до почти колоколообразной. Такие особенности формирования гелевого барьера требуют наложения следующего условия: максимум безразмерной концентрации выпавшего геля не должен превышать 1, что соответствует полной закупорке высокопроницаемого слоя.

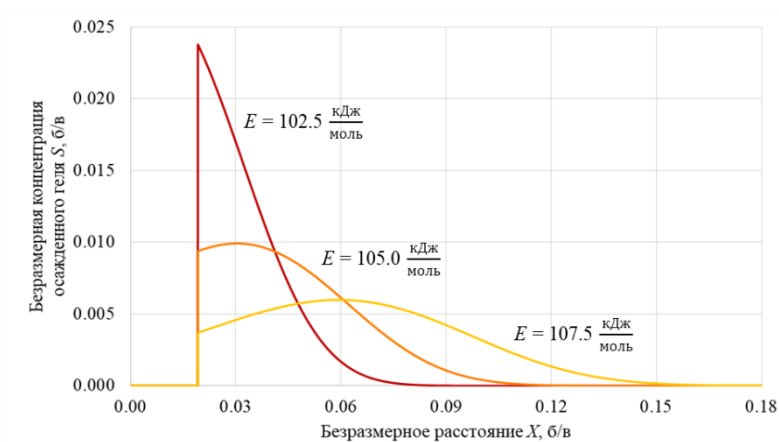


Рисунок 4 – Влияние энергии активации на стационарное распределение объёмного содержания геля в высокопроницаемом слое

Механизм немонотонного поведения стационарного распределения объёмной концентрации геля обуславливается конкуренцией двух процессов: роста температуры пласта по мере удаления от нагнетательной скважины и падения концентрации подвижной термогелеобразующей композиции по мере движения оторочки.

В разделе 3.4 представлен алгоритм расчёта динамики основных технологических параметров моделируемого участка с учётом закачки термогелеобразующей композиции в слоисто-неоднородный пласт с целью ограничения водопритока по высокопроницаемым слоям.

Проведённые расчёты показали, что формирование гелевого барьера в высокопроницаемом слое (красная точка) сопровождается уменьшением расхода воды, в то время как в низкопроницаемом слое (синяя точка) расход воды увеличивается. Процесс формирования гелевого барьера в низкопроницаемом слое сопровождается уменьшением расхода воды в низкопроницаемом слое, при этом увеличивается расход воды в высокопроницаемом слое, рисунок 5.

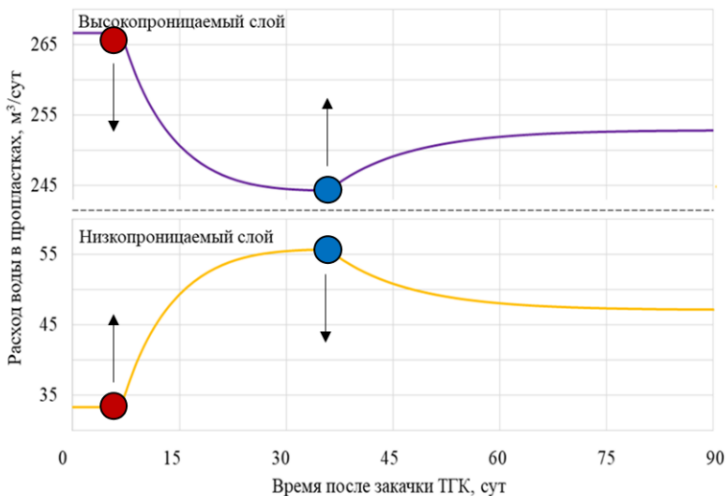


Рисунок 5 – Расчетная динамика расходов воды в пропластках

Так как по условию задачи расход воды в нагнетательную скважину поддерживается постоянным, формирование геля в пропластках сопровождается ростом репрессии на пласт, рисунок 6.

При заводнении моделируемого участка в динамике изменения обводнённости наблюдается две стадии: безводный режим добычи нефти и прорыв воды по высокопроницаемому пропластку, который сопровождается резким ростом обводнённости добываемой продукции, рисунок 7. Установлено, что максимальное снижение обводнённости наблюдается в интервалы времени, когда гелевые барьеры сформированы только в высокопроницаемых пропластках. Формирование барьеров в низкопроницаемых слоях приводит к частичному восстановлению обводнённости.

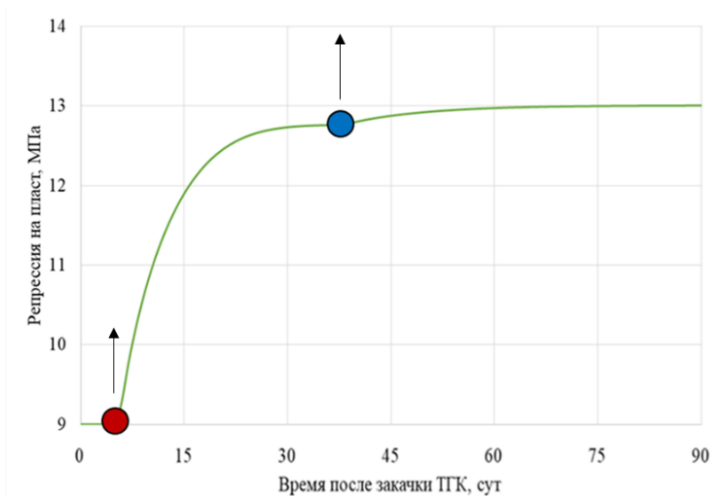


Рисунок 6 – Расчётная динамика репрессии на пласт



Рисунок 7 – Расчётная динамика обводнённости за весь период разработки

Результаты работы данного алгоритма показали, что закачка термогелеобразующей композиции в слоисто-неоднородный пласт заметно снижает обводнённость добываемой продукции и повышает коэффициент охвата пласта заводнением.

В разделе 3.5 представлены основные выводы по третьей главе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе решения теплофизических задач при движении жидкости в скважине и нефтяном пласте получены следующие выводы:

1. Разработан численно-аналитический алгоритм для определения коэффициента теплопередачи по данным единичного замера температуры в нагнетательной скважине и известной геотерме.

2. При исследовании температурного поля в пласте в однотемпературном приближении в рамках квазидвумерного подхода Ловерье установлено, что зависимость коэффициента теплопередачи от времени является принципиальной составляющей. На основе сопоставления численного решения термогидродинамической задачи в программном комплексе tНавигатор и аналитического решения установлена степенная зависимость коэффициента теплопередачи от времени.

3. На основе оценки характерных значений гидродинамического и теплового потоков установлено, что в слоисто-неоднородном пласте выравнивание температуры в вертикальном сечении происходит гораздо быстрее, чем гидродинамические перетоки между пропластками. Это заключение позволяет сформулировать термогидродинамическую модель, в которой тепловое поле считается однородным по вертикали, а гидродинамическое неоднородным.

4. Получено аналитическое решение задачи о движении термогелеобразующей композиции в слоисто-неоднородном пласте при наличии химической реакции гелеобразования, скорость которой зависит от температуры. Согласно решению, формирование гелевых барьеров в пропластках происходит на одном расстоянии от нагнетательной скважины, но в различные моменты времени, которые зависят от проницаемости пропластков.

5. Установлено, что максимальное снижение обводнённости наблюдается в интервалы времени, когда барьеры сформированы в высокопроницаемых пропластках и не сформированы в низкопроницаемых. Формирование барьеров в низкопроницаемых слоях приводит к частичному восстановлению обводнённости и повышению коэффициента охвата пласта заводнением.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях, входящих в международные базы данных:

1. Vydysh, I.V. Mathematical Modeling of the Process of Injecting Thermogel-Forming Compositions Into a Stratified Nonuniform Formation / I.V. Vydysh, K.M. Fedorov, T.A. Kremleva // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2025. – Vol. 98. – № 4. – P. 957–966.
2. Vydysh, I.V. Refinement of the Heat-Transfer Coefficient for Rapid Analysis of the Development of the Heat Front in a Producing Reservoir / I.V. Vydysh, K.M. Fedorov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2026. – Vol. 99. – № 1. – P. 69–78.

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

3. Выдыш, И.В. Прогноз распределения температуры в пласте при вытеснении нефти флюидом с температурой отличной от пластовой / И.В. Выдыш, К.М. Фёдоров, А.П. Шевелёв // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2023. – Том 9. – № 2 (34). – С. 6–22.
4. Выдыш, И.В. Особенности распространения теплового и гидродинамического полей в слоисто-неоднородном пласте и их учёт в задачах тепломассопереноса / И.В. Выдыш, К.М. Фёдоров // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2025. – Том 11. – № 2 (42). – С. 25–39.

В других изданиях:

5. Выдыш, И.В. Исследование теплофизических закономерностей применения термогелеобразующих композиций в нефтедобыче / И.В. Выдыш // Нефть и газ: технологии и инновации: материалы Международной научно-практической конференции 25–27 ноября 2025 г. – Тюмень: ТИУ, 2025. – С. 74–78.
6. Выдыш, И.В. Физико-математическое моделирование процесса закачки термогелеобразующей композиции в слоисто-неоднородный пласт / И.В. Выдыш // Актуальные проблемы нефти и газа: Сборник трудов VIII Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием 14–17 октября 2025 г. – Москва: ИПНГ РАН, 2025. – С. 26–29.
7. Выдыш, И.В. Решение обратной задачи по определению коэффициента теплообмена жидкости с окружающими слоисто-неоднородный пласт породами при помощи гидродинамического симулятора / И.В. Выдыш // Всероссийские студенческие Ломоносовские

чтения – 2025: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции (16 июня 2025 г.). – Петрозаводск: МЦПН «Новая наука», 2025. – С. 262–268.

Подписано в печать 16.04.2026. Тираж 110 экз.
Объём 1.0 уч. изд. л. Формат 60×84/16. Заказ № 124.

Отпечатано в типографии «КС Графит»
625003, г. Тюмень, ул. Урицкого, д. 5, оф. 319
Тел.: +7 (922) 003-07-40
E-mail: grafit@inbox.ru