

0- 778615

На правах рукописи

ДАВЛЕТБАЕВ АЛЬФРЕД ЯДГАРОВИЧ

**НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ВЫТЕСНЕНИЕ ВЫСОКОВЯЗКОЙ
НЕФТИ СМЕШИВАЮЩИМСЯ АГЕНТОМ ПРИ
ОДНОВРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

01.02.05. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Уфа 2009

Работа выполнена на кафедре прикладной физики ГОУ ВПО
«Башкирский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ковалева Лиана Ароновна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Шагапов Владислав Шайхулаязамович

кандидат технических наук, доцент
Калиновский Юрий Валентинович

Ведущая организация: Институт механики Уфимского научного
центра РАН, г.Уфа

Защита диссертации состоится «17» сентября 2009 г. в 15 час. на
заседании диссертационного совета Д 212.013.09 в Башкирском
государственном университете по адресу: 450074, г. Уфа, ул.
З. Валиди, 32, физико-математический корпус, ауд. 216

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Башкирского
государственного университета по адресу: 450074, г. Уфа, ул.
З. Валиди, 32

Автореферат разослан «15» августа 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, профессор



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000549206

Л.А. Ковалева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. К настоящему времени доля трудноизвлекаемых запасов нефти (месторождения с тяжелыми высоковязкими нефтями, с низкопроницаемыми терригенными и карбонатными коллекторами и т.п.) уже превысила половину извлекаемых запасов. Из всех методов искусственного воздействия для повышения нефтеотдачи таких залежей, наиболее эффективными остаются термические методы воздействия на пласт. Они позволяют добывать нефть вязкостью до 10 Па·с. Применение тепловых методов обеспечивает кратное увеличение извлекаемых запасов месторождений тяжелых нефтей и темпов их разработки. К этим методам относятся паро- и парогазоциклические обработки призабойной зоны пласта, паротепловое вытеснение нефти из пласта, внутрипластовое горение, их комбинации с физико-химическими методами и т.д. Однако все перечисленные методы имеют ограничения по вязкости пластовой жидкости, приемистости скважин и практически не применимы в случае сверхвязких нефтей.

Методом, принципиально отличающимся от традиционных, является использование энергии высокочастотного (ВЧ) электромагнитного (ЭМ) поля. Отличительная особенность ВЧ ЭМ воздействия от других тепловых методов – возникновение в толще залежи объемных источников тепла. Вследствие диэлектрических потерь в среде энергия ЭМ волн преобразуется в тепловую энергию, в результате происходит повышение температуры и уменьшение вязкости жидкости в пласте.

Изучением процессов тепломассопереноса в различных средах при воздействии ЭМ полей занимались многие ученые, такие как: Айрапетян М.А., Ахметов А.Т., Галимбеков А.Д., Дыбленко В.П., Зыонг Нгок Хай, Кислицын А.А., Ковалева Л.А., Макогон Ю.Ф., Морозов Г.А., Насыров Н.М., Нигматулин Р.И., Саяхов Ф.Л., Симкин Э.М., Фатыхов М.А., Хабибуллин И.Л., Abernethy E.R., Chakma A., Hiebert A.D., Islam M.R., Kasevich R.S., Ovalles C., Sahni A., Spencer H., Wadadar S.S. и другие. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования свидетельствуют о том, что при излучении ВЧ ЭМ поля значительно интенсифицируются процессы тепло- и массопереноса в многокомпонентной углеводородной системе. Были получены положительные результаты

и опытно-промысловых испытаний в США, Канаде, Венесуэле, а также в нашей стране под руководством профессора Саяхова Ф.Л.

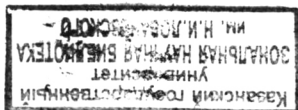
В качестве одного из вариантов повышения эффективности метода извлечения высоковязких нефтей с применением ЭМ воздействия предложено сочетание его со смешивающимся вытеснением, которое предполагает комбинированное воздействие на пласт ВЧ ЭМ поля и закачку в пласт растворителя. При этом в связи с конечной электропроводностью труб скважин, передающих ЭМ энергию на забой, они нагреваются, и растворитель попадает в пласт уже в нагретом состоянии, причем температура нагрева зависит от мощности и частоты генератора ЭМ волн, забойного давления и электрофизических свойств нефтенасыщенного коллектора.

Предложенный способ воздействия на продуктивный пласт посредством нагнетательной скважины имеет ряд недостатков, которые сдерживают его применение в случае сверхвязких нефтей и битумов. При реальных расстояниях (около 100 м) области воздействия ЭМ полем между нагнетательными и добывающими скважинами не перекрываются, поэтому образуются застойные зоны без фильтрационного течения и переноса тепла. Имеет место неэффективное использование выделяемой энергии, отсюда высокая энергетическая затратность и невысокая эффективность метода.

В настоящей работе предлагается осуществлять ЭМ воздействие на продуктивный пласт, комбинированное с одновременной закачкой растворителя посредством добывающей скважины. Для реализации метода возникает необходимость предварительной оценки количества закачиваемого растворителя, длительности комбинированного воздействия и эффективного отбора жидкости, теплотер в окружающие продуктивный пласт и скважину породы, предупреждения возможных проблем при реализации и ряд других задач.

Таким образом, **актуальность** темы диссертации обусловлена необходимостью изучения процессов тепломассопереноса при ВЧ ЭМ воздействии, комбинированном с закачкой растворителя, на продуктивный пласт посредством добывающей скважины и оценки эффективности этого воздействия при добыче высоковязких и сверхвязких нефтей.

Цели работы. Теоретические исследования особенностей процессов тепло- и массопереноса при смешивающемся вытеснении



углеводородной системы в многослойной пористой среде под действием ВЧ ЭМ поля.

Основные задачи.

1. Математическое моделирование закачки растворителя в добывающую скважину при одновременном электромагнитном воздействии.

2. Исследование процессов тепломассопереноса в многослойной среде при нагнетании смешивающегося агента с одновременным электромагнитным воздействием путем численной реализации математической модели.

3. Изучение влияния перекрестных эффектов тепломассопереноса, возникающих при движении многокомпонентной системы в пористой среде под действием ЭМ поля, на процесс конвективно-диффузионного переноса массы.

4. Исследование влияния объемных источников тепла в пористой среде и тепла, выделяемого в стенках труб при распространении по ним ЭМ волн, на технологические процессы в системе «добывающая скважина - продуктивный пласт -окружающие породы».

5. Оценка энергетической эффективности использования мощного ВЧ ЭМ излучения в сочетании с закачкой растворителя на месторождениях высоковязких нефтей с целью интенсификации добычи нефти.

Методы решения поставленных задач. Поставленные в диссертационной работе задачи решены численными методами на базе теоретических исследований и известных экспериментальных данных. **Научная новизна** работы состоит в следующем:

- сформулирована математическая модель нагнетания растворителя в добывающую скважину при одновременном ЭМ воздействии с учетом явлений термодиффузии и электротермодиффузии, проявляющихся в многокомпонентной системе при ее взаимодействии с внешним ВЧ ЭМ полем;

- проведено численное исследование процессов тепломассопереноса в многослойной системе «добывающая скважина – продуктивный пласт – окружающие породы» при нагнетании растворителя с одновременным ЭМ воздействием;

- обоснована схема поэтапного воздействия на залежь высоковязкой нефти с целью оптимизации метода, минимизации

энергетических затрат и выбора оптимального режима разработки с точки зрения технологической и энергетической эффективности при реализации комбинированного воздействия.

Практическая ценность. Полученные в работе результаты могут быть использованы для повышения эффективности теплового воздействия на продуктивный пласт с высоковязкой и сверхвязкой пластовой нефтью, в частности, для повышения охвата воздействием, максимального использования выделяемой тепловой энергии, интенсификации добычи нефти и т.д. Разработанные математические модели могут быть использованы при проектировании разработки месторождений тяжелых углеводородов и выбора оптимальных режимов воздействия в каждом конкретном случае.

Достоверность результатов. Достоверность результатов диссертации основана на корректном применении основных уравнений механики сплошных сред, на проведении тестовых расчетов и сравнении результатов расчетов с точными решениями.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на международных, всероссийских конференциях и региональных научных школах-семинарах:

- Международная научно-техническая конференция «Geopetrol: Наука, техника и технология в развитии поисков и добычи углеводородов на суше и море» (Польша, Закопане, 2006, 2008);
- Fifth International Conference of Applied Mathematics and Computing (Plovdiv, Bulgaria, 2008);
- Международная конференция «Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям» (Москва, 2008);
- 10th Annual International Conference «Petroleum Phase Behavior and Fouling» (Rio de Janeiro, Brazil, 2009)
- Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Москва, 2004; Екатеринбург, 2005; Уфа, 2008);
- VIII Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике (Сочи, 2007);
- Российская конференция «Механика и химическая физика сплошных сред» (Бирск, 2007);
- Всероссийская конференция «Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности (теоретические и прикладные аспекты)» (Москва, 2007);

- Всероссийская школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (Уфа, БашГУ, 2008);
- Научно-практическая конференция «Обратные задачи в приложениях» (Бирск, 2008);
- Региональная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике (Уфа, БашГУ, 2003, 2004);
- XXVIII школа-семинар по проблемам механики сплошных сред в системах добычи, сбора, подготовки, транспорта и переработки нефти и газа под руководством академика АН Азербайджана Мирзаджанзаде А.Х. (Уфа, ТРАНСТЭК, 2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 2 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 151 страниц, в том числе 53 рисунка и 8 таблиц. Список литературы состоит из 123 наименований.

Благодарность. Автор выражает свою глубокую и искреннюю благодарность за консультации и практическую помощь при подготовке диссертационной работы научному руководителю профессору Ковалевой Л.А. и к.ф.-м.н. Насырову Н.М.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность задач, рассмотренных в диссертационной работе, научная новизна, сформулирована цель, поставлены задачи исследования и кратко изложена структура работы.

В первой главе выполнен обзор теоретических, экспериментальных, промысловых исследований, посвященных изучению влияния ЭМ поля на нефтенасыщенные пористые среды.

В п. 1.1 приведено описание физической сущности взаимодействия ЭМ поля с веществом.

В п. 1.2 представлены результаты экспериментальных исследований по ЭМ воздействию на среды, описаны физические модели и процедуры лабораторных исследований. В частности, приведены результаты лабораторных исследований комбинированного воздействия на среду ВЧ ЭМ поля и смешивающегося вытеснения, сравнительные данные с другими

экспериментами (смешивающееся вытеснение, которое сопровождается внешним тепловым прогревом и «холодное» смешивающееся вытеснение, не сопровождающееся каким-либо внешним воздействием).

В п. 1.3 приведен обзор технологий воздействия на углеводородные залежи и способы извлечения тяжелой нефти и битума из этих залежей с применением ЭМ воздействия. Кроме того, рассмотрены результаты промысловых испытаний по применению ЭМ воздействия для нагрева продуктивного пласта в России и за рубежом.

В п. 1.4 приведен обзор теоретических исследований по изучению влияния ЭМ поля на процессы тепло- и массопереноса, интенсификацию технологических процессов в нефтедобыче, фазовые переходы и другие. Приведена ссылка на ряд работ, в которых математические модели описывают лабораторные и промысловые эксперименты.

Во второй главе описан предложенный способ ЭМ воздействия на пласт и извлечения высоковязкой нефти посредством добывающей скважины, комбинированный с одновременной закачкой растворителя. Сформулирована система уравнений, описывающая рассматриваемые технологические процессы. Представлены результаты сопоставительных расчетных исследований с другими методами воздействия и оценки эффективности метода по энергетическому балансу.

В п. 2.1 приведена схема реализации ВЧ ЭМ воздействия на продуктивный пласт посредством добывающей скважины, комбинированного с закачкой смешивающегося агента (растворителя).

В п. 2.2 приведена система уравнений для описания технологического воздействия на продуктивный пласт, включающий три этапа: закачка растворителя с ВЧ ЭМ нагревом, «выдержка» скважины и отбор продукции без теплового воздействия. В постановке задачи учитываются явления термодиффузии и электротермодиффузии (термодиффузия ЭМ происхождения), проявляющиеся в многокомпонентной системе при ее взаимодействии с внешним ВЧ ЭМ полем.

Основным уравнением, описывающим процессы смешивающегося вытеснения нефти в ЭМ поле, является уравнение

конвективной диффузии относительно изменяющейся во времени и пространстве массовой концентрации растворителя C_1 с учетом перекрестных диффузионных эффектов:

$$m \frac{\partial C_1}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial C_1}{\partial r} \right) - v \frac{\partial C_1}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r (\alpha_T + \alpha_T^E) D_0 \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где $D = D_0 + l_0 v$, D_0 и D – коэффициенты молекулярной и конвективной диффузии, соответственно; l_0 – параметр рассеивания пористой среды; α_T , α_T^E – параметры термодиффузии и электротермодиффузии.

Скорость фильтрации v определяется из закона Дарси

$$v = - \frac{k}{\mu_f} \frac{\partial P}{\partial r},$$

распределения давления P и температуры T – из уравнений пьезопроводности

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{m\beta_f + \beta_c} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{\mu_f} \frac{\partial P}{\partial r} \right)$$

и теплопроводности

$$\alpha_b \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_b r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - v \rho_f c_f \frac{\partial T}{\partial r} + q$$

в которых m , k – пористость и проницаемость среды; β_f , β_c – коэффициенты сжимаемости смеси компонентов и скелета породы; α_b , λ_b – объёмная теплоемкость и теплопроводность насыщенной пористой среды; ρ_f , c_f – плотность и удельная теплоемкость смеси компонентов; q – распределенные источники тепла; μ_f – динамическая вязкость смеси компонентов, которая определяется из соотношения:

$$\ln \mu_f = C_1 \ln \mu_1 + (1 - C_1) \ln \mu_2.$$

Вязкости растворителя μ_1 и нефти μ_2 зависят от температуры и определяются из выражения:

$$\mu_j = \mu_{j0} \cdot \exp(-\gamma_j \cdot \Delta T),$$

где $j=1, 2$ – индексы для вязкостей растворителя и нефти, соответственно; $\Delta T = T - T_0$, а T_0 – первоначальная температура

среды; μ_{j0} – значения вязкостей при $T = T_0$; γ_j – температурные коэффициенты.

Теплопроводность и объемная теплоемкость насыщенной пористой среды считаются аддитивными величинами и определяются следующими выражениями:

$$\lambda_b = (1-m)\lambda_c + m(C_1\lambda_1 + C_2\lambda_2), \quad \alpha_b = (1-m)\alpha_c + m(C_1\alpha_1 + C_2\alpha_2)$$

$$c_f \rho_f = C_1\alpha_1 + C_2\alpha_2,$$

где $\lambda_c, \lambda_1, \lambda_2$ – теплопроводность скелета пористой среды, растворителя и нефти, соответственно; $\alpha_c, \alpha_1, \alpha_2$ – объемные теплоемкости скелета пористой среды, растворителя и нефти.

Считается, что при воздействии ЭМ поля на среду частота ВЧ ЭМ генератора фиксирована. Выражение распределенных источников тепла в уравнении теплопроводности представлено в виде:

$$q = 2\alpha J(r_w/r) \exp(-2\alpha(r-r_w)), \dots J = N_0/S_b, \dots S_b = 2\pi r_w h.$$

Здесь J – интенсивность излучения на забое скважины, определяемая мощностью N_0 и площадью S_b излучателя ЭМ волн; α, r_w – коэффициент затухания и радиус излучателя ЭМ волн, h – толщина пласта.

В п. 2.3 приведено обоснование граничных условий с учетом потерь энергии в линии передачи электромагнитных волн.

При реализации рассматриваемого способа воздействия предполагается, что в качестве линии передачи энергии ЭМ волн от устья скважины к забою используется коаксиальная система внутренних и внешних труб скважины: насосно-компрессорная труба (НКТ) и обсадная колонна. Электромагнитные волны, распространяясь в межтрубном пространстве скважины как в коаксиальной линии передачи, неизбежно теряют часть своей энергии из-за конечной электропроводности труб и диэлектрических потерь в среде, заполняющей межтрубное пространство. В предлагаемом методе эти потери используются для нагрева закачиваемого в пласт растворителя.

При оценке степени нагрева растворителя в НКТ по мере его продвижения от устья скважины к забою полагается, что потери энергии в обсадной колонне и частично в НКТ идут на нагрев окружающих скважину пород, остальная часть (в расчетах принято

20 %) энергии, выделяемой в НКТ, затрачивается на нагрев растворителя. При этом значение температуры, до которой нагревается растворитель, определяется выражением:

$$T(r_w, t) = T_k + \frac{\eta W}{\alpha_1 Q}.$$

Здесь η – часть энергии, выделяемой в скважине, которая затрачивается на нагрев растворителя, T_k , Q – температура и расход закачиваемого растворителя на устье скважины; W – мощность энергии, выделяемой в НКТ скважины, определяется по формуле:

$$W = \frac{(N_g - N_0)K_t}{K_t + K_{ob}},$$

где K_t и K_{ob} коэффициенты затухания ЭМ волн в НКТ и обсадной колонне.

При известной мощности генератора ЭМ волн мощность излучателя N_g определяется из выражения:

$$N_0 = N_g \exp(-2(K_t + K_{ob})H).$$

где H – глубина залегания продуктивного пласта.

Расход жидкости Q определяется скоростью фильтрации на забое скважины

$$Q = 2\pi r_w h v.$$

В п. 2.4 изучено температурное поле и распределение смешивающегося агента в пласте в зависимости от вязкости пластового флюида, мощности излучателя ЭМ волн, давления закачки растворителя и других исходных параметров.

Результаты вычислений для первого этапа воздействия на пласт при мощности генератора ЭМ волн $N_0 = 60 \text{ кВт}$, перепаде между забойным и пластовым давлением $\Delta P = 6 \text{ МПа}$ для различных длительностей воздействия t_f приведены на рис. 1 и 2. Сопоставление кривых распределения концентрации вытесняющего агента при различных соотношениях вязкостей вытесняемого и вытесняющего флюидов (рис. 1а и 2а) показывает, что чем больше при прочих равных условиях соотношение вязкости нефти и растворителя, тем более немонотонный характер имеют кривые распределения их концентраций. Это объясняется тем, что при более высокой вязкости нефти закачка в пласт растворителя затруднена из-за высокого фильтрационного сопротивления. Это приводит к незначительному

конвективному переносу тепла в пласте, резкому повышению температуры на забое скважины и ее большому градиенту (рис. 1б), что увеличивает вклад перекрестных термодиффузионных эффектов в процесс перемешивания нефти и растворителя (рис. 1а). При меньшей вязкости нефти наблюдается более равномерное проникновение растворителя в пласт (рис. 2а) с понижением температуры на забое скважины (рис. 2б). При этом в распределении температуры наблюдается характерный температурный «горб» вследствие суммарного действия объемных тепловых источников и конвективного переноса тепла (рис. 2б).

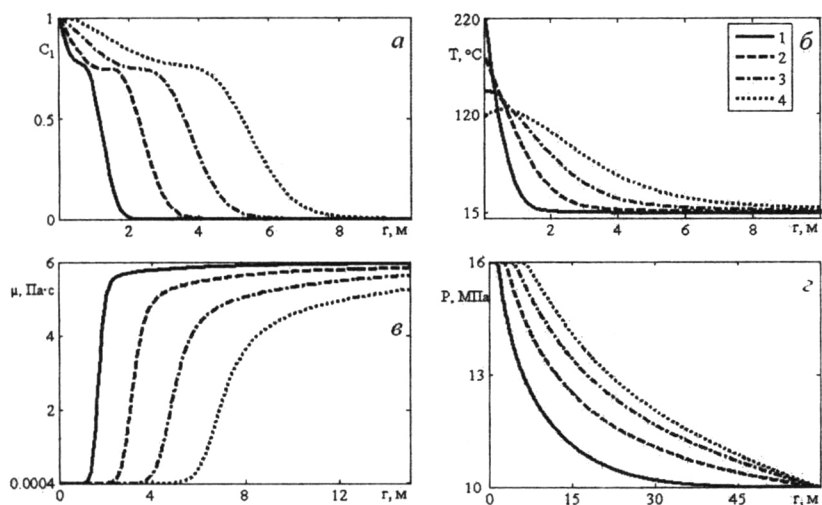


Рис. 1. Распределение концентрации (а), температуры (б), вязкости флюида (в), давления (г) в пласте при $\mu_{20}=6 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $t_1=5, 20, 50, 100$ сут. (кривые 1–4)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что электромагнитное поле, в большей степени, влияет на сверхвязкие нефти, меняя характер распределения флюидов в зоне смешения с растворителем не только количественно, но и качественно, и требует более тщательного подхода к выбору режимов воздействия.

В п. 2.5 приведены результаты сопоставления предложенного метода воздействия на залежи с известными методами, составляющими предложенное комбинированное воздействие:

нагнетание «холодного» растворителя с последующими этапами «выдержки» скважины и отбора флюида; ВЧ ЭМ прогрев призабойной зоны пласта скважины при постоянном отборе.

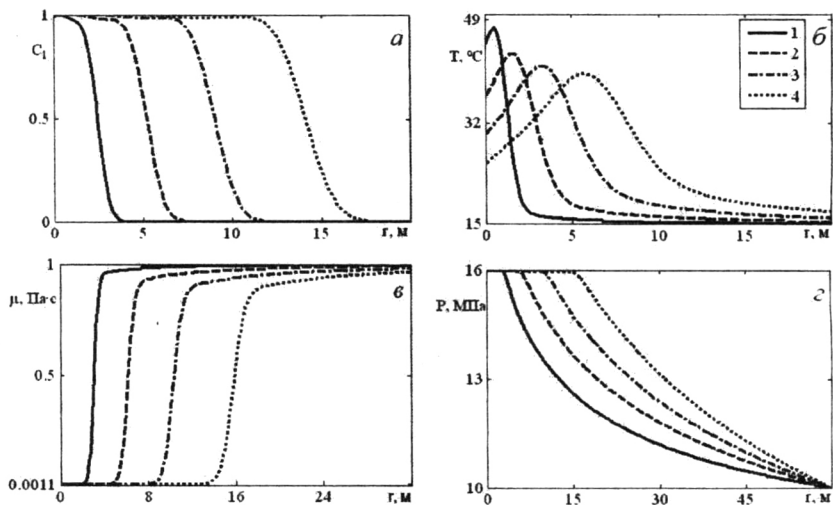


Рис. 2. Распределение концентрации (а), температуры (б), вязкости флюида (в), давления (г) в пласте при $\mu_{20} = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $t_I = 5, 20, 50, 100$ сут. (кривые 1–4)

Некоторые результаты этих численных экспериментов представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3 приведены кривые распределения концентрации растворителя для комбинированного и «холодного» его нагнетания, которые показывают более полный охват порового пространства в первом случае, благодаря более интенсивному перемешиванию флюидов за счет изменения их вязкостей в зависимости от температуры и влияния перекрестных эффектов переноса.

На рис. 4 показаны распределения теплового поля в околоскважинной области при ВЧ ЭМ воздействии с постоянным одновременным отбором и с закачкой растворителя при $\Delta P = 3 \text{ МПа}$, $N_0 = 60 \text{ кВт}$, $\mu_{20} = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ в различные моменты времени.

Тепловое поле при отборе пластовой жидкости с одновременным ЭМ воздействием имеет максимальное значение температуры на стенке скважины и уменьшается по мере удаления от

скважины в пласт (рис. 4а). Из рисунка видно, что при добыче нефти с одновременным ЭМ нагревом тепло, выделяемое в околоскважинной зоне, выносится из пласта вместе с отбираемой продукцией. Температура нагрева продуктивного пласта значительно ниже, чем при комбинированном воздействии (рис. 4б). Кроме того, за счет конвективного переноса тепла растворителем и образования температурного «горба» в последнем случае значительно увеличивается охват тепловым воздействием.

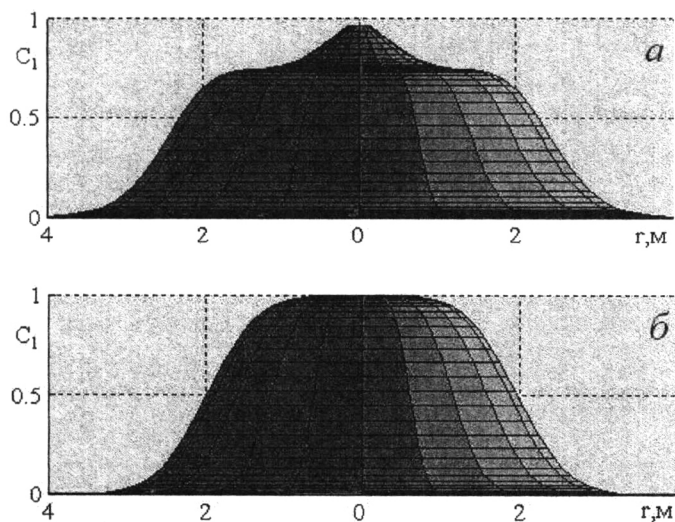


Рис. 3. Распределение концентрации растворителя в пласте при его закачке с одновременным тепловым воздействием (а) и без него (б)

В этом же разделе проведены сопоставительные расчеты энергетического баланса предложенного и перечисленных выше известных методов воздействия на залежи высоковязких нефтей. Энергетическому эквиваленту дополнительно добытой по той или иной технологии воздействия нефти сопоставляются все произведенные при использовании данной технологии затраты. При этом учитываются потребляемая мощность ВЧ генератора, его КПД, потери энергии в линии электропередачи от тепловой электростанции, где условно сжигается добытая нефть, до месторасположения ВЧ генератора, КПД линии электропередачи и т.д. Расчеты показали, что при вязкости пластовой нефти (до 1000

сПз) может быть достаточно использован традиционный ВЧ ЭМ прогрев призабойной зоны пласта с одновременным или последующим отбором нефти, однако, при большей вязкости пластовой нефти гораздо более эффективным является предложенный комбинированный метод воздействия на пласт.

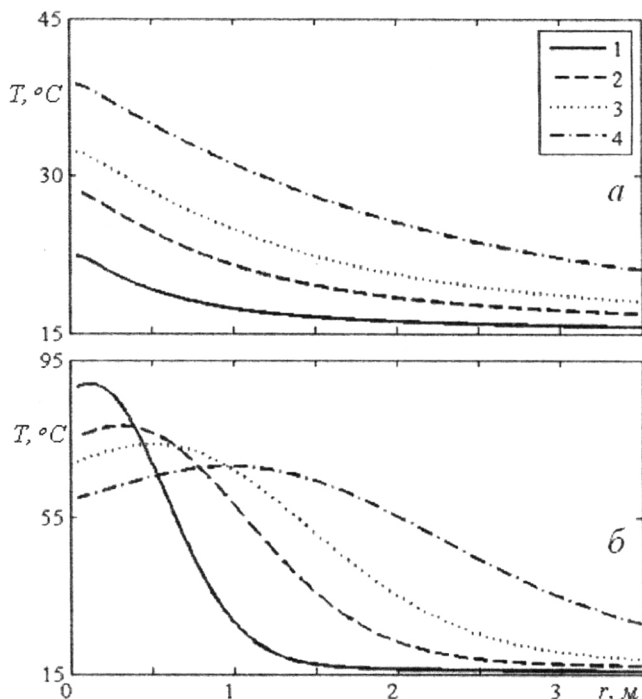


Рис. 4. Распределение температуры в пласте при отборе нефти с одновременным ВЧ ЭМ нагревом (а) и при комбинированном воздействии (б) в моменты времени 3, 9, 15, 30 сут. (кривые 1 – 4)

В третьей главе рассматривается многослойная система «скважина - продуктивный пласт – окружающие породы». Представленная математическая модель позволяет учитывать потери тепла в окружающие скважину и продуктивный пласт породы и провести их оценку. Приводятся результаты многовариантных расчетов по оптимизации комбинированного воздействия на залежь.

В п. 3.1 рассматривается процесс обработки призабойной зоны пласта ЭМ полем с одновременной закачкой смешивающегося агента

(растворителя) в скважину. Результаты численных расчетов приводятся в виде распределений теплового поля в расчетной среде, концентрации смешивающегося агента, вязкости смеси компонент в пласте. Динамика распределения температуры в дальнейшем использовалось для оценки потерь тепла в окружающие породы.

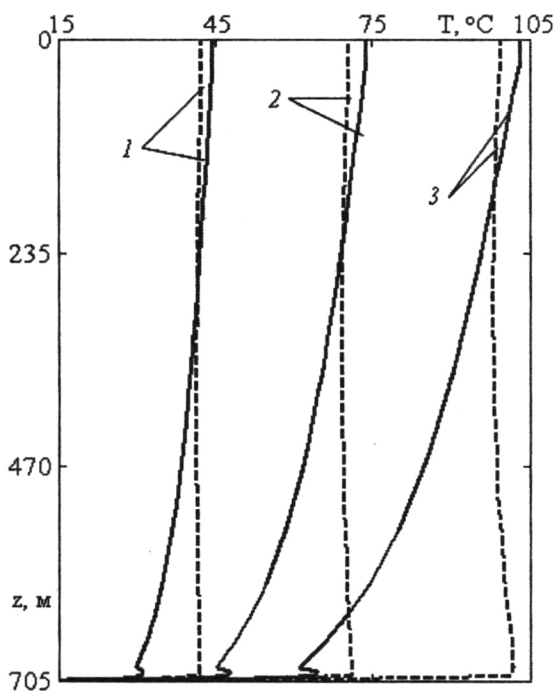


Рис. 5. Распределение температуры вдоль оси скважины. $\Delta P=4$ МПа, $t_1=30$ сут, 1 — $N_g=20$ кВт, 2 — $N_g=40$ кВт, 3 — $N_g=60$ кВт. $\mu_{20}=1$ Па·с — пунктирные кривые, $\mu_{20}=10$ Па·с — сплошные кривые

На рис. 5 приведено распределение температуры вдоль ствола скважины после 30 суток ВЧ ЭМ воздействия. Характер распределения температуры соответствует данным рис. 4: при постоянной работе генератора для менее вязкой нефти конвективный перенос тепла в пласте выравнивает температурное поле вдоль скважины, тогда как для более вязкой нефти начальный температурный профиль меняется незначительно из-за низких скоростей течения флюида. Резкое уменьшение температуры имеет

место на границе продуктивного пласта с подошвой и вызвано отсутствием в этой зоне тепловых источников и переноса тепла растворителем. Некоторое повышение температуры в этой области выше начального связано лишь с перетоком тепла из продуктивного пласта в окружающие породы.

Рис. 6 иллюстрирует степень прогрева продуктивного пласта, а также выше- и нижележащих пород. Наблюдаемое некоторое искривление температурного профиля и смещение максимума температуры в разрезе пласта в сторону кровли объясняется тем, что в эту область тепло поступает как от самого пласта, так и от стенки скважины, у которой температура здесь выше, чем на уровне подошвы. Причём, чем меньше вязкость пластовой нефти, тем этот эффект заметнее.

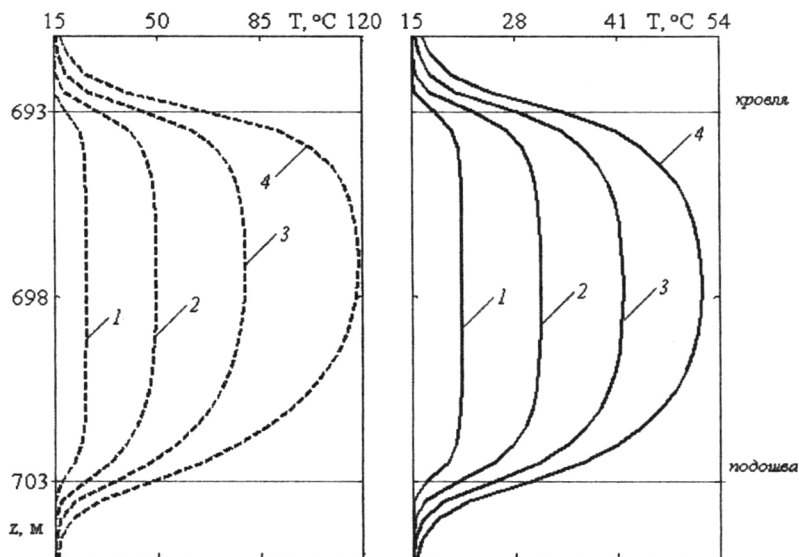


Рис. 6. Распределение температуры в поперечном сечении пласта и окружающих его породах на расстоянии 1 м от скважины в различные моменты времени: 1 – 2 сут, 2 – 8 сут, 3 – 16 сут, 4 – 30 сут (остальные обозначения те же, что на рис.5)

В п. 3.2 рассмотрен случай циклической работы ВЧ ЭМ генератора для предупреждения нежелательно высоких значений температур в околоскважинной зоне.

В п. 3.3 предложена методика расчета длительностей этапов воздействия в оптимальном режиме, оценки энергетического баланса и оптимального количества растворителя, необходимого при реализации комбинированного метода.

Проведенный анализ расчетов показал, что при прочих равных условиях энергетическая эффективность зависит преимущественно от вязкости пластовой жидкости. В частности, при $\mu_{20}=1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ наиболее эффективным и рентабельным является циклическое воздействие с заполнением растворителем от 5 до 8% порового пространства. На рис. 7 приведены результаты оценки коэффициента энергетического баланса (K_{em}) в зависимости от относительного порового объема, заполненного растворителем (C_s), при $\mu_{20}=1 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

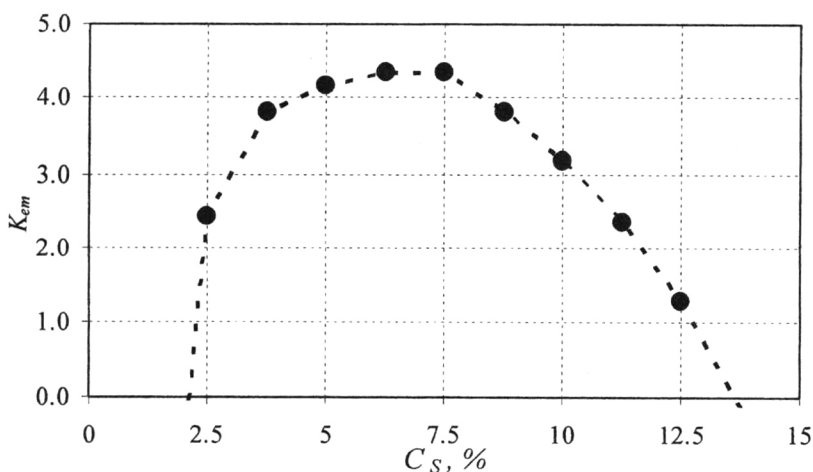


Рис. 7. Изменение коэффициента энергетического баланса от доли заполнения порового пространства на этапе закачки

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате численного решения задачи установлено, что чем больше при прочих равных условиях соотношение вязкости нефти и растворителя, тем больше абсолютные значения и градиенты температуры и тем интенсивнее происходят процессы

перемешивания в призабойной зоне пласта. Показано, что на динамику изменения температуры и величину области смеси флюидов влияют два основных фактора: перенос тепла от ствола скважины нагревающимся в ней растворителем и возникновение объемных тепловых источников при поглощении средой ВЧ ЭМ энергии. Существенный вклад вносят также перекрестные эффекты переноса и «выдержка» скважины для завершения массообменных процессов.

2. Анализ результатов сопоставительных расчетных исследований с другими методами воздействия показал, что при комбинированном воздействии ВЧ ЭМ поля с закачкой растворителя повышаются охват пласта нагревом и заполнение порового пространства вытесняющим агентом. Установлено, что чем больше вязкость пластовой нефти, тем эффективнее предложенный комбинированный вариант воздействия на пласт по сравнению с другими методами.

3. Обнаружено, что градиент температуры вдоль ствола скважины приводит к искривлению температурного профиля и к смещению максимума температуры в разрезе пласта в сторону кровли (чем меньше вязкость пластовой нефти, тем заметнее эффект). Показана возможность регулирования процессов, происходящих в пласте, задаваемыми мощностью генератора ЭМ волн и давлением на забое скважины. В частности, с помощью регулирования режимов воздействия можно добиться снижения потерь тепла в окружающие скважину и пласт породы.

4. Предложена методика расчета объема оторочки нагнетаемого растворителя в зависимости от прогнозируемого коэффициента энергетического баланса с учетом теплопотерь в окружающие породы.

5. Обоснован циклический режим работы ВЧ ЭМ генератора, с ограничением по максимальной допустимой температуре на забое скважины. Найдены режимы, при которых в пласте могут формироваться несколько характерных температурных «горбов», а в глубине продуктивного пласта образуется очаг с повышенной температурой, который не примыкает к околоскважинной зоне.

6. На основе установленных в работе зависимостей предложен способ выбора оптимального варианта, обеспечивающего либо однократное воздействие на ПЗП с полным извлечением закачанного растворителя, либо повторную обработку скважины с сохранением части растворителя и введенного в пласт тепла после первого цикла.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Численное моделирование закачки растворителя в добывающую скважину при электромагнитном воздействии // Известия РАН. Механика жидкости и газа, №4, 2008 г. - С. 94-101.

2. Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Исследование процессов тепломассопереноса в многослойной среде при нагнетании смешивающегося агента с одновременным электромагнитным воздействием // Теплофизика высоких температур, Т. 47, № 4, 2009 г. - С. 605-609.

3. Ковалева Л.А., Давлетбаев А.Я. Влияние перекрестных эффектов тепломассопереноса на движение многокомпонентной системы в пористой среде при электромагнитном воздействии // Обзорение прикладной и промышленной математики. Т. 14, вып. 4, 2007 г. – С. 721-722.

4. L. Kovaleva, A. Davletbaev. Mathematical modeling and numerical solution of multicomponent filtration process under the electromagnetic radiation impact // Fifth International Conference of Applied Mathematics and Computing. - Plovdiv, Bulgaria, Volume 2, 2008. - P. 333.

5. Давлетбаев А.Я. Математическое моделирование закачки растворителя в скважину при одновременном электромагнитном воздействии // Труды института механики Уфимского научного центра РАН. Вып. 6 / Под ред. С.Ф. Урманчеева, С.В. Хабирова. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2008. – С. 45 - 50.

6. Давлетбаев А.Я. Математическое моделирование движения многокомпонентной системы в пористой среде в ВЧ ЭМ поле с учетом перекрестных эффектов тепломассопереноса // Сборник трудов Всероссийской школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании». - Уфа, Т. 3 (Физика), 2008 г. – С. 104-107.

7. Ковалева Л.А., Давлетбаев А.Я. Оптимизация комбинированного воздействия на залежь высоковязкой нефти электромагнитным излучением со смешивающимся вытеснением // Сборник статей научно-практической конференции «Обратные задачи в приложениях». - БирГСПА, Бирск, 2008 г. – С. 220-225.

8. Ковалева Л.А., Давлетбаев А.Я. Интенсификация добычи высоковязкой нефти закачкой растворителя в пласт с одновременным электромагнитным воздействием // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Geopetrol-2008». - Польша, г. Закопане, 2008 г. – С. 809-814.

9. Ковалева Л.А., Давлетбаев А.Я. Электромагнитные технологии интенсификации процессов тепло- и массопереноса в сверхвязких нефтях и природных битумах // Материалы международной конференции «Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям». – Москва, 2008 г. – С. 286-289.

10. Ковалева Л.А., Насыров Н.М., Халилов И.В., Давлетбаев А.Я. Электромагнитные технологии в нефтедобыче и нефтяной экологии // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Geopetrol-2006». - Польша, г. Закопане, 2006 г. – С. 845-850.

11. Ковалева Л.А., Миннигалимов Р.З., Зиннатуллин Р.Р., Давлетбаев А.Я. Применение электромагнитных полей для разработки месторождений высоковязких нефтей, разрушения водонефтяных эмульсий и тестирования реагентов // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Китайско-российское научно-техническое сотрудничество. Наука-образование-инновации». – КНР, Харбин-Санья, 2008г. - С. 84.

12. Ковалева Л.А., Насыров Н.М., Давлетбаев А.Я. Влияние высокочастотного электромагнитного поля на процессы нефтеизвлечения // Тезисы докладов конференции «Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности (теоретические и прикладные аспекты)» - Москва (ГЕОС), 2007 г. – С. 123-124.

13. Давлетбаев А.Я. Математическое моделирование влияния закачки растворителя с электромагнитным воздействием на процессы тепло-массопереноса в системе «пласт-скважина» // Сборник тезисов

«Четырнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых» - Уфа, 2008 г. – С. 229.

14. Давлетбаев А.Я. О некоторых численных реализациях уравнения теплопереноса // Сб. тезисов «Одиннадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых». Екатеринбург, 2005 г., С.151.

15. Давлетбаев А.Я. Математическое моделирование индукционного нагрева многослойных сред // Сборник тезисов «Десятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых» - Екатеринбург, 2004 г. – С. 328-330.

16. Давлетбаев А.Я. Расчетное исследование индукционного нагрева призабойной зоны пласта // Тезисы докладов студенческой научно-практической конференции по физике – Уфа, БашГУ, 2004 г. – С. 51-52.

17. Ковалева Л.А., Давлетбаев А.Я. Математическое моделирование индукционного нагрева многослойных сред // Тезисы докладов «XXVIII школы-семинара по проблемам механики сплошных сред в системах добычи, сбора, подготовки, транспорта и переработки нефти и газа» - Уфа, ТРАНСТЭК, 2004 г. – С. 14-15.

18. Давлетбаев А.Я. Математическая модель теплового поля скважины при индукционном нагреве // Тезисы докладов «Региональной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике». - Уфа, БашГУ, 2003 г. – С. 83.

19. A. Davletbaev, L. Kovaleva. Combined RF EM/Solvent Treatment Technique: Heavy/Extra-heavy Oil Production Model Case Study // 10th Annual International Conference Petroleum Phase Behavior and Fouling - Rio de Janeiro, Brazil, 2009. – P. 62.

20. Ковалева Л.А., Насыров Н.М., Зиннатуллин Р.Р., Хайдар А.М., Давлетбаев А.Я. Способ разработки залежи высоковязкой нефти или битума. Положительное решение по заявке на изобретение №2007128512/03 от 24.02.2009г.

Давлетбаев Альфред Ядгарович

**НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ВЫТЕСНЕНИЕ ВЫСОКОВЯЗКОЙ
НЕФТИ СМЕШИВАЮЩИМСЯ АГЕНТОМ
ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

*Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 021319 от 05.01.99 г.*

Подписано в печать 12.08.2009 г. Формат 60х84/16.
Усл. печ. л. 1,38. Уч.-изд. л. 1,37.
Тираж 100 экз. Заказ 504.

*Редакционно-издательский центр
Башкирского государственного университета
450074, РБ, г. Уфа, ул. З. Валиди, 32.*

*Отпечатано на множительном участке
Башкирского государственного университета
450074, РБ, г. Уфа, ул. З. Валиди, 32.*

102