На правах рукописи

Иванов Гаврил Иванович

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПЛАСТА-КОЛЛЕКТОРА С ВМЕЩАЮЩИМИ ПОРОДАМИ НА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Якутск 2015

Работа выполнена на кафедре высшей математики Института математики и информатики Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Бондарев Эдуард Антонович**.

Официальные оппоненты: **Пеньковский Валентин Иванович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск;

Протодьяконова Надежда Анатольевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск.

Ведущая организация: Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск.

Защита состоится 05 февраля 2016 г. в 15^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 212.306.04 при Северо-Восточном федеральном университете имени М. К. Аммосова, расположенного по адресу: 677000, г. Якутск, ул. Белинского 58, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова, 677000, г. Якутск, ул. Белинского 58 и на сайте *www.s-vfu.ru* по ссылке *http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/otdel-dissertatsionnykh-sovetov/disser_soiskateli/*

Автореферат разослан «____» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н. Н. А. Саввинова

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. В настоящее время большинство прикладных задач теории фильтрации природного газа рассматривается при следующих основных допущениях: природный газ считается совершенным (идеальным), процесс фильтрации является изотермическим. В то же время, за последние два десятилетия была выполнена серия исследований, в которых была выведена полная система уравнений неизотермической фильтрации реального газа, дана оценка влияния неизотермичности на динамику поля давления при различных режимах добычи газа и дана оценка вклада различных компонентов уравнения энергии в общий энергетический баланс газоносного пласта. Эти исследования дополнялись разработкой эффективных вычислительных алгоритмов решения соответствующих начально-краевых задач.

Однако, практически все задачи неизотермической фильтрации реального газа рассматривалась в рамках математической модели теплоизолированного пласта. Такое предположение существенно ограничивает возможности изучения процессов добычи природного газа из глубоко залегающих пластов, которые характеризуются, во-первых, малой проницаемостью и, следовательно, необходимостью добывать газ при больших депрессиях. Во-вторых, вмещающие газоносные пласты горные породы имеют большую плотность и, следовательно, большую теплопроводность. Таким образом, актуальной становится задача обобщения математической модели неизотермической фильтрации реального газа на случай теплообмена газоносного пласта с окружающими его горными породами и определения его роли при различных режимах фильтрации.

Цель работы: в вычислительном эксперименте изучить влияние теплообмена пласта-коллектора с вмещающими горными породами на динамику полей температуры и давления при различных технологических режимах добычи реального газа и при различных фильтрационных, емкостных и теплофизических характеристиках (проницаемость, пористость, мощность пласта-коллектора, теплопроводность вмещающих пород).

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

- Выбрать математическую модель и разработать алгоритм численного решения сопряженной задачи определения температуры и давления газоносного пласта с учетом теплообмена через его кровлю и подошву при отборе и нагнетании реального газа через одиночную скважину (обобщение модельной задачи теории фильтрации).
- Провести вычислительный эксперимент для изучения влияния параметров математической модели и технологических режимов отбора газа (постоян-

ное забойное давление, постоянный массовый расход) на динамику полей температуры и давления.

- В терминах входных параметров математической модели дать количественную и качественную оценку роли теплообмена пласта-коллектора с вмещающими породами на неизотермическое течение реального газа.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. На основе математической модели неизотермической фильтрации реального газа с использованием конечно-разностных методов и разработки программного обеспечения проведено численное моделирование влияния теплообмена пласта-коллектора с вмещающими породами на динамику полей давления и температуры.
2. По результатам вычислительного эксперимента установлено:

- Влияние теплообмена с вмещающими горными породами на температурное поле газоносного пласта локализовано в узкой зоне вблизи кровли и подошвы, причем со временем размер этой зоны увеличивается. В режиме отбора газа оно наиболее ощутимо вблизи скважины, причем этот эффект наиболее заметен для низкопроницаемых пластов. Этот результат имеет важное практическое значение, так как такие пласты расположены на больших глубинах и, следовательно, будут иметь большие величины давления и температуры. Именно в этом случае использование приближения идеального газа приведет к значительным ошибкам в расчетах.
- При нагнетании газа с постоянной температурой, равной начальной пластовой, ее изменение во времени носит немонотонный характер, что объясняется преобладанием различных механизмов теплообмена (дросселирование, адиабатическое расширение, конвекция, теплопроводность) на различных стадиях процесса. Влияние рассматриваемого теплообмена на температуру пласта возрастает по мере удаления от точки нагнетания.

Практическая значимость диссертации заключается в расширении возможностей проектирования разработки газовых месторождений, расположенных на больших глубинах, следствием чего является низкая проницаемость продуктивных горизонтов. Предложенные в диссертации вычислительные алгоритмы можно использовать для предварительной оценки составляемых рабочих проектов.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- соответствием математической модели исследуемых процессов основным положениям теории фильтрации и термодинамики, а также – использованием современных достижений прикладной математики при создании вычислительных алгоритмов и реализующих их программ;

- отсутствием принципиально важных упрощающих допущений, которые могли бы повлиять на достоверность выводов или снизить точность выполненных расчетов;
- качественным соответствием полученных результатов имеющимся физическим представлениям о характере изучаемых процессов.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены на Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование развития Северных территорий РФ» (Якутск, 2008); III Всероссийской научной конференции «Информационные технологии в науке, образовании и экономике» (Якутск, 2008); II Всероссийской научной конференции и VII Всероссийском школе-семинаре «Математическое моделирование развития Северных территорий РФ» (Якутск, 2009); XIV научной конференции «Лаврентьевские чтения» (Якутск, 2010); VI Международной конференции по математическому моделированию (Якутск, 2011); III Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование развития Северных территорий РФ» (Якутск, 2012); «Аспирантских чтениях СВФУ» (Якутск, 2012); IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Информационные технологии в науке, образовании, экономике» (Якутск, 2012); Научном семинаре научно-исследовательской кафедры Вычислительные технологии ИМИ СВФУ (Якутск, 2014); VII Международной конференции по математическому моделированию (Якутск, 2014).

Публикации. Основное содержание и результаты диссертации отражены в 11 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, в котором содержатся основные выводы, списка литературы (88 наименований), 88 рисунков. Общий объем диссертации 91 страница.

Автор считает необходимым выразить глубокую признательность и искреннюю благодарность ведущему научному сотруднику ИПНГ СО РАН, к.ф.-м.н. Игорю Ивановичу Рожину за ценные консультации, сотрудникам кафедры высшей математики СВФУ им. М.К. Аммосова за постоянную поддержку.

Содержание работы

Во введении приводится краткое содержание диссертации, обсуждаются актуальность темы, цели исследований, основные научные и практические результаты работы, приводятся сведения о научной деятельности соискателя.

Первая глава посвящена анализу научных публикаций по теме диссертационной работы. В первом параграфе приведен обзор исследований по математическому моделированию течения газа в пористой среде, дается вывод уравнений неизотермической фильтрации реального газа. Начало развития теории

фильтрации газа связано с работами Л. С. Лейбензона, в которых уравнение движения несжимаемой жидкости в пористой среде обобщается на течение газа. Последующие исследования принадлежат Г. И. Баренблатту, Д. Бленду, Э. А. Бондареву, В. М. Ентову, Б. Б. Лапуку, Р. И. Нигматулину, В. Н. Николаевскому, Л. И. Рубинштейну, И. А. Чарному, Э. Б. Чекалюку и др. Численным методам решения задач фильтрации газа посвящены работы Х. Азиза, Дж. Брюса, В. И. Васильева, Г. Г. Вахитова, А. Ф. Воеводина, А. Н. Коновалова, М. И. Максимова, Н. Н. Павлова, А. А. Самарского, В. А. Чугунова и др.

Во втором параграфе анализируются научные публикации, посвященные математическому моделированию температурного поля пласта с учетом теплообмена с вмещающими породами, а также – немногочисленные результаты анализа этого процесса, полученные методами вычислительного эксперимента. Первые работы в этом направлении связаны с исследованиями Н. А. Авдонина Х. А. Ловерье, Г. Е. Малофеева, Б. Я. Мартузана, Л. И. Рубинштейна, Э. Б. Чекалюка, и др. В этих и последующих работах рассматривалась фильтрация несжимаемой жидкости при ряде других предположений. Здесь особо следует отметить монографию Л.И. Рубинштейна, в которой систематизированы основные математические модели (они и названы схемами) фильтрации несжимаемой жидкости при теплообмене продуктивного пласта с окружающими породами. Проблема учета теплообмена пласта с окружающей средой при фильтрации газа рассмотрена, по-видимому, лишь в одной работе – в монографии В. И. Васильева с соавторами.

Во второй главе детально описывается математическая модель отбора газа через одиночную скважину при теплообмене пласта-коллектора с вмещающими породами через кровлю и подошву. Ее существенное отличие от схем Л.И. Рубинштейна заключается в том, что здесь поля температуры и давления существенно связаны, тогда как при нагнетании несжимаемой жидкости они определяются независимо. Более того, поле давления фактически задается через задание скорости фильтрации.

Первый параграф посвящен решению этой модельной задачи теории фильтрации с целью определить влияние интенсивности теплообмена с вмещающими породами на динамику полей температуры и давления. Расчеты выполнялись при следующих предположениях, обусловленных технологией процесса: теплопроводность пласта в направлении его простирания пренебрежимо мала по сравнению с конвективным теплопереносом (интенсивное нагнетание); давление не зависит от вертикальной координаты, т.к. скважина вскрывает всю мощность газоносного пласта, а его кровля и подошва непроницаемы для газа. В этом случае математическая формулировка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{t}}\left(\frac{\bar{p}}{Z\bar{T}}\right)=\frac{1}{\bar{r}}\frac{\partial}{\partial \bar{r}}\left(\bar{r}\frac{\bar{p}}{Z\bar{T}}\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}}\right), \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}}=\delta\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{z}^2}+\left(1+\frac{\bar{T}}{Z}\frac{\partial Z}{\partial \bar{T}}\right)\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{t}}+\frac{c_{\text{р}}}{R}\frac{\bar{p}}{Z\bar{T}}\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}}\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}}-\frac{\bar{T}}{Z}\frac{\partial Z}{\partial \bar{T}}\left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}}\right)^2, \tag{2}$$

$$\bar{r}_{\text{w}}<\bar{r}<\bar{r}_{\text{k}},\ 0<\bar{z}<\bar{h}/2,\ \bar{t}>0,$$

где $\bar{p}=\frac{p}{p_0},\ \bar{T}=\frac{c_{\text{г}}T}{mp_0},\ \bar{r}=\frac{r}{l},\ \bar{z}=\frac{z}{l},\ \bar{t}=\frac{\kappa_{\text{р}}t}{l^2},\ \delta=\frac{\kappa}{\kappa_{\text{р}}},\ \kappa=\frac{\lambda_{\text{г}}}{c_{\text{г}}},\ \kappa_{\text{р}}=\frac{kp_0}{m\mu}$. В дальнейшем черта над безразмерными координатами опускается.

Здесь приняты обозначения: $c_{\text{р}}$ – удельная теплоемкость газа, h – мощность пласта, k – коэффициент проницаемости пласта, l – характерный размер, m – пористость, p – давление, R – газовая постоянная, r – радиальная координата, T – температура, t – время, Z – коэффициент несовершенства газа, z – координата по высоте; κ, $\kappa_{\text{р}}$, $c_{\text{г}}$, $\lambda_{\text{г}}$ – температуропроводность, пьезопроводность, объемная теплоемкость и теплопроводность насыщенного газом пласта, соответственно, μ – динамическая вязкость газа; нижние индексы означают: 0 – начальное состояние, k – на контуре питания, w – на стенке скважины.

Краевые условия соответствовали отбору газа с постоянным забойным давлением при непроницаемой и теплоизолированной внешней границе пласта; теплообмен через кровлю и подошву происходит с одинаковой интенсивностью по закону Ньютона, что позволяет использовать условие симметрии; начальные условия соответствуют постоянным значениям температуры и давления газа:

$$p=p_{\text{w}},\ r=r_{\text{w}}; \tag{3}$$

$$\frac{\partial p}{\partial r}=0,\ \frac{\partial T}{\partial r}=0,\ r=r_{\text{k}}; \tag{4}$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}=\bar{\alpha}\left(T-T_0\right),\ z=0; \tag{5}$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}=0,\ z=\frac{h}{2}; \tag{6}$$

$$p\left(r,z,0\right)=1,\ T\left(r,z,0\right)=T_0,\ r_{\text{w}}\le r\le r_{\text{k}},\ 0\le z\le h/2, \tag{7}$$

где $\bar{\alpha}=\frac{\alpha\cdot l}{\lambda_{\text{z}}}$ – число Био, α – коэффициент теплообмена, λ_{z} – теплопроводность вмещающей породы.

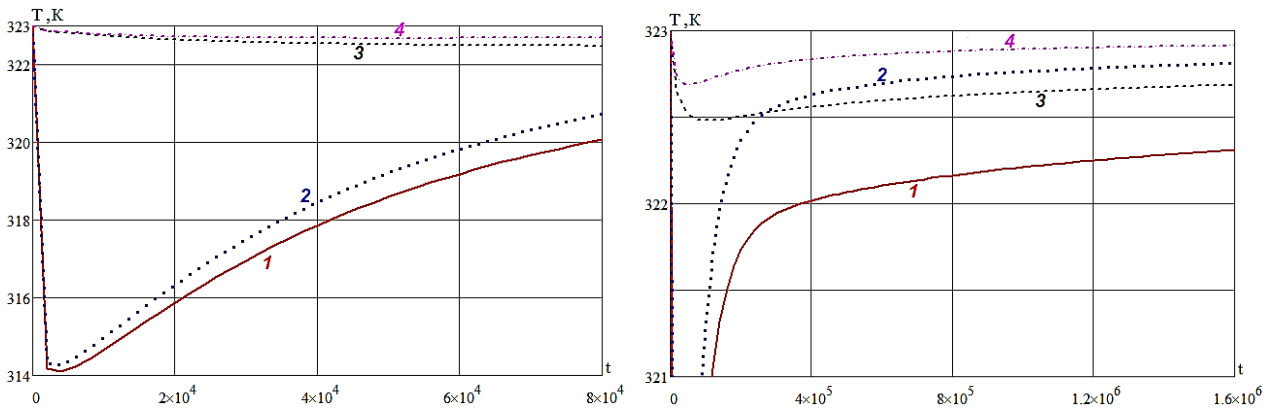
Данная начально-краевая задача (1)-(7) замыкается уравнением состояния в форме Латонова — Гуревича:

$$Z = \left(0.17376 \ln\left(\frac{m p_0}{c_{\text{г}} T_{\text{с}}} T \right) + 0.73 \right)^{\frac{p_0}{p_{\text{с}}} p} + 0.1 \frac{p_0}{p_{\text{с}}} p, \qquad (8)$$

где $T_{\text{с}}$, $p_{\text{с}}$ – критические температура и давление природного газа, зависящие от его состава.

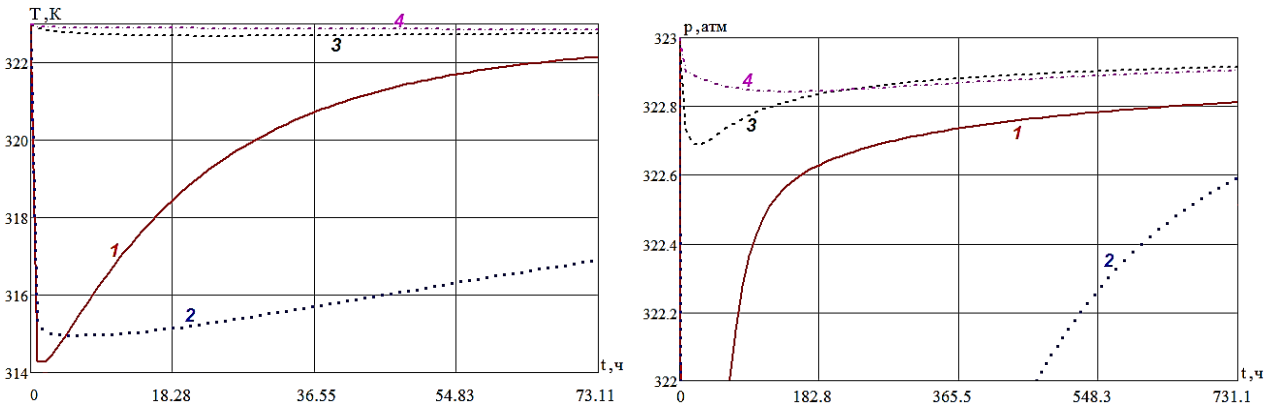
Во втором параграфе описан алгоритм решения разностной задачи, основанный на расщеплении исходной системы уравнений по физическим процессам с последующим расщеплением уравнения энергии по пространственным переменным методом слабой аппроксимации. Соответствующие разностные схемы для определения давления и для определения температуры по вертикальной координате строятся методом баланса; а для определения температуры по радиальной координате используется схема бегущего счета. Для численной реализации получаемой разностной задачи на каждом временном слое использовался метод простых итераций.

В третьем параграфе анализируются результаты вычислительного эксперимента. Входные данные соответствовали Средне-Вилюйскому месторождению природного газа, для которого были определены критические параметры $T_{\text{с}}$, $p_{\text{с}}$. Результаты показывают, что теплообмен пласта-коллектора с вмещающими породами практически не влияет на динамику поля давления, а его влияние на температурное поле локализовано в узкой зоне вблизи кровли и подошвы пласта, но размер этой зоны со временем увеличивается. На забое скважины температура газа вначале процесса отбора резко понижается (за счет эффекта дросселирования) (кривые 1 и 2 на рис. 1а), затем со временем начинает восстанавливаться (начинает преобладать конвективная составляющая теплообмена). На кровле пласта такая же тенденция сохраняется на некотором расстоянии от скважины (причем изменения температуры не существенны и происходят в основном за счет адиабатического расширения) (кривые 3 и 4 на рис. 1), а на плоскости симметрии – температура убывает (изменения также несущественны). Так как предпологается, что горные породы, вмещающие пласт, имеют постоянную температуру, то очевидно, что температура на кровле пласта, по истечению некоторого времени, станет возрастающей во времени функцией (см. кривые 3 и 4 на рис. 1б). Они же показывают, что температура на плоскости симметрии со временем становится постоянной. Такие различия между температурными полями на кровле и на оси симметрии объясняются теплообменом пласта с окружающими породами, причем это влияние наиболее ярко выражено для низкопроницаемых пластов.



а **б**

Рис.1. Динамика температуры на кровле пласта при давлении отбора $p_w = 140$ атм, $k = 10^{-13}$ м^2: кривые 1, 2 – на забое скважины; кривые 3, 4 – на расстоянии 10 м от скважины. Нечетные номера соответствуют α = 2 Вт/(м^2·К), четные – α = 10 Вт/(м^2·К).



а **б**

Рис. 2. Динамика температуры на кровле пласта при давлении отбора $p_w = 140$ атм, α = 10 Вт/(м^2·К): кривые 1, 2 – на забое скважины; кривые 3, 4 – на расстоянии 10 м от скважины. Нечетные номера соответствуют $k = 10^{-13}$ м^2, четные – $k = 10^{-14}$ м^2.

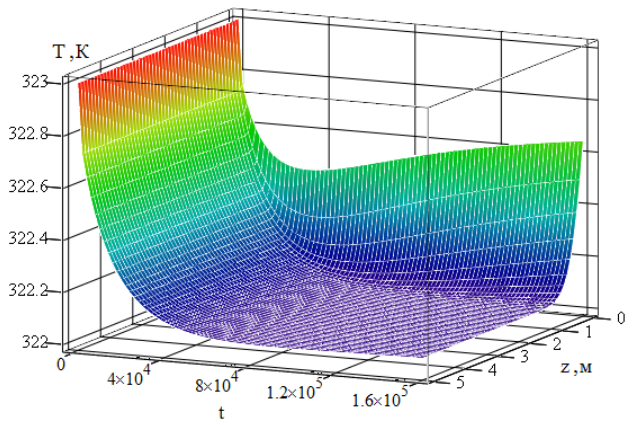


Рис. 3. Динамика температуры по вертикальной координате при $r = 5.1$ м, $p_w = 140$ атм., $\alpha = 10$ Вт/(м^2·К).

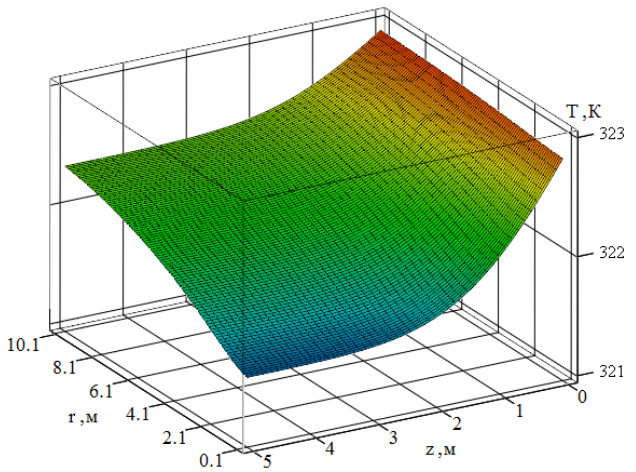


Рис. 4. Пространственное распределение температуры в конце расчетного времени, $p_w = 140$ атм., $\alpha = 10$ Вт/(м^2·К).

Увеличение коэффициента теплообмена приводит к несущественному увеличению температуры на кровле, причем в начальный период это различие почти незаметно (рис. 1), и практически не влечет изменений температуры на плоскости симметрии. Со временем за счет эффекта дросселирования влияние теплообмена становится более заметным вблизи скважины и наименее заметным при отдалении от нее. Основные изменения температуры по вертикальной координате происходят вблизи кровли пласта (рис. 3 и 4), далее температура уменьшается, и ее значение определяется эффектом Джоуля — Томсона и адиабатическим расширением.

Третья глава посвящена решению задачи о нагнетании реального газа в пласт через одиночную скважину, с учетом его теплообмена с окружающими породами. Технологически такие задачи обоснованы необходимостью повышения эффективности добычи такого ценного продукта как газовый конденсант, когда для предотвращения его потерь в продуктивном пласте нужно поддерживать давление выше, чем давление начала конденсации.

В первом параграфе дается постановка задачи закачки газа. Процесс неизотермической фильтрации газа описывается ранее выведенной системой уравнений для случая отбора. При этом уравнение движения (1) остается неизменным, а в правую часть уравнения (2) добавляется слагаемое $\delta\frac{1}{\bar{r}}\frac{\partial}{\partial\bar{r}}\left(\bar{r}\frac{\partial\bar{T}}{\partial\bar{r}}\right)$, характеризующее теплопроводность по радиальной координате:

$$\frac{\partial\bar{T}}{\partial\bar{t}}=\delta\left(\frac{1}{\bar{r}}\frac{\partial}{\partial\bar{r}}\left(\bar{r}\frac{\partial\bar{T}}{\partial\bar{r}}\right)+\frac{\partial^2\bar{T}}{\partial\bar{z}^2}\right)+\left(1+\frac{\bar{T}}{Z}\frac{\partial Z}{\partial\bar{T}}\right)\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{t}}+\frac{c_{\text{р}}}{R}\frac{\bar{p}}{Z\bar{T}}\frac{\partial\bar{T}}{\partial\bar{r}}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{r}}-\frac{\bar{T}}{Z}\frac{\partial Z}{\partial\bar{T}}\left(\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{r}}\right)^2, \quad (9)$$

$$\bar{r}_{\text{w}}<\bar{r}<\bar{r}_{\text{k}},\ 0<\bar{z}<\frac{\bar{h}}{2},\ \bar{t}>0.$$

Рассматривается режим нагнетания с постоянным массовым расходом, при котором температура нагнетаемого газа считается постоянной. Остальные условия остаются такими же, как и в случае отбора:

$$-\frac{p}{ZT}\frac{\partial p}{\partial r}=A,\ T=T_{\text{w}},\ r=r_{\text{w}}, \quad (10)$$

где $A=\frac{m\mu lRM}{2\pi khp_0c_{\text{г}}r_{\text{w}}}$, M – массовый расход газа.

Эта краевая задача численно реализуется во втором параграфе с использованием разностных схем, полученных методом баланса, а в вычислительном алгоритме используется метод простых итераций.

В третьем и четвертом параграфах анализируются результаты вычислений для двух вариантов: нагнетание холодного и горячего газа, соответственно. Расче-

ты проводились для природного газа Средне-Вилюйского месторождения Республики Саха (Якутия). Варьировались значения коэффициента теплообмена α, значение массового расхода нагнетаемого газа M и температура нагнетаемого газа T_w.

Результаты вычислений показали, что теплообмен пласта с вмещающими породами при нагнетании газа, как и при его отборе, практически не влияет на динамику поля давлений. При нагнетании газа с постоянной температурой, равной начальной пластовой, ее изменение во времени носит немонотонный характер (рис. 6), что объясняется преобладанием различных механизмов теплообмена (дросселирование, адиабатическое расширение, конвекция, теплопроводность) на различных стадиях процесса. Увеличение коэффициента теплообмена приводит к уменьшению отклонения температуры на кровле от начального значения (рис. 5 и 6), а вблизи скважины разность температур еще меньше, что объясняется постоянством температуры нагнетаемого газа (кривые 1 и 3 на рис. 5, рис. 6). Влияние теплообмена с вмещающими породами на температуру пласта возрастает по мере удаления от точки нагнетания. На плоскости симметрии вариация коэффициента теплообмена практически не сказывается на перераспределении температуры. Наиболее существенные изменения температуры по вертикальной координате происходят вблизи кровли и подошвы пласта (рис. 7 и 8), причем по мере удаления от кровли отклонение температуры от начальных показателей вначале возрастает, а далее становится постоянным, ее величина определяется только теплопереносом по радиальной координате.

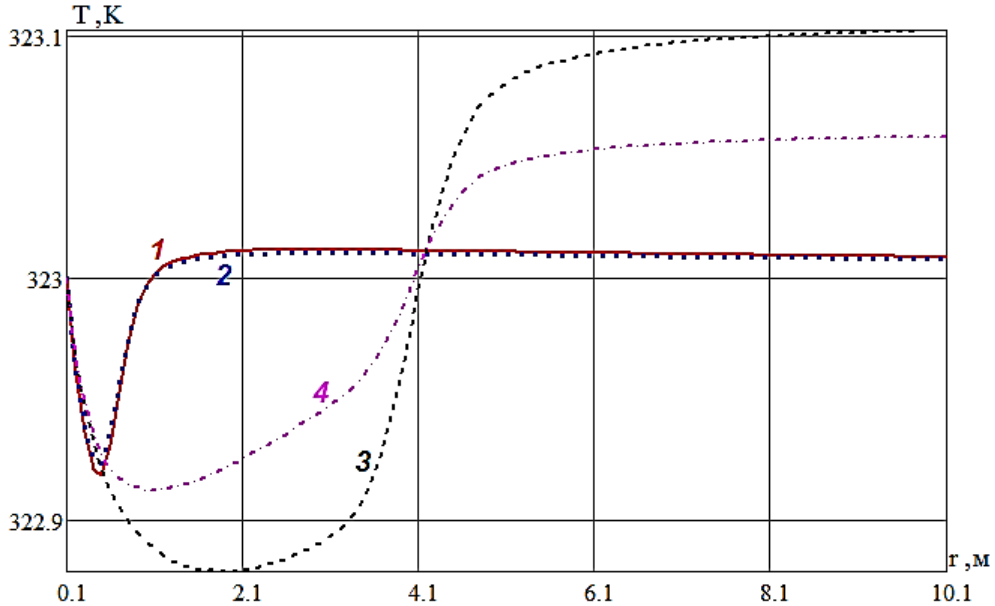


Рис. 5. Распределение температуры по радиальной координате на плоскости симметрии при расходе газа M = 5 кг/с, (кривые 1, 2, t = 4000; кривые 3,4, $t = 1.6 \cdot 10^5$). Нечетные номера соответствуют α = 2 Вт/(м^2·К), четные – α = 10 Вт/(м^2·К).

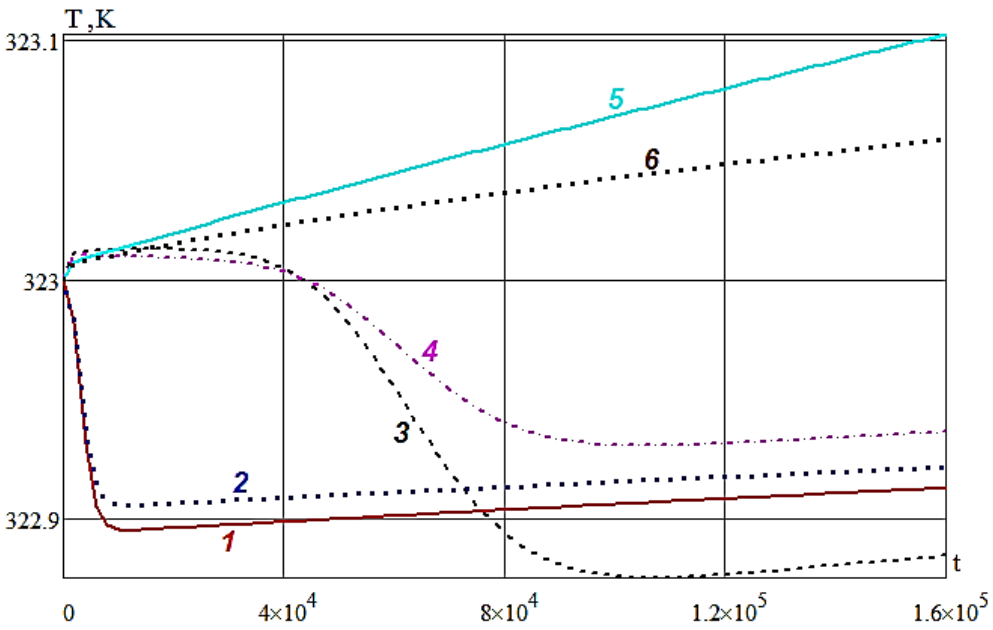


Рис. 6. Динамика температуры на расстоянии от скважины 0.5 м (кривые 1, 2), 2.5 м (кривые 3, 4) и 10 м (кривые 5,6) на кровле пласта при расходе газа M = 5 кг/с. Нечетные номера соответствуют α = 2 Вт/(м^2·К), четные – α = 10 Вт/(м^2·К).

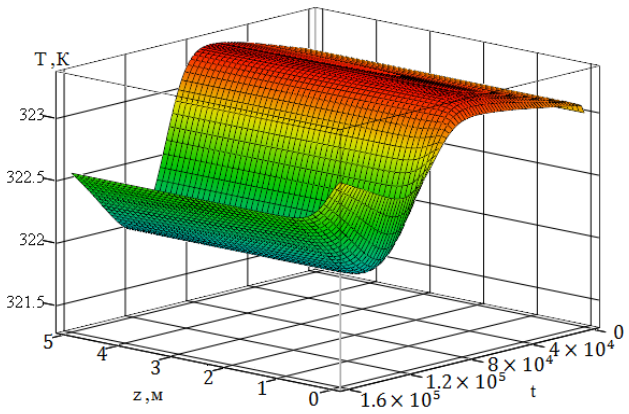


Рис. 7. Динамика изменения температуры по вертикальной координате при r = 10.1 м, M = 5 кг/с, α = 10 Вт/(м^2·К).

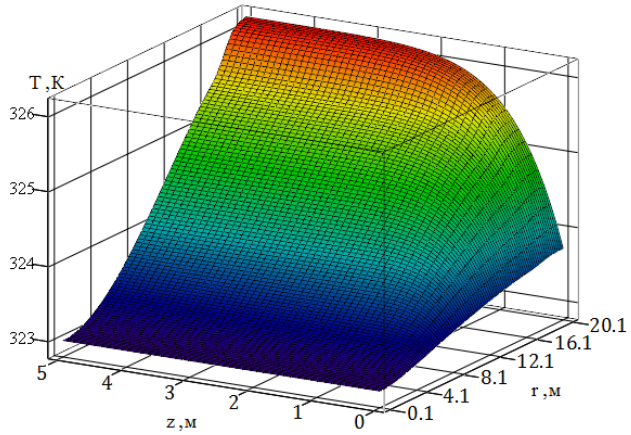
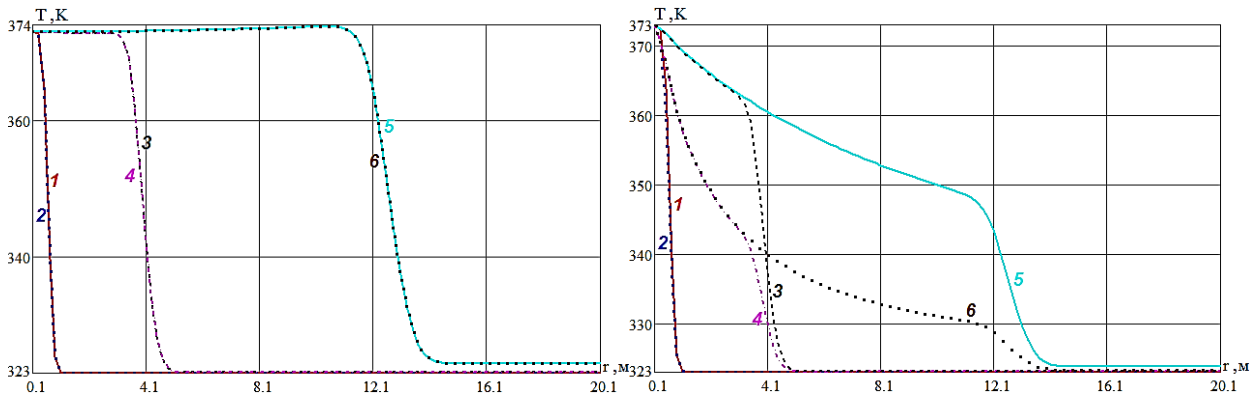


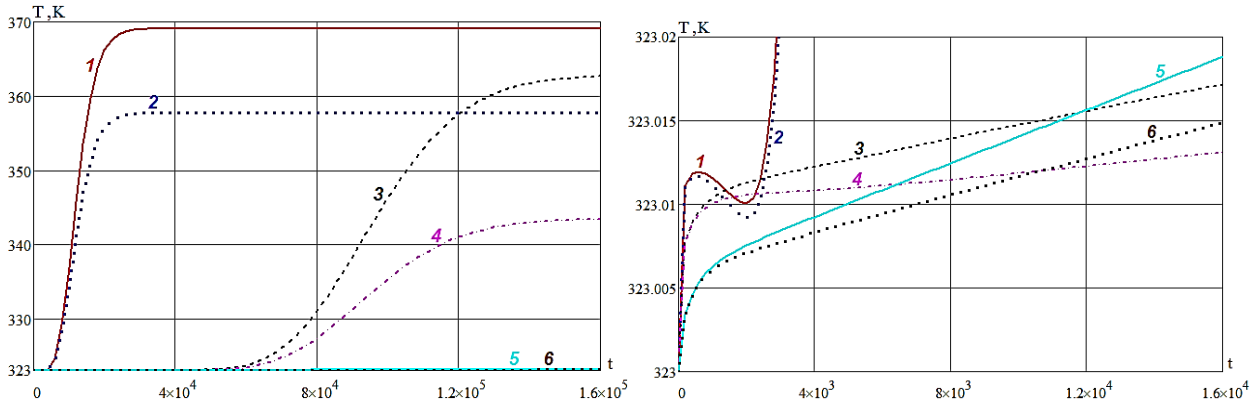
Рис. 8. Пространственное распределение температуры в конце расчетного времени, M = 5 кг/с, α = 10 Вт/(м^2·К).

При нагнетании горячего газа, основные изменения тепмературного поля пласта будут происходить вблизи скважины. На плоскости симметрии (рис. 9а) при малых временах температура газа убывает по мере удаления от скважины (см. кривые 1–4), а при больших временах радиальное распределение температуры носит немонотонный характер (см. кривые 5 и 6). Это объясняется интенсификацией со временем механизма теплопередачи за счет адиабатического сжатия. Однако, на кровле пласта, за счет теплообмена с окружающими породами, радиальное распределение температуры газа убывает в течение всего расчетного времени (рис. 9б). Более детальное рассмотрение радиального распределения температуры выявляет факт существования области, где кривая



а) плоскость симметрии **б)** кровля пласта

Рис. 9. Распределение температуры по радиальной координате (кривые 1, 2, t = 4000; кривые 3, 4, t = 1.6·10^5; кривые 5, 6, t = 1.6·10^6) при расходе газа M = 5 кг/с.
Нечетные номера соответствуют α = 2 Вт/(м^2·К), четные – α = 10 Вт/(м^2·К).



а **б**

Рис. 10. Динамика температуры на расстоянии от скважины 1 м (кривые 1, 2), 3 м (кривые 3, 4) и 10 м (кривые 5, 6) на кровле пласта при расходе газа M = 5 кг/с.
Нечетные номера соответствуют α = 2 Вт/(м^2·К), четные – α = 10 Вт/(м^2·К).

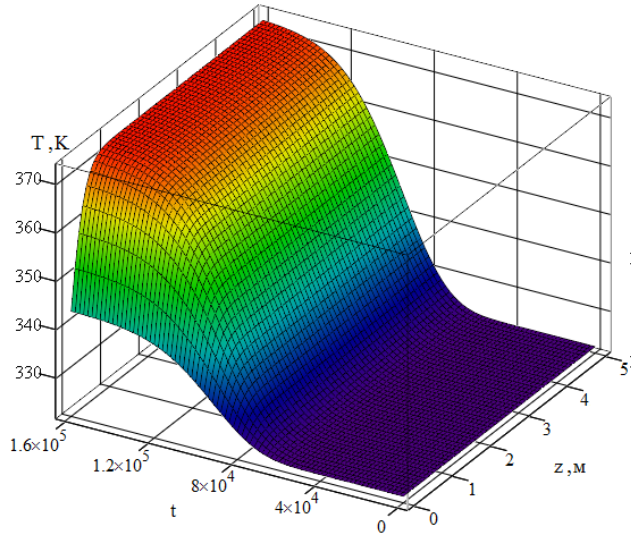


Рис. 11. Динамика изменения температуры по вертикальной координате, r = 3.1 м, M = 5 кг/с, α = 10 Вт/(м^2·К).

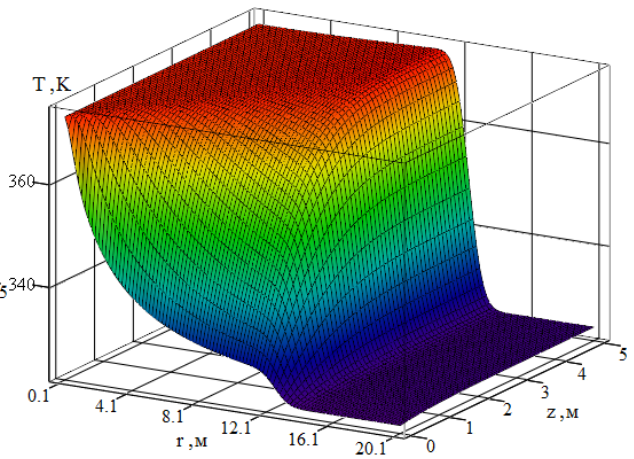


Рис. 12. Пространственное распределение температуры в конце расчетного времени M = 5 кг/с, α = 10 Вт/(м^2·К).

температуры возрастает, но на несущественную величину, что объясняется эффектом Джоуля — Томсона. Температура газа представляет собой возрастающую (практически всюду) во времени функцию (рис. 10). Здесь резкий нагрев пластового газа происходит за счет конвекции, причем зона преобладания конвективного теплообмена со временем только возрастает. Небольшой скачок кривых 1 и 2 на рис. 10б происходит за счет эффекта Джоуля — Томсона. Увеличение коэффициента теплообмена практически не влияет на температуру на плоскости симметрии (рис. 9а), и приводит к уменьшению температуры на кровле пласта (рис. 9б). Причем, за счет постоянства температуры нагнетаемого газа, разница между температурными кривыми возрастает по мере удаления от точки нагнетания (в зоне преобладания конвективного теплообмена), затем она снова убывает по мере приближения температуры газа к температуре вмещающих пород (кривые 3 и 4 на рис. 9б), а далее становится практически постоянной (в зоне преобладания теплообмена за счет адиабатического сжатия) (кривые 5 и 6 на рис. 9б). Основные изменения температуры по вертикальной координате будут происходить вблизи кровли пласта (рис. 3 и 4). Так, по мере удаления от кровли пласта, температура газа возрастает, далее становится постоянной, величина которой определяется только теплопередачей по радиальной координате. Интенсивность этого возрастания существенно зависит от величины коэффициента теплообмена. Влияние теплообмена пласта-коллектора с вмещающими породами локализовано в узкой зоне вблизи кровли пласта, причем размер этой зоны со временем увеличивается.

Выводы

Получены следующие основные результаты:

1. На основе математической модели неизотермической фильтрации реального газа с использованием конечно-разностных методов и разработки программного обеспечения проведено численное моделирование влияния теплообмена пласта-коллектора с вмещающими породами на динамику полей давления и температуры.
2. По результатам вычислительного эксперимента установлено:

- В изученном диапазоне параметров теплообмен газоносного пласта с вмещающими горными породами, как при отборе газа, так и при его нагнетании практически не влияет на динамику поля давления.
- Влияние теплообмена с вмещающими горными породами на температурное поле газоносного пласта локализовано в узкой зоне вблизи кровли и подошвы, причем со временем размер этой зоны увеличивается. В режиме отбора газа оно наиболее ощутимо вблизи скважины, причем этот эффект наиболее

заметен для низкопроницаемых пластов. Этот результат имеет важное практическое значение, так как такие пласты расположены на больших глубинах и, следовательно, будут иметь большие величины давления и температуры. Именно в этом случае использование приближения идеального газа приведет к значительным ошибкам в расчетах.

- При нагнетании газа с постоянной температурой, равной начальной пластовой, ее изменение во времени носит немонотонный характер, что объясняется преобладанием различных механизмов теплообмена (дросселирование, адиабатическое расширение, конвекция, теплопроводность) на различных стадиях процесса. Влияние рассматриваемого теплообмена на температуру пласта возрастает по мере удаления от точки нагнетания.
- При нагнетании горячего газа температура пласта представляет собой практически всюду возрастающую во времени функцию, а влияние теплообмена с вмещающими породами наиболее ощутимо вблизи скважины, где преобладает конвективная составляющая теплопереноса.

Публикации

1. Николаев В.Е., Иванов Г.И. Математическая модель неизотермической фильтрации газа при нагнетании // Всероссийская научная конференция «Математическое моделирование развития Северных территорий Российской Федерации»: Тез. докл. – Якутск: ООО РИЦ «Офсет», 2008. – С. 24.
2. Николаев В.Е., Иванов Г.И. Исследование влияния различных факторов при нагнетании газа в пласт // Информационные технологии в науке, образовании и экономике: материалы III Всероссийской научной конференции. Часть II. – Якутск: Изд-во ЯГУ, 2008 – С. 45–46.
3. Николаев В.Е., Иванов Г.И. Исследование влияния реальных свойств газа при неизотермической фильтрации // II Всероссийская научная конференция и VII Всероссийская школа-семинар «Математическое моделирование развития Северных территорий Российской Федерации»: Тез. докл. – Якутск: Филиал изд-ва ЯГУ, ИМИ ЯГУ, 2009 – С. 39.
4. Иванов Г.И. Сравнительный анализ неизотермической фильтрации реального и идеального газов // XIV Лаврентьевские чтения, посвященные 110-летию со дня рождения академика М.А. Лаврентьева: Сборник статей научной конференции. – Якутск: Изд-во СВФУ, 2011. – С 31–38.
5. Николаев В.Е., Иванов Г.И. Исследование двумерной математической модели при отборе газа // VI Международная конференция по математическому моделированию: Тез. докл. – Якутск: ОАО «Медиа-холдинг Якутия», 2011. – С. 205.

6. Николаев В.Е., Иванов Г.И. Сравнительный анализ двумерной задачи отбора идеального и реального газов // III Всероссийская научная конференция «Математическое моделирование развития Северных территорий Российской Федерации»: Тез. докл. – Якутск: Изд-во «Сфера», 2012. – С. 58–59.
7. Николаев В.Е., Иванов Г.И. Алгоритм параллельного вычисления математической модели неизотермической фильтрации газа при отборе // IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Информационные технологии в науке, образовании и экономике»: Тез. докл. Часть I. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2012. – С. 81.
8. **Бондарев Э.А., Николаев В.Е., Иванов Г.И. Сравнительный анализ двумерной математической модели отбора идеального и реального газов // Математические заметки ЯГУ, 2013. – Т. 20. Вып. 1. – С. 182–194.**
9. **Николаев В.Е., Иванов Г.И., Рожин И.И. Численное моделирование влияния теплообмена пласта-коллектора с вмещающими породами на отбор газа через одиночную скважину // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. – Новосибирск, 2013. – Т. 16, №4. – С. 337–346.**
10. Nikolaev V.E., Ivanov G.I., Rozhin I.I. Numerical modeling of the influence of heat exchange of reservoir beds with enclosing rocks on gas production from a single well // Numerical Analysis and Applications, 2013. – Vol. 6, No. 4. – Pp. 289–297.
11. Николаев В.Е., Иванов Г.И. Влияние теплообмена пласта-коллектора с вмещающими породами на неизотермическую фильтрацию реального газа при нагнетании. // VII Международная конференция по математическому моделированию: Тез. докл. – Якутск: ООО «Компания «Дани-Алмас», 2014. – С. 155.