

На правах рукописи



ВАРАВВА АРТЁМ ИГОРЕВИЧ

**НЕИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ
БИНАРНОЙ СМЕСИ**

**Специальность 01.04.14
Теплофизика и теоретическая теплотехника**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский государственный университет» (ФГАОУ ВО «ТюмГУ»).

Научный руководитель: **Татосов Алексей Викторович**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Шарыпов Олег Владимирович**
доктор физико-математических наук, заместитель директора Института теплофизики СО РАН, заведующий лабораторией радиационного теплообмена

Стрекалов Александр Владимирович
доктор технических наук, старший эксперт ДО ПАО РосНефти ТННЦ

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»**

Защита состоится «25» апреля 2019 г. 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.274.10 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 410.

Тел.: 89504898912

e-mail: artevar@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» и на сайте <https://diss.utmn.ru/sovet/diss-sovet-212-274-10/zashchita/630819/>

Автореферат разостлан «___» февраля 2019 г.

*Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.274.10
д. ф.-м. н.*



С. Ю. Удовиченко

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Россия наряду с Венесуэлой и Канадой входит в тройку стран-лидеров по объему запасов тяжелых углеводородов. В настоящее время ввиду низкой рентабельности разработки тяжелые нефти в России, как правило, относят к альтернативным источникам углеводородов. Тем не менее, анализ литературных источников показывает, что за счет освоения месторождений высоковязкой нефти добычу нефти можно увеличить на 25-30 млн. т. ежегодно.

Освоение месторождений тяжелой нефти зачастую невозможно без использования специальных технологий добычи, транспортировки и переработки нефти. В последние годы в связи с истощением крупных месторождений легкой нефти развитие методов увеличения нефтеотдачи и интенсификации добычи тяжелой нефти становится особенно актуальным. Использование широкоизвестных паротепловых методов воздействия зачастую сопряжено с рядом трудностей, ограничивающих их применение, повышается интерес к использованию альтернативных методов обработки скважин, сочетании теплового и физико-химического воздействия на пласт. Оценка эффективности большинства предлагаемых в литературе методов основана на лабораторных опытах, упрощенных аналитических оценках, небольшом числе опытно-промышленных испытаний. Требуется более глобальные исследования, комплексное рассмотрение лабораторных, полевых опытов и результатов подробного физико-математического моделирования.

Данная диссертационная работа посвящена изучению одного из перспективных методов обработки призабойной зоны пласта тепловыделяющей бинарной смесью. Суть метода состоит в закачке в прискважинную зону водного раствора химически-активных реагентов, разлагающихся в пласте с выделением газа и тепла. Анализ опытно-промышленных испытаний изучаемой технологии показывает, что на призабойную зону оказывается термобарохимическое воздействие: повышается температура призабойной зоны пласта, понижается вязкость нефти, устраняется кольматация, вымываются загрязнения и парафины, увеличивается трещиноватость коллектора. Решение задачи об обработке скважины тепловыделяющей бинарной смесью требует рассмотрения неизотермической фильтрации водного раствора активных компонентов в пористой среде с учетом химических превращений, обусловленных разложением реагентов. В ходе химической реакции выделяется энергия, происходит изменение тепловых полей, в нагретой зоне протекают процессы плавления твердых компонентов нефти, парафинов. Также в зоне реакции происходит выделение газа, увеличение давления, расширение и углубление естественных и образование новых искусственных трещин. Происходящие процессы оказывают влияние на проницаемость породы, физико-химические свойства флюидов, на процесс фильтрации, на результат и эффективность обработки. Решение данной задачи представляет собой как практический, так и научный интерес.

В диссертационной работе предлагается математическая модель, позволяющая описать процесс фильтрации водного раствора химически-активных реагентов в пористой среде с учетом изменения в ходе химической реакции тепловых полей, физико-химических свойств фильтрующихся флюидов и фазового состояния многокомпонентной углеводородной системы в пласте. На основе предложенной математической модели проводится теоретическое и численное изучение процесса фильтрации тепловыделяющей бинарной смеси.

Цель работы: изучение процесса неізотермической фильтрации водного раствора химически-активных реагентов с учетом химических превращений и фазовых переходов, происходящих в пористой среде; разработка теории и принципов физико-математического моделирования воздействия на прискважинную зону нефтяного пласта тепловыделяющими бинарными смесями, создание методики оценки эффективности обработки скважин тепловыделяющими бинарными смесями в зависимости от различных условий.

Основные задачи исследования:

- Создание математической модели, описывающей процесс неізотермической фильтрации реагирующего водного раствора химически-активных реагентов.
- Анализ теоретических исследований и экспериментальных данных с целью определения неизвестных параметров предложенной модели, а также обоснования используемых уравнений.
- Разработка численного метода и алгоритма решения сформулированной системы уравнений. Поиск приближенных аналитических решений задачи об обработке скважины тепловыделяющей бинарной смесью.
- Исследование влияния различных условий на эффективность воздействия тепловыделяющей бинарной смесью, на тепловые поля и поля давления, возникающие в призабойной зоне пласта в результате воздействия.
- Создание методики для приближенной оценки эффекта от обработок скважин тепловыделяющей бинарной смесью и для поиска подходящих скважин-кандидатов для обработок.

Научная новизна:

- Изучен процесс фильтрации реагирующего водного раствора химически-активных реагентов в пористой среде с учетом химической реакции разложения реагентов, изменения тепловых полей, полей давления и фазового состояния многокомпонентной углеводородной системы в пористой среде в ходе химической реакции.
- Разработана математическая модель воздействия на прискважинную зону тепловыделяющей бинарной смесью, предложены уравнения, позволяющие рассчитать скорость химической реакции между компонентами бинарной смеси в пористой среде при различных термобарических условиях, для различного состава активного раствора.
- Исследована эффективность применения тепловыделяющих бинарных смесей в различных условиях. Созданы графики и палетки, позволяющие про-

водить приближенную оценку эффективности применения тепловыделяющих бинарных смесей. Найдены приближенные аналитические решения задачи об обработке скважины тепловыделяющей бинарной смесью.

Практическая значимость. Разработанная математическая модель, а также созданный на ее основе программный комплекс позволяют проводить расчет воздействия тепловыделяющей бинарной смеси на прискважинную зону, оценивать тепловые поля и поля давления, возникающие в пласте в результате обработки, степень очистки призабойной зоны пласта от отложений твердых парафинов вследствие нагрева, потенциальную дополнительную добычу нефти из нагретого пласта, эффективность и целесообразность проведения обработки. Гидродинамическое моделирование теплобарохимических воздействий в созданном программном комплексе позволит обосновать проведение опытно-промышленных исследований, повысить эффективность применения тепловыделяющих бинарных смесей, сократить затраты на развитие данного метода, а также на разработку новых подходов, обеспечивающих интенсификацию добычи нефти. Созданные на основе результатов проведенных численных экспериментов графики и палетки, полученные приближенные аналитические формулы позволяют проводить экспресс-оценку и скрининг с целью выявления подходящих кандидатов для проведения обработок.

Достоверность обусловлена фундаментальностью лежащих в основе физических законов, корректностью и обоснованностью используемых допущений. Результаты верификационных расчетов совпадают с приближенными аналитическими решениями, результатами расчетов в общепризнанных коммерческих гидродинамических симуляторах, а также соответствуют лабораторным экспериментам. Наблюдается хорошее совпадение полученных результатов с данными промысловых исследований.

Положения, выносимые на защиту:

- Математическая модель фильтрации реагирующего водного раствора химически-активных реагентов в пласте с парафинистой нефтью.
- Математическая модель химической реакции разложения бинарного раствора нитрит натрия – нитрат аммония.
- Результаты исследования влияния температуры, химического состава активного раствора и свойств породы на кинетику химической реакции в лабораторных и в пластовых условиях.
- Результаты исследования влияния различных условий на эффективность использования тепловыделяющих бинарных смесей, на поля давления и температуры в зоне обработки.
- Приближенные аналитические решения задачи об обработке вертикальной скважины тепловыделяющей бинарной смесью.
- Методика для приближенной оценки эффективности воздействия тепловыделяющей бинарной смеси и для поиска подходящих скважин-кандидатов для обработок.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на 72-й международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2018» (г. Москва, 2018 г.); X научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений» (г. Уфа, 2017 г.); VI международном научном симпозиуме «Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов» (г. Москва, 2017 г.); научном семинаре кафедры механики многофазных систем ТюмГУ (г. Тюмень, 2018 г.)

Публикации

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 11 работах, в том числе в 3 статьях, входящих в перечень ВАК, и 1 публикации в издании, входящем в международные базы данных.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Благодарности

Автор выражает глубочайшую благодарность научному руководителю – д.ф.-м.н., доценту А.В. Татосову за неоценимую всестороннюю помощь в работе, обсуждение результатов и поддержку при написании диссертации; В.Е. Вершинину за предоставленные промысловые данные, ценные советы и консультации по ряду рассмотренных в работе вопросов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

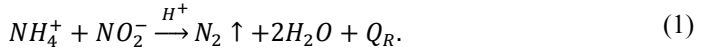
Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна и практическая значимость проведенного исследования.

В первой главе проводится обзор существующих методов интенсификации добычи высоковязкой нефти. Метод обработки прискважинной зоны тепловыделяющей бинарной смесью сравнивается с альтернативными методами теплового и физико-химического воздействия. Выделяются преимущества и недостатки изучаемого метода.

Во второй главе на базе фундаментальных уравнений механики многофазных сред формулируется математическая модель фильтрации реагирующего водного раствора химически-активных компонентов с учетом химической реакции разложения реагентов, а также процессов кристаллизации и плавления тяжелых компонентов нефти, парафинов, протекающих в нагретой зоне. Проведено обоснование используемых допущений. Для рассматриваемой задачи формулируются замыкающие соотношения.

При описании процессов, происходящих в пласте, рассматривается состояние пяти фаз: 0 - скелет горной породы, 1 – бинарная смесь, 2 - нефть, 3 - газ, 4 - твердый парафин. Первая фаза представляет собой водный раствор двух солей: нитрита натрия ($NaNO_2$) и нитрата аммония (NH_4NO_3). Реагенты

в растворе распадаются на ионы: 1 – NH_4^+ , 2 – NO_3^- , 3 – Na^+ , 4 – NO_2^- . В пласте под действием высокой температуры или добавленных в раствор инициаторов закачаные реагенты разлагаются с выделением газа и тепла:



Молярная концентрация активных компонентов (аммоний-ион и нитрит-ион) равна y , концентрация не взаимодействующих реагентов (натрий-ион и нитрат-ион) равна a . Плотность первой фазы ρ_1 – функция, зависящая от концентрации компонентов в растворе

$$\rho_1 = \rho_{10} + a\rho_a + y\rho_y, \quad (2)$$

ρ_{10} – плотность чистой воды, ρ_a, ρ_y – молярные плотности реагентов. Вторая фаза, подвижная нефть, состоит из 2 компонентов: 1 – легкий, не претерпевающий фазовых превращений, и 2 – тяжелый, участвующий в процессах плавления и кристаллизации парафина. Массовая концентрация компонентов равна C_{1k} . Плотность фазы ρ_2 зависит от массового содержания парафинов в нефти. Считается, что удельные объемы тяжелого и легкого компонента аддитивны:

$$\rho_2^{-1} = C_{21}\rho_{21}^{-1} + C_{22}\rho_{22}^{-1}, \quad (3)$$

ρ_{21} – плотность легкого компонента нефти, ρ_{22} – плотность тяжелого компонента. Третья фаза – выделяющийся в ходе химической реакции газ (азот). Выделение попутного нефтяного газа в пласте не учитывается. Используется уравнение состояния реального газа:

$$\rho_3 = M_3 p / Z_3 R T, \quad (4)$$

M_3 – молярная масса газа, $R = 8.31$ – универсальная газовая постоянная, Z_3 – коэффициент сверхсжимаемости. Четвертая фаза – твердый парафин, осевший на скелете породы, истинная плотность которого равна ρ_4 .

Пористость пласта m , плотность скелета ρ_0 , плотность твердого парафина ρ_4 считаются постоянными. Каждая фаза характеризуется своей насыщенностью s_i , скоростью фильтрации u_i , фазовой проницаемостью k_i , вязкостью μ_i , теплоемкостью c_i , а также давлением. Так как капиллярные силы незначительно влияют на движение фаз, давление в каждой из фазы считается одинаковым и равным p . Движение фаз подчиняется закону Дарси:

$$u_i = -\lambda_i \nabla p, \quad \lambda_i = \frac{k k_i}{\mu_i}, \quad i = \overline{1,3}. \quad (5)$$

Плавление твердого парафина и вовлечение его в поток влияет на абсолютную проницаемость пласта k . Это влияние описывается в рамках модели Козени-Кармана:

$$\frac{k}{k_0} = C \frac{m'^3}{(1 - m')^2}, \quad (6)$$

k_0 , m – проницаемость и пористость пласта, при условии, что все парафины находятся в жидком состоянии, $m' = m(1 - s_4)$ – пористость заполненного па-

рафинами пласта. В результате химической реакции выделяется тепловая энергия Q_R . Температура всех фаз, включая твердую породу, одинакова и равна T .

Система уравнений сохранения массы фаз и компонентов в пористой среде с учетом химической реакции и фазовых переходов имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(ms_1\rho_{10})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{u}_1) &= -ms_1 j (M_3 - y), \\
 \frac{\partial(ms_1 y)}{\partial t} + \nabla \cdot (y \mathbf{u}_1) &= -ms_1 j, \\
 \frac{\partial(ms_1 a)}{\partial t} + \nabla \cdot (a \mathbf{u}_1) &= 0, \\
 \frac{\partial(ms_2 \rho_2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_2 \mathbf{u}_2) &= J_2, \\
 \frac{\partial(ms_2 C_{22} \rho_2)}{\partial t} + \nabla \cdot (C_{22} \rho_2 \mathbf{u}_2) &= J_2, \\
 \frac{\partial(ms_3 \rho_3)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_3 \mathbf{u}_3) &= ms_1 M_3 j, \\
 \frac{\partial(ms_4 \rho_4)}{\partial t} &= -J_2,
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$C_{10} = 1 - \frac{1}{\rho_1} \sum_{k=1}^4 M_{1k} x_{1k}, \quad C_{21} = 1 - C_{22}, \quad s_1 + s_2 + s_3 = 1,$$

где j - скорость химической реакции; J_2 - скорость плавления твердых парафинов. Уравнение сохранения полной энергии в общем виде имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - m) \rho_0 e_0 + \sum_i^4 ms_i \rho_i e_i \right] + \nabla \cdot \sum_i^3 \rho_i h_i \mathbf{u}_i = \nabla \cdot \kappa \nabla T + h_T (T - T_{ext}), \tag{8}$$

где e_i , h_i - внутренняя энергия фазы, κ - коэффициент теплопроводности насыщенного скелета породы, T_{ext} - температура окружающих пород, h_T - коэффициент теплообмена пласта с окружающими породами.

Массообмен между фазами в результате фазового перехода и химической реакции описывается источниками слагаемыми. Скорость химической реакции j пропорциональна молярным концентрациям реагирующих веществ. Зависимость скорости химической реакции от температуры описывается уравнением Аррениуса:

$$j = A_{10} e^{-E_R/RT} y^\alpha. \tag{9}$$

Константы A_{10} , E_R , теплота реакции Q_R и порядок реакции α определяются на основе анализа лабораторных экспериментов и литературных источников, описанного в главе 4.

Кинетика растворения твердых парафинов в нефти описывается уравнением:

$$J_2 = m \rho_2 s_2 A_2 (C_{22}^* - C_{22}), \tag{10}$$

C_{22}^* – равновесная массовая концентрация тяжелого компонента в нефти; A_2 – константа скорости плавления парафинов. Нефть представляет собой многокомпонентный раствор углеводородов. Равновесная концентрация парафина C_{22}^* , растворенного в нефти, зависит от температуры, давления и компонентного состава пластового флюида и определяется в рамках модели термодинамического равновесия «нефть – твердый парафин». В данной диссертационной работе используется приближенная модель термодинамического равновесия, основанная на модели идеальных растворов:

$$C_{22}^* = \frac{M_{22}}{M_{22} - M_{21} + K_2 M_{21}}, K_2 = \gamma_{22} \exp \left[\frac{\Delta h_{22}}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_f} \right) \right]. \quad (11)$$

Предполагается, что нефть состоит из двух псевдо-компонентов, K_2 – константа равновесия, M_{2k} – молярная масса тяжелого псевдо-компонента. Свойства тяжелого псевдо-компонента: энтальпия фазового перехода Δh_{22} , температура плавления чистого парафина T_f и коэффициент активности γ_{22} , определяются на основе литературных данных. В диссертационной работе показано, что модель (11) позволяет описывать с хорошей точностью как экспериментальные данные, так и результаты подробного термодинамического моделирования. Константа скорости плавления парафина A_2 вычисляется по известной механистической модели:

$$\lim_{Re \rightarrow 0} Sh = \frac{1}{(1-m)^{0.33}} \left(\frac{1}{(1-m)^{0.33}} - 1 \right) \frac{f^2}{2} Re Sc^{0.66}, A_2 = \frac{6Sh \cdot D(1-m)}{d_p^2}, \quad (12)$$

где D – коэффициент диффузии, Sh – число Шервуда, $f = 0.6$ – настроечный параметр. В рамках модели (12) пористая среда представляется набором сферических твердых частиц равного диаметра d_p , с поверхности которых происходит диффузия активного вещества и фильтрующегося растворителя. Предполагается, что скорость растворения лимитирована процессом диффузии. В литературе показано, что модель (12) с хорошей точностью описывает ряд экспериментов на насыпных моделях.

Во второй части главы 2 описываются уравнения состояния, обосновываются используемые в расчетах теплофизические константы и корреляционные зависимости. Описываются используемые допущения и замыкающие соотношения. Считается, что теплоемкость нефтяной и газовой фазы $c_{2,3}$, вязкость μ_3 и коэффициент Джоуля-Томсона ε_3^* газа постоянные, жидкие фазы слабосжимаемые, коэффициенты изотермической сжимаемости и теплового расширения постоянные и не зависят от компонентного состава фаз. Вязкость водной и нефтяной фазы $\mu_{1,2}(T)$, коэффициент сверхсжимаемости газовой фазы $Z_3(p, T)$ и теплоемкость бинарной смеси $c_3(a, y)$ задаются при помощи корреляционных зависимостей, полученных на основе справочных данных. Фазовые проницаемости задаются моделью Кори, в проведенных расчетах используются параметры модели с месторождения-аналога.

В конце главы 2 проводится вывод уравнения переноса тепла с учетом зависимости теплоты фазового перехода и теплоты химической реакции от температуры и давления. Применяется классический подход, в рамках которого энтальпия фаз представляется в виде:

$$\begin{aligned} h_i &= c_i(T - T_0) + \frac{p - p_0}{\rho_i} + h_i^0, \\ h_3 &= c_3(T - T_0) - c_3\varepsilon_3^*(p - p_0) + h_3^0, \end{aligned} \quad (13)$$

c_i – теплоёмкость фазы, ε_3^* – средний коэффициент Джоуля-Томсона газа, h_i^0 – константы, определяющиеся условиями нормировки:

$$\begin{aligned} L_2 &= h_4^0 - h_2^0, \\ L_3 &= Q_R/M_3 = h_1^0 - h_3^0. \end{aligned} \quad (14)$$

Считается, что теплота плавления парафина L_2 и теплота химической реакции L_3 , отнесенная к единице массы образовавшегося газа, заданы при стандартных условиях: давлении p_0 и температуре T_0 . Уравнение переноса тепла имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - m)c_0\bar{T} + \sum_{i=1}^4 ms_i\rho_i c_i\bar{T} - ms_3\rho_3 c_3\eta_3^*\bar{p} \right] + \nabla \cdot \left[\sum_{i=1}^3 (\rho_i c_i\bar{T} - \rho_i c_i \varepsilon_i^*\bar{p}) \mathbf{u}_i \right] = \\ = \nabla \cdot \kappa \nabla T + h_T(T - T_{ext}) + ms_1 M_3 L_3 j - L_2 j, \\ \bar{T} = T - T_0, \quad \bar{p} = p - p_0, \\ \varepsilon_{1,2}^* = 1, \quad \varepsilon_3^* = \frac{1}{\bar{p}} \int_0^{\bar{p}} \varepsilon_3 dp, \quad \eta_3^* = \frac{1}{\rho_i c_i} + \varepsilon_i^*, \end{aligned} \quad (15)$$

$\varepsilon_3 = (T/c_3\rho_3 z_3)(\partial z_3/\partial T)_p$ – коэффициент Джоуля-Томсона для газовой фазы.

В главе 3 описывается разработанная методика численного решения сформулированной в главе 2 системы уравнений. Алгоритм решения уравнений основан на IMPES-методе. Данный метод был выбран ввиду простоты реализации и широкой распространенности для решения задач фильтрации жидкостей и газов в пористых средах. При вычислении нелинейных коэффициентов уравнений, а также неизвестных источниковых членов используется метод простой итерации.

Во второй части главы 3 кратко описывается используемый при пространственной дискретизации уравнений метод конечных объемов. В рамках данного метода проводится дискретизация слагаемых дифференциального уравнения переноса: временной производной, диффузионного и конвективного слагаемых, источникового члена, градиента. Рассматриваются различные подходы к расчету значений на границах конечных объемов: метод центральной разности, схема с разностями «против потока», TVD-схемы. Описывается процедура численного решения СЛАУ.

В начале главы 4 на основе литературных данных доказывається, что химическая реакция (1) может быть описана как реакция второго порядка:

$$j = \frac{d[N_2]}{dt} = A_1 \cdot [NH_4^+][NO_2^-], \quad (16)$$

A_1 – константа реакции. Затем на основе анализа лабораторных исследований кинетики химической реакции разложения компонентов тепловыделяющей бинарной смеси определяются константы реакции и порядок реакции. Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. В ходе рассматриваемых изотермических исследований тепловыделяющая бинарная смесь помещалась в термостат, внутри которого на всем протяжении эксперимента поддерживалась постоянная температура, измерялась скорость тепловыделения. Выделяющийся в ходе реакции газ отводился по открытой газоотводной линии. В ходе адиабатических экспериментов в результате экзотермической химической реакции смесь в адиабатической оболочке нагревалась, измерялась температура смеси в каждый момент времени. Эксперименты проводились как в присутствии, так и без инициатора. В качестве инициатора использовались альдегиды, действие которых сводится к понижению ph раствора. Рассчитанное количество альдегида добавлялось в бинарную смесь после ее нагрева до рабочей температуры непосредственно перед началом эксперимента.

Так как газ отводится из зоны реакции, установка в рассматриваемых экспериментах не является замкнутой системой. При анализе результатов исследований использовалось численное решение системы уравнений, описанной в главе 2. Ввиду того, что объем лабораторной колбы небольшой, $V_0 = 80$ мл, считалось, что давление, температура и характеристики флюидов одинаковы во всей рассматриваемой области. На основе анализа изотермических опытов были определены константы реакции при различной температуре и концентрации рабочей смеси. Полученные значения были аппроксимированы уравнением Аррениуса (рис. 2) для случая без инициатора:

$$A_1 = A_{10} \cdot e^{-\frac{E_R}{RT}} \quad A_{10} = 6.9 \cdot 10^7 \frac{\text{м}^3}{\text{моль} \cdot \text{с}}; \quad E_R = 77 \text{ кДж} \quad (17)$$

и в присутствии инициатора:

$$A'_1 = A'_{10} \cdot e^{-\frac{E'_R}{RT}} \quad A'_{10} = 2.7 \cdot 10^{11} \frac{\text{м}^3}{\text{моль} \cdot \text{с}}; \quad E'_R = 104 \text{ кДж} \quad (18)$$

Наблюдается хорошее совпадение полученных зависимостей с проведенными ранее экспериментами (рис. 2).

На основании совпадения результатов численных расчетов и адиабатических экспериментов (рис. 3) делается вывод, что предложенная математическая модель реакции (17)-(18) с хорошей точностью описывает результаты рассматриваемых лабораторных экспериментов и может быть использована для дальнейшего анализа.

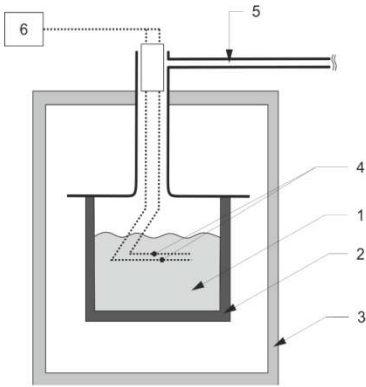


Рис. 1. Экспериментальная установка.
1 - бинарная смесь, 2 - колба, 3 – камера с электрообогревом, 4 - нагреватель, 5 - газоотводная линия, 6 - термостат

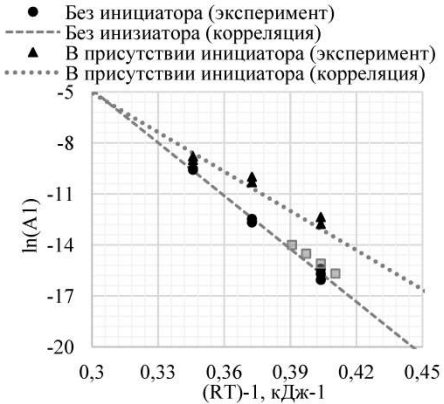


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных с корреляционными зависимостями (17)-(18)

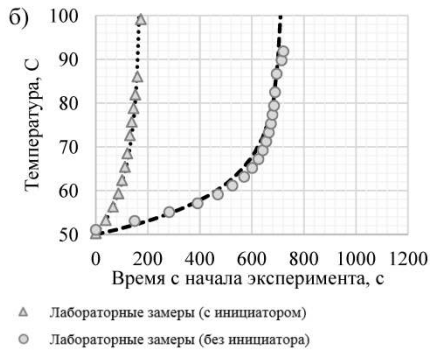
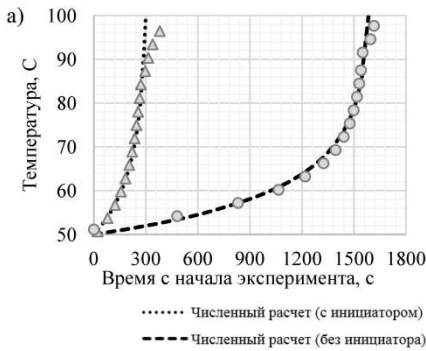


Рис. 3. Сравнение численного расчета с результатами адиабатических экспериментов. Концентрация тепловыделяющей бинарной смеси а) 50%, б) 70%

В главе 5 проведено изучение процесса фильтрации реагирующего водного раствора химически-активных компонентов с учетом химической реакции разложения реагентов, изменения тепловых полей и фазового состояния многокомпонентной углеводородной системы в пористой среде в ходе химической реакции. В начале главы проводится постановка задачи об обработке призабойной зоны вертикальной скважины тепловыделяющей бинарной смесью. Выделяется несколько промежуточных задач:

1. *Процесс закачки тепловыделяющей бинарной смеси в пласт.* На первом этапе производится закачка активного раствора в пласт. Реагенты смешиваются на устье или на забое скважины (в зависимости от используемого со-

става активного раствора и технологии проведения обработки) и с высокой скоростью под давлением поддаются в пласт.

2. *Протекание химической реакции разложения реагентов в пласте.* На практике скважина закрывается на период реакции, длительность второго этапа составляет порядка 24 часов. Наблюдается рост давления и температуры вблизи скважины. Выделяющееся тепло нагревает породу и флюиды. Выделяющийся газ создает высокое давление в зоне реакции.

3. *Добыча нефти из нагретого пласта.* На третьем этапе скважина запускается в работу. Породы нагревает протекающий через нее флюид, понижается вязкость нефти, повышается дебит скважины. В результате очистки повышается пористость и проницаемость в прискважинной зоне. Эффект затухает с течением времени из-за охлаждения породы и повторного осаждения парафинов.

Поставленные задачи решаются в одномерной радиальной осесимметричной постановке. Рассматриваемая область пласта ограничена с одной стороны стенкой скважины, $r = r_w$, с другой стороны – контуром питания, $r = r_e$. Толщина радиального слоя равна h . Для каждой задачи формулируются граничные условия (табл. 1). На границе области дренирования задается постоянное пластовое давление p_r и температура T_r . На скважине при закачке бинарной смеси в пласт задается постоянная приемистость q_1 , массовая концентрация компонентов бинарной смеси C_m и температура бинарной смеси T_1 , при добыче на скважине задается постоянное забойное давление p_{bhp} . На период протекания реакции в пласте скважина останавливается, на стенке скважины в расчёте задается условие не протекания.

Таблица 1. Граничные условия

Закачка бинарной смеси в пласт, $t < \tau_1$	$r = r_w: \begin{cases} \frac{\partial p}{\partial r} = q_1 \mu_1 / 2\pi r_w h k, T = T_1 \\ a = y = C_m \rho_{10} / (M_m - (\rho_a + \rho_y) C_m) \\ s_1 = 1, s_2 = s_3 = 0 \end{cases}$ $r = r_e: p = p_r, T = T_r$
Протекание химической реакции, $\tau_1 < t < \tau_2$	$r = r_w: \partial p / \partial r = 0, \partial T / \partial r = 0$ $r = r_e: p = p_r, T = T_r$
Добыча нефти из нагретого пласта, $\tau_2 < t < \tau_3$	$r = r_w: p = p_{bhp}, \partial T / \partial r = 0$ $r = r_e: p = p_r, T = T_r$

В первой части главы 5 для задачи об обработке вертикальной скважины тепловыделяющей бинарной смесью получаются приближенные аналитические решения. Используются следующие допущения: газ идеальный, жидкие

фазы несжимаемые, не учитывается поток тепла за счет теплопроводности, не учитывается растворение в нефти твердых парафинов.

Задача 1. Так как закачка бинарной смеси проводится до тех пор, пока активные компоненты в растворе не взаимодействуют, скорость химической реакции можно считать пренебрежимо малой. Тогда задача допускает простое математическое описание:

$$\pi r^2(s_1) = \pi r_w^2 + \frac{f_1'(s_1) q_1}{m} h t, \quad (19)$$

где $f_1(s_1) = \frac{k_1/\mu_1}{k_1/\mu_1 + k_2/\mu_2}$ – функция Баклея-Левретта. Уравнение (19) описывает положение характеристик с постоянным значением насыщенности в каждый момент времени. Ввиду несогласованности начального и граничного условий возникают разрывные решения – скачок насыщенности. Значение насыщенности на разрыве s_d и положение разрыва r_d определяются выражением:

$$\frac{f_1(s_d)}{s_d} = f_1'(s_d), \quad \pi r_d^2 = \pi r_w^2 + \frac{f_1(s_d) q_1}{s_d m} h t. \quad (20)$$

Концентрация реагентов постоянна в зоне, заполненной водной фазой, $r_w \leq r \leq r_d$, и определяется массовой концентрацией бинарного раствора C_m :

$$y = a = \frac{C_m \rho_{10}}{M_m - (\rho_a + \rho_y) C_m}, \quad r \leq r_d, \quad (21)$$

$M_m = \sum_{k=1}^4 M_{1k}$ – молярная масса реагентов. Таким образом, после закачки активного раствора в прискважинную зону образуется область пласта, заполненная тепловыделяющей бинарной смесью. Размер зоны r_d определяется уравнением (20), насыщенность активным раствором $s_1(r)$ уменьшается по мере удаления от скважины согласно решению (19).

Задача 2. Так как скважина закрывается на период протекания химической реакции, а активные реагенты разлагаются быстро по сравнению с характерным временем фильтрационных процессов, допустимо считать, что нефтяная и водная фазы в активный период реакции практически неподвижны. В этом случае рост температуры в пласте описывается уравнением:

$$\ln \frac{1 + RT_r/Q_R}{1 + RT/Q_R} = \frac{R}{M_3(c_1 - c_3 + R/M_3)} \ln \left(1 - \frac{(1 - s_t) s_{1t}^* M_3 (c_1 - c_3 + R/M_3)}{(\rho c)^* C_p} \right), \quad (22)$$

$$(\rho c)^* = (\rho_1 c_1 s_1)^* + (\rho_2 c_2 s_2)^*, \quad C_p = \frac{M_3 - \rho_y}{\rho_{10}}, \quad s_1(\mathbf{r}, t) = s_1^*(\mathbf{r}) s_{1t}(t).$$

Верхним индексом «*» обозначены начальные условия, определенные при решении задачи 1 (19)-(21). Проведенные численные оценки показывают, что ввиду низкой теплоемкости выделяющийся газ уносит из зоны реакции менее 3% тепловой энергии. С учетом этого, температура в пласте с точностью до 5% может быть вычислена по приближенной формуле:

$$T = T_r + \frac{(1 - s_t)s_1^*Q_R}{(\rho c)^*C_\rho}, \quad T_m = T_r + \frac{s_1^*Q_R y^*}{(\rho c)^*}, \quad (23)$$

T_m – температура в пласте после окончания химической реакции. Формула (23) может быть использована с хорошей точностью для расчета поля температуры, возникающего в пласте в результате обработки бинарной смесью (рис. 5).

Время протекания реакции с учетом (23) можно рассчитать по формуле:

$$t = \frac{C_\rho}{k_0} \left(e^{x_m} (x_m f + 1) \text{Ei}(x_r - x_m) + e^{x_r} \frac{x_m f}{(x_m - x_r)} - \text{Ei}(x_r) \right), \quad (24)$$

$$x = \frac{E_R}{RT}, \quad x_m = \frac{E_R}{RT_m}, \quad x_r = \frac{E_R}{RT_r}, \quad f = \frac{(T_m - T_r)}{T_m} \left(\frac{1}{y^* C_\rho} - 1 \right).$$

Уравнение (24) с хорошей точностью может быть использовано для расчета времени протекания реакции в пластовых условиях (рис. 4).

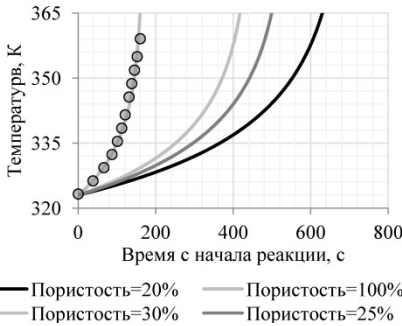


Рис. 4. Кинетика химической реакции при различной пористости пласта.

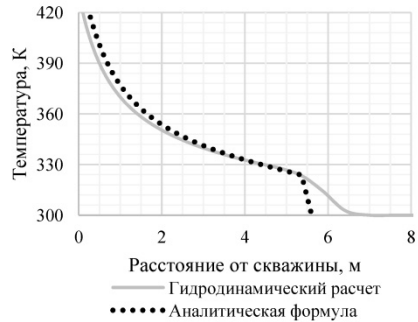


Рис. 5. Сравнение формулы (23) с подробным гидродинамическим расчетом.

Задача 3. После обработки бинарной смесью призабойная зона пласта нагревается, в результате чего понижается вязкость нефти, повышается продуктивность скважины. Для аналитического решения задачи рассматривается чисто нефтяной пласт, не учитывается влияние на продуктивность скважины закачаных реагентов и продуктов реакции, а также эффект от очистки при-скважинной зоны от твердых отложений парафинов. В этих предпосылках решение уравнения сохранения энергии можно искать методом характеристик. Уравнения характеристик имеют вид:

$$\begin{cases} T = T_r + (T_m - T_r)e^{-\alpha t}, & \alpha = \frac{2h_m}{hR_r}, \\ \pi r^2 = \pi r_{**}^2(T_m) - \frac{R_2 Q_2(t)}{R_r h} \end{cases}, \quad (25)$$

$Q_2(t) = \int_0^t 2\pi r u_r h dt$ – накопленная на момент времени t добыча нефти, $r_{**}^2(T_m)$ – константа интегрирования, распределение температуры (23), полученное при решении задачи 2. Согласно решению задачи 1 (19)-(20) при закачке бинарной смеси в пласт образуется фронт насыщенности. После окончания химической реакции образуется фронт температуры (23). Положение фронта температуры r_d определяется накопленной добычей нефти из нагретого ста Q_2 :

$$Q_2 = \frac{\pi h(r_d^2 - r_{d0}^2)R_r}{R_2}, \quad Q_2^{tot} = Q_2(\tau_3) = \frac{\pi h(r_w^2 - r_{d0}^2)R_r}{R_2}, \quad (26)$$

где r_d - положение фронта температуры при накопленном отборе нефти Q_2 , r_{d0} - положение фронта температуры в начальный момент времени, Q_2^{tot} – накопленная добыча нефти на момент времени, когда фронт температуры дойдет до скважины.

Дебит скважины можно рассчитать по уравнению Дюпюи. Так как в нагретой зоне $r_w \leq r \leq r_d$ вязкость нефти снижена:

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{2\pi k h \Delta p}{\int_{r_w}^{r_d} \mu_2(T) \frac{dr}{r} + \mu_{2r} \ln \frac{r_d}{r_w}} \quad (27)$$

Если разложить функцию $\mu_2(T) = \mu_2(T_r + (T_m(r^2 + r_{d0}^2 - r_d^2) - T_r)e^{-\alpha t})$ в ряд Тейлора в точке $r = r_d$, можно получить дифференциальное уравнение для нахождения положения фронта температуры

$$\frac{4k\Delta p R_2}{R_r} \frac{dt}{dr_d} + (\mu_{2d} - \mu'_{2d} r_d^2) \ln \frac{r_d^2}{r_w^2} + \mu'_{2d}(r_d^2 - r_w^2) - \mu_{2r} \ln \frac{r_d^2}{r_e^2} = 0. \quad (28)$$

Отдельно был рассмотрен случай $\alpha = 0$, когда можно пренебречь теплопотерями в кровлю и подошву пласта. В этом случае из (28) можно вычислить время, за которое фронт насыщения дойдет до скважины:

$$t_{\text{доб}} = \frac{\mu_{2r} \ln r_e/r_w}{2\pi k h \Delta p} \left(\frac{\pi h r_{d0}^2 R_r}{R_2} + \Delta Q \right) \quad (29)$$

$$\Delta Q = \frac{\pi h r_{d0}^2 R_r}{R_2} \frac{\left(1 - \frac{\mu_{2d} - \mu'_{2d}}{\mu_{2r}}\right) (\ln r_{d0}^2/r_w^2 + 1) + \frac{\mu'_{2d} r_{d0}^2}{\mu_{2r} 2}}{\ln r_e^2/r_w^2}.$$

ΔQ – дополнительная добыча нефти, получаемая в результате обработки. Данное приближение справедливо, если время добычи $t_{\text{доб}}$ меньше характерного времени теплообмена с окружающими пласт породами:

$$\frac{2h_m t_{\text{доб}}}{h R_r} \ll 1. \quad (30)$$

На рис. 6 показано сравнение численных расчетов, проведенных без учета теплопотерь в кровлю и подошву пласта, с результатами, полученными по формуле (29).

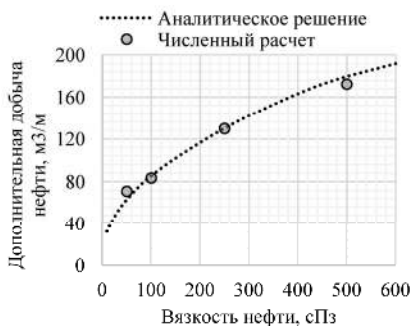


Рис. 6. Сравнение аналитического и численного расчета дополнительной добычи нефти из нагретого пласта

Полученные формулы (19), (20), (23) и (29) могут быть использованы для верхней оценки дополнительной добычи нефти получаемой в результате обработки прискважинной зоны тепловыделяющей бинарной смесью. Расчеты по полученным формулам могут быть использованы, например, для ранжирования и выбора подходящих скважин-кандидатов опытно-промышленных исследований.

Вторая часть главы 5 посвящена численному исследованию фильтрации тепловыделяющей бинарной смеси на созданном программном комплексе (ПК). В первую очередь описывается верификация расчетов. Для этого численное решение сравнивалось с аналитическими формулами (рис. 5, 6) и с результатами расчета в гидродинамическом симуляторе Schlumberger Eclipse 300 (E300).

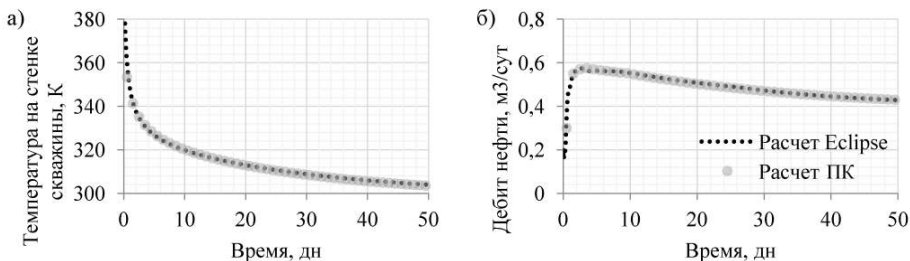


Рис. 7. Сравнение расчетов в созданном ПК с гидродинамическим симулятором E300. Динамика температуры на стенке скважины (а) и дебит нефти (б) по мере отбора нефти из нагретого пласта

При сравнении численных расчетов использовались упрощенные тестовые задачи: 1 – добыча нефти из нагретого пласта; 2 – закачка в пласт горячей воды; 3 – источник газа, находящийся вблизи скважины. Результаты сравнения симуляторов приведены на рис. 7-9. При закачке горячей воды в пласт в ПК наблюдается меньшая численная диффузия, чем в E300, так как используется

менее диссипативная TVD-схема дискретизации конвективных потоков. При закачке газа в пласт, напротив, за счет явного решения уравнений переноса, в ПК размазывание фронта вытеснения несколько больше.

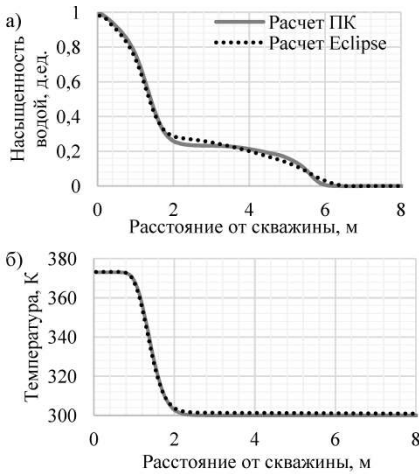


Рис. 8. Сравнение профилей насыщенности водой (а) и температуры (б) при закачке горячей воды в пласт рассчитанных в ПК и в симуляторе E300.

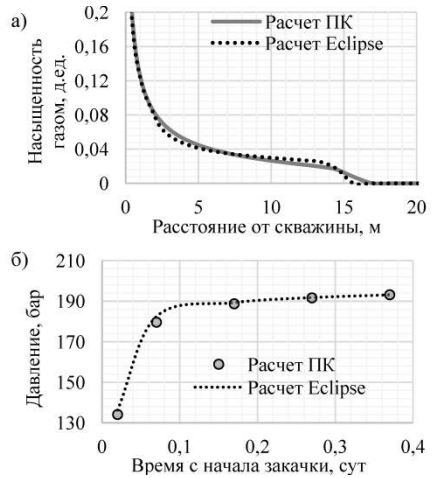


Рис. 9. Сравнение профилей насыщенности газом (а) и динамики роста давления (б) при закачке газа в пласт рассчитанных в ПК и в симуляторе E300.

На основании совпадения результатов численных расчетов в созданном ПК с аналитическими формулами и с результатами, полученными в симуляторе E300, сделан вывод о корректности используемой математической модели, алгоритма численного решения и его программной реализации.

Затем в главе 5 описываются численные эксперименты, проведенные для оценки эффекта воздействия тепловыделяющей бинарной смеси. Использовалась одномерная радиальная модель: внутренний радиус расчетной области, $r_w = 0.1$ м; внешний радиус, $r_e = 100$ м; толщина слоя $h = 1$ м; количество ячеек расчетной области, $N = 100$; размер ячеек расчетной сетки уменьшался к скважине по логарифмическому закону до 0.1 м. Не учитывалась неоднородность пласта, пористость, проницаемость, фазовые проницаемости во всех ячейках одинаковые. Для каждой промежуточной задачи проводился отдельный гидродинамический расчет. В расчетах варьировались следующие параметры: масса закачанных реагентов Q_{1m} и концентрация бинарной смеси C_m , проницаемость пласта k , вязкость нефти μ_2 , обводненность скважины w , и толщина пласта h . Варьируемые параметры и их диапазоны приведены в таблице 2, используемые константы – в таблице 3.

Таблица 2. Диапазоны варьируемых параметров

Проницаемость пласта, k , мД	5, 10, 50, 100, 250, 500
Вязкость нефти, μ_2 , сПз	10, 25, 50, 100, 250, 500
Расход компонентов бинарной смеси, q_{1m} , т/сут	0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4
Массовая концентрация бинарной смеси, C_m , %	50, 60, 70
Обводненность скважины, %	0, 5, 10, 30, 50, 70, 90
Толщина пласта, h , м	1,5, 10, 50, 100, 500

Таблица 3. Константы, используемые в расчетах

Пластовое давление, p_r , бар	100
Пластовая температура, T_r , К	300
Пористость, m , д.ед.	0.2
Вязкость, μ , сПз (вода; газ),	1.0; 0.01
Плотности нефти, ρ_2 , кг/м ³	850
Молярные плотности компонентов БС, ρ_a ; ρ_y , кг/моль	66.2; 12.7
Плотность породы, ρ_0 , кг/м ³	2700
Сжимаемость, β , 10 ⁻⁴ 1/бар (нефть; вода)	1.0; 0.1
Теплоемкость, c , кДж/кг (нефть; газ; порода),	2.0; 1.3; 1.0
Теплопроводность породы, κ , Вт/м/К	1.8
Коэффициент теплообмена пласт-порода, h_m , Вт/м ² /К	15

В качестве критерия эффективности использовалась величина удельной дополнительной добычи нефти (УДН) – отношение разницы накопленной добычи нефти в вариантах с и без обработки тепловыделяющей бинарной смесью к массе закачанных реагентов. Из проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Для нефти средней вязкости ($10 \text{ сПз} < \mu_2 < 50 \text{ сПз}$) обработки малоэффективны, УДН составляет 5-7 м³/т (рис. 10).

2. При увеличении вязкости нефти эффективность обработок тепловыделяющими бинарными смесями повышается. Для нефти вязкостью $\mu_2 > 250 \text{ сПз}$ УДН составляет 13-15 м³/т и слабо зависит от дальнейшего увеличения вязкости нефти (рис. 10).

3. Эффективность воздействия существенно зависит от концентрации активной смеси. Для растворов концентрации $C_m = 70\%$ УДН в 1.5 выше, чем для растворов с концентрацией $C_m = 50\%$, так как в пласт вносится меньший объем воды (рис. 10).

4. При росте обводненности эффективность обработок падает (рис. 11). В случае обводненности скважины $w = 30\%$ УДН в 2 раза меньше, чем в случае чисто нефтяной зоны. При обводненности $w > 50\%$ УДН ниже 5 м³/т, обработки малоэффективны.

5. При увеличении объемов закачки реагентов удельная эффективность воздействия повышается (рис. 13): если на 1 м толщины пласта закачано

$Q_{m1} = 6$ т реагентов, УДН на 30% выше, чем при закачке $Q_{m1} = 1$ т/м реагентов.

6. При учете теплопотерь в кровлю и подошву пласта УДН определяется фильтрационными характеристиками пласта, скоростью отбора нефти, толщиной пласта и величиной теплопотерь (рис. 12).

Результаты проведенных численных экспериментов были представлены в виде графиков и палеток, которые позволяют оценить как потенциально возможную удельную дополнительную добычу нефти (рис. 10, 13), так и уменьшение УДН из-за обводненности скважины (рис. 11), а также вследствие потерь тепла в кровлю и подошву пласта (рис. 12).

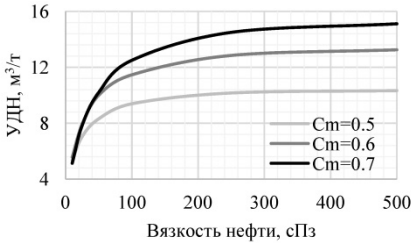


Рис. 10. Зависимость УДН от вязкости нефти и концентрации бинарной смеси

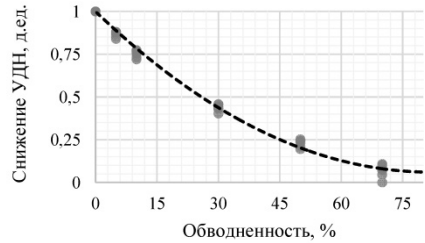


Рис. 11. Зависимость УДН от обводненности скважины

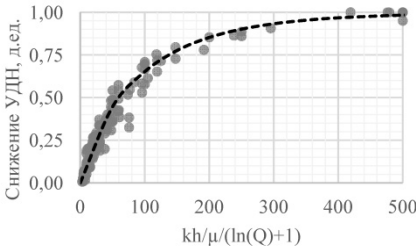


Рис. 12. Снижение УДН при учете теплопотерь в кровлю и подошву пласта

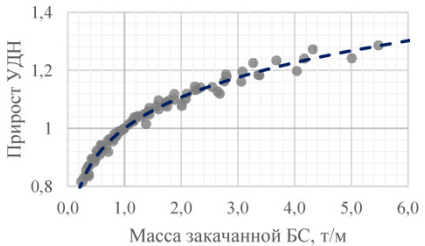


Рис. 13. Прирост УДН при увеличении объемов закачки бинарной смеси по сравнению с вариантом 1 т/м пласта

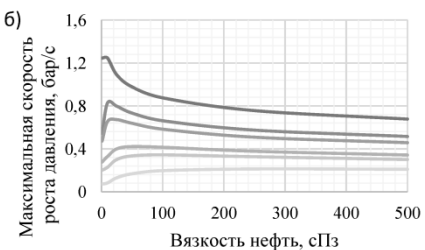
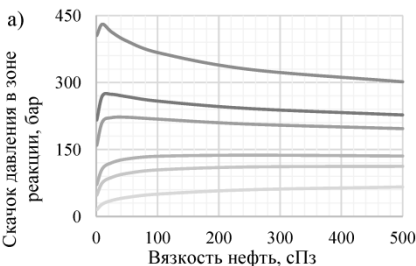


Рис. 14. Максимальное давление (а), возникающее в ходе реакции в пласте, и максимальная скорость роста давления (б)

Для оценки влияния состояния прискважинной зоны на эффективность обработки скважины тепловыделяющей бинарной смесью рассматривалась фактически проведенная обработка скважины Y месторождения X. В скважину было закачано 15 т активных реагентов. Приемистость скважины $q_1 = 360 \text{ м}^3/\text{сут}$, время закачки $\tau_1 = 3 \text{ ч}$. Массовая концентрация бинарной смеси $C_m = 70\%$, температура раствора $T_1 = 307 \text{ К}$. Свойства продуктивного пласта приведены в таблице 4. В рассматриваемых условиях прирост давления в зоне реакции не превышает 100 бар (рис. 14), при этом не будет происходить увеличение трещиноватости вблизи скважины. Согласно гидродинамическим исследованиям скважины идентифицируется скин-фактор равный 2, что может быть вызвано выпадением части парафинов в пласте из-за снижения пластового давления и разгазирования нефти в прискважинной зоне. По формуле Козе-ни-Кармана (6) была проведена оценка доли пор заполненных твердым парафином. Свойства тяжелого компонента нефти, необходимые для модели термодинамического равновесия твердое тело-жидкость (11), задавались по месторождению-аналогу.

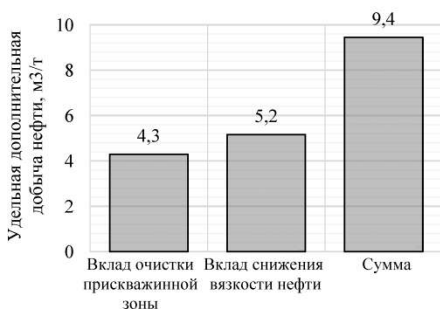


Рис. 15. Накопленная удельная дополнительная добыча нефти (на тонну закачанных реагентов) после обработки



Рис. 16. Снижение вязкости нефти и очистка призабойной зоны пласта после обработки

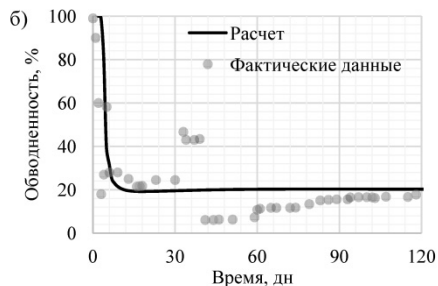
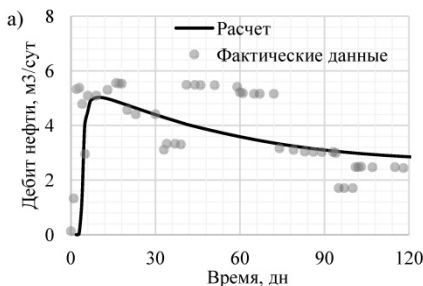


Рис. 17. Рассчитанная и фактическая динамика дебита нефти (а) и обводненности скважины (б)

Полученные в результате проведенных численных расчетов распределения насыщенности, температуры и вязкости нефти изображены на рис. 16. По результатам проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Радиус прогрева составляет $r_d = 5$ м. Максимальная температура на стенке скважины равна $T_m(r_w) = 363$ К, средняя температура в обработанной зоне $r_w < r < r_d$ равна $\bar{T}_m = 305$ К. Вследствие нагрева понижается вязкость нефти, призабойная зона очищается от парафинов.

2. Расчетная и фактическая динамика добычи нефти и обводненности совпадает с хорошей точностью (рис. 17).

3. Длительность эффекта от обработки составляет около 90 дней. В течение 10 дней после обработки наблюдается высокая обводненность скважины, затем вся закачанная вода добывается и обводненность скважины снижается до значения до обработки.

4. Состояние прискважинной зоны и степень ее очистки в значительно ($\approx 50\%$ суммарного эффекта от обработки) влияет на эффективность применения тепловыделяющих бинарных смесей (рис. 15).

Таблица 4. Свойства продуктивного пласта

Пористость, m , д.ед.	0.2
Толщина, h , м	5
Проницаемость, k , мД	370
Пластовая температура, T_r , К	287
Пластовое давление, p_r , бар (нач./тек.)	63 / 46
Плотность нефти в пл.у., ρ_2 , кг/м ³	887
Вязкость нефти в пл.у., μ_2 , сПз	57
Вязкость воды в пл.у., μ_1 , сПз	1.5
Парафиносодержание в нефти, масс. %	3.7

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты выполненных теоретических и численных экспериментальных исследований позволили сформулировать следующие основные выводы:

1. Изучен процесс фильтрации тепловыделяющего водного раствора активных компонентов (тепловыделяющей бинарной смеси) в пористой среде с учетом химической реакции разложения реагентов, изменения тепловых полей и фазового состояния многокомпонентной углеводородной системы в пористой среде в ходе химической реакции. На основе выполненного анализа сформулирована математическая модель воздействия на прискважинную зону теп-

ловыделяющей бинарной смесью. Проведено обоснование используемых уравнений, описывающих процесс плавления-кристаллизации твердых парафинов, химическую реакцию между активными компонентами бинарной смеси, а также процесс тепломассопереноса в пласте с учетом зависимости теплоты фазового перехода и теплоты химической реакции от температуры и давления.

2. Выполнен детальный анализ экспериментальных исследований кинетики реакции разложения компонентов бинарной смеси. Исследовано влияние температуры, химического состава активного раствора и свойств породы на скорость химической реакции в пластовых условиях. Предложены уравнения, позволяющие проводить расчет скорости химической реакции как в лабораторных, так и в пластовых условиях. Результаты численных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

3. Найдены приближенные аналитические решения задачи об обработке вертикальной скважины тепловыделяющей бинарной смесью. Получены аналитические формулы, позволяющие рассчитать радиус воздействия, тепловые поля, возникающие в пласте после обработки, кинетику химической реакции разложения активных реагентов в пластовых условиях, потенциально возможную дополнительную добычу нефти из нагретого пласта.

4. Разработан численный метод и алгоритм решения сформулированной системы уравнений, разработан программный комплекс, позволяющий проводить расчет закачки тепловыделяющей бинарной смеси в пласт, химическую реакцию между активными компонентами бинарной смеси, в ходе которой происходит изменение тепловых полей, плавление и вовлечение в процесс фильтрации твердых парафинов, а также последующую добычу нефти из нагретого пласта. Результаты численных расчетов согласуются с приближенными аналитическими решениями, а также с результатами полевых исследований.

5. Результаты выполненных численных экспериментов эффективности применения тепловыделяющих бинарных смесей в различных условиях систематизированы в виде графиков и палеток, которые позволяют провести оценку потенциальной возможной удельную дополнительную добычу нефти из пласта в результате обработки, так и уменьшение удельной добычи из-за обводненности скважины, а также вследствие потерь тепла в кровлю и подошву пласта. Показано, что состояние прискважинной зоны и степень ее очистки в значительной степени ($\approx 50\%$ суммарного эффекта от обработки) влияет на эффективность применения тепловыделяющих бинарных смесей. Показано, что химическая реакция между компонентами тепловыделяющей бинарной смеси способна саморазгоняться, что на практике может приводить к скачкообразному увеличению давления в зоне обработки, расширению естественных и созданию новых трещин, увеличивающих фильтрационные свойства коллектора.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Варавва А.И. Оценка эффективности обработки прискважинной зоны энерговыделяющей бинарной смесью / А.И. Варавва, А.В. Татосов В.Е. Вершинин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2018. – №2. – С. 8-21.
2. Варавва А.И. Аналитические решения задачи об обработке вертикальной скважины энерговыделяющей бинарной смесью / А.И. Варавва, А.В. Татосов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2018. – №4. – С. 8 21.
3. Варавва А.И. Оценка глубины гидратообразования в нефтяных скважинах, расположенных в зоне вечной мерзлоты / А.И. Варавва, В.Е. Вершинин, К.М. Федоров, Р.А. Хабибуллин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2013. – №7. – С. 21-32.

Публикации в журналах, входящих в международные базы данных

4. Варавва А.И. Оценка теплового эффекта обработки призабойной зоны пласта энерговыделяющими бинарными смесями / А.И. Варавва, А.В. Татосов, А.Н. Лищук, В.Е. Вершинин // Нефтяное хозяйство. – 2018. – №6. – С. 122-126.

Публикации в других изданиях

5. Варавва А.И. Очистка призабойной зоны пласта / А.И. Варавва, А.В. Татосов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2016. – №3. – С. 85 93.
6. Варавва А.И. Модель подачи реагирующей бинарной смеси в пласт / А.И. Варавва, А.В. Татосов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – №4. – С. 195-200 (из перечня ВАК).
7. Варавва А.И. Исследование кинетики разложения бинарной смеси применительно к воздействию на нефтяной пласт / А.И. Варавва, В.Е. Вершинин, Р.А. Идиятуллин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2017. – №6. – С. 67-72 (из перечня ВАК).
8. Варавва А.И. Численное моделирование тепловых эффектов при обработке скважин растворами бинарных смесей / А.И. Варавва, В.Е. Вершинин // Нефтегазовое дело. – 2017. – №6. – С. 20-34 (из перечня ВАК).
9. Варавва А.И. Методика численного моделирования научно-испытательного стенда на открытой интегрируемой платформе OpenFOAM / А.И. Варавва, В.Е. Вершинин, Р.М. Ганопольский, В.О. Поляков, С.С. Чудинов // Естественные и технические науки. – 2013. – №6 (68). – С. 403-407 (из перечня ВАК).
10. Варавва А.И. Оценка эффективности термобаро-химического воздействия на пласт при обработке скважин водными растворами бинарных смесей / А.И. Варавва, В.Е. Вершинин, К.М. Федоров, Б.В. Заволжский, А.Н. Лищук // Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов: тезисы докладов VI Международного научного симпозиума. – 2017. – С. 24-25.
11. Варавва А.И. Моделирование закачки химически активных реагентов в пласты с парафинистой нефтью / А.И. Варавва, А.В. Татосов, В.Е. Вершинин // Тезисы докладов 72-й международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2018». – 2018. – С. 158.

Подписано в печать 21.02.2019. Тираж 120 экз.
Объем 1,0 уч.-изд. л. Формат 60×84/16. Заказ 101.

Издательство Тюменского государственного университета
625003, г. Тюмень, ул. Семакова, 10.
Тел./факс (3452) 59-74-81, 59-74-68
E-mail: izdatelstvo@utmn.ru