

На правах рукописи



ЧЕРЕМИСИН АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

**ВОЗДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ФИЛЬТРАЦИЮ
ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОМ КОЛЛЕКТОРЕ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Тюмень – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Пальчиков Евгений Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Сибиряков Борис Петрович

доктор физико-математических наук,
профессор
Федоров Константин Михайлович

Ведущая организация: ОАО «СибНИИ НП», г. Тюмень

Защита состоится 19 февраля 2010 г. в 15⁰⁰ час на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 при Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, д. 15^А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Семакова, д. 10.

Автореферат разослан «18» января 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м. н., доцент



Мусакаев Н.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Опыт разработки месторождений показывает, что виброакустические методы являются неотъемлемой частью комплексного воздействия на пласты. Во-первых, это воздействие естественного волнового фона, создаваемого нестационарным режимом работы скважинного оборудования, их периодическими пусками и остановками, приливными волнами и сейсмической активностью земной коры. Во-вторых, это процесс управляемого виброакустического воздействия на пласты, который в настоящее время изучен недостаточно полно.

Метод управляемого виброакустического воздействия на продуктивные нефтенасыщенные пласты разрабатывается с 70-х годов прошлого столетия. В настоящее время этот метод широко апробирован в различных геолого-физических условиях для интенсификации скважинной добычи углеводородов. Существует много экспериментальных работ, свидетельствующих о том, что воздействие на нефтенасыщенный пласт с частотами от единиц до тысяч герц увеличивает приток нефти к исследуемой скважине и уменьшает ее обводненность.

Наиболее тщательно разработаны физические основы; различные варианты базовых технологий и технических решений для промышленной реализации виброакустического воздействия на призабойную зону скважин с целью восстановления ее проницаемости и интенсификации притока жидкости, но вопрос о механизмах влияния на удаленную промытую зону остается открытым.

Существуют разные точки зрения на механизм виброакустического воздействия, но на сегодняшний день непротиворечивых концепций, к сожалению, нет. Также не существует единой математической модели, позволяющей полностью описать и количественно рассчитать влияние виброакустических колебаний на гидродинамику вытеснения нефти водой.

В связи с этим, изучение и прояснение физического механизма акустического воздействия на многофазную фильтрацию в пористой среде, создание на этой основе адекватного математического аппарата и методической базы для разработки новых и совершенствования существующих технологий воздействия является **актуальной** задачей, решаемой в диссертации.

Задача исследования - совершенствование методов акустического воздействия на нефтенасыщенный поровый коллектор с помощью построения математической модели и алгоритмов расчета влияния акустических колебаний на процесс фильтрации двухфазной жидкости в пористой среде, а именно: устанавливающих связь между параметрами волнового поля и изменениями фильтрационно-емкостных характеристик коллектора, в частности остаточной нефтенасыщенности.

Защищаемые научные результаты.

- Полуэмпирическая модель, основанная на резонансном механизме воздействия и устанавливающая связь параметров поля акустических колебаний с

изменениями фильтрационно-емкостных свойств пористого коллектора, в частности остаточной нефтенасыщенности.

- Гидродинамическая модель фильтрации двухфазной жидкости в пористой среде и алгоритмы расчета, позволяющие количественно учесть влияние акустических колебаний на остаточную нефтенасыщенность, проницаемость фаз и, как следствие, на решение уравнений фильтрации.
- Результаты расчета эффективности акустического воздействия на нефтеотдачу коллектора в модельных задачах разработки нефтяных месторождений.

Научная новизна работы.

- Предложены полуэмпирическая модель и алгоритмы расчетов, позволяющие учитывать воздействие поля упругих акустических колебаний на остаточную нефтенасыщенность, на основе резонансного механизма влияния акустических колебаний на капиллярно-защемленную нефть.
- Получена связь спектра собственных частот колебаний капиллярно-защемленной нефти со структурой порового пространства коллектора, его текущей нефтенасыщенностью и внешним градиентом давления.
- Показано, что резонансное воздействие упругих акустических колебаний с частотами 300 - 3000 Гц (в зависимости от параметров коллектора) на капиллярно-защемленную часть остаточной нефти уменьшает остаточную нефтенасыщенность и увеличивает фазовую проницаемость по нефти при данном градиенте давления в пласте, обусловленном работой добывающих и нагнетательных скважин.
- Создан трехмерный гидродинамический симулятор, позволяющий моделировать фильтрацию двухфазной жидкости в пористой среде, основу которого составляют общепринятые вычислительные методы решения уравнений тепло- и массопереноса в пористых средах с учетом акустического воздействия на остаточную нефтенасыщенность и фазовую проницаемость нефти.
- На основе гидродинамического моделирования процесса разработки модельных месторождений показано, что эффективное применение источников акустических колебаний может быть достигнуто при соответствующем подборе параметров излучателей, а именно: спектра частот, диаграммы направленности излучения, расположения источника, его мощности, исходя из геолого-физических характеристик и условий разработки участка пласта до воздействия.
- На основе опубликованных экспериментальных данных разработан полуэмпирический алгоритм оценки влияния неупругой деформации недоуплотненных коллекторов на фильтрацию двухфазной жидкости и параметры резонансного акустического воздействия, применение которого в численных моделях показало, что неупругая деформация, уменьшая пористость и проницаемость коллектора, приводит к увеличению собственных частот капиллярно-защемленной нефти, а также приводит к перераспределению насыщенныхностей.

Достоверность результатов диссертации основана на корректной теоретической постановке задач, математическом обосновании применяемых методов и алгоритмов; использовании фундаментальных уравнений фильтрации многофазных жидкостей, общепринятых уравнений распространения акустических волн в насыщенной пористой среде, и подтверждена согласованием полученных численных результатов с данными проведенных экспериментов.

Практическая значимость результатов. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для совершенствования волновых методов увеличения нефтеотдачи коллекторов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены в докладах на конференциях: «Особенности моделирования разработки гранулярных коллекторов с упруго-пластическими свойствами» (Научно-практическая конференция «Перспективы нефтегазоносности Западно-Сибирской нефтегазовой провинции», г. Тюмень, 2003 г.); «Моделирование неупругой деформации в коллекторах» (ВНКСФ, г. Новосибирск, 2006 г.); «Виброакустическая неустойчивость капиллярно-защемленной нефти и ее влияние на процесс фильтрации» («Акустика неоднородных сред IX», г. Новосибирск, 2006 г.); «Виброакустическое воздействие на процесс разработки нефтенасыщенных коллекторов» («Научно-практическая конференция, посвященная 55-летию ХантыМансийскГеоФизика», г. Ханты-Мансийск, 2006 г.); «Численное исследование влияния неупругой ползучей деформации нефтенасыщенных гранулярных пористых сред на процесс их разработки» (Всероссийская конференция «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций», г. Новосибирск, 2006 г.).

Диссертационная работа также представлялась на геофизических семинарах в Институте нефтегазовой геологии и геофизике им. А.А. Трофимука СО РАН, на лабораторных и объединенных семинарах Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, на семинарах в Институте горного дела СО РАН.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 6 работ, из них в ведущих научных журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией, - 2, в материалах научных конференций - 3, в тезисах докладов - 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 168 страницах, содержит 48 рисунков и 7 таблиц.

Благодарности. За участие в формировании научных взглядов, руководство при написании работы, всестороннюю поддержку и внимание автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, кандидату технических наук, доценту Пальчикову Евгению Ивановичу (Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева).

За ценные замечания и рекомендации к диссертационной работе и автореферату автор выражает искреннюю благодарность доктору технических наук, профессору, заведующему лабораторией прикладной геомеханики ИФЗ РАН Николаевскому Виктору Николаевичу.

Также автор выражает искреннюю признательность Кубиновой Наталье Александровне (редактор журнала «ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА») за методические рекомендации и помощь при подготовке текста диссертации и автореферата.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведена научная новизна и выносимые на защиту положения.

В первой главе, в параграфе 1.1, проанализированы опубликованные экспериментальные работы, связанные с виброакустическим воздействием на фильтрационные процессы в нефтенасыщенном коллекторе. К ним относятся: 1) сейсмическое воздействие с земной поверхности; 2) акустическое воздействие от источника, расположенного вблизи забоя скважины.

Рассмотрены и проанализированы теоретические модели виброакустического воздействия. Изученные модели условно можно разделить на шесть групп. Внутри каждой из этих групп влияние воздействия связывается со следующими факторами:

- Влияние напряженного состояния и неоднородности структуры пористой среды на процесс фильтрации многофазной жидкости.
- Существование автоколебаний в процессах фильтрации многофазной жидкости и в многопластовой системе в целом, а также возможность их резонансного взаимодействия с сейсмическими и акустическими волнами.
- Влияние акустических колебаний на процесс фильтрации многофазной жидкости за счет дегазации флюида.
- Изменение реологических характеристик пластового флюида: изменение вязкости за счет увеличения температуры и т.д.
- Влияние капиллярных эффектов на процесс фильтрации многофазной жидкости в пористой среде.
- Изменения смачиваемости за счет акустических колебаний.

Анализ опубликованных работ показал, что виброакустическое воздействие на нефтеотдачу пласта представляет большой интерес для нефтяной промышленности. Вместе с тем следует отметить, что выполненные исследования по этим проблемам не обеспечивают полного представления о механизмах влияния волнового поля на процесс фильтрации многофазных флюидов и нефтеотдачу коллекторов. Кроме того, как правило, отсутствуют способы, позволяющие проектировать и прогнозировать параметры такого воздействия для повышения эффективности разработки нефтяных месторождений.

Далее, в **параграфе 1.2,** приведена общая постановка задачи, решаемой в диссертационной работе, приведены этапы исследования. Показано, что задачу можно разделить на четыре подзадачи, решаемые последовательно:

1. Расчет затухания акустических волн при их распространении в насыщенных пористых средах.

2. Разработка полуэмпирической модели изменения остаточной нефтенасыщенности за счет резонансного воздействия акустического поля.
3. Создание гидродинамической модели процесса фильтрации двухфазной жидкости с изменяемой остаточной нефтенасыщенностью.
4. Решение модельных задач разработки нефтяных месторождений при наличии источников волнового поля, установленных вблизи забоя скважин.

Параграф 1.3 посвящен описанию распространения акустических колебаний в пористых насыщенных средах. Так, в параграфе (п. 1.3.1) приведен обзор теорий, описывающих распространение акустических волн в пористых насыщенных средах. Рассмотрены следующие модели: среды Кельвина-Фойгта; среды Максвелла; стандартного линейного тела, сред с упругим последствием.

Далее в параграфе рассмотрена и изучена модель Био-Френкеля. В этой модели среда представляет собой пористое изотропное тело, материал скелета которого является идеально упругим; поры сообщаются между собой и заполнены вязкой жидкостью. Причина диссипации акустической энергии - вязкое трение между жидкой и твердой фазами (в работах В.Н. Николаевского учтен также теплообмен между фазами). Приведена система волновых уравнений данной модели:

$$\rho_1 \cdot (1 - m) \cdot \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} = (\lambda + 2 \cdot \mu) \cdot \frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} + [(1 - m) \cdot K_2 - \hat{K}] \cdot \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} + \frac{k \cdot m}{k_{pr}} \left(\frac{\partial U_2}{\partial t} - \frac{\partial U_1}{\partial t} \right),$$

$$\rho_2 \cdot \frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} = K_2 \cdot \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} - \frac{k}{k_{pr}} \left(\frac{\partial U_2}{\partial t} - \frac{\partial U_1}{\partial t} \right),$$

где $\rho_{1,2}$ - плотности фаз; λ, μ - коэффициенты Ламе; $K_{1,2}$ - модули сжимаемости фаз; k_{pr} - коэффициент проницаемости; m - коэффициент пористости; k - коэффициент вязкости жидкости; $\hat{K} = \frac{K \cdot K_2}{K_1}$; K - сжимаемость породы в целом.

Частное решение волнового уравнения представляет собою плоскую продольную волну. При этом известно, что существуют два решения, определяющие две различные волны – первого и второго рода. Отметим, что волну первого рода связывают с продольными колебаниями твердого скелета синфазными с колебаниями в жидкости, волну второго рода - с противофазными колебаниями. Волна второго рода быстро затухает и в работе не рассматривается. Далее, в параграфе получены и проанализированы основные уравнения, определяющие затухание и скорость продольных волн первого рода.

В п. 1.3.2 приведена полуэмпирическая модель распространения акустических колебаний первого рода от установленного вблизи забоя скважины источника с заданными начальными условиями. Расчет коэффициентов поглощения и скорости волн основан на экспериментальных работах и на выводах из модели Био-Френкеля. Данная модель позволяет количественно рассчитать амплитуду волны (перепад давления) в любой точке коллектора с учетом поглощения и геометрического расхождения волны заданной формы.

Приведены расчеты параметров акустических полей (п. 1.3.3) в модельных коллекторах; показано, что акустическая волна с частотами в сотни герц может проникать в пласт на десятки и сотни метров.

Во второй главе диссертационной работы формулируется система уравнений фильтрации двухфазной жидкости в пористой среде и численный метод решения. Рассмотрены основные параметры, определяющие численное решение уравнений фильтрации, при прочих равных условиях: фазовые проницаемости по нефти и по воде, а также остаточная нефтенасыщенность.

В **параграфе 2.1.** приведена математическая система уравнений, описывающая фильтрацию двухфазной жидкости в пористой среде, при допущении того, что капиллярные силы учтены в фазовых проницаемостях (п.2.1.1):

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho_i \cdot v_i) + \frac{\partial(\rho_i \cdot m \cdot s_i)}{\partial t} + q_i &= 0, \\ v_i &= -\frac{k_i}{\mu_i} \cdot \nabla p, \\ \sum_i s_i &= 1, \end{aligned}$$

где i – нефть, вода; ρ_i - плотность i -й фазы; m_i – пористость; s_i – насыщенность i -й фазой; q_i – плотность внешних источников где v_i - вектор скорости фильтрации; $k_i = k \cdot f_i(s_1 \dots s_n)$ - проницаемость i -й фазы; k - абсолютная проницаемость; $f_i(s_1 \dots s_n)$ - относительная фазовая проницаемость i -й фазы; μ_i - вязкость i -й фазы; p – давление, общее для всех фаз.

Для численного решения данной системы уравнений она была преобразована к следующему, так называемому «объемному» виду, при условии, что градиенты давления малы, т.е. выполнено условие $\nabla(\rho_i \cdot \frac{k_i}{\mu_i}) \cdot \nabla p \ll \rho_i \cdot \frac{k_i}{\mu_i} \cdot \Delta p$:

$$\begin{aligned} -\left(\sum_i \frac{k_i}{\mu_i} \Delta p\right) + \sum_i (q_i / \rho_i) &= -m \cdot \beta_{эфф} \frac{\partial p}{\partial t}, \\ -\left(\frac{k_i}{\mu_i} \Delta p\right) + q_i / \rho_i &= -\frac{\partial(\rho_i \cdot m \cdot s_i)}{\partial t} \cdot \frac{1}{\rho_i}, \\ \sum_i s_i &= 1, \end{aligned}$$

где $\beta_{эфф} = \frac{\sum_i \beta_i \cdot \rho_i \cdot s_i}{\sum_i \rho_i \cdot s_i} + \beta_{пор}$ - эффективная сжимаемость пор совместно с насыщающей их жидкостью; β_i - сжимаемости скелета породы и соответственно насыщающей жидкости.

Далее, в п. 2.1.2, приведена разностная схема и описан численный метод решения данной системы уравнений, основанный на неявном решении уравнений по давлению и явном решении по насыщенности (IMPES). Так как практический интерес представляет собой коэффициент извлечения нефти из пластовой системы, то под решением системы уравнений фильтрации, при заданных начальных и граничных условиях, в данной работе подразумевается *КИН (коэффициент извлечения нефти) = (1 - K_{ОН}/K_Н)*, где $K_{ОН}/K_{Н}$ – отношение остаточной нефтенасыщенности к начальной во всей расчетной области.

Для проверки физической достоверности данной гидродинамической модели было проведено ее тестирование на известных аналитических решениях фильтрационных задач. Так, в (п. 2.1.3) была численно решена задача Баклея-Левретта и показано совпадение численных и аналитических решений (рис. 1-2).

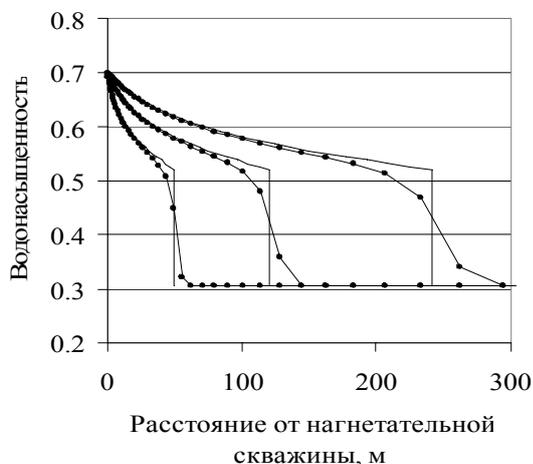


Рис. 1. Сравнение численного и аналитического решений задачи Баклея-Левретта. Сплошные линии – аналитическое решение, точки – численное.

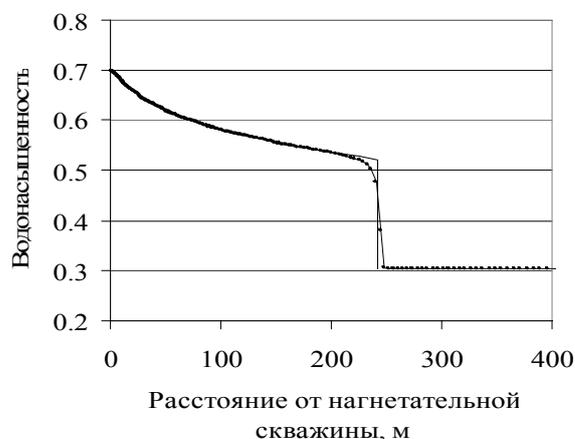


Рис. 2. Сравнение численного и аналитического решений задачи Баклея-Левретта для более плотной сетки. Сплошные линии – аналитическое решение, точки – численное.

Параграф 2.2 посвящен решению уравнений фильтрации с учетом неупругой деформации коллектора. На основании опубликованных экспериментальных данных показано, что необратимая деформация изменяет абсолютную проницаемость и пористость коллектора по следующим зависимостям (п.2.2.2):

$$\Delta m = 1 + \frac{1}{m} \int_0^t \frac{b'}{P_{эфф}(\tau)} \cdot \left(\frac{\partial P_{эфф}(\tau)}{\partial \tau} \right) \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{t - \tau - \xi(t, \tau)} \right)} d\tau,$$

$$\Delta k = \Delta m^{\frac{2}{3}} \cdot [1 - (\alpha - \beta \cdot N) \cdot \Delta K_n + (\alpha - \beta \cdot N) \cdot \Delta m],$$

где $P_{эфф}$ - эффективное давление; α, β, N - эмпирические коэффициенты;

$$\xi_i(t) = \int_0^t H[P_{эфф}(\tau') - P_{эфф}(\tau_i)] \cdot d\tau'; \quad H - \text{функция Хэвисайда.}$$

Также показано, что за счет необратимого изменения пористости, необратимая деформация ведет к перераспределению насыщенностей в пласте (п.2.2.3).

В параграфе 2.3 на основе опубликованных данных исследована зависимость фазовых проницаемостей по нефти и по воде, а также остаточной нефтенасыщенности от различных параметров, в том числе и от вытесняющего градиента давления. Определены относительные фазовые проницаемости по нефти и по воде; показано, что их зависимости можно представить в следующем общем виде (п. 2.3.1):

$$f_n = F_1(K_{OH}(\nabla p), K_H, \theta, \varphi, \lambda, K^{BK}),$$

$$f_w = F_2(K_{OH}(\nabla p), K_H, \theta, \varphi, \lambda, K^{BK}),$$

где K_{OH} - остаточная нефтенасыщенность, K_H - начальная нефтенасыщенность, K^{BK} - критическая водонасыщенность, θ, φ, λ - полуэмпирические параметры.

Как видно из приведенных выше зависимостей, фазовые проницаемости зависят от многих параметров, но определяющим для диссертационной задачи является остаточная нефтенасыщенность, поэтому далее (п. 2.3.2) исследована ее структура и количественные характеристики. В первую очередь показано, что остаточная нефть при вытеснении ее водой из порового пространства слагается из следующих частей: адсорбированные на поверхности минералов углеводороды, капиллярно-защемленная и содержащаяся в тупиковых порах нефть. Капиллярно-защемленная нефть образуется в пористой гидрофильной среде в отдельно взятых порах, каналах или конгломератах пор в виде изолированных глобул, при этом внутри глобулы нефть является неразрывной фазой. В параграфе получено, что остаточная нефтенасыщенность описывается следующим полуэмпирическим выражением:

$$K_{OH} = \frac{(1 - \varphi) \cdot K_H}{1 + \frac{K_H}{m} \cdot \frac{f_B \cdot k}{\mu_B} |\nabla P| \cdot \theta} + \varphi \cdot K_H,$$

где $|\nabla P|$ - модуль градиента давления; m - пористость коллектора; θ, φ - коэффициенты, зависящие от особенностей строения коллектора; μ_B - вязкость воды; K_H - начальная нефтенасыщенность.

Содержание **третьей главы** диссертации посвящено теоретическому исследованию механизма волнового воздействия на насыщенный многофазной жидкостью коллектор и связи параметров этого воздействия со структурой остаточной нефтенасыщенности и другими характеристиками пористой среды и насыщающих ее жидкостей, а также созданию математической модели, позволяющей количественно описать влияние акустического воздействия на остаточную нефтенасыщенность. Следует заметить, что предлагаемая в работе схема резонансного воздействия является развитием работ С.В. Сухина, Ю.М. Заславского, Р.Ф. Ганиева и др.

Так, в **параграфе 3.1** изучен возможный механизм резонансного воздействия, определяющий влияние акустического воздействия на капиллярно-защемленную нефть. На основе анализа как теоретических работ, так и лабораторных исследований (Ю.М. Заславский, С.В. Сухинин, В.П. Дыбленко и др.) показано, что: во-первых, капиллярно-защемленная глобула нефти представляет собой осциллятор, а во-вторых, возможно резонансное взаимодействие внешнего акустического поля упругих колебаний с капиллярно-защемленными глобулами нефти.

При этом распространяющаяся акустическая волна создает мгновенный градиент давления (В.Н. Николаевский), действующий на капиллярно-защемленные глобулы нефти дополнительно к градиенту давления, вызванного работой скважин. За счет резонансного усиления их собственных малых колебаний, при воздействии акустической волны, возможно возникновение «усиленного» эффективного градиента давления в акустической волне, совпадающего по направлению с градиентом внешнего давления (Р.Ф. Ганиев и др).

Максимально возможный коэффициент увеличения модуля градиента давления в акустической волне будет определяться уравнением колебаний с вязким демпфированием под воздействием внешней вынуждающей силы:

$$K_{amp} = \left((1 - \omega_i^2 \cdot \omega^{-2})^2 + (2 \cdot \gamma_D \cdot \omega_i)^2 \cdot \omega^{-2} \right)^{-2},$$

где ω_i - частота излучателя; ω – собственная частота колебаний; $\gamma_D = \omega$ - коэффициент демпфирования.

Там же показано, что при данных предположениях остаточная нефтенасыщенность с учетом акустического поля определяется следующей зависимостью, куда входит не только внешний градиент давления, но и резонансно-усиленный модуль градиента давления, действующий на глобулу со стороны акустической волны:

$$K_{OH} = \frac{(1 - \varphi) \cdot K_H}{1 + \frac{K_H}{m} \cdot \frac{f_B \cdot k}{\mu_B} \cdot (|\nabla P| + |\nabla P^{BK}| \cdot K_{amp}) \cdot \theta} + \varphi \cdot K_H,$$

где $|\nabla P^{BK}|$ - модуль градиента давления, действующего на капиллярно заземленную глобулу нефти со стороны акустической волн; K_{amp} - коэффициент усиления в резонансе.

Параграф 3.2 посвящен определению основных параметров, определяющих резонансно-усиленный перепад давления, действующий на глобулу, таких как: собственная частота колебаний, коэффициент демпфирования и вынуждающая сила.

В п. 3.2.2, опираясь на то, что жесткость глобулы определяется капиллярным противодействием и сечением глобулы, а ее масса – объемом и плотностью, получена собственная частота колебаний капиллярно-заземленной нефти, используя только макро-характеристики порового коллектора:

$$\omega^2 = \frac{K}{M} = \frac{3 \cdot |\nabla P| \cdot \left(1 - \frac{Z}{(2-Z) \cdot \lambda(1-Z)}\right)}{2 \cdot K_n \cdot (1-Z) \cdot (1-\varphi) \cdot R_{gl} \cdot \rho_n},$$

где Z – доля пор, из которых, при данном градиенте давления, была вытеснена нефть (определено через градиент давления и эмпирические параметры в п.2.3.2); $\lambda(1-Z)$ - коэффициент увеличения фильтрационного сопротивления; ρ_n - плотность нефти; $R_{gl} = \frac{(1-Z)}{m \cdot Z} \cdot r_{cp}$ - радиус глобул; r_{cp} - средний радиус пор, из которых, при данном градиенте давления, была вытеснена нефть.

Коэффициент демпфирования получен в п. 3.2.3 решением задачи о поглощении энергии колеблющейся жидкости в тонком капилляре, учитывая потери на вязкое трение и теплообмен с породой:

$$\gamma_d = -\frac{c}{2 \cdot r \cdot \omega} \cdot \ln \left(1 - \frac{\sqrt{\omega}}{\sqrt{2} \cdot c} \left(\sqrt{\nu} + \left(\frac{c_p}{c_v} - 1 \right) \sqrt{\chi} \right) \right),$$

где ν - кинематическая вязкость нефти, m^2/s ; χ - температуропроводность насыщенной пористой среды; c – скорость звука; c_p / c_v - отношение теплоемкостей нефти; r - критический радиус капилляров, ниже которого движение нефти блокировано капиллярными силами.

При распространении акустической волны в системе пористый скелет-жидкость возникает дополнительный градиент давления как в скелете, так и в

жидкости. Дополнительный градиент давления в жидкости определит мгновенную «дополнительную» фильтрацию в соответствии с законом Дарси.

На основании уравнений сохранения количества движения при течении однофазной жидкости в пористом коллекторе и на основании эмпирических зависимостей для относительной фазовой проницаемости по воде, получен дополнительный градиент давления, действующей на капиллярно-защемленную глобулу нефти (п. 3.2.4):

$$|\nabla p_k^B| = \frac{2 \cdot |\nabla p^B| \cdot \left(1 - \frac{Z}{(2-Z) \cdot \lambda(1-Z)}\right)}{(1-Z)},$$

где $|\nabla p^B|$ - модуль градиента давления акустической волны.

Параграф 3.3 подытоживает материалы, изложенные в параграфах 2.1 - 3.2., и содержит систему уравнений фильтрации двухфазной жидкости в пористой среде с учетом резонансного акустического воздействия на остаточную нефтенасыщенность.

В **параграфе 3.4** численно решена модельная задача разработки кругового пласта с законтурным заводнением с добывающей скважиной в центре и установленным источником акустических колебаний вблизи ее забоя. Приведены оценки некоторых параметров в радиальной окрестности добывающей скважины:

- распределения собственных частот колебаний капиллярно-защемленной нефти (рис. 3).
- изменения остаточной нефтенасыщенности под влиянием акустических колебаний, в зависимости от параметров пласта и дебита скважины (рис. 4).

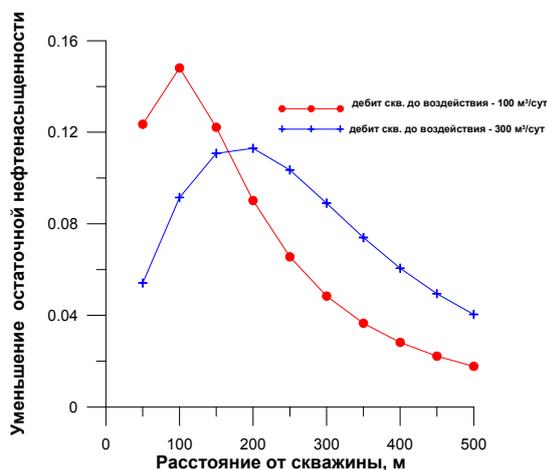


Рис. 3. Изменение остаточной нефтенасыщенности в окрестности добывающей скважины под воздействием акустических колебаний

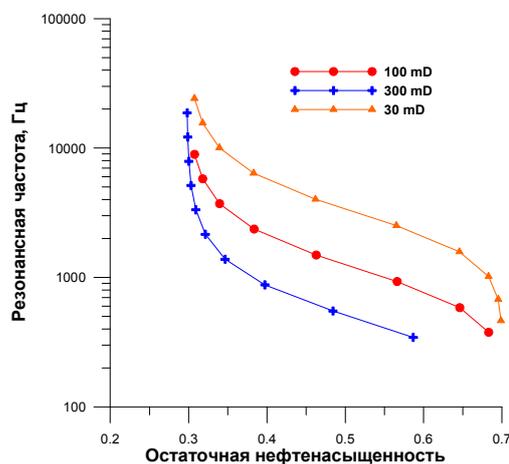


Рис. 4. Собственная частота колебаний для капиллярно-защемленной части от остаточной нефтенасыщенности и проницаемости

На основе выполненного моделирования показано, что акустическое воздействие может существенно понизить остаточную нефтенасыщенность, тем самым, повлияв на решение уравнений фильтрации.

Далее, в **параграфе 3.5**, изучен вопрос о возможном резонансном поглощении акустических колебаний. При акустическом резонансном воздействии на

остаточную нефтенасыщенность дополнительная энергия, необходимая для вовлечения ранее неподвижных глобул нефти в движение, «закачивается» из акустической волны. При этом на некоторых частотах будет существовать аномальное поглощение. Показано, что выражение, определяющее дополнительный коэффициент затухания волны в локальной зоне коллектора, будет:

$$\eta = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \ln \sqrt{1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{[\nabla p_k^B]^2 \cdot (1-Z) \cdot m \cdot K \cdot f_n \cdot k_{amp} \cdot c \cdot \rho_0}{\mu \cdot \lambda^3 \cdot \nabla P^{B^2}}},$$

где η - дополнительный коэффициент затухания 1/м; f_n - фазовая проницаемость по нефти; ρ_0 - плотность жидкости; c - скорость звука в коллекторе; $|\nabla p_k^B|$ - дополнительный градиент давления, действующий на капиллярно-защемленную глобулу нефти.

Четвертая глава диссертации посвящена практическим вопросам применения теории акустического воздействия на моделях месторождений, а именно, вопросам совершенствования технологии акустического воздействия. Качественно и количественно изучено влияние акустического поля на решение уравнений фильтрации двухфазной жидкости в пористых средах на модельных задачах.

Используя созданную гидродинамическую модель с учетом акустического воздействия, подробно описанную во второй и третьей главах диссертационной работы, численно решен ряд модельных задач разработки месторождений, позволяющих проектировать технологию акустического воздействия на нефтенасыщенный коллектор.

Во всех численных задачах разработки использовалась геолого-гидродинамическая модель небольшого месторождения, размерами 1,5 x 1,5 км, с нефтенасыщенной толщиной от 1 до 10 м. Сверху и снизу пласт перекрыт глинистым неколлектором. Пласт разрабатывался по пятиточечной системе разработки с плотностью скважин 27 га/скв. Начальное пластовое давление составляло 20 МПа. Дебит добывающих скважин был ограничен давлением дегазации на забое - 10 МПа, приемистость нагнетательной скважины – давлением 40 МПа на забое. Проницаемость по пропласткам, их количество, толщины, а также пористость, начальные насыщенности варьировались в задачах в широких пределах.

Во всех моделях в качестве излучателя применялся излучатель длиной 30 см, диаметром 10 см, с удельной мощностью 0,75 Вт/см², установленный вблизи забоя добывающих скважин и работающий на определенной частоте (или заданном спектре частот).

Численное решение уравнений фильтрации прекращалось после достижения обводненности по всем добывающим скважинам 97%. Далее оценивался коэффициент извлечения нефти (КИН) как с воздействием, так и без него и определялось его относительное повышение: $\Delta(\%) = (КИН_{возд} - КИН) / КИН \cdot 100\%$.

Одной из основных задач акустического воздействия является выбор частоты воздействия на нефтенасыщенный коллектор, поскольку данная характеристика во многом определяет степень воздействия на коллектор. Поэтому в **параграфе 4.1** выполнена серия расчетов вариантов разработки данного месторождения как с учетом акустического воздействия на различных частотах, так и без него. Для различных типов коллекторов была определена частота, воздействие на которой приводит к максимальному повышению КИН. На рисунке 5 объединены результаты данных расчетов: показана зависимость оптимальной частоты воздействия в зависимости от проницаемости, а также соответствующее увеличение КИН.

При несбалансированной системе отбора и закачки в процессе разработки месторождения возможно снижение пластового давления в окрестности скважин на 5-10 МПа. При таком снижении давления может быть превышен порог прочности пород на сжатие и возможна не только упругая, но и неупругая деформация, при которой пористость может существенно уменьшиться (как показано в **параграфе 2.2**). В этом случае соответственно должны измениться и характерные собственные частоты остаточной нефтенасыщенности, что приведет к изменению степени акустического воздействия. Поэтому в **параграфе 4.2** оценивалась оптимальная частота воздействия в случае деформированного коллектора. Все серии расчетов были аналогичны расчетам в первом параграфе.

При сравнении с результатами для недеформированного коллектора видно, что оптимальная частота воздействия возрастает в силу увеличения собствен-

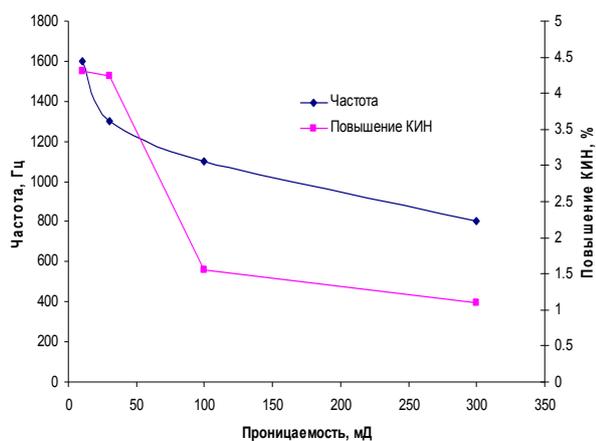


Рис. 5. Частота воздействия и соответствующее максимальное повышение КИН для пластов различной средней проницаемости

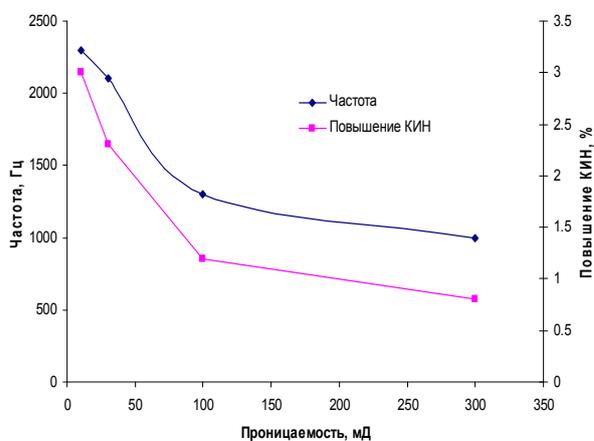


Рис. 6. Частота воздействия и соответствующее максимальное повышение КИН для пластов, подверженных неупругой деформации

ных частот капиллярно-защемленной нефти, из-за снижения пористости и проницаемости коллектора. Также, в силу того, что затухание волны на высоких частотах более сильное, уменьшается зона влияния акустического воздействия и соответственно снижается эффект (рис. 6).

Применение акустических источников в скважинах влечет за собой увеличение стоимости эксплуатации, поэтому необходимо при проектировании воздействия для каждой стадии разработки данного участка месторождения оптимизировать момент включения и время работы источника. В соответствии с этим, в **параграфе 4.3** решена задача определения выгодной для включения ис-

точников стадии разработки месторождения. Для этого, на основе вышеописанной модели, проведен ряд расчетов с установленными источниками в скважинах, которые включались в различные стадии разработки месторождения и работали до ее окончания. Показано, что конечный коэффициент извлечения нефти практически не зависит от стадии разработки, когда был включен источник. Т.е. выгоднее всего использовать акустическое воздействие на завершающей стадии разработки, когда скважины полностью обводнены. Это легко объяснить тем, что только на завершающей стадии разработки нефть представляет собой разрывную фазу в виде отдельных глобул.

В параграфе 4.4 изучен вопрос влияния собственных колебаний дебитов скважин на процесс разработки как с акустическим воздействием, так и без него. Эти колебания наблюдаются на реальных месторождениях, связанные с существованием собственных частот как всего резервуара в целом, так и его частей. Колебания резервуара являются откликом на различного рода воздействия на пластовую систему (пуски и остановки скважин, приливные волны и т.д.).

Для их моделирования использовалась модель описанного выше месторождения, но дебиты скважин задавались периодическими, с амплитудой 20% (от максимального) и с различной частотой колебаний: от нескольких минут до нескольких недель.

Расчеты показали, что для пласта с различными средними проницаемостями наблюдаются колебания нефтеотдачи в зависимости от частоты колебаний дебитов на скважинах, причем это отмечается как для разработок резервуара с воздействием, так и без него. По сравнению с модельными задачами, где не учитывалось периодическое изменение дебитов, присутствует существенное увеличение нефтеотдачи (как относительной, так и абсолютной). Это легко объяснить изменением притока к скважинам и периодической стимуляцией зоны влияния, а также подтягиванием ранее неподвижных целиков нефти.

Таким образом, для выбора оптимальных параметров работы скважины и проектирования воздействий на нее одним из шагов должен быть анализ истории, оценка периода и амплитуды колебаний дебита скважины.

Поэтому, можно предположить, что для повышения нефтеотдачи коллектора необходимо не только проектировать различные виды воздействия, но и пытаться создать естественный фон, например, регулируя последовательность остановок скважин и пуска их в работу, а возможно, и частоту вращения рабочего вала ЭЦН (используя его как искусственный и постоянный источник акустических колебаний).

Также важный параметр, определяющий эффективность акустического воздействия, - это положение излучателя относительно продуктивной зоны. Поскольку, как правило, продуктивная зона представляет набор пропластков с различными проницаемостями, и размеры излучателя много меньше ее толщины, то понимание оптимального размещения источника является одним из важнейших параметров.

В параграфе 4.5 на модельных задачах найдено оптимальное местоположение акустического источника в пластах, представляющих собой набор пропластков с различными проницаемостями. Для этого в гидродинамической мо-

дели месторождения пласт был разбит на пропластки с различными проницаемостями, и источник, в каждом из расчетов, помещался напротив одного из них. Показано, что выгоднее располагать излучатель напротив менее промытых пропластков из более высокопроницаемой части разреза.

В параграфе 4.6 для проверки физической достоверности резонансной модели акустического воздействия приведены результаты моделирования натуральных испытаний, проходивших на Самотлорском месторождении в 1999-2000 гг. на одной из остановленных по причине отсутствия притока к скважине (до остановки - 7 т/сут при обводненности 50%).

Краткое описание проведенного эксперимента: проведена ультразвуковая обработка призабойной зоны скважины, после чего скважина вышла на стабильный дебит 30 т/сут, с обводненностью 50 %. После был спущен источник, работающий на частотах от 100 до 400 Гц, мощностью 6 кВт. После начала работы источника обводненность по данной скважине снизилась с 50 до 35%, оставаясь на этом уровне в течение месяца, после отключения источника обводненность приблизилась к прежнему уровню.

Для моделирования данного натурального эксперимента была создана геолого-гидродинамическая модель данного участка месторождения, после чего моделировалась работа скважины до, во время и после воздействия. Результаты моделирования показали удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных. В частности, расчетная обводненность продукции скважины с хорошей точностью совпала с реальными промысловыми данными, полученными во время эксперимента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложены полуэмпирическая модель и алгоритмы расчета изменения остаточной нефтенасыщенности вследствие резонансного воздействия акустического поля на пористый коллектор.
2. Получена связь спектра собственных частот колебаний капиллярно-защемленной нефти со структурой порового пространства коллектора, его текущей нефтенасыщенностью и внешним градиентом давления.
3. Разработана гидродинамическая модель процесса фильтрации двухфазной жидкости с изменяемой остаточной нефтенасыщенностью.
4. На основе экспериментальных данных других авторов создан полуэмпирический алгоритм учета неупругой деформации недоуплотненных коллекторов при фильтрации двухфазной жидкости. Показано, что неупругая деформация уменьшает пористость и проницаемость коллектора, а также приводит к увеличению собственных частот капиллярно-защемленной нефти и к перераспределению насыщенныхностей.
5. Проведены расчеты применительно к результатам полевых испытаний эффективности акустического воздействия на Самотлорском месторождении. Результаты расчетов согласуются с результатами полевых испытаний с точностью в 15-20 %.

6. Решен ряд модельных задач разработки нефтяных месторождений при наличии источников волнового поля, установленных вблизи забоя скважин. Анализ полученных решений показал, что:
- акустическое воздействие следует применять на завершающей стадии разработки при высокой обводненности добывающих скважин,
 - при воздействии на неоднородные коллекторы источник следует располагать возле менее промытых пропластков высокопроницаемой части коллектора,
 - частота эффективного волнового воздействия зависит от ряда факторов таких, как проницаемость коллектора, от подверженности его неупругой деформации и т.д. При прочих равных условиях с увеличением проницаемости частота уменьшается (30 мД – 1300 Гц, 100 мД – 1100 Гц, 300 мД – 900 Гц), а при неупругой деформации коллектора – увеличивается (до 50%),
 - при воздействии на зону вытеснения нефти водой с частотой 500 - 3000 Гц остаточная нефтенасыщенность может быть уменьшена локально на 5-10 %, а коэффициент извлечения нефти может быть увеличен на 5 %.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Черемисин А.Н., Черемисин Н.А., Сонич В.П. Особенности моделирования разработки гранулярных коллекторов с упруго-пластическими свойствами // Нефтяное хозяйство. 2004. № 2. С. 60-62.
2. Черемисин А.Н., Черемисин Н.А. Проектирование необходимого спектра частот и оптимальной интенсивности волновых воздействий на пласт // Нефтяное хозяйство. 2007. № 6. С. 61-65.
3. Черемисин А.Н., Черемисин Н.А. Виброакустическая неустойчивость капиллярно-защемленной нефти и влияние волнового фона на нефтеотдачу пластов // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр./ Ин-т гидродинамики СО РАН. 2007. Вып. 124. С. 67-74.
4. Черемисин А.Н., Черемисин Н.А. Особенности моделирования разработки гранулярных коллекторов с упруго-пластическими свойствами. // Перспективы нефтегазоносности Западно-Сибирской нефтегазовой провинции. // Материалы научно-практической конференции, посвященной 60-летию образования Тюменской области.– Тюмень.- 2004.- С.305-309.
5. Черемисин Н.А., Черемисин А.Н., Сонич В.П. Численное исследование влияния неупругой деформации ползучести нефтенасыщенных гранулярных пористых сред на процесс их разработки // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: Тез. докл. Всеросс. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. С.130.
6. Черемисин А.Н., Черемисин Н.А., Пальчиков Е.И. Моделирование неупругой деформации в коллекторах // ВНКСФ-12. Материалы конференции, информационный бюллетень. Изд-во Екатеринбург, АСФ России, 2006. С. 623-624.