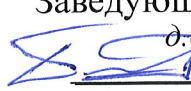


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК
Кафедра математического моделирования

ДОПУЩЕНО К ЗАЩИТЕ В ГЭК
И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ
Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., доцент
 Татосов А.В.
21 июня 2016 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЧКИ БИНАРНОЙ
СМЕСИ В ПЛАСТ

01.04.01 Математика

Магистерская программа «Математическое моделирование»

Выполнил работу
Студент 2 курса
очной формы обучения



Литвинов
Иван
Викторович

Руководитель работы
д.ф.-м.н.
доцент



Татосов
Алексей
Викторович

Рецензент
научный сотрудник,
ТюмФ ИТПМ СО РАН, к.ф.-м.н



Боталов
Андрей
Юрьевич

Тюмень 2016

Оглавление

Тепловые методы увеличения нефтеотдачи. Остаточная нефть.....	4
Современные методы воздействия на пластовую систему, их эффективность	5
Тепловые методы воздействия на пласт	6
Бинарные смеси и их использование для нагрева пласта	7
Поведение пластовой системы при закачке в пласт теплоносителя.....	11
Физическая постановка задачи	13
Математическая постановка задачи	13
Система уравнений	14
Интенсивность источников	18
Заключение	25
Список используемой литературы	26

Введение

В настоящее время основная добыча углеводородных соединений осуществляется на месторождениях, находящихся на поздней стадии разработки. Разработано большое количество методик, способствующих интенсификации разработки. Выделяются две операции по стимулированию добычи углеводородных соединений, обеспечивающих рентабельную деятельность. Это гидроразрыв пласта (ГРП) и нагревание породы горячим паром. Пар в России применяют весьма ограничено. Это связано с высоким уровнем опасности ввиду возможного взрыва горючих компонентов при подаче кислорода в стволе скважины.

Тепловые методы значительно уменьшают вязкость, что способствует увеличению скорости фильтрации при нагреве продуктивного пласта.

Таким образом, цель данной работы – создание и описание математической модели прокачки бинарной смеси с учетом экзотермической реакции с учетом фазового перехода твердых парафинов в жидкое состояние.

Для достижения поставленной цели был определен ряд задач:

- создать физическую постановку задачи;
- интерпретировать задачу с помощью математического аппарата;
- создать расчетную модель и алгоритм, отражающий процессы пластовой системы;
- анализ полученной модели.

Результатом настоящей работы является математическая модель, позволяющая оценить распространение полей насыщения флюидов, концентрации парафинов и температуры.

Тепловые методы увеличения нефтеотдачи. Остаточная нефть

В зависимости от характера места сосредоточения остаточные запасы углеводорода можно разделить на следующие виды:

- углеводороды в породах с низкой проницаемостью и низким содержанием воды;
- углеводороды в линзах и у непроницаемых поверхностей;
- пленочная нефть (сюда можно отнести углеводороды, удержанные силами капиллярного давления).

В породе, насыщенной двумя и более подвижными фазами, действуют силы:

- Вязкостные силы (гидродинамическое сопротивление): данные силы прямо пропорциональны вязкости углеводорода и скорости потока флюидов. В медленных процессах являются незначительными;
- Гравитационные силы: силы, характеризующиеся постоянно действующим градиентом давления, численно равным разности плотностей углеводородов. Под действием данного градиента становится возможным всплытие нефти в воде и газа в нефти;
- Упругие силы пласта: силы, характеризующиеся расширением всех компонентов системы при уменьшении пластового давления;
- Силы поверхностного натяжения: силы, возникающие на границе разделов фаз и фаза-твердое тело, величина определяется углами смачиваемости, характером насыщения., размером пор.

Современные методы воздействия на пластовую систему, их эффективность

Для повышения рентабельности разработки месторождений используют следующие методы воздействия на залежи углеводородов:

- **физико-химические методы** (полимерное заводнение, заводнение с применением поверхностно-активных веществ и т.д.)
- **газовые методы** (закачка углекислого газа, азота, углеводородных газов);
- **тепловые методы** (вытеснение нефти теплоносителями, внутрипластовые экзотермические окислительные реакции);
- **микробиологические методы** (введение в пласт бактериальной продукции или ее образование в пласте);

Под эффективностью методов увеличения углеводородов понимают экономически обоснованную оценку применимости технического комплекса мероприятий. Эффективность основана на изменении таких показателей, как:

- уменьшение сил межфазного натяжения на границе углеводород – вытесняющий агент;
- максимальное приближение подвижности углеводорода к подвижности вытесняющего агента (за счет уменьшения подвижности вытесняющего агента или изменения в меньшую сторону вязкости нефти) [8].

Тепловые методы воздействия на пласт

Из всех методов искусственного воздействия для повышения нефтеотдачи аналогичных залежей наиболее эффективны термические методы, позволяющие уменьшить вязкость пластовых флюидов и, как следствие, увеличить нефтеотдачу в несколько раз, что является проблематичным для других методов (например, гидравлический разрыв пласта).

Термические методы одновременно способствуют протеканию двух эффектов – это не только прогреванию пластовой системы, но и гидродинамический эффект. Тепло в пористой среде значимо влияет на все ее компоненты (твердые, жидкие, газообразные). При этом меняется характер взаимодействия их между собой.

Термические методы могут применяться в наиболее сложных физико-геологических условиях и позволяют добывать нефть с очень высокой вязкостью, увеличивая при этом конечную нефтеотдачу в несколько раз (с 6-20 до 30-50%).

Виды термических методов:

- паротепловое воздействие на пласт (ПТВ);
- парагазовое воздействие на пласт;
- закачка горячей воды;
- импульсно-дозированное тепловое воздействие на пласт(ИДТВ);
- внутрипластовое горение;
- комбинированный метод термополимерного воздействия (ТПВ);
- пароциклическая обработка призабойных зон добывающих скважин;
- закачка в пласт бинарных смесей (БС).

Бинарные смеси и их использование для нагрева пласта

Обводнение месторождений — нарастающая проблема современной нефтяной отрасли. Применение всех технологий на водной основе (закачка воды или пара с помощью нагнетательных скважин) способствуют увеличению обводненности.

Не способствующей резкому обводнению технология бинарных смесей сейчас активно начинает проявлять себя по сравнению с другими методами интенсификации.

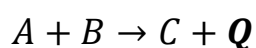
Бинарные смеси ($\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{NaNO}_2$: аммиачная селитра и нитрит натрия) неоднократно применялись для очистки от загрязнений зоны небольшого радиуса (1-2 метра) около скважины. Данная смесь аммиачной селитры массой 1 кг выделяет в среднем около 2 МДж тепла. Растворы неорганического нитрата (аммиачной селитры) и инициатора реакции (нитрита натрия), разделенные слоем буферного (инертного) раствора, закачивали в скважину по одному каналу — по насосно-компрессорной трубе (НКТ). Газы, выделившиеся после выхода растворов из НКТ и их реакции в обсадной трубе, входили в пласт.

В России, в республиках Татарстан, Удмуртия и Саратовской, Пермской, Оренбургской областях с применением БС способами, описанными в, была обработана призабойная зона пласта в нескольких десятках скважин. Эти способы обычно использовали в малодебитных скважинах, дававших 1—2 тонны нефти в сутки. Относительно небольшие количества (от 0,5 до 1,5 тонн) селитры использовали, как правило, лишь для реакции БС с целью прочистки «скин-слоя» породы, прилегающего к скважине. Тепловой вклад БС в добычу нефти в этом случае был мал, т.к. во время подготовки скважины к откачке нефти большая часть нагретой породы успевала остыть. После обработки нескольких десятков скважин увеличение дебита в среднем на 80—90% сохранялось от полугода до трех лет.

Позднее были разработаны новые высокоэнергетические составы БС и условия их безопасного применения на промыслах, пригодные для эффективного теплового стимулирования процесса извлечения нефти из пласта.

В результате реакции 1 кг БС нового состава выделяется до 20 МДж тепла, достаточного для нагрева на 100 К породы массой до 200 кг [5]. Они построены в своем большинстве на основе органических алканоламинов или полиаминов с небольшим по длине углеродным скелетом. в реакции

Выделение тепла и газов происходит по реакции вида



Органическая селитра по сравнению с аммиачной селитрой обладает следующими преимуществами:

а) тепловой эффект реакции разложения органической селитры выше теплового эффекта реакции разложения аммиачной селитры;

б) составы на основе органической селитры безопасны, т.к. фронт разложения органической селитры в скважине, как правило, движется с постоянной скоростью, не ускоряясь и не переходя в детонацию. (Аммиачная селитра разлагается с переходом в детонацию при содержании воды меньше 20%.)

Горячие газы, выделившиеся в процессе реакции одной тонны БС, в скважине способны произвести разрыв пласта и создать в новых трещинах «внутрипластовый реактор» с начальным объемом не менее 1 м³. При последующей закачке в пласт нескольких десятков тонн БС объем реактора, равный объему новых трещин, можно увеличить в десятки раз. Для этого нужно инициировать реакцию БС только в пласте. Применение на промыслах объемного внутрипластового реактора позволит:

а) увеличить массу БС, закачиваемых в скважину и в пласт, в десятки и сотни раз и переместить зону реакции из скважины в пласт;

б) снизить тепловую нагрузку на скважинную арматуру и цементный камень, фиксирующий обсадную колонну;

в) произвести мощный горячий разрыв пласта, который в перспективе должен стать более эффективным, чем известный метод гидроразрыва пласта (ГРП) холодной жидкостью. Горячий разрыв пласта продуктами реакции БС и создание магистральных трещин сопровождаются нагревом пласта и нефти в окрестности трещин, что улучшает условия добычи. Относительно маломощные промысловые насосы, закачивающие растворы БС, могут обеспечить протекание быстрой реакции, выделяющей тепло, с мощностью, превышающей мощность насосов современного технического комплекса ГРП (10 000 л. с.). Бинарные смеси с теплотворной способностью 8 - 20 МДж/кг, закачиваемые со скоростью 8 кг/с, могут обеспечить работу внутрипластового реактора, максимальная мощность которого равна [9]

$$2 \cdot (4 \text{ кг/с}) \cdot (8 + 20) \text{ МДж/кг} = (60 + 160) \text{ МДж/с} = (67000 - 200000) \text{ л.с.}$$

Такую необычно высокую мощность можно получить только при использовании эффективных смесителей реагентов. При этом необходим надежный контроль режима реакции БС, в которой выделяется горячий газ, совершающий работу при входе в пласт;

Авторы утверждают, что бинарные смеси обводняют пласт в 10 — 20 раз меньше, чем пар. Поэтому технология БС является реальной альтернативой существующей нересурсосберегающей паровой технологии.

Процесс эксплуатации нефтедобывающей скважины приводит со временем к неизбежному засорению призабойной зоны, что значительно снижает дебит. Разработано большое количество способов борьбы с накопленными отложениями. Одним из перспективных и представляющих

научный интерес является метод подачи в продуктивный пласт реагирующей энерговыделяющей бинарной смеси. Протекающая в пласте химическая реакции в удаленной от забоя зоне приводит к значительному повышению температуры и, как следствие, удалению высоковязких флюидов и парафинов. В данной работе предложена математическая модель движения бинарной смеси с учетом экзотермической реакции и фазового перехода твердых парафинов в жидкое состояние.

Поведение пластовой системы при закачке в пласт теплоносителя

На текущий момент самым популярным реагентом для нагрева пласта является подогретая вода. У нее высокая удельная теплоемкость (≈ 4.2 кДж/кг $^{\circ}$ С), что позволяет оказывать на пласт интенсивное воздействие. Также для целей нагрева пласта используют горячий пар.

Температурным фронтом называется процесс распределения температуры в пласте с течением времени. Теоретически фронт температуры получается при конвективном переносе тепла в пласте, изолированном от внешних потерь энергии, т.е. при без учета теплопроводности пласта и потерь тепла в выше- и нижележащие пласты. В этом случае по пласту будет продвигаться фронт с температурой, равной начальной температуре смеси после произведенной химической реакции (рис. 2а). При учете теплопроводности «термоизолированного пласта» изменение температуры происходит более плавно и принимает вид, показанный на рис. 2б. При учете потерь температуры в выше- и нижележащие пласты при конвективном переносе изменение температурного профиля будет описываться графиком, который изображен на рис. 2в.

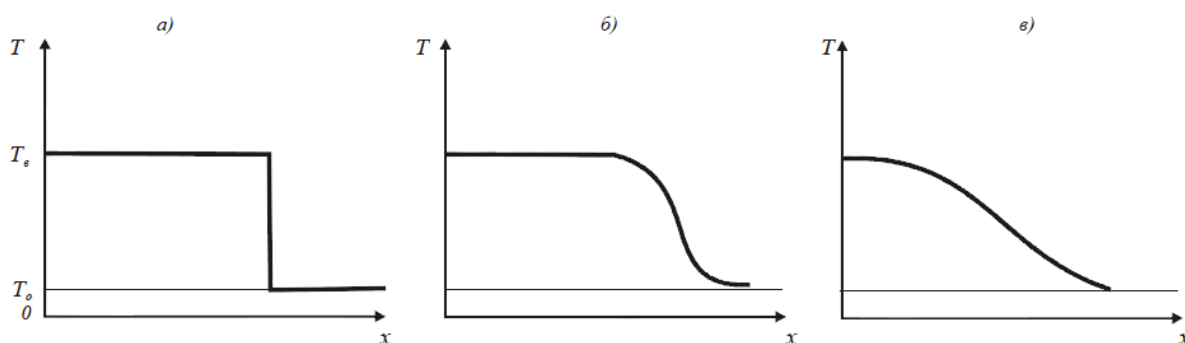


Рис. 1 Схематизированное изображение температурного профиля при нагнетании горячей смеси: а) без учета теплопроводности; б) с учетом теплопроводности; в) с учетом теплопроводности и потерь тепла в выше- и нижележащие пласты

После химической реакции и выделения энергии происходит нагрев породы и повышается температура системы. Однако, после окончания процесса реагирования температура системы начинает уменьшаться.

Механизм нефтеотдачи при вытеснении нефти теплоносителями носит комплексный характер и включает несколько элементов:

- вытеснение фактурой самого теплоносителя – при этом особых различий для агентов с различной температурой нет;
- снижение вязкости нефти – оптимальная температура, до которой следует нагревать пласт, соответствует точке на кривой температурной характеристики вязкости нефти, после которой вязкость нефти снижается менее эффективно;
- термическое расширение – происходит дополнительное извлечение нефти за счет увеличения объема флюида и уменьшения порового объема;
- интенсификация капиллярной пропитки – с повышением температуры ускоряется капиллярная пропитка водой породы, что сопровождается капиллярным вытеснением из породы части нефти [11].

В разных физико-геологических условиях разрабатываемого объекта, при разных видах применяемых теплоносителей количественное влияние отдельных элементов механизмов нефтеотдачи различно.

Таким образом, применение тепловых методов увеличения нефтеотдачи в разработке вязких и высоковязких нефтей является наиболее эффективным направлением.

Физическая постановка задачи

В работе рассматривается одномерное нестационарное неизотермическое течение бинарной смеси с учетом экзотермической реакции и фазового перехода твердых парафинов в жидкое состояние.

Также используются следующие допущения:

- отсутствует газовая фаза;
- флюиды в пластовых условиях представляют собой несмешивающиеся жидкости, которые находятся в жидкой фазе;
- капиллярные и гравитационные силы не учитываются;
- плотности нефти и воды являются стационарными;
- температура всех представленных фаз является общей.

Математическая постановка задачи

В число дифференциальных уравнений фильтрации должны входить:

- уравнения перемещения для компонентов бинарной смеси, нефти, воды;
- уравнения движения – закон Дарси для жидких фаз;
- уравнения изменения концентрации парафина и пористости;
- уравнение теплового баланса.

Для нахождения решения системы уравнений необходимо наличие граничных условий и в начальный момент времени. Для определения изотермической фильтрации необходимо задать уравнение, определяющее фронт температуры с течением времени. Это уравнение определяется путем анализа уравнения сохранения энергии в пластовой системе. Начальные условия задаются в виде полей неизвестных функций в начальный момент времени.

Краевые условия задаются на границах пласта, причем их число должно быть равно порядку дифференциального уравнения по координатам.

Система уравнений

Определим фазы, определяющие модель. Для каждой из фаз определена скорость фильтрации.

В первую фазу включены компоненты: вода, элементы бинарной смеси и продукты происходящей в пласте реакции. Плотность фазы ρ_1 зависит от массовой концентрации одного из реагентов C_s и массовой концентрации компонента продуктов реакции C_r .

Вторая фаза представлена нефтью и жидким парафином с плотностью ρ_2 . Фаза зависит от концентрации парафинов C в нефти.

Также стоит учитывать фазу твердого парафина с плотностью ρ_p .

В целом, в трех фазах, определены шесть компонентов, у которых характеристиками являются давления (p_1 и p_2) и скорости (u_1 и u_2). В модель для каждого компонента необходимо уравнения переноса. Кроме этих шести уравнений нужны два уравнения фильтрации (для каждой скорости u_1 и u_2). Дополнительно необходимо учитывать процесс плавления твердого парафина и вовлечение его в фильтрацию, что приводит к изменению пористости m . Без учета сжимаемости твердой породы, пористость будет изменяться в зависимости от средней плотности третьей фазы. Взаимосвязь давлений в фазах определим с помощью насыщенности s . Энергия образуется за счет происходящей экзотермической реакции. В итоге имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t}(ms\rho_1) + \nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{u}_1) = 0 \\
& \frac{\partial}{\partial t}(msC_s\rho_1) + \nabla \cdot (C_s\rho_1 \mathbf{u}_1) = -J_s \\
& \frac{\partial}{\partial t}(msC_r\rho_1) + \nabla \cdot (C_r\rho_1 \mathbf{u}_1) = J_r \\
& \frac{\partial}{\partial t}[m(1-s)(1-C)\rho_2] + \nabla \cdot [(1-C)\rho_2 \mathbf{u}_2] = 0 \\
& \frac{\partial}{\partial t}[m(1-s)C\rho_2] + \nabla \cdot [C\rho_2 \mathbf{u}_2] = J_p \\
& \frac{\partial a}{\partial t} = -J_p \\
& \rho_p \frac{\partial m}{\partial t} = J_p \\
& \mathbf{u}_1 = -\frac{k_1}{\mu_1} \nabla p_1 \\
& \mathbf{u}_2 = -\frac{k_2}{\mu_2} \nabla p_2 \\
& p_2 - p_1 = f(s) \\
& \frac{\partial}{\partial t}[msc_1\rho_1 T + m(1-s)c_2\rho_2 T + c_3 T] + \\
& + \nabla \cdot (c_1\rho_1 T \mathbf{u}_1 + c_2\rho_2 T \mathbf{u}_2) = \kappa \nabla^2 T + Q_{in} + Q_{out}
\end{aligned} \tag{1}$$

В качестве упрощения системы (1) плотность первой фазы примем за константу

$$\rho_1 = const \tag{2}$$

Для второй фазы плотность также примем независимой от концентрации парафина

$$\rho_2 = const \tag{3}$$

Третья фаза представлена твердым парафином с параметром усредненной плотности a . Истинная плотность фазы также будет равна ρ_2 .

Базовая модель подачи реагирующей бинарной смеси отражает основные законы механики сплошной среды и будет представлять собой: уравнения перемещения первой фазы,

$$\frac{\partial}{\partial t}(ms) + \nabla \cdot \mathbf{u}_1 = 0 \tag{4}$$

уравнения перемещения нефти первоначального состава и одного из реагентов бинарной смеси

$$\frac{\partial}{\partial t} [m(1 - s)] + \nabla \cdot \mathbf{u}_2 = \frac{J_p}{\rho_2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (msC_s) + \nabla \cdot (C_s \mathbf{u}_1) = -\frac{J_s}{\rho_1} \quad (6)$$

уравнения, отражающие изменение содержания твердого парафина и пористости

$$\rho_2 \frac{\partial m}{\partial t} = J_p \quad (7)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -J_p \quad (8)$$

уравнения Дарси для жидких фаз

$$\mathbf{u}_1 = -\frac{k_1}{\mu_1} \nabla p \quad (9)$$

$$\mathbf{u}_2 = -\frac{k_2}{\mu_2} \nabla p \quad (10)$$

Где $k_1 = k_1(s)$ – относительная проницаемость первой фазы, $k_2 = k_2(s)$ – относительная проницаемость второй фазы μ_1, μ_2 - вязкости фаз

Складывая уравнения (4) и (5), получим

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2) = \frac{J_p}{\rho_2} \quad (10)$$

или, применяя (7)

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2) = 0$$

В плоском случае

$$\frac{\partial}{\partial x} (u_1 + u_2) = 0$$

По свойству дифференцирования, последнее выражение будет представлено в следующей форме

$$u_1 + u_2 = U(t) = const \quad (11)$$

Выражение (11), учитывая закон Дарси (9) и (10) примет следующий вид

$$U = -k \left[\frac{f_1(s)}{\mu_1} + \frac{f_2(s)}{\mu_2} \right] \frac{\partial p}{\partial x} \quad (12)$$

Используя теорию Баклея-Левретта, скорости фильтрации u_1 , u_2 запишем следующим образом

$$u_1 = -\frac{k_1}{\mu_1} \frac{\partial p}{\partial x} = U \frac{\frac{f_1(s)}{\mu_1}}{\frac{f_1(s)}{\mu_1} + \frac{f_2(s)}{\mu_2}} = UF(s) \quad (13)$$

$$u_2 = -\frac{k_2}{\mu_2} \frac{\partial p}{\partial x} = U \frac{\frac{f_2(s)}{\mu_2}}{\frac{f_1(s)}{\mu_1} + \frac{f_2(s)}{\mu_2}} = (1 - F(s))U \quad (14)$$

где $F(s)$ – функция Баклея-Левретта

$$F(s) = \frac{\frac{f_1(s)}{\mu_1}}{\frac{f_1(s)}{\mu_1} + \frac{f_2(s)}{\mu_2}} \quad (15)$$

Для учета температурной составляющей необходимо внести уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [m s c_1 \rho_1 T + m(1-s)c_2 \rho_2 T + c_3 T] + \nabla \cdot (c_1 \rho_1 T u_1 + c_2 \rho_2 T u_2) = \\ = \kappa \nabla^2 T + Q_{in} + Q_{out} \end{aligned} \quad (16)$$

Коэффициент теплопроводности среды κ зависит от нескольких параметров, однако, если рассматривается однотемпературная модель, то значение можно принять значение, соответствующее теплопроводности скелета; c_1 , c_2 – удельные теплоемкости жидких фаз, c_3 – теплоемкость твердой среды.

Система дифференциальных уравнений (1) с учетом (11)-(15) будет представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(ms) + U \frac{\partial}{\partial x} F &= 0 \\
\frac{\partial}{\partial t}(msC_s) + U \frac{\partial}{\partial x}(FC_s) &= -J_s \\
\frac{\partial}{\partial t}[m(1-s)C] + U \frac{\partial}{\partial x}[(1-F)C] &= J_p \\
\frac{\partial a}{\partial t} &= -J_p \\
\frac{\partial m}{\partial t} &= \frac{J_p}{\rho_2} \\
\frac{\partial}{\partial t}[msc_1\rho_1T + m(1-s)c_2\rho_2T + c_3T] + \\
+\nabla \cdot (c_1\rho_1Tu_1 + c_2\rho_2Tu_2) &= \kappa\nabla^2T + Q_{in} + Q_{out}
\end{aligned} \tag{17}$$

Интенсивность источников

Скорость плавления кристаллического парафина будем считать пропорциональной разности концентрации $C(T)$ и предельно ограниченного значения C^* , определяющего фазовое равновесие

$$J_p = \begin{cases} k_p(C^* - C), & \text{(I)} \\ 0, & \text{(II)} \end{cases} \tag{18}$$

Условие (I) состоит в том, что либо $C^* < C$, либо $C^* > C$ и $a > 0$:

$$\begin{cases} C^* < C \\ C^* > C, \\ a > 0 \end{cases}$$

условие (II) требует $C^* > C$ и $a = 0$:

$$\begin{cases} C^* > C \\ a = 0 \end{cases}$$

Фазовое равновесие определяется температурой и составом нефти

$$0 < C^* = C^*(T) .$$

Скорость реакции пропорциональна произведению мольных концентраций (долей) компонентов бинарной смеси

$$J_s = k_s(T)[C_{si}][C_s] = k_s(T)[C_s]^2 \tag{19}$$

Плотность источников тепла

$$Q_{in} = q_s J_s \quad (20)$$

$$Q_{out} = q_p J_p + q_{out} \quad (21)$$

где q_s – теплота бинарной реакции, q_p – скрытая теплота плавления парафина,

$$q_{out} = -K_A(T - T_0)$$

коэффициент K_A характеризует теплообмен пласта с окружающими породами.

Модельная задача

В качестве объекта анализа была рассмотрена численно разрешенная модель прокачки бинарной смеси. Для расчетов в качестве функции Баклея-Левретта принята зависимость $F(s) = \frac{th((5 \cdot s - 0.5) + 1)}{2}$, график которой представлен на рисунке 1.

рис. 1).

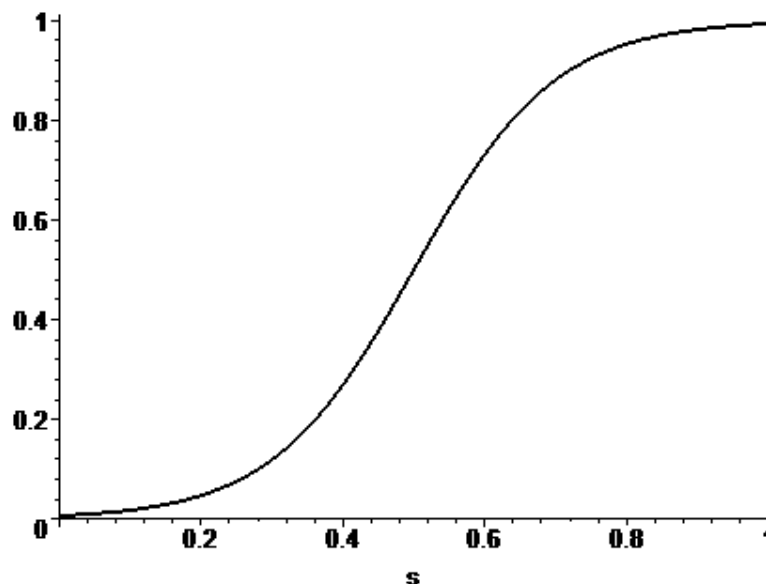


Рисунок 1 – График функции Баклея-Левретта, принятый в модельной задаче

Скорость плавления парафина задана как зависимость концентрации парафина и температуры. Для расчетов использовалась функция $J_p = 1 - k_0 e^{-T} - C$, где k_0 – начальное значение концентрации парафина.

Скорость экзотермической реакции является функцией концентрации реагента и температуры. В расчетах использовалась зависимость $J_s = k_1 e^T C_s^2$, где k_1 - константа.

Энергия, поступающая в пласт за счет протекания химической реакции, Q_{in} определена прямопропорционально концентрации реагента в пластовой системе $Q_{in} = k_2 J_s$, где k_2 - константа пропорциональности температуре. Потери энергии пластовой системой Q_{out} в расчетах для упрощения принимаются зависимыми только от температуры.

Для замыкания системы необходимо задание начальных и граничных условий. Начальные условия задают распределение полей в начальный период времени. Начальные условия для насыщения s , температуры T , массовой концентрации одного из реагентов C_s , массового содержания парафина в нефти C и концентрации парафина на единицу объема a , используемые в модельной задаче, показаны ниже:

$$\begin{aligned}
 s(x, 0) &= 0,4 \\
 C_s(x, 0) &= 0 \\
 C(x, 0) &= 0,1 \\
 a(x, 0) &= 0,2 \\
 T(x, 0) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Граничные условия задают распределение расчетных полей на границе рассматриваемой области. Граничные условия были заданы для полей насыщения s , температуры T , массовой концентрации одного из реагентов C_s , массового содержания парафина в нефти C . Для модельной задачи использовались следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
 s(0, t) &= 0,9 \\
 C_s(0, t) &= 0,5 \\
 C(0, t) &= 0,1 \\
 T(0, t) &= 0 \\
 \left. \frac{\partial s(x, t)}{\partial x} \right|_{x=1} &= 0 \\
 \left. \frac{\partial C_s(x, t)}{\partial x} \right|_{x=1} &= 0 \\
 \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=1} &= 0 \\
 \left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x=1} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Распределение насыщенности для различных временных шагов представлено на рисунке 2.

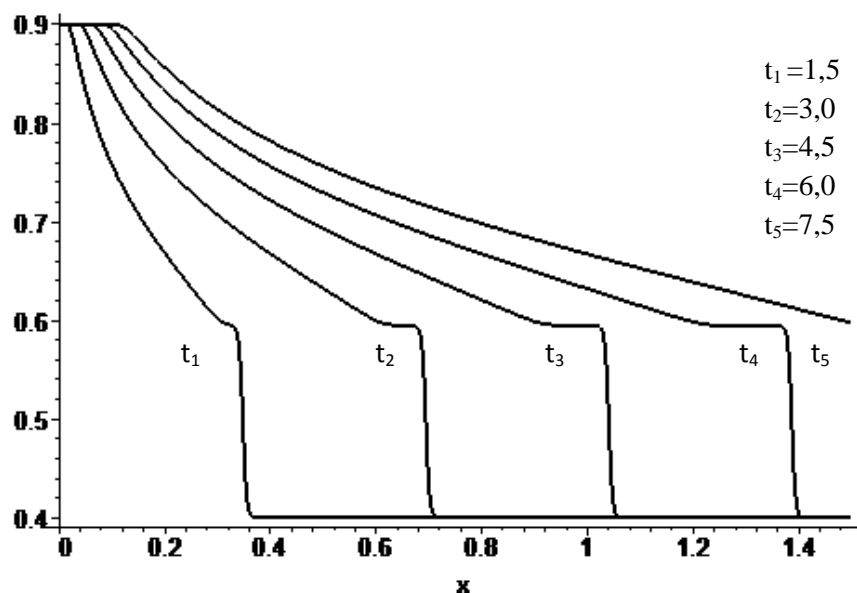


Рисунок 2 – Распределение насыщенности в модельной задаче

Из рисунка видно, что фронт насыщенности распределяется со скоростью, отличной от физической скорости задачи.

График распределения массовой концентрации парафина на единицу порового объема представлен на рисунке 3.

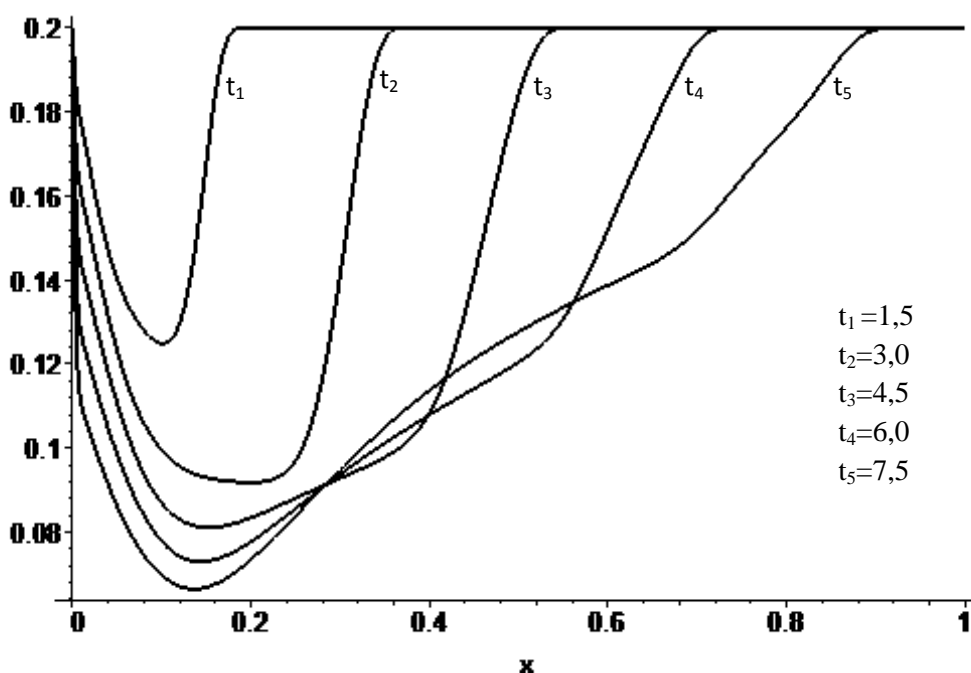


Рисунок 3 – Распределение концентрации твердого парафина в модельной задаче для различного времени

На рисунке показано, как с течением времени меняется величина концентрации твердого парафина. В результате экзотермической реакции происходит плавление парафина, однако из-за остывания пластовой системы

на расстоянии величина концентрации парафина вновь становится исходной. График движения температурного фронта для аналогичных временных шагов показан на рисунке 4.

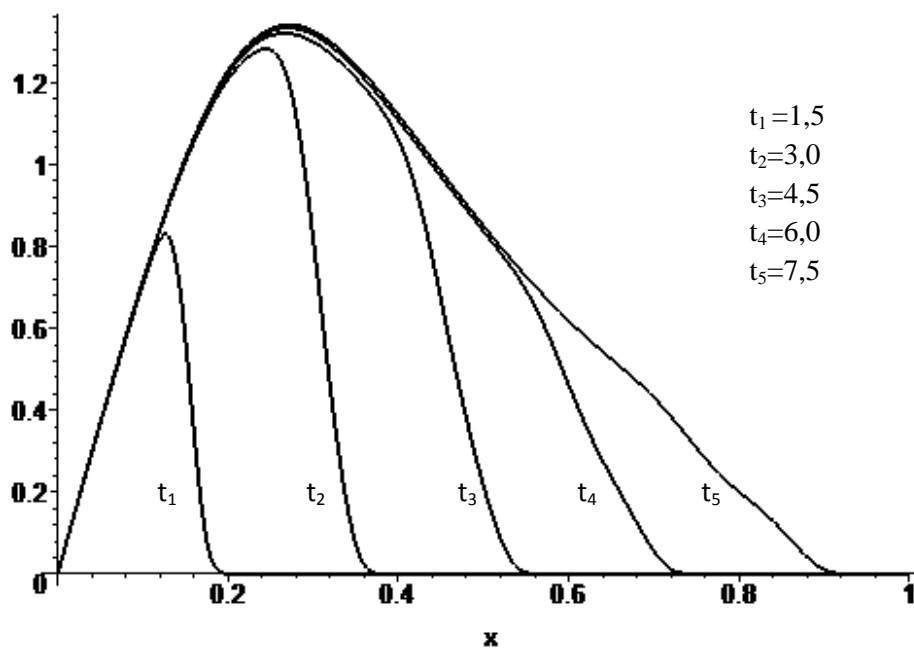


Рисунок 4 – Распределение температуры в модельной задаче для различного времени

На графике показано, как с постоянной величиной подачи энергии от экзотермической реакции продвигается фронт температуры. В начальные периоды времени фронт температуры продвигается с физической скоростью задачи, температура резко уменьшается. С течением времени характер графика температуры приобретает более пологий вид. Это объясняется необходимостью поддерживать температуру в уже прогретом интервале фильтрации. Реагент расходуется на протяжении всей модельной области.

График распределения величины концентрации реагентов представлен на рисунке 5.

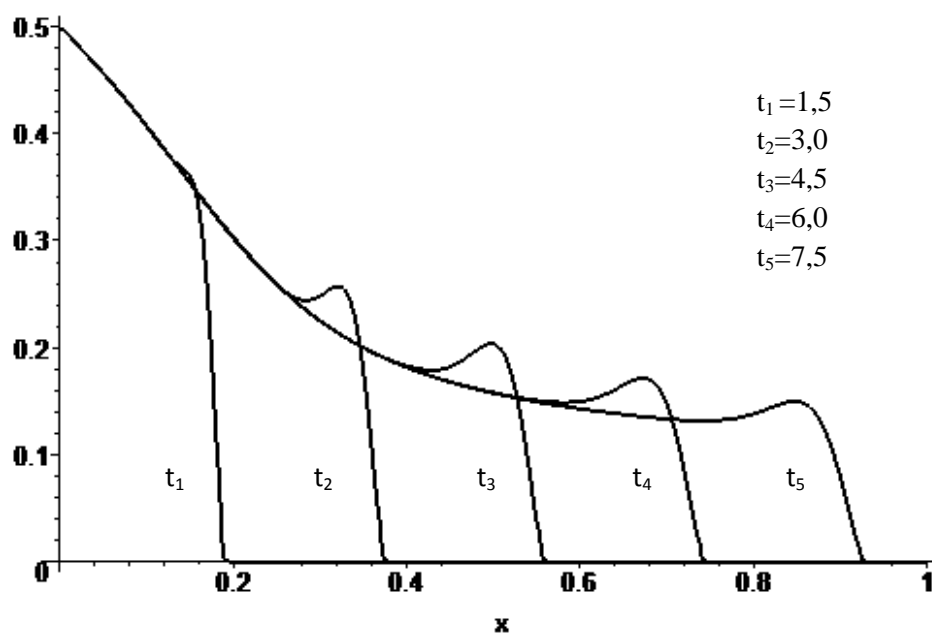


Рисунок 5 – Распределение величины концентрации реагентов в модельной задаче для различного времени

Монотонное уменьшение значения концентрации объясняется происходящей экзотермической реакцией. На уже прогретый участок модельной области расходуется небольшое значение величины реагента. С приближением к фронту температуры используется весь подведенный реагент. Скачок происходит за счет выгорания продуктов реакции.

Заключение

В результате анализа литературы установлено, что перспективным направлением увеличения темпов добычи нефти в России является разработка месторождений вязких и высоковязких нефтей.

Цель работы, заключающаяся в создании модели прокачки бинарной смеси с учетом экзотермической реакции и плавления парафинистых осложнений, достигнута.

В ходе работы были поставлены и решены следующие задачи:

- создание физической задачи;
- интерпретация физической постановки с помощью мат аппарата
- создание математической модели, отражающей процессы пластовой системы;
- анализ результатов.

Результатом настоящей работы является численный метод, позволяющий оценить распространение полей насыщения флюидов, концентрации парафинов и температуры.

Список используемой литературы

1. Азиз. А, Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
2. Барентблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М., Недра, 1984.
3. Басниев К.С., Дмитриев Н.И., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1993.
4. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика: Учебник для вузов. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005.
5. Бурже Ж., Сурко П., Комбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. Пер. с франц. –М.: Недра, 1989
6. Закиров Э.С. Трехмерные задачи прогнозирования, анализа и регулирования разработки месторождений нефти и газа. – М.: Изд. «Грааль». – 2001.
7. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов / Р.Д. Каневская // Москва-Ижевск: ИКИ. – 2003.
8. Лысенко В.Д. Разработка нефтяных месторождений. Теория и практика. М. Недра, 1996.
9. Малофеев Г. Е., Мирсов О. М., Чоловская И. Д. Нагнетание в пласт теплоносителей для интенсификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи.: Учебное пособие. –М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2008.
10. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. – М.: Издательство МЭИ, 2003.
11. Пирвердян А. М. Физика и гидравлика нефтяного пласта. – М., Недра, 1982