MINISTRY OF EDUCATION OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN
BAKU STATE UNIVERSITY

PhD Thesis

Afandiyeva Afat Oqtay gizi

Investigation of filtration of fluids in heterogeneous porous media

Supervisor
Baghir A. Suleimanov, DSc habil., «OilGasScientificResearchProject» Institute, SOCAR

Baku - 2009

ABSTRACT

On the base of theoretical and experimental investigations we study filtration process of gas-liquid systems with regard to non-linear effects and inhomogeneity of a plate and on this base we determine filtration parameters allowing to use more rationally internal energy of produced fluid and oil recovery improvement of a stratum.

We consider filtration of homogeneous porous medium of fractal structure.

Vibration wave influence on a stratum and bottomhole zone of walls is studied and investigated with regard to sliding fluid. Depth of penetration of elastic waves in a stratum is studied. Experimental investigations for improving filtration and infiltration of fluid in porous media are carried out.

ORIGINAL LANGUAGE

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
АЗЕРБАЙЖДАНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

БАКИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

АФАТ ОКТАЙ кызы ЭФЕНДИЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ФЛЮИДОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Баку – 2009

Работа выполнена в отделе «Механика жидкости, газа и теория пластичности» **Института Математики и Механики НАН Азербайджана**

Научный руководитель:
доктор технических наук **Багир Алекпер оглы Сулейманов**

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор **Ф.Б. Нагиев**
(Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия);
кандидат физико-математических наук, доцент **В.Ю. Бабанлы**
(Бакинский Государственный Университет)

Ведущая организация:
Азербайджанский Технический Университет
(кафедра «Математика»)

Защита диссертации состоится «20» октября 2009 г. в 14^{00} часов на заседании Диссертационного Совета N. 02.016 по присуждению ученой степени кандидата физико-математических наук при Бакинском Государственном Университете по адресу: AZ 1148 Баку, ул. З.Халилова 23, г. Баку.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Бакинского Государственного Университета

Автореферат разослан «17» сентября 2009 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
Диссертационного Совета N. 02.016 БГУ
к. ф.-м. н., доцент **Н.К.Ахмедов**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Увеличение нефтеотдачи пластов и более рациональное использование внутренней энергии добываемых флюидов наряду с другими факторами, еще во многом зависит от правильного выбора режимов фильтрации флюидов с учетом нелинейных эффектов.

Фильтрация газожидкостных систем в пористых гетерогенных средах сопровождается различными процессами, влияние которых приводит к нелинейным эффектам.

Следует отметить, что нефтегазоносные пласты в большинстве случаев имеют сложную структуру и являются неоднородной по проницаемости средой.

При нестационарных процессах и в процессе вытеснения одной жидкости другой проявляется ряд важных особенностей. Так, например, возникает пристенные эффекты, которые приводят к проскальзыванию.

Неучет некоторых нелинейных эффектов и фрактальности пористой среды могут привести к серьезным ошибкам при исследовании и изучении фильтрации газожидкостных систем.

Цель работы. На основе теоретических и экспериментальных исследований, изучение фильтрационного процесса газожидкостных систем с учетом нелинейных эффектов и неоднородности пласта на основе, чего определение параметров фильтрации позволяющих более рационально использовать внутреннюю энергию добываемых флюида и улучшение нефтеотдачи пласта.

Методы исследования. Рассмотренные в диссертационной работе задачи были решены методом преобразования Лапласа, методом разделения переменных, методом интегрирования дифференциальных уравнений дробного порядка, методом преобразования Кирхгофа и приближенным методом - методом интегральных соотношений, применяемые в области разработки нефтяных месторождений и математической теории фильтрации.

Научная новизна заключается в следующем:

- Показано, что в гетерогенных средах при фильтрации от меньшей проницаемости к большей, расход становится больше, чем при обратной фильтрации.
- Показано, что с увеличением фрактальной размерности сопротивление среды растет, а расход жидкости резко падает.

- Показано, что с уменьшением частоты упругих волн глубина их проникновения в пласт увеличивается. Причем с ростом величины $A\omega$ до $10^{-3}\ м^3/с^2$ глубина проникновения упругих волн резко уменьшается, а после него стабилизируется и слабо зависит от $A\omega$. Наибольший эффект от воздействия достигается в интервале $0 \le A\omega \le 10^{-3}\ м^3/с^2$.

- Получены аналитические выражения для распределения давления и расхода жидкости с учетом эффекта проскальзывания. Показано, что при определенных значениях давления имеет место аномальное увеличение расхода жидкости.

- Экспериментально изучены особенности фильтрации и инфильтрации жидкости в модели пласта, где было показано, что в гетерогенных средах при фильтрации от меньшей проницаемости к большей происходит увеличение коэффициента продуктивности в среднем на 15% по сравнению с инфильтрацией. Предложен механизм наблюдаемых явлений.

- Внедрение результатов и итогов проведенных исследований показали, что работа устьевого генератора волны настроенного на основе полученных в работе результатов обеспечивают более рациональное использование пластовой энергии и внутренней энергии добываемой жидкости, повышение КПД лифта, увеличение объемов добычи, снижение потерь энергии.

Практическая ценность и реализация результатов работ. Разработан новый тип устьевого волнового генератора регулируемой частоты, обеспечивающий увеличение притока добываемой продукции, а также уменьшения расхода газа и снижение потерь энергии добываемой жидкости в лифтовых трубах.

Опытный образец разработанного устьевого волнового генератора изготовлен и прошел приемочные испытания на скважине №2015 НГДУ «Нефтяные Камни».

В результате внедрения устройства достигнуто увеличение добычи нефти на 20-25%, а снижение расхода газа в среднем на 20%.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- Научно-практической конференции «Xəzəneftqazyataq-2002», Баку, 2002г.

- Научно-практической конференции «Xəzərneftqazyataq -2004», Баку, 2004г.
- Международной конференции, посвященной 125-летию со дня рождения академика Л.С. Лейбензона и 100-летию со дня рождения академика А.П. Крылова, Москва, 2004г.
- Научных семинарах ИММ НАН Азербайджана и отдела «Механика жидкости, газа и теория пластичности» ИММ.

Публикации. На основе диссертационной работы было опубликовано 5 (пять) статей и 3 (три) тезиса.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 119 страницах, включая 21 рисунок и 2 таблицы. Список литературы содержит 96 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, научная новизна, практическая ценность, а также сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе диссертации проводится анализ современного состояния теоретических и экспериментальных работ, посвященных фильтрационному процессу жидкости в пористых средах, а также работ построения моделей фильтрации жидкости и постановки математических задач и методов их решения. В этой области важные для теории и практики результаты получены М.Т. Абасовым, Г.И. Баренблаттом, М.А. Гусейн-заде, В.М. Ентовым, Ю.П. Желтовым, А.Х. Мирзаджанзаде, В.Н. Щелкачевым, И.А. Чарным и многими другими учеными. Из-за выделения газа и образования газовой прослойки на стенках капилляров при течении газированной жидкости вблизи давления насыщения происходит пристенные эффекты. Это в свою очередь приводит к эффекту проскальзывания. Эффект проскальзывания исследуется в работах А.А. Болотова, А.Х. Мирзаджанзаде, Б.А. Сулейманова, Г.Х. Меликова.

В работах К.С. Басниева, А.М. Власова, И.Н. Кочиной, В.М. Максимова, С.Н. Бузинова, И.Д. Умрихина, Б.А. Сулейманова, Э.М. Аббасова изучено влияние немгновенного прекращения притока жидкости в скважину на кривые восстановления давления. На

процесс фильтрации жидкости в пористых средах сильно влияет эффект проскальзывания, что приводит к нелинейным эффектам. Поэтому изучение фильтрационного процесса в пористых средах и кривых восстановления давления с учетом немгновенного прекращения притока жидкости в скважину и эффекта проскальзывания, а также разработка методов определения параметров среды представляет как научный, так и практический интерес.

Во втором параграфе первой главы изучены факторы, влияющие на фильтрационную способность пласта и методы ее улучшения. Предметом изучения многих исследователей ввиду практической значимости является разработка методов определения параметров зонально-неоднородных пластов при неустановившихся фильтрационных процессах. Существует ряд методов воздействия на призабойную зону скважин, например акустическое, виброволновое, электро - и магнитное и т.д. Наиболее перспективными представляются физические методы, которые не требуют применения дорогостоящих установок. В частности, предложенные академиком А.Х. Мирзаджанзаде метод импульсного воздействия, барообработки и «шока».

В третьем параграфе первой главы проводится анализ теоретических и экспериментальных работ посвященных фильтрацию жидкости в неоднородных пористых средах.

В четвертом параграфе первой главы проводится анализ работ посвященных фильтрации с учетом фрактальной структуры пласта. Изучению фильтрации в пористой среде с фрактальной структурой посвящены работы ряда авторов, таких как А.В. Мальшакова, Р.П. Мейланова, Р.Р. Нигматулина, Б.А. Сулейманова, М.М. Хасанова, Ф. Хаусдорфа, J. Feder, M. Muskat, P.G. Saffman, G.I. Taylor. Исследование и изучение фильтрации в пористых средах с фрактальной структурой и на их основе определение параметров систем представляет как научный, так и практический интерес. Фракталы встречаются в огромном числе физических явлений и процессов. Для описания различных природных явлений и процессов фракталы получили широкое применение в ряде работ Мандельброта.

Во второй главе диссертационной работы рассматриваются и изучаются фильтрации флюидов в неоднородных пористых средах с учетом фрактальности среды, влияния эффекта проскальзывания, немгновенного прекращения притока жидкости в скважину. Также

изучастся виброволновое воздействие на пласт и призабойную зону скважины.

В первом параграфе второй главы на основе теоретических исследований изучается влияние зонально неоднородной проницаемости пористой среды на ее фильтрационную способность при одномерной нестационарной фильтрации с учетом конечных размеров пласта. Приводится уравнение фильтрации:

$$\frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\chi_1}\frac{\partial P_1}{\partial t}, \quad \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2} = \frac{1}{\chi_2}\frac{\partial P_2}{\partial t} \qquad (1),$$

где $\chi = \begin{cases} \chi_1, & при \quad 0 \le x \le l_1 \\ \chi_2, & при \quad l_1 \le x \le l_2 \end{cases}$, χ_1, χ_2 –коэффициенты пьезопроводности;

P_1, P_2 – соответствующие давления; t - время; x - координата; l_1, l_2 - длина пласта.

Начальные $P_1 = P_{01}$, $P_2 = P_{01}$ при $t = 0$ (2) и граничные условия $P_1 = P_2$ при $x = l_1$, $k_1 \frac{\partial P_1}{\partial x} = k_2 \frac{\partial P_2}{\partial x}$ при $x = l_1$, $P_1\big|_{x=0} = P_l$, $P_2\big|_{x=l} = P_0$ (3), где P_0 - забойное давление, P_l - контурное давление.

Применяя преобразование Лапласа и переходя от изображения к оригиналу, и учитывая равенство: $Q = \frac{k_1}{\mu} \cdot f \frac{\partial P_1}{\partial x}\big|_{x=0}$ (4), где Q- расход жидкости; f - площадь поперечного сечения стенки пласта, получаем $\frac{\partial P_1}{\partial x}$ и после некоторых преобразований получаем выражение для определения величины расхода в неоднородно-пористой среде.

Проведен численный расчет значение расхода в прямом и в обратном направлениях фильтрации. Результаты расчета представлены на рис.1. Показано, что при фильтрации от меньшей проницаемости к большей проницаемости, расход становится больше, чем при обратной фильтрации, что имеет важное практическое значение при эксплуатации и закачки скважины.

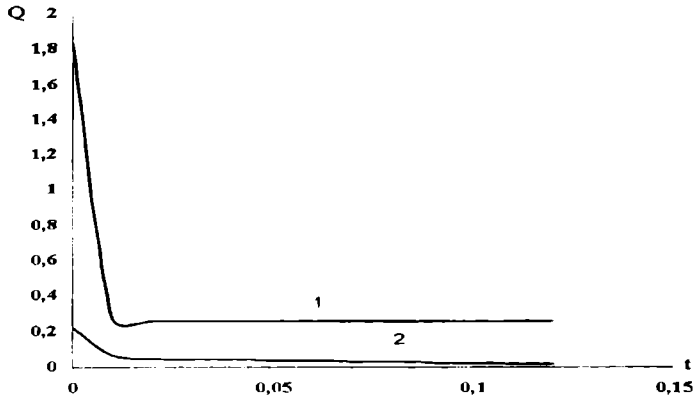

Рис.1 Зависимость расхода жидкости $Q(м^3/сут)$ от времени t (сутки): 1-фильтрация от меньшей проницаемости к большей; 2-фильтрация от большей проницаемости к меньшей

Во втором параграфе второй главы рассмотрена нестационарная плоскорадиальная фильтрация в зонально-неоднородном пласте с учетом его конечной протяженности, и задача решена аналитическими методами. Движение жидкости в пласте происходит в условиях замкнуто-упругого режима.

Соответствующее уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial \Delta P_1}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\chi_1 \frac{\partial \Delta P_1}{\partial r}\right), при\ R_c \le r \le R_1,\ 0 \le t \le \infty$$

$$\frac{\partial \Delta P_2}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\chi_2 \frac{\partial \Delta P_2}{\partial r}\right), при\ R_1 \le r \le R_2, 0 \le t \le \infty, \quad (5)$$

где R_c - радиус скважины; R_1 - радиус I зоны пласта; R_2 - радиус II зоны пласта; r - координата.

Начальные $\Delta P_1 = 0,\ \Delta P_2 = 0,$ при $t = 0$ (6) и граничные условия

$$k_1 \frac{\partial \Delta P_1}{\partial r} = k_2 \frac{\partial \Delta P_2}{\partial r}, при\ r = R_1,\ \Delta P_1\Big|_{r=R_1} = \Delta P_2\Big|_{r=R_1},\ \Delta P_1\Big|_{r=R_2} = 0,$$

$\Delta P_1\Big|_{r=R_c} = P_n - P_з$ (7), где P_n - давление на контуре питания; $P_з$ - давление на забое скважины.

Для решения задачи применен метод разделения переменных. В данном случае этот метод позволяет определить . постоянные интегрирования.

Интегрируя (5) с учетом граничных условий (7) получено трансцендентное уравнение:

$$J_0(x_\nu)Y_0\left(x_\nu\frac{R_1}{R_c}\right)-J_0\left(x_\nu\frac{R_1}{R_c}\right)Y_0(x_\nu)=0 \qquad (8)$$

из которого определяются его корни x_ν .

В итоге после некоторых преобразований для давления и расхода жидкости получены уравнения:

$$P_2(r,t)=P_n-\frac{\Delta P_y}{\ln\frac{R_c}{R_2}}\ln\frac{r}{R_2}-\pi\left(\ln\frac{R_2}{R_c}\right)\frac{\Delta P_y}{\ln\frac{R_c}{R_2}}\sum_{\nu=1}^{\infty}\frac{J_0\left(x_\nu\frac{R_2}{R_c}\right)J_0(x_\nu)}{J_0^2\left(x_\nu\frac{R_2}{R_c}\right)-J_0^2(x_\nu)}\times$$

$$\times U_\nu\left(x_\nu\frac{r}{R_c}\right)\exp\left(-x_\nu^2\frac{\chi_2 t}{R_c^2}\right);$$

$$Q=-\frac{2\pi R_c h k_2\Delta P_y}{\mu\ln\frac{R_c}{R_2}}\left[\frac{1}{R_c}-\frac{\pi}{R_c}\left(\ln\frac{R_2}{R_c}\right)\sum_{\nu=1}^{\infty}\frac{x_\nu J_0\left(x_\nu\frac{R_2}{R_c}\right)J_0\left(x_\nu\frac{R_1}{R_c}\right)}{J_0^2\left(x_\nu\frac{R_2}{R_c}\right)-J_0^2(x_\nu)}\times\right. \qquad (9)$$

$$\left.\times\left(J_1(x_\nu)Y_0(x_\nu)-J_0(x_\nu)Y_1(x_\nu)\right)\cdot\exp\left(-x_\nu^2\frac{\chi_2 t}{R_c^2}\right)\right]$$

Результаты численных расчетов представлены на рис.2-4.

Как видно из рисунка 2 и 3, при фильтрации от большей проницаемости к меньшей, расход жидкости становится почти в два раза меньше, чем при обратной фильтрации.

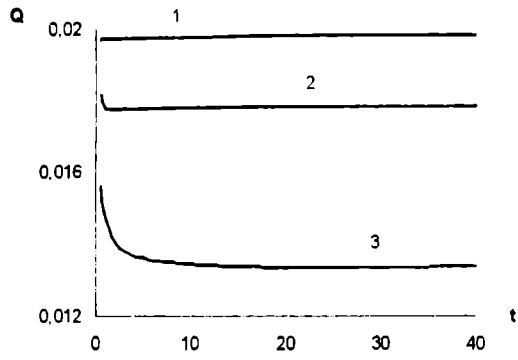

Рис.2 Изменение расхода жидкости $Q(м^3/с)$ в зависимости от времени $t(с)$ в неоднородных пористых средах: фильтрация от большей проницаемости к меньшей $k_1 = 0{,}1 \cdot 10^{-12} м^2, k_2 = 0{,}05 \cdot 10^{-12} м^2$ $(1 - R_2/R_1 = 5; 2 - 10; 3 - 100)$

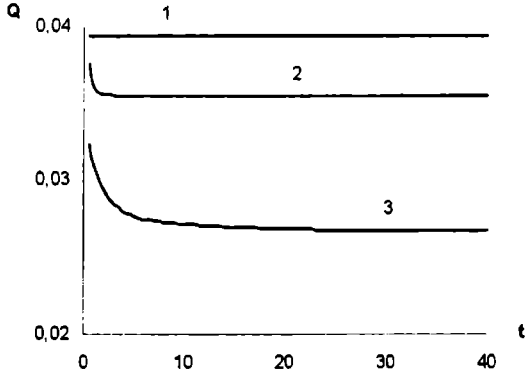

Рис.3 Изменение расхода жидкости $Q(м^3/с)$ в зависимости от времени $t(с)$ в неоднородных пористых средах: фильтрация от меньшей проницаемости к большей $k_1 = 0{,}05 \cdot 10^{-12} м^2, k_2 = 0{,}1 \cdot 10^{-12} м^2$ $(1 - R_2/R_1 = 5; 2 - 10; 3 - 100)$

Из рис.4 следует, что поле давления во второй зоне пласта сильно зависит от отношения R_2/R_1, причем с увеличением значения R_2/R_1, потеря давления увеличивается.

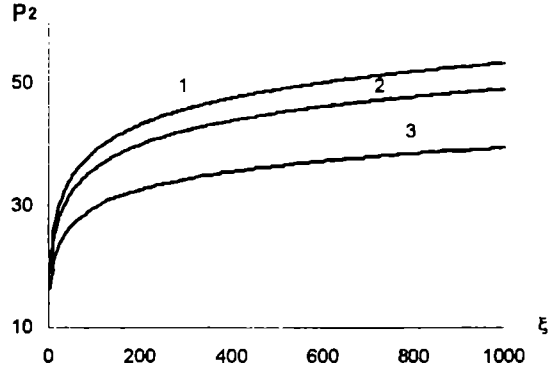

Рис.4 Зависимость давления P_2 от координаты ξ: $1 - R_2/R_1 = 5$; $2 - 10$; $3 - 100$, P_2, *МПа*

В третьем параграфе второй главы исследован случай одномерной стационарной фильтрации в неоднородной среде с фрактальной структурой. Жидкость принималась объемно несжимаемой. Уравнение фильтрации имеет вид

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{k\cdot a_0}{\mu}\cdot\rho\cdot\frac{d^{\alpha}\cdot P}{dx^{\alpha}}\right)=0 \qquad (10),$$

где a_0 - постоянный коэффициент; k - проницаемость пористой среды; μ - динамическая вязкость жидкости; ρ - плотность жидкости; α - фрактальная размерность пористой среды.

Граничные условия $P\big|_{x=0}=P_1$, $P\big|_{x=l}=P_2$ (11), где P_1 – давление на контуре питания; P_2– забойное давление; l - длина пласта.

Интегрируя (10) получим $\frac{d^{\alpha}P}{dx^{\alpha}} = C$ (12), где C- постоянное интегрирование. Из уравнения (12) с учетом (11) получим $\frac{P}{P_2} = \beta + (1-\beta)\xi^{\alpha}$ (13), где $\xi = \frac{x}{l}$; $\beta = \frac{P_1}{P_2}$.

Расход жидкости для сред с фрактальной структурой может быть определен по закону Дарси формулой $Q = -\frac{ka_0}{\mu} f \frac{d^{\alpha}P}{dx^{\alpha}}$ (14), где Q- расход жидкости через неоднородную пористую среду с фрактальной структурой.

Тогда из (14) с учетом (12) и (13) будем иметь $Q = \alpha \frac{ka_0}{\mu} f \frac{P_1 - \Gamma(\alpha)P_2}{l^{\alpha}}$ (19), где $l^{\alpha} = \left(\frac{l}{\delta}\right)\delta^{\alpha}$; δ - размер песчинки.

Уравнение (15) можно привести к виду $\frac{Q}{Q_0} = \frac{\alpha a_0[\beta - \Gamma(\alpha)]}{(\beta-1)l^{\alpha-1}}$ (16), где Q_0- расход жидкости через неоднородную пористую среду без фрактальной структуры.

Результаты численных расчетов по формуле (13) и (16) представлены на рис.5 и рис.6.

Из рисунка 5 видно, с увеличением фрактальной размерности пористой среды α, кривая распределения давления становится более выпуклой, т.е. сопротивление среды растет.

Из рисунка 6 видно, что расход жидкости через пористую среду сильно зависит от фрактальной размерности α. Причем, при прочих равных условиях с увеличением фрактальной размерности α пористой среды расход жидкости резко падает.

Таким образом, как свидетельствуют проведенные исследования, неучет фактора фрактальной структуры пористой среды может привести к большим ошибкам при изучении фильтрации жидкости.

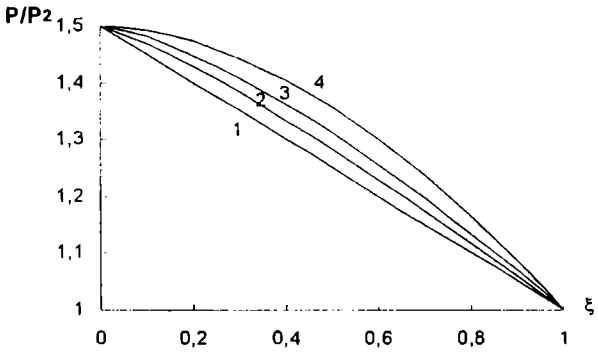

Рис.5 Кривые распределения давления P/P_2 по ξ (в безразмерных единицах): 1- $\alpha \equiv 1$; 2- $\alpha \equiv 1{,}2$; 3- $\alpha \equiv 1{,}4$; 4- $\alpha = 1{,}8$

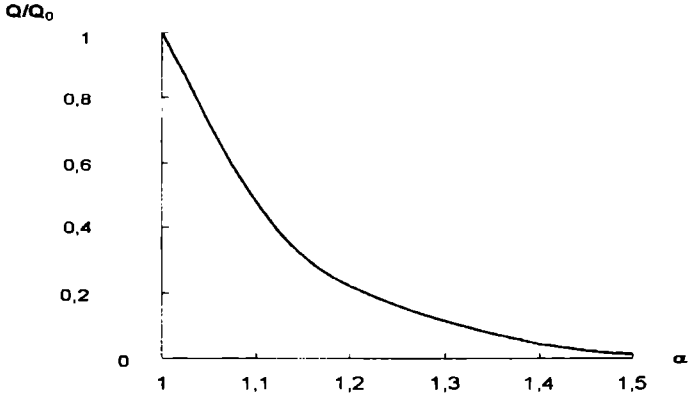

Рис.6 График изменения Q/Q_0 в зависимости от фрактальной размерности α (в безразмерных единицах)

В четвертом параграфе исследовано виброволновое воздействие на пласт и призабойную зону скважин с учетом эффекта проскальзывания жидкости. Строится модель процесса, и определяются факторы, влияющие на его механизм.

Распределение давления в пласте описывается уравнением пьезопроводности

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\chi(P)\frac{\partial P}{\partial r} \right] \qquad (17)$$

Начальные $P_{\Gamma}\big|_{t=0} = P_{3}$ (18) и граничные условия $P\big|_{r=R_к} = P_к$ (19)

$2\pi rh\frac{k}{\mu}\frac{\partial P}{\partial r}_{r=r_c} = Q(t)$ (20), где P_{Γ} и P_{3}– соответственно давление на галерее пласта и на забое скважины; $P_к$ – контурное давление; $R_к$ – радиус контура пласта; r_c – радиус скважины; h – толщина пласта.

Для решения нелинейной краевой задачи (17) применяем преобразование Кирхгофа

$$\theta = \frac{1}{k_0}\int_0^P k(P)dP \qquad (21),$$

где k_0 - начальное значение коэффициента проницаемости.

Рассмотрен фильтрационный процесс выше и вблизи давления насыщения (без и с учетом эффекта проскальзывания).

С уменьшением частоты волн глубина их проникновения в пласт увеличивается, что имеет важное практическое значение. Кроме того, для увеличения глубины проникновения волн их частоту необходимо выбрать кратной $\frac{8\chi_0}{R_k^2}$.

На рис.7 представлены результаты численного расчета по точному и приближенному решениям динамики перепада давления, а также глубины проникновения упругих волн при различных $A\omega$. Видно, что с уменьшением частоты упругих волн глубина их проникновения в пласт увеличивается. Причем с ростом величины $A\omega$ до $10^{-3}\,м^3/с^2$ глубина проникновения упругих волн резко уменьшается, а после него стабилизируется и слабо зависит от $A\omega$. Наибольший эффект от воздействия достигается в интервале $0 \le A\omega \le 10^{-3}\,м^3/с^2$.

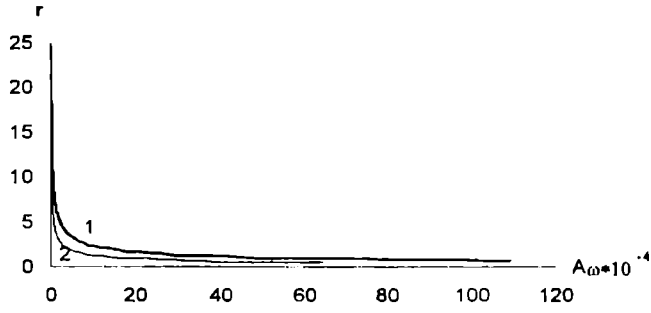

Рис.7 Зависимость глубины r, $м$ проникновения упругих волн от скорости колебаний $(A\omega)\cdot 10^{-4}\, м^3/с^2$: 1 – точное решение; 2 – приближенное решение

В пятом параграфе данной главы рассматривается влияние эффекта проскальзывания на нестационарную фильтрацию жидкости. Движение жидкости с плоскорадиальным течением происходит в условиях замкнуто-упругого режима. Показано, что эффект проскальзывания оказывает существенное влияние на фильтрационную способность пористой среды.

В шестом параграфе изучается влияние эффекта проскальзывания на кривые восстановления давления с учетом немгновенного прекращения притока жидкости в скважину. Рассматривается скважина с начальным дебитом Q_0, в определенный момент, которого происходит ее немгновенная остановка. Предполагается, что проницаемость пористой среды зависит от давления.

На рис.8 представлены результаты численного расчета изменение давления на стенке скважины.

Как видно из рисунка 8, когда давление жидкости ближе к давлению насыщения, то из-за эффекта проскальзывания восстановление давления происходит быстрее чем, когда этот эффект отсутствует (кривые 1-2 рис.8).

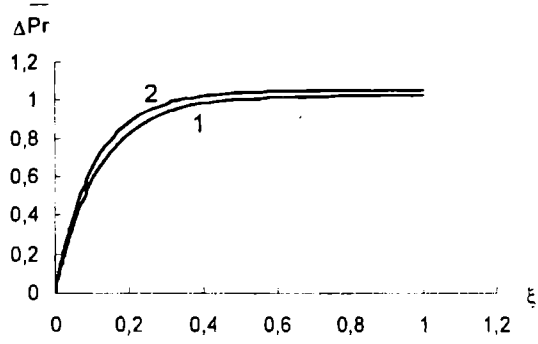

Рис.8 Кривые восстановления давления с учетом немгновенного прекращения притока жидкости, когда проницаемость постоянна $k = const$ и с учетом эффекта проскальзывания и немгновенного прекращения притока жидкости $k=k(p)$, ($\xi = \frac{t}{T}$ - безразмерная величина, $\Delta\overline{P_\Gamma} = \frac{\Delta P_\Gamma}{P_к - P_{cm}}$ - безразмерная величина): 1- $R_к = 200$ (k =const); 2- $R_к = 200$ ($k=k(p)$)

В первом параграфе третьей главы диссертационной работы на основе проведенных экспериментальных исследований в лабораторных условиях изучены особенности фильтрации и инфильтрации жидкости в линейной модели пласта. Линейная модель пласта состояла из двух зон различной проницаемости и была изготовлена в виде цилиндрической трубы длиной 1,1 м и внутренним диаметром 0,032 м. Показано, что при фильтрации воды от меньшей проницаемости к большей происходит увеличение коэффициента продуктивности в среднем на 15% по сравнению с инфильтрацией. Предложен механизм наблюдаемых явлений.

Во втором параграфе дается внедрение результатов исследования в промысловых условиях. Изучены и определены механизм взаимодействия и глубина распространения в пластах упругих волн в зависимости от параметров генератора и с учетом параметров пласта. Результаты и итоги проведенных исследований на

скважине работ по испытанию устройства показали, что работа устьевого волнового генератора и его технологическая схема обеспечивают более рациональное использование пластовой и внутренней энергии добываемой жидкости, повышение КПД лифта, увеличение объемов добычи, снижение потерь энергии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Было показано, что в гетерогенных средах при фильтрации от меньшей проницаемости к большей проницаемости, расход становится больше, чем при обратной фильтрации.

2. Показано, что с увеличением фрактальной размерности сопротивление среды растет, а расход жидкости резко падает.

3. Показано, что с уменьшением частоты упругих волн глубина их проникновения в пласт увеличивается. Причем с ростом величины $A\omega$ до $10^{-3}\,м^3/с^2$ глубина проникновения упругих волн резко уменьшается, а после него стабилизируется и слабо зависит от $A\omega$. Наибольший эффект от воздействия достигается в интервале $0 \le A\omega \le 10^{-3}\,м^3/с^2$.

4. Получены аналитические выражения для распределения давления и расхода жидкости с учетом эффекта проскальзывания и немгновенного прекращения притока жидкости в скважину. Показано, что при определенных значениях давления имеет место аномальное увеличение расхода жидкости. Показано, что при наличии эффекта проскальзывания восстановление давления происходит быстрее чем, когда этот эффект отсутствует.

5. Экспериментально также показано, что в гетерогенных средах при фильтрации от меньшей проницаемости к большей происходит увеличение коэффициента продуктивности в среднем на 15% по сравнению с инфильтрацией. Предложен механизм наблюдаемых явлений.

6. Результаты и итоги проведенных исследований и внедрений их в промысловых условиях по испытанию устройства показали, что работа устьевого волнового генератора и технологическая схема его внедрения обеспечивают более рациональное использование пластовой и внутренней энергии добываемой жидкости, повышение КПД лифта, увеличение объемов добычи, снижение потерь энергии. В результате внедрения устройства достигнуто увеличение добычи нефти на 20-25%, снижение расхода газа в среднем на 20%.

REFERENCES
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абасов М.Т., Азимов Э.Х., Кулиев А.М. Гидротермодинамические исследования скважин глубокозалегающих месторождений. Баку: Азернешр, 1993, 173 с.
2. Абызбаев И.И., Малишевская Л.В. Интерпретация результатов исследования скважин для решения промысловых задач при применении методов увеличения нефтеотдачи и проведении геолого-технических мероприятий http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/232.pdf
3. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. М: ИКИ, 2004, 416 с.
4. Аметов И.М., Шерстнев Н.М. Применение композитных систем в технологических операциях эксплуатации скважин. М.: Недра, 1989, 212 с.
5. Баишев Е.В., Гливенко Е.В., Губарь В.А. и др. О газоимпульсном воздействии на призабойную зону скважин // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2004, №4, с. 84-90
6. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984, 208 с.
7. Бармин А.А., Кондрашов А.В. Двухфронтовая математическая модель инжекции воды в геотермальный пласт, насыщенный паром // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2000, №3, с. 105-112
8. Басниев К.С., Дмитриев Н.Н., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика. М.: Недра, 2003, 480 с.
9. Беднаржевский С.С., Запивалов Н.П., Смирнов Г.И. Эффекты фрактальной геофлюидодинамики в процессах разработки и реабилитации нефтяных залежей с истощенными или трудноизвлекаемыми запасами / 12 th European Symposium on Improved Oil Recovery. Russia, 2003, p. 595-600
10. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности: В 2-х ч. Ч.1, М.: Высшая школа, 1982, 304 с.
11. Береславский Э.Н. О расчете фильтрации грунтовых вод в прибрежных напорных пластах // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2004, №3, с. 101-110

12. Болотов А.А., Мирзаджанзаде А.Х, Нестеров И.И. Реологические свойства растворов газа в жидкости в области давления насыщения // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа, 1988, №1, с. 172-175

13. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследование нефтяных и газовых скважин и пластов. М.: Недра, 1984, 269 с.

14. Ватсон Г.Н. Теория бесселевых функций. М.: ИЛ, 1949, 315 с.

15. Вахитов Г.Г., Симкин Э.М. Использование физических полей для извлечения нефти из пласта. М.: Недра, 1985, 230 с.

16. Гадиев С.М. Использование вибрации в добыче нефти. М.: Недра, 1977, 159 с.

17. Галимов А.Ю., Хабибуллин И.Л. Особенности фильтрации высоковязкой жидкости при нагреве электромагнитным излучением // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2000, №5, с. 114-123

18. Горбунов В.Е. О свойствах смесей флюидов. М.: ВНИИ Эгазпром, 1999, 71 с.

19. Грей Э., Мэтьюз Г.Б. Функции Бесселя и их приложения к физике и механике. М.: Изд. Иностранной Литературы, 1953, 371 с.

20. Гусейн-заде М.А. Особенности волнового течения в трубах. Гидравлический удар. М.: Нефть и газ, 1999, 162 с.

21. Данилов В.Л. Вариационный принцип наименьшей скорости рассеяния энергии при фильтрации жидкостей в пористой среде и его приложения. М.: Недра, 2003, 108 с.

22. Динариев О.Ю. Движение жидкостей и газов в пористых средах с фрактальной геометрией // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа, 1992, №5, с. 101-109

23. Динариев О. Ю. Кривая восстановления давления для фрактальной трещиноватой среды // Инженерно-Физический Журнал, 2006, Т. 79, №2, с. 76-81

24. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. М.: Наука, 1974, 544 с.

25. Дмитриев М.Н., Дмитриев Н.М., Кадет В.В. Обобщенный закон Дарси и структура фазовых и относительных фазовых проницаемостей для двухфазной фильтрации в анизотропных пористых средах // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2003, №2, с. 136-145

26. Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений. М.: Недра, 1998, 366 с.

27. Закиров С.Н. Разработка газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений. М.: Недра, 1998, 627 с.

28. Зинченко И.А. Совершенствование технологии повышения производительности газоконденсатных скважин в условиях ретроградной конденсации углеводородной смеси (при разработке нижнемеловых залежей углеводородов Севера Тюменской области): Автореф. дис. … канд.тех.наук. М., 1998, 31 с.

29. Кадет В.В., Максименко А.А. Решеточное моделирование течения взвесей и эмульсий в пористых средах // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2002, №1, с. 105-112

30. Кадет В.В. Методы математической физики в решении задач нефтегазового производства. М: ИКИ, 2004, 148 с.

31. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов. М.: Недра, 2003, 128 с.

32. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика открытых систем. М.: Янус, 1995, Т. 1, 624 с.; 1999, Т. 2, 528 с.; 2001, Т. 3, 508 с.

33. Кобелев В.Л., Романов Е.П., Кобелев Л.Я., Кобелев Я.Л. Недебаевская релаксация и диффузия в фрактальном пространстве // ДАН Серия Физика, 1998, Т. 361, №6, с. 755-758

34. Кобелев В.Л., Романов Е.П., Кобелев Л.Я., Кобелев Я.Л. Релаксационные и диффузионные процессы во фрактальных пространствах // Изв. РАН Серия Физика, 1998, Т. 62, №12, с. 2401-2408

35. Кобелев Я.Л., Кобелев Л.Я., Кобелев В.Л., Романов Е.П. Диффузия в фрактальных средах на основе кинетического уравнения Климонтовича в фрактальном пространстве // ДАН Серия Физика, 2002, Т. 385, №5, с. 612-614

36. Кондрашов А.В., Цыпкин Г.Г. О режимах инжекции воды в геотермальный пласт, насыщенный паром // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 1999, №2, с. 86-91

37. Конюхов В.М., Храмченков М.Г., Чекалин А.Н. Фильтрационно-диффузионная модель миграции рассолов в неоднородных водоносных пластах // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2004, №2, с. 140-151

38. Конюхов В.М., Чекалин А.Н. Гидродинамические эффекты при фильтрации двухфазных многокомпонентных смесей в нефтяных пластах сложного строения // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2004, №3, с. 111-122

39. Корганов И.И., Мирзаджанзаде А.Х. Соотношение между фильтрацией жидкости из пласта в скважину и инфильтрацией в пласт // ДАН Азерб. ССР, 1952, Т. 8, №2, с. 63-68

40. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970, 712 с.

41. Куликовский А.Г. О фронтах испарения и конденсации в пористых средах // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2002, №5, с. 85-92

42. Куликовский А.Г. О фазовых переходах при фильтрации в теплопроводном скелете // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2004, №3, с. 85-90

43. Лапушкин С.С., Якобовский В., Бренерман М.Х. Моделирование динамических процессов фильтрации в перколяционных решетках на высокопроизводительных вычислительных системах // Математическое моделирование, 2004, Т. 16, №11, с. 77-88

44. Лебедев Н.Н. Специальные функции и их приложения. М.-Л.: Физматгиз, 1968, 324 с.

45. Мазуров П.А., Цепаев А.В. Метод решения нелинейных задач фильтрации жидкости в трехмерных пластах с гидродинамически несовершенными скважинами // Математическое моделирование, 2004, Т. 16, №3, с. 33-42

46. Мальшаков А.В. Уравнения гидродинамики для пористых сред со структурой порового пространства, обладающей фрактальной геометрией // Инженерно-Физический Журнал, 1992, Т. 62, №3, с. 405-414

47. Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. М.: ИКИ, 2002, 656 с.

48. Мейланов Р.П. К теории фильтрации в пористых средах с фрактальной структурой // Письма в ЖТФ, 1996, Т. 22, вып. 23, с. 10-12

49. Меликов Г.Х. Исследование влияния неравновестности на гидродинамические характеристики газожидкостных систем при давлении выше давления насыщения: Дис. … канд.тех.наук. Баку, 1988, 31 с.

50. Мирзаджанзаде А.Х., Алиев Н.А., Юсифзаде Х.Б., и др. Фрагменты разработки морских нефтегазовых месторождений. Баку: Елм, 1997, 403 с.

51. Мирзаджанзаде А.Х., Кузнецов О.Л., Басниев К.С., Алиев З.С. Основы технологии добычи газа. М.: Недра, 2003, 880 с.

52. Мирзаджанзаде А.Х., Мамедзаде А.М., Муслимов Р.Х. Методика по закачке омагниченной воды в пласт с применением постоянных магнитов. Альметьевск: Татнефть, 1984, 55 с.

53. Михайлов Д.Н., Николаевский В.Н. Динамика потока в пористых средах при нестационарных фазовых проницаемостях // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2000, №5, с. 103-113

54. Михайлов Д.Н., Степанова Г.С. О влиянии адсорбции-десорбции микрозародышей газа на характер фильтрации газированной жидкости // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2003, №5, с. 106-114

55. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов. М.: ИКИ, 2002, 160 с.

56. Нигматулин Р.Р. Дробный интеграл и его физическая интерпретация // ТМФ, 1992, Т. 90, №3, с. 354-368

57. Панфилов М.Б., Шилович Н.Н. Фильтрация жидкостей с сильно различающимися подвижностями при наличии фазовых переходов: явления пограничного слоя, пространственные фазовые структуры, неустойчивость течения // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2000, №2, с. 124-135

58. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987, 687 с.

59. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: ГИТТЛ, 1955, 520 с.

60. Степанова Г.С. Механизм вытеснения нефти газом // Газовая промышленность, 2001, №11, с. 58-63

61. Суетнова Е.И., Чернявский В.М. О течении свободного флюида в вязкодеформируемой пористой среде с подвижной границей // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2001, №1, с. 136-144

62. Сулейманов А.А. Фрактальный анализ технологических показателей работы скважин // Азербайджанское нефтяное хозяйство, 2000, №1, с. 17-19

63. Сулейманов Б.А. О фильтрации дисперсных систем в неоднородной пористой среде // Коллоидный журнал, 1995, Т. 57, №5, с. 743-746. (Suleimanov B. A. Filtration of disperse systems in a nonhomogeneous porous medium // Colloid Journal, 1995, Vol. 57, № 5, P. 704-707)

64. Сулейманов Б.А. Экспериментальные исследования образования фрактальных структур при вытеснении несмешивающихся жидкостей на ячейке Хеле-Шоу // Инженерно-Физический Журнал, 1996, Т. 69, №2, с. 230-237. (Suleimanov B. A. Experimental study of the formation of fractal structures in displacement of immiscible fluids using a Hele-Shaw cell // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1996, Vol. 69, No. 2, P. 182-187.)

65. Сулейманов Б.А. Об эффекте проскальзывания при фильтрации газированной жидкости // Коллоидный журнал, 1997, Т. 59, №6, с. 807-812. (Suleimanov B. A. Slip effect during filtration of gassed liquid // Colloid Journal, 1997, Vol. 59, № 6, P. 749-753.)

66. Сулейманов Б.А. Об эффекте проскальзывания при фильтрации газированной неньютоновской жидкости // Коллоидный журнал, 1999, Т. 61, №6, с. 847-851. (Suleimanov B. A. The slip effect during filtration of gassed non-Newtonian liquids // Colloid Journal, 1999, Vol. 61, № 6, P. 786-790.)

67. Сулейманов Б.А. О влиянии взаимодействия частиц дисперсной фазы на реологию фрактально-неоднородных дисперсных систем // Коллоидный журнал, 2004, Т. 66, №2, с. 283-286. (Suleimanov B. A. On the effect of interaction between dispersed phase particles on the rheology of fractally heterogeneous disperse systems // Colloid Journal, 2004, Vol. 66, No. 2, P. 249–252.)

68. Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М. О влиянии вибровоздействия на систему пласт-скважина // Нефтепромысловое дело, 2004, №3, с. 53-57

69. Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М. Алиев Н.С. Экспериментальные исследования фильтрации релаксирующих жидкостей в неоднородных пористых средах // Инженерно-Физический Журнал, 1996, Т. 69, №1, с. 9-15. (Suleimanov B. A., Abbasov E. M., Aliyev N. S. Experimental investigations of filtration of relaxing liquids in heterogeneous porous media // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1996, Vol. 69, No. 1, P. 8-13.)

70. Сулейманов Б.А., Эфендиева А.О. О фильтрации и инфильтрации в зонально-неоднородной пористой среде // Инженерно-Физический Журнал, 2004, Т. 77, №6, с. 120-123. (Suleimanov B. A., Efendieva A. O. Filtration and infiltration in a zonally inhomo-geneous porous medium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2004, Vol. 77, No. 6, P. 1201-1204.)

71. Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М., Эфендиева А.О. Стационарная фильтрация в фрактально-неоднородной пористой среде // Инженерно-Физический Журнал, 2005, Т. 78, №4, с. 194-196. (Suleimanov B. A., Abbasov E. M., Efendieva A. O. Stationary filtration in a fractal in homogeneous porous medium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2005, Vol. 78, No. 4, P. 832-834.)

72. Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М., Эфендиева А.О. Нестационарная плоско-радиальная фильтрация в зонально-неоднородном пласте // Инженерно-Физический Журнал, 2005, Т. 78, №6, с. 89-92. (Suleimanov B. A., Abbasov E. M., Efendieva A. O. Nonstationary plane-parallel filtration in an inhomogeneous zonal seam // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2005, Vol. 78, No. 6, P. 1138-1141.)

73. Сулейманов Б.А. Особенности фильтрации гетерогенных систем. М.: ИКИ, 2006, 356 с.

74. Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М., Эфендиева А.О. Виброволновое воздействие на пласт и призабойную зону скважин с учетом эффекта проскальзывания // Инженерно-Физический Журнал, 2008, Т. 81, №2, с. 358-364. (Suleimanov B. A., Abbasov E. M., Efendieva A. O. Vibrowave action on the bed and the critical area of wells with allowance for the slip effect // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2008, Vol. 81, No. 2, P. 380-387.)

75. Телков Л.П., Грачёв С.И. Подземная гидромеханика: В 2-х ч. Ч. 1, 2, Т: ООО НИПИКБС, 2004, 545 с.

76. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: МГУ, 2004, 743 с.

77. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991, 260 с.

78. Фракталы в физике. М.: Мир, 1988, 670 с.

79. Хавкин А.Я., Чернышев Г.И. Томография нефтенасыщенных пористых сред. М.: Наука, 2005. 270 с.

80. Харин А.Ю., Харина С.Б. Гидродинамические методы исследования нефтяных скважин. Уфа: УГНТУ, 2004, 108 с.

81. Храмченков М.Г. Дисперсия и химические реакции в пористых средах // Изв. РАН Механика жидкости и газа, 2001, №1, с. 185-188

82. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: ИКИ, 2006, 436 с.

83. Швецов И.А., Манырин В.Н. Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов. Анализ и проектирование. Самара: Российское Представительство Акционерной Компании «Ойл Технолоджи Оверсиз Продакшн Лимитед», 2000, 350 с

84. Шейдергер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М.: ИКИ, 2008, 254 с.

85. Шнайдер А.В. Течения двухфазных смесей в пористой среде при волновом воздействии: Автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. Тюмень, 2006, 18 с.

86. Щелкачев В.Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации: В 2-х ч. Ч. 1, М.: Нефть и газ, 1995, 586 с.

87. Щелкачев В.Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации: В 2-х ч. Ч. 2, М.: Нефть и газ, 1995, 493 с.

88. Щелкачев В.Н. Подземная гидравлика. М.: Нефть и газ, 2001, 737 с.

89. Эфендиева А.О. Нестационарная фильтрация в неоднородно пористой среде со скачкообразным изменением проницаемости / Материалы VII Международной научно - практической конференции «Xəzərneftqazyataq». Баку, 2002, с. 318

90. Эфендиева А.О. Влияние эффекта проскальзывания на фильтрационную способность пористой среды / Материалы IX Международной научно - практической конференции «Xəzərneftqazyataq». Баку, 2004, с. 329-334

91. Эфендиева А.О. Влияние эффекта проскальзывания и фрактальной неоднородности пористой среды на ее фильтрационную способность / Материалы Международной конференции, посвященной 125-летию со дня рождения академика Л.С. Лейбензона и 100-летию со дня рождения академика А.П. Крылова. Москва: ГЕОС, 2004, с. 131

92. Afandiyeva A.O. Non-stationary filtration in non-homogeneous-porous medium with discontinuous jump of penetrability // Transactions of NAS of Azerb., 2003, V. XXIII, No 4, p.227-232

93. Hurst W., Van Everdingen A.F. The Application of Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs // Transactions AIME, 1949, No 186, p.305-324

94. Maloy K.J., Feder J., Jossang T. Radial viscous fingering in a Hele-Shaw cell // Report Series, Cooperative Phenomena Project, Department of Physics, University of Oslo, 1985, No 85-9, p.1-15

95. Muskat M. The Flow of Homogenous Fluids through Porous Media. New-York, London: 1937, 315 p.

96. Saffman P.G., Taylor G.I. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a move viscous fluid // Proceedings of the Royal Society-London, 1958, Ser. A, v.245, p.312-329