

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА
имени М.УЛУГБЕКА**

На правах рукописи

УДК 532.546

ХУДОЁРОВ ШУХРАТ ЖУМАКУЛОВИЧ

**АНАЛИЗ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ПОДХОДА
ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ОДНОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ
В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

Специальность: 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

ТАШКЕНТ - 2006

Работа выполнена в Комплексном НИИ региональных проблем (КНИИРП) при Самаркандском региональном отделении АН РУз

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Б.Х.Хужаёров**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Ж.А.Акилов**

кандидат физико-математических наук,
доцент **Ш.Каюмов**

Ведущая организация: Институт механики и сейсмостойкости
сооружений АН РУз

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2006 г. в _____
часов на заседании специализированного совета К 067.02.06 в Национальном
Университете Узбекистана имени М.Улугбека по адресу:

700174, г. Ташкент, ВУЗ городок, Национальный Университет Узбекистана,
механико-математический факультет (ауд. Г-303).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Национального
Университета Узбекистана имени М.Улугбека (ВУЗ городок).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2006 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
К 067.02.06 к.ф.-м.н., доцент



Оттажонов Б.Х.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Вопросы моделирования движения жидкости и газа в трещиновато-пористых средах (ТПС) имеют ряд специфических особенностей. Типичные ТПС, как это представляется во многих феноменологических моделях, состоят из пористых блоков, окруженных со всех сторон трещинами. По сути дела пористые блоки и система трещин представляют собой самостоятельную среду, со своими физико-механическими, коллекторскими свойствами. Как правило, в реальных ТПС эти свойства могут быть контрастными, т.е. отличаться значительно. Это делает течение жидкости в пористых блоках и трещинах также контрастными. Поэтому моделирование процессов течения в ТПС сталкивается значительными трудностями по сравнению с моделированием течения в чисто пористых средах.

Из-за контрастности свойств пористых блоков и трещин (проницаемость, пористость, характерные размеры, сжимаемость) при фильтрации однородных жидкостей в ТПС возникают характерные особенности процесса - поток жидкости из пористых блоков в трещины (или наоборот), т.е. массообмен между обеими средами, наличие двух полей давления, скоростей жидкости и др. Эти явления являются сугубо внутренними, однако оказывают значительное влияние на показатели течения, т.е. на давление, скорости фильтрации жидкости и др.

При эксплуатации нефтяных и газовых месторождений с трещиновато-пористыми коллекторами отмечается ряд характерных особенностей, не свойственных месторождениям с поровыми коллекторами. В частности, при эксплуатации месторождений среднее пластовое давление в начальных стадиях уменьшается значительно, а затем наблюдается уменьшение падения темпа. Это объясняется следующим: в первой стадии дренируются в основном трещины и из-за их хорошей проницаемости быстро и на значительное расстояние распространяется зона падения давления. Затем за счет разности давлений в трещинах и пористых блоках возникает переток жидкости из блоков в трещины, что послужит причиной уменьшения темпа падения давления. Эти и другие характерные черты движения нефти и газа в ТПС обуславливают особенности гидродинамических исследований пластов и скважин. В частности, наблюдается своеобразное искривление индикаторных кривых, что, во-первых используется для диагностики типа коллектора и, во-вторых, на их основе определяются параметры пласта.

Первый модельный подход к изучению движения жидкости и газа в ТПС был предпринят в [3, 4]. В этих работах ТПС рассматривается как два сосуществующих континуума со своими параметрами. В каждой точке среды вводятся две пористости, две проницаемости, два поля давления, две скорости фильтрации и т.д. Для каждой среды отдельно записываются уравнения неразрывности и соответствующие законы Дарси. В уравнениях неразрывности

вводится источниковый член, который характеризует переток жидкости из одной среды в другую. Основное допущение данного подхода заключается в том, что поток жидкости из пористых блоков в трещины (или наоборот) считается пропорциональным разности давлений в средах с коэффициентом пропорциональности, зависящим от физических свойств жидкости и геометрических характеристик пористых блоков. Это предположение известно как квазистационарный подход. Однако сложные переходные процессы перераспределения давлений внутри ТПС, разномасштабность распределения давления в трещинах и пористых блоках диктует делать предположение, что внутренний массоперенос в ТПС должен быть явно нестационарным. На это, в частности, указывают модель де Сваана [8] и модели с типовыми блоками [6].

В связи с этим возникает проблема тщательной проверки допущений квазистационарного подхода. Эта проблема до сих пор не решена, хотя упоминания относительно необходимости проверки гипотезы квазистационарности делались довольно часто. Все сказанное указывает на актуальность проверки основных положений гипотезы квазистационарности при фильтрации однородных жидкостей в ТПС.

Степень изученности проблемы. Теория фильтрации однородных жидкостей в ТПС разработана в начале 60-х годов прошлого столетия. Система уравнений фильтрации Г.И.Баренблатта и др.[3, 4] оказалась наиболее широко применяемой моделью. Наряду с теоретическими исследованиями выполнен ряд прикладных работ, составляющий основу исследования нефтяных скважин и пластов с трещиновато-пористыми коллекторами. Несколько другой подход к моделированию фильтрации однородных жидкостей в ТПС предложен Волковым [6], что впоследствии получило название «модель с типовыми блоками». В основу теории Г.И.Баренблатта и др. лежит ряд гипотез, одной из которых является предположение о пропорциональности массообмена между трещинами и пористыми блоками разности давлений в них. Оно получило название «квазистационарный подход». Правомерность такого подхода проверялась некоторыми исследователями, например, де Сваан [8], P.Royer и др. [9]. При макроскопическом моделировании течения однородной жидкости в ТПС чтобы получить лучшее соответствие макроскопической модели известным феноменологическим моделям P.Royer и др. предлагают внести нестационарную поправку в массообменный член уравнений. До сих пор роль этой поправки не была оценена. В диссертационной работе анализируется данная проблема.

Связь темы диссертации с планом НИР. Тема диссертационной работы связана с планом НИР в рамках ПФИ 3Ф. - «**Разработка и исследование моделей течения неньютоновских жидкостей в пористых и трещиновато-пористых средах**», выполненной в КНИИРП Сам.отд. АН РУз 2000-2002 гг.

Цель работы. Целью работы является анализ квазистационарного подхода при моделировании процессов фильтрации жидкости в ТПС, а также оценка некоторых нестационарных подходов, предложенных как обобщение классических моделей.

Научная новизна, теоретическая и практическая ценность. В работе исследован характер распространения скачков решений упрощенных и «усеченных» систем уравнений релаксационной фильтрации в ТПС. С учетом нестационарной поправки в массообменный поток из пористых блоков в трещины выписана система уравнений фильтрации однородных жидкостей в ТПС. Оценены диапазоны работы этих уравнений относительно характерного времени нестационарной поправки в массообменный поток. Для исследования динамики массообменного потока выведены уравнения фильтрации в средах, включающих элемент ТПС с отдельной трещиной и сопряженным пористым блоком.

Полученные результаты позволяют в некоторой степени определить механизм массообменного процесса в ТПС и оценить справедливость классического квазистационарного подхода. Результаты работы позволяют также сделать важные выводы относительно динамики массообменного потока и справедливости квазистационарного подхода.

В практическом аспекте результаты работы показывают на важность интерпретации данных исследования скважин на месторождениях с трещиновато-пористыми коллекторами с учетом динамического характера массообмена между пористыми блоками и трещинами. В этом смысле представляется весьма интересным решение обратных гидродинамических задач для уравнений фильтрации с нестационарной поправкой в ТПС. Такие исследования в будущем позволят оценить роль нестационарной поправки в массообменный поток и разработать специальную методику гидродинамических исследований скважин и пластов с трещиновато-пористыми коллекторами.

Апробация работы. Основное содержание работы докладывалось и обсуждалось на республиканской научно-технической конференции «Современные проблемы механики» (Ташкент, 2001), на республиканской научной конференции «Математическое моделирование и вычислительный эксперимент» (Ташкент, 2002); на республиканской конференции, посвященной памяти академика АН РУз Х.А.Рахматулина «Узбекистон республикаси жанубий минтакасида ишлаб чикаришни механика фани ютуклари ва таълим билан узаро интеграллашувининг холати ва истикболлари» (Карши, 2003); республиканской научно-технической конференции "Пути повышения эффективности разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений Узбекистана" (Ташкент, 2003), на международной конференции, посвященной 70-летию академика АН РУз Т.Р.Рашидова «Проблемы механики и сейсмомеханики сооружений» (Ташкент, 2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано девять работ, в т.ч. три журнальные статьи в: "Инженерно-физическом журнале", Узбекском журнале «Проблемы механики» и Узбекском журнале «Нефть и газ».

Ё.О.Бобокулов как соавтор в статье, опубликованной в Инженерно-физическом журнале, участвовал при проведении численных расчетов на ЭВМ, обосновании устойчивости численного алгоритма. Соавторы Э.К.Ирматов,

А.А.Закиров в статье, опубликованной в Узбекском журнале «Нефть и газ», внесли вклад в инженерную интерпретацию гидравлических расчетов и формировании практических выводов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы; изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенных в диссертации исследований, изложено их основное содержание. Дан краткий обзор работ по рассматриваемой тематике.

В первой главе приведены некоторые сведения об особенностях фильтрации однородных жидкостей в ТПС. Здесь рассматриваются характерные свойства фильтрации жидкости в трещиноватых и трещиновато-пористых коллекторах. Приведены классические модели теории фильтрации однородных жидкостей в ТПС и исследовались особенности эффективного применения этих моделей при решении задач фильтрации жидкости в ТПС. После краткого сведения о моделях фильтрации приведены релаксационные уравнения фильтрации и исследованы закономерности распространения скачков решений упрощенных и "усеченных" систем уравнений релаксационной фильтрации в ТПС.

В параграфе 1.1 даны особенности фильтрации жидкости в ТПС. Здесь в начале приведены сведения об исследовании скважин месторождений с трещиновато-кавернозными и трещиновато-пористыми коллекторами и об их характерных признаках, выражающихся в искривлении индикаторных кривых.

В 1.2 рассматриваются модели фильтрации однородной жидкости в ТПС. Относительно подробно описывается вывод уравнений фильтрации жидкости для трещин и для пористых блоков.

Описание основывается на классическую модель [3, 4]

$$\begin{aligned} \frac{k_1}{\mu} \Delta p_1 &= \beta_1^* \frac{\partial p_1}{\partial t} - \frac{\alpha}{\mu} (p_2 - p_1), \\ \frac{k_2}{\mu} \Delta p_2 &= \beta_2^* \frac{\partial p_2}{\partial t} + \frac{\alpha}{\mu} (p_2 - p_1), \end{aligned} \quad (1)$$

где Δ - оператор Лапласа, k_i - проницаемость трещин ($i=1$) и проницаемость блоков ($i=2$), μ - вязкость жидкости, p_i - давление в фазах, t - время, α - безразмерный коэффициент, зависящий от геометрических характеристик блоков, β_1^* , β_2^* - коэффициенты упругоэластичности трещин и пористых блоков соответственно, $\beta_i^* = \beta_{ci} + m_{i0} \beta_f$, $i = 1, 2$,

m_{i0} - начальные пористости сред, β_{ci} - коэффициенты сжимаемости сред, β_f - коэффициент сжимаемости жидкости.

Модель Уоррена-Рутта представляет собой "усеченную" модель Г.И.Баренблатта и др., в которой использовалось то обстоятельство, что

проницаемость блоков k_2 мала по сравнению с трещинной проницаемостью k_1 , следовательно, $\varepsilon_2 = \frac{k_2}{k_1} \ll 1$. Тогда система уравнений (1) примет вид

$$\begin{aligned} \chi \Delta p_1 &= \varepsilon_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} - \frac{p_2 - p_1}{\tau}, \\ \frac{\partial p_2}{\partial t} + \frac{p_2 - p_1}{\tau} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\chi = \frac{k_1}{\mu \beta_2^*}$, $\varepsilon_1 = \frac{\beta_1^*}{\beta_2^*}$, $\tau = \frac{\mu \beta_2^*}{\alpha}$, $m_i = m_{i0} + \beta_{ci}(p_i - p_0)$, $i = 1, 2$.

Упрощенная модель Баренблатта была получена в предположениях, что трещинная пористость m_1 , проницаемость блоков k_2 и сжимаемость трещин β_{c1} малы, т.е. $m_1 \ll m_2$, $k_2 \ll k_1$, $\beta_{c1} \ll \beta_{c2}$, следовательно в (2) $\varepsilon_1 \ll 1$, $\varepsilon_2 \ll 1$, что дает

$$\begin{aligned} \chi \Delta p_1 + \frac{p_2 - p_1}{\tau} &= 0, \\ \frac{\partial p_2}{\partial t} + \frac{p_2 - p_1}{\tau} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

В 1.3 рассматриваются релаксационные модели фильтрации однородных жидкостей в ТПС. Сначала приводятся некоторые известные релаксационные модели, выводятся релаксационные уравнения фильтрации в ТПС.

Для описания временно-зависимого характера фильтрационного течения, по-видимому, первая такая модель была предложена Алишаевым М.Г.[1]. В этой модели учитывается только релаксация градиента давления по отношению к скорости фильтрации

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \left(1 + \lambda_p \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla p, \quad (5)$$

где λ_p является временем релаксации градиента давления.

Затем был определен закон с двойной релаксацией [2]

$$\left(1 + \lambda_v \frac{\partial}{\partial t} \right) \vec{v} = -\frac{k}{\mu} \left(1 + \lambda_p \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla p, \quad (6)$$

где λ_v - время релаксации скорости фильтрации.

В [7] выведена система уравнений релаксационной фильтрации, что для модели (5) имеет вид

$$\left(1 + \lambda_i \frac{\partial}{\partial t} \right) \operatorname{div} \left[\frac{\rho(p_i) k_i(p_i)}{\mu(p_i)} \operatorname{grad} p_i \right] = \frac{\partial}{\partial t} [\rho(p_i) m_i(p_i)] \mp q, \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

где q может быть задано, как и в [3, 4]

$$q = \frac{\alpha\rho}{\mu}(p_2 - p_1).$$

В 1.4 изучен характер размытия скачков решений упрощенной и "усеченной" систем уравнений релаксационной фильтрации. Установлено, что скачки решений размываются в соответствии с экспоненциальным законом, определяемым как временем запаздывания, обусловленным массообменом между пористыми блоками и трещинами, и временем релаксации градиента давления в трещинах.

Общая система релаксационных уравнений фильтрации в ТПС, имеет вид:

$$\begin{cases} \chi \left(1 + \lambda_1 \frac{\partial}{\partial t} \right) \Delta p_1 = \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - \frac{p_2 - p_1}{\tau}, \\ \chi \varepsilon_2 \left(1 + \lambda_2 \frac{\partial}{\partial t} \right) \Delta p_2 = \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + \frac{p_2 - p_1}{\tau}. \end{cases} \quad (8)$$

В предположении $m_1 \ll m_2$, $k_2 \ll k_1$ из (8) можно получить «усеченную» систему

$$\begin{cases} \chi \left(1 + \lambda_1 \frac{\partial}{\partial t} \right) \Delta p_1 = \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} - \frac{p_2 - p_1}{\tau}, \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + \frac{p_2 - p_1}{\tau} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В частном случае [7] из второго уравнение (8) можно получить уравнение вида:

$$\chi \varepsilon_2 \lambda_2 \frac{\partial}{\partial t} \Delta p_2 = \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + \frac{p_2 - p_1}{\tau}. \quad (10)$$

Уравнения (9) назовем релаксационной системой уравнений Уоррена-Рутга.

Отметим также, что при условии $\beta_1^* \ll \beta_2^*$ из «усеченной» системы уравнений (9) можно получить упрощенную систему

$$\begin{cases} \chi \left(1 + \lambda_1 \frac{\partial}{\partial t} \right) \Delta p_1 + \frac{p_2 - p_1}{\tau} = 0, \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + \frac{p_2 - p_1}{\tau} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

При условиях, которые приводят к уравнению (10), второе уравнение упрощенной системы (11) также заменяется уравнением (10).

В работе показано, что в случае релаксационной фильтрации скачки p_1 и $\frac{\partial \varphi_1}{\partial t}$ для систем (9), (11) не затухают мгновенно, как это имеет место в классической модели фильтрации в ТПС [5]. Размытие скачков происходит в соответствии с экспоненциальным законом, где характерное время размытия скачков определяется временем релаксации градиента давления - λ_1 . В пористых блоках характер размытия скачков решения также

экспоненциальный. Однако, в отличие от классического случая он определяется аддитивным влиянием двух характерных времен процесса - λ_1 и τ . Масштабы затухания определяются значениями λ_1 и τ . При $\lambda_1 \gg \tau$ более длительное затухание скачков определяется значением λ_1 . Следовательно, затухание скачков, обусловленное массообменом между пористыми блоками и трещинами, завершается относительно быстро. Наиболее отличительный характер размытия скачков наблюдается в случае $\lambda_1 = \tau$. В этом случае скачки p_2 и $\frac{\partial p_2}{\partial x}$ размываются в соответствии с аддитивным сложением чисто экспоненциального и степенно-экспоненциального законов.

Таким образом, размытие скачков решений упрощенной и «усеченной» систем уравнений релаксационной фильтрации в ТПС определяется не только значением τ , но и λ_1 . В определенных ситуациях, возможно, немонотонное затухание скачков давления и его первой производной по x в пористых блоках. При этом затухание скачков будет иметь унимодальный характер, т.е. затухание происходит при наличии одного максимума.

Вторая глава посвящена исследованию гипотезы квазистационарности при моделировании фильтрации жидкости в ТПС. Обсуждены вопросы построения макроскопических моделей фильтрации исходя из микроскопического описания течения жидкости в пористой среде. Анализированы некоторые методы решения задач, таких как операционный метод, приближенный метод, и численные методы. Далее приведены конкретные задачи для проверки гипотезы квазистационарности на примере плоскопараллельного и плоскорадиального случаев, разработаны алгоритмы и программы для решения уравнений фильтрации. В обоих случаях рассмотрены также упрощенные и «усеченные» системы уравнений фильтрации однородных жидкостей в ТПС.

В 2.1 излагаются макроскопические модели фильтрации жидкости в ТПС. Для построения этой модели в отличие от феноменологического подхода, макроскопическое поведение выводится исходя из физического поведения системы в микроскопическом масштабе. Здесь исследуются два случая, т.е. поток газа через абсолютно твердую пористую среду и фильтрация жидкости через деформируемые пористые блоки. В обоих случаях показано, что отношение между характерными масштабами пористых блоков и трещин играет существенную роль.

В 2.2 рассматриваются некоторые известные методы, широко использованные при решении типовых задач фильтрации в ТПС. Сначала даётся операционный метод, который был использован в работе [3,4] для решения феноменологических уравнений фильтрации в ТПС. Далее приведены приближенные методы решения задач фильтрации в ТПС. Применение приближенных методов решения нестационарных задач в большинстве случаев позволяет получить весьма простые расчетные формулы. Затем приводится решение задач релаксационной фильтрации в ТПС численным методом.

В 2.3 приведены конкретные задачи и анализ гипотезы квазистационарности в плоскопараллельном случае, разработаны численный алгоритм и соответствующая программа для решения уравнений фильтрации. С учетом нестационарной поправки [9] модифицирована система уравнений фильтрации жидкости в ТПС [3, 4]. Затем рассмотрены задачи оценки решений общей, упрощенной и "усеченной" систем уравнений фильтрации однородных жидкостей в ТПС. Результаты расчетов при различных значениях характерного времени поправки θ и времени запаздывания τ представлены в графическом виде. Установлено влияние τ и θ в определенном диапазоне текущего времени.

Чтобы получить хорошее соответствие феноменологической и макроскопических моделей в [9], предложено модифицировать массообменный член в феноменологической модели, что здесь мы используем в следующем виде

$$q = \alpha \frac{\rho}{\mu} \left(p_2 - p_1 - \theta \frac{\partial p_1}{\partial t} \right), \quad (12)$$

где α - безразмерный параметр, зависящий от геометрических характеристик пористых блоков, ρ - плотность жидкости, μ - вязкость жидкости, p_1 - давление в трещинах, p_2 - давление в пористых блоках, θ - постоянный коэффициент. Видно, что в (12) поток q является не квазистационарным как в [3, 4], а нестационарным.

Если принимать во внимание (12), то уравнения фильтрации однородных жидкостей в ТПС [3, 4] принимают вид

$$\begin{cases} \chi \Delta p_1 = \left(\varepsilon_1 + \frac{\theta}{\tau} \right) \frac{\partial p_1}{\partial t} - \frac{p_2 - p_1}{\tau}, \\ \chi \varepsilon_2 \Delta p_2 = \frac{\partial p_2}{\partial t} + \left(p_2 - p_1 - \theta \frac{\partial p_1}{\partial t} \right) / \tau. \end{cases} \quad (13)$$

Нетрудно видеть, что система уравнений (13) при $\theta = 0$ переходит известным уравнениям фильтрации [3, 4].

С целью оценки поправки в массообменный поток [9] необходимо анализировать решение (13) на примере конкретных задач и сравнить его с решением классических уравнений Г.И.Баренблатта и др. [3, 4]. Заметим, что поправка в (12) предложена в [9] для модели Уоррена-Рутта [10]. Однако, здесь эту поправку используем для полной системы уравнений Г.И.Баренблатта и др. [3, 4]. С целью оценки влияния θ на различные фильтрационные характеристики система (13) численно решена в плоском случае.

Результаты расчетов показывают, что в области малых времен влияние θ на профили p_1 и p_2 существенно, что говорит о важности учета нестационарности массообменного потока. Интересным является еще тот факт, что при увеличении значений θ начиная с определенных величин модель (13) дает не правдоподобные результаты. Этот диапазон величин θ расчетным путем определен как $\theta < \tau$. По-видимому, нестационарный переходной

процесс, вводимый в (12) как поправочный член, не должен быть более влиятельным, чем нестационарность, обусловленная массообменом между пористыми блоками и системой трещин. Во всех случаях снижение p_1 опережает снижение p_2 , что было как в классическом случае [3, 4], так и для релаксационной системы уравнений фильтрации в ТПС. Приведены некоторые графики изменения

$$\delta p_1 = \left| p_1 \Big|_{\theta \neq 0} - p_1 \Big|_{\theta=0} \right|, \quad \delta p_2 = \left| p_2 \Big|_{\theta \neq 0} - p_2 \Big|_{\theta=0} \right|,$$

а также относительного массообменного потока

$$Q = \left(p_2 - p_1 - \theta \frac{\partial p_1}{\partial t} \right) / \tau$$

для различных θ , τ и t . Результаты показывают, что с ростом θ значения Q при одних и тех же t уменьшаются, что говорит об уменьшении массообменного потока из пористых блоков в систему трещин. Это соответствует более контрастным значениям коллекторских свойств системы трещин и пористых блоков. С увеличением t максимальные значения Q уменьшаются, но можно наблюдать продвижение профилей Q в глубь пласта, что полностью соответствует основным гипотетическим предположениям модели [3, 4]. Таким образом, можно сделать вывод, что нестационарность массообмена между пористыми блоками и системой трещин, предложенная как поправка к феноменологическим уравнениям фильтрации в [9], может сыграть значительную роль в определенном диапазоне времен. Большие поправки приводят к ситуации, когда уравнения дают не правдоподобные решения.

В 2.4 рассматривается вышеприведенная задача в плоскорадиальном случае. Задача решается аналогичным методом и в целом качественно подтверждается результаты, которые получены в параграфе 2.3, отмечены некоторые характерные особенности, связанные с плоскорадиальностью задачи. Результаты показывают, что как и в случае плоскопараллельного потока нестационарность массообмена между пористыми блоками и системой трещин, предложенная как поправка к феноменологическим уравнениям фильтрации в [9], может сыграть значительную роль в определенном диапазоне времен. Этот диапазон определяется характерным временем нестационарного переходного процесса и как правило, включает начальный этап процесса. Большие поправки приводят к ситуации, когда уравнения дают не правдоподобные решения. В отличие от плоскопараллельного случая, в данном случае зона изменения давления и других параметров фильтрации, т.е. возмущенная зона распространяется относительно на небольшие расстояния.

В третьей главе рассматривается гипотеза квазистационарности для задач фильтрации жидкости в ТПС с определенной конфигурацией.

В 3.1 изложены модели с типовыми блоками. Принцип построения такой модели [6] обеспечивает ее единообразие для гетерогенных сред с различной структурой [4] и при произвольных значениях, входящих в уравнения фильтрации в качестве коэффициентов. Эти модели используются для

количественной оценки массообменного потока в средах с определенной геометрией трещин и пористых блоков, составляющих ТПС.

В 3.2 выводятся уравнения фильтрации жидкости для одиночной трещины и сопряженного одиночного пористого блока. При выводе уравнения фильтрации были использованы два подхода: 1) использование уравнения пьезопроводности в средах, 2) использование уравнения неразрывности в трещине с гипотетической оценкой перетока массы из пористого блока в трещину (или наоборот). Показывается эквивалентность двух подходов.

В 3.3 решается конкретная задача для выведенных в 3.2 уравнений.

Рассмотрим среду, состоящую из одиночной трещины и примыкающего к ней пористого блока (Рис.1.)

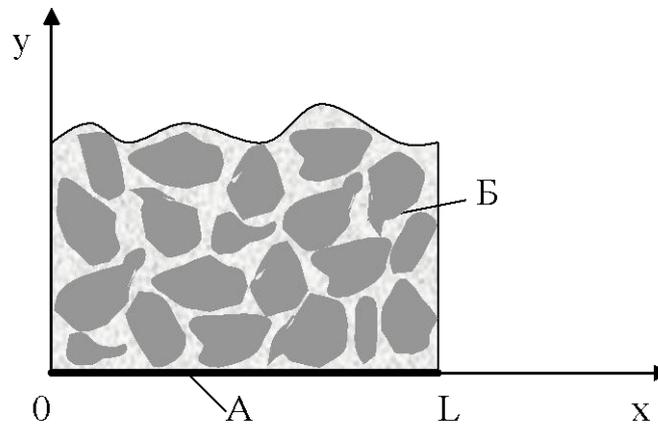


Рис. 1. Схема элемента ТПС с одиночной трещиной и пористым блоком. А – трещина, Б – пористый блок.

Трещина моделируется как одномерный объект, на рисунке 1 расположена на отрезке $[0, L]$ оси Ox . Примыкающий пористый блок является полубесконечным, что на рисунке 1 отражен как полуполоса. Предположим, что в трещине движение жидкости происходит по оси Ox , а в пористом блоке в направлении оси Oy . Между трещиной и пористым блоком происходит массообмен, что считается пропорциональным градиенту давления на $y=0$. Считаем, что фильтрация жидкости происходит в упругом режиме, что позволяет использовать уравнения пьезопроводности в обеих средах в формах, выведенных в 3.2

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = \chi_1 \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} + \eta \left(\frac{\partial p_2}{\partial y} \right)_{y=0}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial t} = \chi_2 \frac{\partial^2 p_2}{\partial y^2},$$

где p_1 и p_2 - соответственно давление по трещинам и блокам, χ_1 , χ_2 - коэффициенты пьезопроводности, η - коэффициент массообменного переноса.

Пусть в точке $x=0$ в трещину закачивается (или отбирается) жидкость с некоторым постоянным относительным расходом \bar{Q} . В трещине и пористом блоке первоначально было постоянное давление p_0 . На конце трещины $x=L$ поддерживается первоначальное постоянное давление. При такой постановке задачи начальные и граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} p_1(0, x) &= p_0, & p_2(0, x, y) &= p_0, \\ \left. \frac{\partial p_1}{\partial x} \right|_{x=0} &= \bar{Q}_1, & p_1(x, y) \Big|_{x=L} &= p_0, \\ p_2(t, x, 0) &= p_1(t, x), & p_2(t, x, \infty) &= p_0. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь, как и в предыдущей главе, система уравнений решается методом конечных разностей. Произведены численные расчеты при следующих исходных данных: $k_1=10^{-12} \text{ м}^2$, $k_2=10^{-14} \text{ м}^2$, $\beta_{ж}=2,2 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$, $\beta_{c1}=2,5 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$, $\beta_{c2}=1,6 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$, $\mu=10^{-8} \text{ МПа} \cdot \text{с}$, $\bar{Q}_1=0,2 \text{ МПа/м}$, $L=6 \text{ м}$, $p_0=10 \text{ МПа}$.

Приведены результаты расчетов для поля давления и массообмена между одиночной трещиной и сопряженным одиночным пористым блоком при различных значениях времени.

На рис.2 представлены графики проекции на плоскости OXY уровня давления $p_2=9,7 \text{ МПа}$ для различных t . Видно, что поле давления распространяется вглубь пористого блока. При малых временах темп изменения давления высок. На рис.3 показана зависимость относительного

масообмена $q = \eta \left. \frac{\partial p_2}{\partial x} \right|_{y=0}$ от расстояния x на границе сред, т.е. на $y=0$.

Заметим, что с увеличением времени массообмен во всех точках x уменьшается. Как и в поле давления, при малых временах темп изменения q высок.

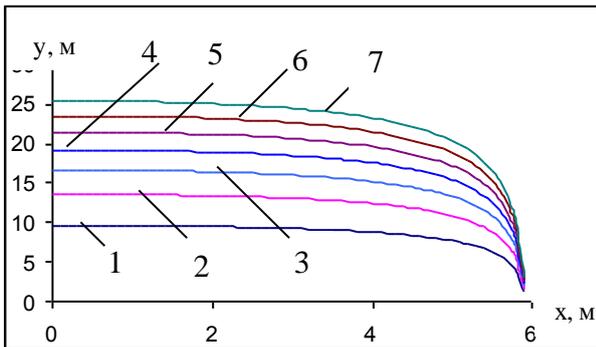


Рис.2. Уровни давления $p_2=9,7 \text{ МПа}$ при $t=500(1), 1000(2), 1500(3), 2000(4), 2500(5), 3000(6), 3500(7) \text{ с}$, $\chi_2 = 2,13 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$

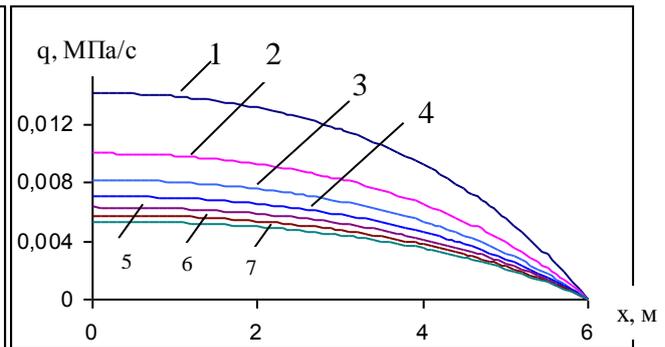


Рис.3. Профили q на $y=0$ при $t=500(1), 1000(2), 1500(3), 2000(4), 2500(5), 3000(6), 3500(7) \text{ с}$, $\chi_2 = 2,13 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$

Результаты показывают, что нестационарность массообмена между пористыми блоками и системой трещин играет значительную роль в малом диапазоне времени, что по сути дела означает нарушение допущений квазистационарного подхода. Следовательно, в этом диапазоне времени

следует использовать нестационарную поправку [9] на массообменный поток.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Определен характер размытия скачков решений упрощенной и «усеченной» систем уравнений релаксационной фильтрации в ТПС. Установлено, что скачки решений в отличие от классического случая (мгновенно для трещин и экспоненциально для пористых блоков) размываются везде экспоненциально. Причем характер размытия скачков давления и его первой производной по пространственной переменной в трещинах определяется только временем релаксации давления в трещинах. Характер размытия скачков давления в пористых блоках также является экспоненциальным, однако интенсивность размытия определяется не только временем релаксации давления в трещинах, но и временем запаздывания, обусловленным массообменом между трещинами и пористыми блоками. Выделен случай, когда размытие скачков и его первой производной по пространственной переменной в пористых блоках может иметь унимодальный характер, т.е. динамику с одним максимумом. Дана формула, определяющая время наступления этого максимума.

2. Модифицирована система уравнений фильтрации однородных жидкостей в ТПС, учитывающая нестационарную поправку в массообменный член.

3. Влияние неквазистационарного подхода оценено на основе численного решения плоскопараллельных и плоскорадиальных задач фильтрации. Установлено, что влияние нестационарной поправки в массообменный поток существенно в области малых времен, диапазон которых определяется временем запаздывания системы и характерным временем нестационарной поправки. На основе численных расчетов решений установлено, что система уравнения фильтрации в ТПС с нестационарной поправкой корректно работает в диапазоне характерного времени поправки, не превышающем времени запаздывания, обусловленным массообменом между трещиной и пористыми блоками. Относительный массообмен между пористыми блоками и трещинами уменьшается с увеличением характерного времени нестационарной поправки при неизменных других параметрах задач. С увеличением времени максимальное значение относительного массообмена уменьшается, и наблюдаются продвижения его профилей в глубь пласта.

4. Показано, что подходы, основанные на модели с типовыми блоками, могут быть использованы для количественной оценки массообменного потока в средах с определенной геометрией трещин и пористых блоков, составляющих ТПС.

5. Для оценки характера массообмена рассмотрена задача фильтрации в среде, состоящая из одиночной трещины и примыкающего к ней пористого блока. Выведены уравнения фильтрации в этих средах путем использования двух подходов: 1) с использованием уравнения пьезопроводности в средах; 2)

путем использования уравнения неразрывности в трещине с гипотетической оценкой перетока массы из пористого блока в трещины. Установлена эквивалентность этих подходов. Исходя из этого, предпочтение отдано первому подходу, не использующему гипотетические предположения.

6. С целью оценки справедливости квазистационарного подхода решена задача фильтрации жидкости в среде, состоящей из одиночной трещины и примыкающего к ней пористого блока. Численные расчеты показывают, что нестационарность массообмена между пористыми блоками и системой трещин играет значительную роль в малом диапазоне времени, что по сути дела означает нарушение допущений квазистационарного подхода. Следовательно, в этом диапазоне времени необходимо использовать нестационарную поправку на массообменный поток.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Хужаёров Б.Х., Бобокулов Е.О., Худоёров Ш.Ж. Релаксационная фильтрация однородных жидкостей в трещиновато-пористых средах //Инж.-физ.журнал. 2001.Том 74, №5. С. 17-23. (Перевод: Relaxation filtration of homogeneous fluids in cracked-porous media// Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol.74, No. 5, 2001, P. 1073-1082).
2. Хужаёров Б.Х., Бобокулов Е.О., Худоёров Ш.Ж. Влияние релаксационных параметров на фильтрацию высоковязких жидкостей в трещиновато-пористых средах// «Механиканинг хозирги замон муаммолари». Республика илмий-техникавий конференцияси. Тошкент-Самарканд. 29-31.10.01. Маърузалар ва тезислар туплами. Тошкент. 2001. С. 163.
3. Ирматов Э.К., Хужаёров Б.Х., Худоёров Ш.Ж., Закиров А.А. Определение параметров трещиновато-пористых пластов с учетом сжимаемости скелета породы и жидкости // Узбекский журнал «Нефть и газ». Ташкент. 2002. №4. С.20-23.
4. Хужаёров Б.Х., Худоёров Ш.Ж. О проверке гипотезы квазистационарности при моделировании массопереноса в трещиновато-пористых средах// В сб. «Математическое моделирование и вычислительный эксперимент». Респ. Научная конференция. 25-27. 03.02. Сб. тезисов. Ташкент. 2002. С. 115-116.
5. Хужаёров Б.Х., Худоёров Ш.Ж. О проверке гипотезы квазистационарности при моделировании массопереноса в трещиновато-пористых средах // Узбекский журнал "Проблемы механики". 2003. №2. С.44-47.
6. Хужаёров Б.Х., Худоёров Ш.Ж. О неквазистационарном подходе при моделировании массопереноса в трещиновато-пористых средах// «УзР жанубий минтакасида ишлаб чикаришни механика фани ютуқлари ва таълим билан узаро интеграллашувининг холати ва истикболлари». Академик Х.А.Рахматулин хотирасига бағишланган Республика илмий-амалий ва услубий конференцияси материаллари туплами. Карши. 2-3.05.2003 й. I жилд. 37-40 бет.

7. Хужаёров Б.Х., Худоёров Ш.Ж. Оценка внутреннего массообмена в трещиновато-пористых средах // Труды КНИИРП Сам. отд. АН РУз. Вып.2. Самарканд, 2003. С.73-77.
8. Хужаёров Б.Х., Худоёров Ш.Ж. Оценка внутреннего массообмена при фильтрации нефти в трещиновато-пористых средах// "Пути повышения эффективности разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений Узбекистана". Сб.тезисов Республиканская научно-техническая конференция. 17-18 сентября. Ташкент. 2003. С.43-45
9. Худоёров Ш.Ж. Модельный подход к оценке внутреннего массообмена жидкости в трещиновато-пористых средах// «Механика муаммолари ва иншоотлар сейсמודинамикаси». Халқаро илмий конференция материаллари. 27-28 май. Тошкент. 2004 йил. 445-446 бет.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алишаев М.Г. О нестационарной фильтрации с релаксацией давления// Тр. Моск. обл. пед. ин-та. «Гидромеханика». М.1974, вып. III. С.166-177.
2. Алишаев М.Г., Мирзаджанзаде А.Х. К учету явлений запаздывания в теории фильтрации// Изв. Вузов. Нефть и газ. 1975. №6. С.71-74.
3. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах //ДАН СССР. 1960. Т.132, №3. С. 545-548.
4. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиновато-пористых средах //ПММ. 1960. Т.24, Вып. 5. С. 852-864.
5. Баренблатт Г.И. О некоторых краевых задачах для уравнений фильтрации жидкости в трещиноватых породах //ПММ. 1963. Т.27, Вып. 2. С. 348-350.
6. Волков И.А. К вопросу об упругом режиме фильтрации в трещиновато - пористой среде. Сб. "Исследования по матем. и эксперим. физ. и механ.". М.-Л., "Недра", 1965, С. 7-11.
7. Хужаёров Б.Х. Уравнения фильтрации релаксирующих жидкостей в трещиновато-пористых средах //ДАН РУз. 1995. № 7-8. С. 13-16.
8. De Swaan A.O., Analytical solution for determining naturally fractured reservoir parameters by well testing. SPEJ. 1976. P.117-122.
9. Royer P., Auriault J.-L., Boutin C. Macroscopic modeling of double-porosity reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. 1996.16. 187-202.
10. Warren J.R. and Root P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs //Soc. Pertol. Eng. J. 1963. Sept., 245-255.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю профессору Б.Хужаёрову за руководство и помощь, оказанные при выполнении работы.

Соискатель:

Худоёров Ш.Ж.

РЕЗЮМЕ

диссертации Худоёрова Ш.Ж. на тему «**Анализ квазистационарного подхода при фильтрации однородных жидкостей в трещиновато-пористых средах**» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Ключевые слова: проницаемость, пористость, трещиновато-пористая среда, фильтрация жидкости, вязкость, массообменный поток, пьезопроводность.

Объекты исследования: пласты, насыщенные однородной жидкостью с трещиновато-пористыми коллекторами.

Цель работы: анализ квазистационарного подхода при моделировании процессов фильтрации жидкости в ТПС, а также оценка некоторых нестационарных подходов, предложенных как обобщение классических моделей.

Методы исследования: составление уравнений фильтрации в ТПС на основе фундаментальных принципов механики (законы сохранения), а также феноменологических подходов, широко используемых в подземной гидрогазомеханике. Численное решение задач с обоснованием устойчивости и сходимости метода, физическая интерпретация результатов и их сравнение с существующими данными.

Полученные результаты и их новизна: в работе исследован характер распространения скачков решений упрощенных и «усеченных» систем уравнений релаксационной фильтрации в ТПС. С учетом нестационарной поправки в массообменный поток из пористых блоков в трещины выведена система уравнений фильтрации однородных жидкостей в ТПС. Оценены диапазоны работы этих уравнений относительно характерного времени нестационарной поправки в массообменный поток. Для исследования динамики массообменного потока выведены уравнения фильтрации в средах, включающих элемент ТПС с отдельной трещиной и сопряженным пористым блоком. Полученные результаты позволяют в некоторой степени определить механизм массообменного процесса в ТПС и оценить справедливость классического квазистационарного подхода. Результаты работы позволяют также сделать важные выводы относительно динамики массообменного потока и справедливости квазистационарного подхода.

Практическая значимость работы: полученные результаты могут интерпретировать процессы движения нефти, газа, воды и конденсата в нефтегазоконденсатном месторождении, с трещиновато пористыми коллекторами.

Степень внедрения и экономическая эффективность: работа носит теоретический характер, полученные результаты позволяют более глубоко понимать механизмы фильтрации жидкостей в ТПС.

Область применения: результаты работы могут быть использованы при гидродинамическом исследовании нефтяных пластов с трещиновато-пористыми коллекторами, при добыче нефти и газа.

Физика-математика фанлари номзоди илмий даражасига талабгор Ш.Ж.Худоёровнинг 01.02.05 – «Сую=лик, газ ва плазма механикаси» ихтисослиги буйича «Ёри=-\овак муцитларда биржинсли сую=ликларнинг сизишида квазистационар ёндошувни тащлил =илиш» мавзусидаги диссертациясининг
+ИС+АЧА МАЗМУНИ

Калит сызлар: ытказувчанлик, \оваклик, ёри=-\овак муцит, сую=ликларнинг сизиши, =овуш=о=лик, массаалмашинув о=ими, босим ытказувчанлик.

Тад=и=от объектлари: биржинсли сую=лик билан туйинтирилган ёри=-\овак коллекторли =атламлар.

Ишнинг ма=сади: сую=ликларнинг ёри=-\овак муцитларда сизишини моделлаштиришда квазистационар ёндошувни тащлил этиш ва шу билан биргаликда моделларнинг умумлашмаси сифатида таклиф этилган бир нечта ностационар ёндошувларни бащолаш.

Тад=и=отнинг усуллари: механиканинг фундаментал принциплари (масса са=ланиш =онуни) ва ер ости гидрогазомеханикасида кенг =ылланиладиган феноменологик ёндошувлар асосида ёри=-\овак муцитларда сизиш тенгламаларини келтириб чи=ариш. Ечим тур\унлиги ва я=инлашувчилигини асослаган щолда масалани сонли ечиш, натижаларни физик томонини изошлаш ва мавжуд маълумотлар билан солиштириш.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: ишда ёри=-\овак муцитларда содаллаштирилган ва кесилган релаксацион сизиш тенгламалар системаси ечими узилишларининг тар=алиш =онунияти тад=и= =илинган. Ёри=-\овак муцитларда биржинсли сую=ликларнинг сизиш тенгламалар системаси масса алмашинув о=имида ностационар тузатма киритилган щолда келтириб чи=арилган. Бу тенгламаларнинг ишлаш диапозони масса алмашинув о=имидаги ностационар тузатманинг тавсифий ва=т параметрига бо\ли= щолда бащоланган. Масса алмашинув о=ими динамикасини ырганиш учун ёри=-\овак муцитда алощиди ёри=дан ва унга бириктирилган \овакдан иборат муцитларда сизиш тенгламалари келтириб чи=арилган ва улар сонли ечилган.

Ишнинг амалий ащамияти: олинган натижалар ёри=-\овак коллекторли нефтгазконденсатли конларда нефт, газ, сув ва конденсат щаракати жараёнларини ырганишда ва тавсиф этишда =ылланилиши мумкин.

Татби= этиш даражаси ва и=тисодий самарадорлиги: иш назарий характерга эга былиб, олинган натижалар ёри=-\овак муцитларда сую=ликларнинг сизиш жараёнлари механизмини чу=уррок тушунишга ёрдам беради.

+ылланиш сощаси: ишнинг натижаларидан ёри=-\овак коллекторли =атламларни гидродинамик тад=и= =илишда, нефть ва газ =азиб олиш жараёнларини тащлил =илишда фойдаланиш мумкин.

SUMMARY

thesis by Sh.Zh.Khudoyorov on the academic degree competition of the candidate of physics-mathematics sciences, speciality – 01.02.05 –

«Mechanics of Fluid, Gas and Plasma», subject “**Analysis the quasi-steady approach at the filtration of homogeneous liquids in fractured porous media**”

Key words: permeability, porosity, fractured porous media, filtration of liquids, viscosity, mass-exchange flow, pressureconductivity.

Subject of investigations: fractured porous media, saturated by homogeneous liquid.

Aim of investigations: arguing the quasi-steady approach at the modeling of liquids filtration processes in fractured porous media (FPM), estimation some non-steady approaches.

Methods of investigations: to set filtration equations of homogeneous liquids in FPM by using basic principles of mechanics (balance laws) as well as phenomenological approaches, widely using in subterrian hydro-gas-mechanics, numerical solving of these equations by checking stability and convergence of methods, physical interpretation of results and its comparison with existing results.

Results achieved and their novelty: in the work a character of the solutions jumps spreading is firstly investigated for the “truncated” and simplified systems of filtration equations in FPM. With accounting the non-steady correction in the mass-exchange flow from porous blocks into fractures a system of filtration equations of homogeneous liquids in FPM is derived. Ranges of correct works of these equations with respect the characteristic time of the non-steady correction are estimated. To investigate a dynamics of the mass-exchange flow equations of filtration in an element consisting of an fracture and a surrounding porous block were derived. The results of the work allow us in some sense to determine a mechanism of the mass-exchange process in FPM and to estimate the ability of the classic quasi-steady approach. The results of the work allow us also to make important conclusions about dynamics of mass-exchange flow and ability of quasi-steady approach.

Practical value: results achieved can interpret oil, gas, water and condensate flows in oil-gas-condensate reservoirs.

Degree of embed and economic effectively: the work has an theoretical character, achieved results allow us to make a more deep insight into the mechanism of liquids in FPM.

Fields of application: results of the work can be used at hydrodynamical test of fractured porous oil reservoirs, at oil and gas recovery processes.

