

На правах рукописи



Кабиров Ильшат Файзелькавиевич

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ РАСТВОРА СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ НА
КАРБОНАТОСОДЕРЖАЩИЕ НЕФТЕГАЗОВЫЕ ПЛАСТЫ

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2019

Работа выполнена в лаборатории прикладной физики и механики Стерлитамакского филиала Института стратегических исследований республики Башкортостан.

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РБ,
Филиппов Александр Иванович

Официальные оппоненты: Федоров Константин Михайлович
доктор физико-математических наук,
профессор, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тюменский госу-
дарственный университет»

Бородин Станислав Леонидович
кандидат физико-математических наук,
Тюменский филиал Института теоретиче-
ской и прикладной механики им. С.А.
Христиановича СО РАН

Ведущая организация: ФГБУН «Удмуртский федеральный ис-
следовательский центр Уральского отде-
ления Российской академии наук»

Защита состоится «25» апреля 2019 г. в 15.30 на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.274.10 при ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный уни-
верситет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, д. 15а, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном
центре ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет»

Автореферат разослан « » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.274.10
доктор физико-математических наук,
профессор



Удовиченко С. Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Кислотная обработка карбонатных коллекторов является наиболее распространенным способом химического воздействия на призабойную зону пласта (ПЗП) для интенсификации добычи нефти. Несмотря на многолетний опыт применения и большой объем проведенных исследований, направленных на совершенствование и повышение эффективности метода, значительная часть обработок не дает положительных результатов. По различным оценкам, успешность проведения кислотных обработок на многих месторождениях не превышает 30 – 50%.

Данное обстоятельство обращает внимание на необходимость учета многообразия определяющих факторов, среди которых – особенности химико-гидродинамических и термодинамических условий протекания реакции. Основы теории гетерогенных химических процессов заложены в трудах В.Г.Левича, М.Д. Франк-Каменцкого, Г.М. Панченкова, А.А. Жуковицкого и другие. Развита математические модели, описывающие процесс закачки раствора кислоты в карбонатный коллектор (G.Daccord, C.N.Fredd, H.S.Fogler, M.L.Noefner, К.М.Федоров, А.С.Смирнов, Р.Д.Каневская, Г.Т.Булгакова, А.Р.Шарифуллин, Т.Р.Закиров, А.И.Никифоров и другие), в которых учтено формирование червоточин, определяющихся скоростью фильтрации, или точнее, безразмерным числом Дамкеллера. Предложена модель, которая учитывает изменение фильтрационных свойств пористой среды, основанная на функции распределения пор по размерам исследуемого образца в результате растворения породы с учетом интенсивности объединения поровых каналов.

Практическое использование солянокислотных обработок неизбежно связано с этапностью (закачка, выдержка и отбор), цикличностью, обусловленной недостаточным желаемым эффектом, достигаемым в ходе одного цикла. Учету этих факторов в работах предшественников не уделялось достаточного внимания. Кроме того, в температурных задачах необходимо учитывать влияние предшествующих технологических процессов. Условия протекания реакций на различных этапах существенно различаются. При решении соответствующих химико-гидродинамических задач необходимо учитывать результаты предыдущих этапов обработки. Это существенно усложняет постановку задач и затрудняет получение расчетных зависимостей. Такие же трудности возникают при постановке и решении температурной задачи, актуальность которой обусловлена перспективами использования термометрических измерений для контроля процесса кислотной обработки с целью повышения эффективности.

Известно, что температурные эффекты, возникающие при взаимодействии кислоты с карбонатной горной породой, составляют десятки градусов. Одна-

ко возможности этих эффектов для контроля не используются в должной степени в связи с отсутствием теоретической базы.

Целью диссертационной работы является изучение взаимосвязанных тепловых и химико-гидродинамических процессов, происходящих при циклическом химическом воздействии раствором соляной кислоты на карбонатосодержащие породы с учетом многостадийности процесса кислотной обработки.

Задачи исследования:

- создание физико-математической модели температурного поля в карбонатосодержащем пласте и окружающих породах с учетом изменений пористости пласта и концентрации раствора соляной кислоты при закачке, выдержке и отборе;

- определение особенностей протекания химико-гидродинамических процессов при кислотном воздействии на этапах закачки, выдержки и отбора;

- теоретическое и экспериментальное исследование вклада теплофизических, химических и гидродинамических параметров в температурное поле, возникающее при кислотной обработке.

Объектом исследования является слоисто-неоднородная ортотропная карбонатосодержащая пластовая система, содержащая углеводороды.

Предметом исследования являются особенности и закономерности формирования термогидродинамических полей в пласте при циклическом химическом воздействии раствором соляной кислоты на карбонатосодержащие терригенные породы с учетом многостадийности.

Методы исследования. Основным методом решения математических задач, представленных в диссертационной работе, является развитая при участии автора модификация асимптотического метода. Кроме того, для получения аналитических зависимостей, представленных в работе, использованы широко известные: метод характеристик, методы вариации произвольной постоянной, интегральные преобразования. Графические зависимости рассчитаны с использованием стандартных математических программных пакетов. Осуществлены также лабораторные эксперименты.

Научная новизна:

1. Впервые построена объединённая физико-математическая модель, описывающая взаимосвязанные теплофизические и химико-гидродинамические процессы, протекающие в природных коллекторах, содержащих углеводороды, при циклическом кислотном воздействии.

2. Развита модификация асимптотического метода для решения нестационарных теплофизических задач сопряжения с учетом начальных условий, зависящих от пространственных координат.

3. Найдены новые аналитические выражения, позволяющие рассчитывать концентрацию, пористость и температуру в слоисто-неоднородном анизо-

тропном пласте и в скважине при циклическом воздействии, состоящем из этапов закачки раствора соляной кислоты, выдержки и отбора технологического раствора, содержащего продукты реакции и остатки кислотного раствора.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели взаимосвязанных полей концентрации и температуры при нестационарной фильтрации раствора кислоты в карбонатосодержащем пористом пласте с учетом цикличности кислотного воздействия, при этом каждый цикл включает этапы закачки, выдержки и отбора.

2. Метод решения задач нестационарных полей температуры при многоэтапном циклическом воздействии, основанный на асимптотических разложениях задач сопряжения, учитывающих результаты предшествующих технологических воздействий.

3. Расчетные аналитические асимптотические формулы для температурного поля в пласте и окружающих породах, учитывающие предшествующие температурные возмущения, вызванные предыдущими стадиями и циклами солянокислотной обработки (СКО).

4. Результаты расчётов пространственно-временных распределений плотности раствора кислоты, пористости и температуры при кислотной обработке пластов с учетом многостадийности и цикличности, подтвержденные лабораторным экспериментом.

Достоверность полученных результатов обосновывается тем, что в основу исследований положены фундаментальные законы сохранения массы и энергии, установлено соответствие полученных данных в частных случаях с результатами других исследователей, а также показано удовлетворительное согласие расчётных кривых с результатами выполненных автором экспериментальных измерений температуры при взаимодействии соляной кислоты и карбонатосодержащих образцов.

Практическая значимость заключается в описании температурных возмущений, возникающих в пористой среде, при кислотной обработке ПЗП. На основе полученных решений развиты новые методы расчета полей температуры и концентрации кислоты в растворе, а на базе изученных закономерностей могут быть разработаны новые способы исследования скважин и пластов. Созданы программы, позволяющие прогнозировать результаты воздействия раствора соляной на реальные коллекторы нефти и газа и, тем самым, осуществлять выбор наиболее эффективных режимов воздействия.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях: II Международная студенческая научно-практическая конференция «Интеллектуальный потенциал XXI века» (Новосибирск, 2010); X Международная студенческая научно-практическая конференция «Наука и современность» (Новосибирск, 2011); II Международная научно-

практическая конференция «Современное состояние естественных и технических наук» (Москва, 2011); III Международная научно-практическая конференция «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» (Новосибирск, 2014); XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, 2016); IX международная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2016); Международная конференция «Современные проблемы математической физики и вычислительной математики» (Москва, 2016); Российская научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2016); VI Ежегодная научно-техническая конференция молодых специалистов (Уфа, 2016); VII Международная молодежная научно-практическая конференция «Математическое моделирование процессов и систем» (Стерлитамак, 2017); Всероссийская научно-практическая конференция «Физика конденсированного состояния ее приложения» (Стерлитамак, 2018).

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в восьми научных работах из них четыре публикации в журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus и четыре в журналах, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад автора. Научные результаты, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Постановка задач осуществлена проф. д.т.н., А.И. Филипповым.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений.

Благодарность. Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору А.И. Филиппову, д.ф.-м.н., профессору П.Н. Михайлову, д.ф.-м.н. О.В. Ахметовой за постановку проблемы и ценные консультации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обоснованы научная новизна и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе дано представление о проработанности исследуемого вопроса в мировой литературе. Приведен краткий обзор научных достижений в области исследований. Обосновано разделение проблемы циклического химического воздействия раствором соляной кислоты на карбонатосодержащие породы с учетом многостадийности процесса кислотной обработки на химико-гидродинамическую и тепловую задачи.

На рис 1 представлена обобщенная геометрия химико-гидродинамических и температурных задач, рассмотренных в диссертации. В цилиндрической системе координат среда представлена тремя областями с плоскими границами раздела $z_d = \pm h$ (рис. 1), перпендикулярными оси z_d . Среда в

центральной слое толщиной $H = 2h$ представляет карбонатосодержащий проницаемый пласт, который подвергается СКО на этапах закачки ($v > 0$), выдержки ($v = 0$) раствора соляной кислоты и отбора ($v < 0$) активного флюида из карбонатосодержащего пласта.

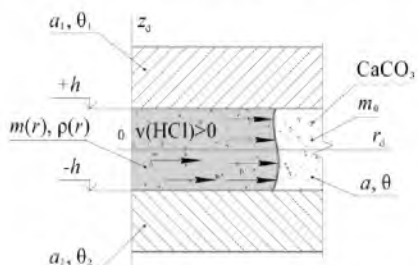


Рис. 1. Геометрия задач о полях пористости, концентрации раствора соляной кислоты и температуры на этапе закачки ($v > 0$), выдержки ($v = 0$) и отбора ($v < 0$) активного флюида из карбонатосодержащего пласта

Здесь $a = \lambda/c\rho$, $a_1 = \lambda_1/c_1\rho_1$ и $a_2 = \lambda_2/c_2\rho_2$ – температуропроводность, θ , θ_1 и θ_2 – температура соответствующих пластов; m_0 – начальная пористость карбонатного пласта, ρ_s – плотность скелета породы; r_d и z_{0d} – размерные координаты; $m(r)$, $\rho_a(r)$ – пористость проницаемой породы и плотность раствора соляной кислоты.

В соответствии с этим в первой главе рассмотрены химико-гидродинамические задачи о полях пористости и концентрационной плотности раствора соляной кислоты в призабойной зоне пласта на этапах закачки, выдержки и отбора.

На этапе закачки фильтрация раствора соляной кислоты в карбонатосодержащем пласте происходит в радиальном направлении от скважины к периферии. Математическая модель описывается системой дифференциальных уравнений, получаемых из соответствующих уравнений неразрывности, для соляной кислоты и скелета пористой среды

$$m \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{Q}{r_d} \frac{\partial \rho_a}{\partial r_d} = -k\alpha \rho_a, \quad (1) \quad \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\alpha \rho_a}{\rho_s}. \quad (2)$$

Начальные и граничные условия имеют вид

$$\rho_a(r_d, t=0) = \begin{cases} \rho_0, & r_d \leq r_{0d}, \\ \rho_0(r_d), & r_d > r_{0d}, \end{cases} \quad m(r_d, t=0) = \begin{cases} 1, & r_d < r_{0d}, \\ m_0(r_d), & r_d > r_{0d}, \end{cases} \quad \rho_a(r_{0d}, t) = \rho_0. \quad (3)$$

Отметим, что рассматриваемая задача является нелинейной и отличается от рассмотренных ранее наличием зависимости начальной пористости от радиальной координаты $m_0 = m_0(r_d)$. Решение задачи с именно такой зависимостью начальной пористости и позволяет учесть вклад предшествующих этапов и циклов обработки.

Из полученного методом характеристик решения

$$m = m_0(r_d) + \frac{\alpha}{\rho_s} \rho_0 \exp\left(-\frac{k\alpha}{mQ} \int_{r_{0d}}^{r_d} m r dr\right) (t - \tau(r_d)) \gamma(r < R(t)), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \exp\left(-\frac{k\alpha}{m(r)Q} \int_{r_{0d}}^r m(r') r' dr'\right) \gamma(r < R(t)) = \\ &= \begin{cases} \rho_0 \exp\left(-\frac{k\alpha}{m(r)Q} \int_{r_{0d}}^r m(r') r' dr'\right), & r < R, \\ 0, & r > R \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

следует, что учет зависимости начальной пористости от радиальной координаты существенно изменяет полученные зависимости, а в частном случае постоянной начальной пористости совпадает полученными ранее формулами. Здесь $\tau(r_d)$ – функция, определяющая время подхода фронта кислоты к точке с координатой r_d , а $R(t)$ – выражение для радиуса зоны воздействия, для которых в работе найдены аналитические выражения.

На этапе закачки уточнена расчетная неявная формула продвижения фронта раствора кислоты в пласте от времени закачки с учетом растворения породы, которая для случая постоянной начальной пористости впервые получена в работе А.Г. Крупинова

$$\begin{aligned} 2Qt = m_0 \left(R^2 - r_{0d}^2 \right) + 2 \frac{\rho_0 Q t}{\rho_s k} \left[1 - \exp\left(-\frac{k\alpha}{2Q} \left(R^2 - r_{0d}^2 \right) \right) \right] + 2 \frac{\rho_0 m_0 Q_0}{\rho_s k^2 \alpha} \times \\ \times \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_s k} \right)^{-1} \left\{ \exp\left(\frac{k\alpha}{2Q} \left(R^2 - r_{0d}^2 \right) \right) \ln \left[\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_s k} \right) \exp\left(\frac{k\alpha}{2Q} \left(R^2 - r_{0d}^2 \right) \right) + \frac{\rho_0}{\rho_s k} \right] + \right. \\ \left. + \left(\frac{\rho_s k}{\rho_0} - 1 \right) \ln \left[1 - \frac{\rho_0}{\rho_s k} \left(1 - \exp\left(-\frac{k\alpha}{2Q} \left(R^2 - r_{0d}^2 \right) \right) \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Варианты этой формулы, которые не учитывают процесса растворения скелета:

$$R = \sqrt{r_c^2 + \frac{Dt}{(\pi H m_0)}}, \quad (7) \quad R = \sqrt{r_c^2 + \frac{2Q}{r m_0} t}, \quad Q = \frac{D}{2\pi H}, \quad (8)$$

найжены в работах А.Р. Хендриксона, Р.Е. Харста, и М.Ф. Каримова, Р.К. Мухаметшина. Здесь D – дебит раствора кислоты, H – толщина продуктивного пласта. На рис. 2 изображены графики зависимости глубины проникновения раствора соляной кислоты ($\rho_a = 104.7$ г/л, 10%) от времени при разных дебитах. Кривая 1 и 2 на рис. 2, а и б – это две совпадающие зависимости, построенные по формулам (7) или (8). Эти формулы не учитывают растворение скелета в ходе химической реакции. Кривые 3, 4 и 5 на рис. 2, а и б по-

строены по формуле (10) при разных значениях постоянной химической реакции.

Из рисунка следует, что с уменьшением кинетической константы α и увеличением дебита растет глубина проникновения водного раствора в карбонатный пласт. С уменьшением кинетического параметра постоянной химической реакции кривые 2, 3 и 4 приближаются к 1 и 2. Это объясняется тем, что раствор соляной кислоты в значительной меньшей степени растворяет карбонатный скелет. Таким образом, показано, что необходим учет вклада растворения скелета при определении радиуса зоны обработки.

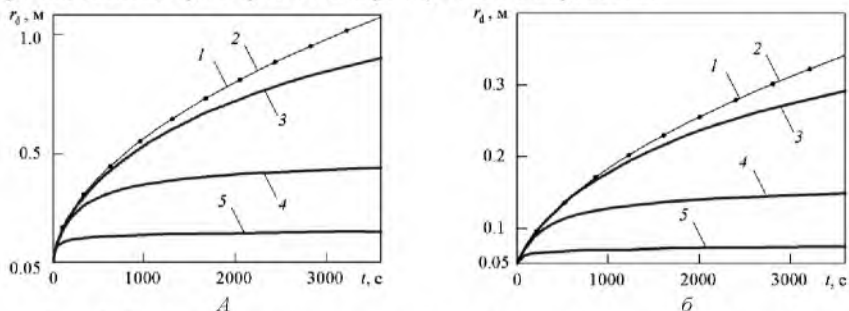


Рис. 2. График зависимости размеров зоны реакции от времени закачки, α – при дебите $D = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, $\bar{\sigma} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, 1, 2 – размеры зоны реакции, определенной по формулам (11) и (12); 3, 4, 5 – по формуле (10) при постоянной реакции $\alpha = 1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

На *этапе выдержки* прекращается подача растворителя в пласт, закачанный раствор кислоты реагирует с карбонатным скелетом. Задача отличается от подобной на этапе закачке, отсутствием движения несущей фазы

$$\frac{d(m\rho_a)}{dt} = -k\alpha(m)\rho_a^l = -kq, \quad (9) \quad \frac{dm}{dt} = \alpha(m)\frac{\rho_a^l}{\rho_s} = \frac{q}{\rho_s}, \quad (10)$$

начальные условия и граничные условия имеют вид

$$m|_{t=0} = m_0(r_d); \quad \rho_a|_{t=0} = \rho_{a0}(r_d). \quad (11)$$

На *этапе отбора продуктов реакции*, движение активного флюида происходит радиально в направлении от периферии к скважине, соответствующая задача отличается от случая закачки знаком «минус» перед $Q\partial\rho_a/r_d\partial r_d$ в основном уравнении

$$m\frac{\partial\rho_a}{\partial t} - \frac{Q}{r_d}\frac{\partial\rho_a}{\partial r_d} = -k\alpha\rho_a, \quad (12) \quad \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\alpha\rho_a}{\rho_s}, \quad (13)$$

и начальными и граничными условиями

$$\rho_a(r_d, t=0) = \begin{cases} \rho_0, & r_d \leq r_{0d}, \\ \rho_0(r_d), & r_d > r_{0d}, \end{cases} \quad m(r_d, t=0) = \begin{cases} 1, & r_d < r_{0d}, \\ m_0(r_d), & r_d > r_{0d}. \end{cases} \quad (14)$$

Задачи для случаев выдержки (9) – (11) и отбора (12) – (14) с учетом начальных возмущений ранее не рассматривались. Поскольку начальное распределение пористости и плотности во всех задачах является функцией радиальной координаты $m(r_d, t=0) = m_0(r_d)$, $\rho_a(r_d, t=0) = \rho_0(r_d)$, то такой подход обеспечивает возможность учета предыдущих этапов воздействия и применим для циклических закачек.

Поставленные химико-гидродинамические задачи решены методом характеристик и интегральных преобразований. На основании полученных аналитических зависимостей на этапах закачки выдержки и отбора, реализована расчетная программа в среде *Mathcad*. На рис. 3, а – б изображены графики зависимости относительной пористости (а), плотности (б) для трех последовательных циклов закачки раствора соляной кислоты от времени в карбонатосодержащий пласт на отметках 0.15, 0.2 и 0.25 м от скважины. Для более полной нейтрализации раствора соляной кислоты в прискважинном пространстве принимаем время закачки $t_1 = 3600$ с, выдержки – $t_2 = 200$ с, отбора – $t_3 = 400$ с. Максимум воздействия при трех последовательных циклах достигается на отметках, близких к скважине; при удалении эффективность снижается.

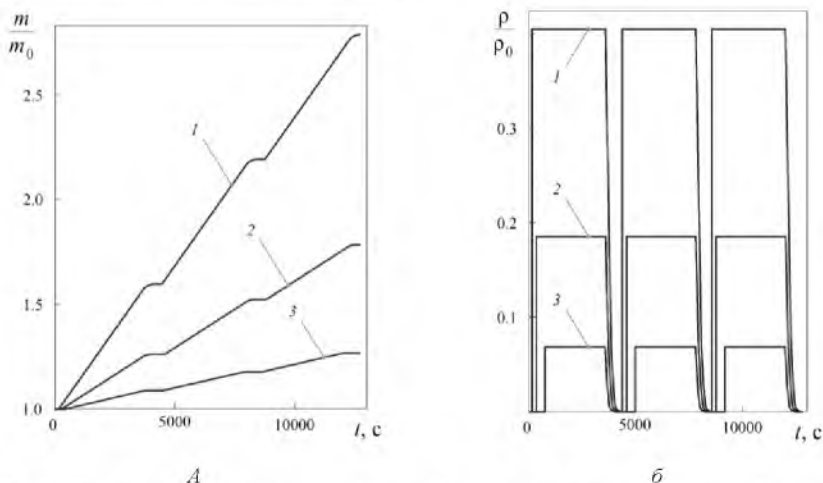


Рис. 3. График зависимости относительной пористости (а) и плотности (б) для трех последовательных циклов закачки раствора соляной кислоты от времени t ($r = 0.15$, $\rho_a = 71.22$ г/л), 2 ($r = 0.2$ м, $\rho_a = 40.04$ г/л), 3 ($r = 0.25$ м, $\rho_a = 18.33$ г/л)

Осуществлены многочисленные расчеты полей пористости пласта и плотности кислоты для отдельных этапов, единичных циклов и серии их последо-

вательного применения. Осуществлен анализ результатов расчетов, на основании которых установлено, что достигаемое изменение пористости в течение одного цикла воздействия, особенно в удаленных от скважины зонах пласта, не достаточны с точки зрения требований практики. Это доказывает целесообразность многократного циклического воздействия для достижения требуемых результатов.

Основным результатом анализа расчетов является проиллюстрированная возможность использования построенных программ для прогноза ожидаемых и оценки достигнутых результатов соляно кислотного воздействия на карбонатосодержащие пласты в условиях реальных нефтяных месторождений. Приведены характеристики единой диалоговой программы для расчетов зависимостей пористости пород и концентрации кислоты от расстояния до оси скважины и времени воздействия, созданной автором на основе найденных решений для этапов закачки, выдержки и отбора при кислотном воздействии.

Полученные выражения для плотностей кислоты позволяют определить плотность тепловых источников в задачах о температурных полях на этапах закачки, выдержки и отбора, при циклическом воздействии, которые рассмотрены в главах 2, 3 и 4.

Во второй главе рассмотрена задача о температурном поле, инициированном закачкой раствора соляной кислоты в карбонатосодержащий пористый пласт (рис. 1). Рассматривается случай $u_d > 0$, то есть движение жидкости направлено от полярной оси z_d в бесконечность. Среда считается ортотропной в соответствии с направлением осей. Для простоты пренебрегается слагаемыми, содержащими радиальную теплопроводность во всех слоях, это обосновывается преобладающим влиянием конвекции в радиальном направлении. Ввиду аксиальной симметрии задачи, слагаемые, содержащие угловую координату, в уравнениях так же опущены.

Математическая постановка задачи для покрывающего и подстилающего массивов представляются уравнениями теплопроводности, а для карбонатосодержащего слоя уравнением конвективной теплопроводности в пласте

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = a_{z1} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z_d^2}, \quad z_d > h, \quad r_d > 0, \quad t > 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = a_{z2} \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial z_d^2}, \quad z_d < -h, \quad r_d > 0, \quad t > 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_d(r, t) \frac{\partial \theta}{\partial r_d} - a_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z_d^2} = Q_d(r_d, t), \quad |z_d| < h, \quad r_d > 0, \quad t > 0. \quad (17)$$

На границах раздела заданы условия равенства температур и тепловых потоков

$$\theta \Big|_{z_d=h} = \theta_1 \Big|_{z_d=h}, \quad \theta \Big|_{z_d=-h} = \theta_2 \Big|_{z_d=-h}, \quad (18)$$

$$\lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z_d} \Big|_{z_d=h} = \lambda_{z1} \frac{\partial \theta_1}{\partial z_d} \Big|_{z_d=h}, \quad \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z_d} \Big|_{z_d=-h} = \lambda_{z2} \frac{\partial \theta_2}{\partial z_d} \Big|_{z_d=-h}. \quad (19)$$

Поскольку циклы закачки и отбора при кислотном воздействии могут повторяться, то считается, что температура в начальный момент времени отличается в пластах на величину $D(r_d, z_d)$, $D_1(r_d, z_d)$, $D_2(r_d, z_d)$, в соответствии с номерами пластов в задаче, от естественной температуры Земли, которая определяется решением соответствующей стационарной задачи при отсутствии источников

$$\begin{aligned} \theta|_{t=0} &= D(r_d, z_d) + \theta_0 - \Gamma z_d, \quad \theta_1|_{t=0} = D_1(r_d, z_d) + \theta_0 - \Gamma h - \Gamma_1(z_d - h), \\ \theta_2|_{t=0} &= D_2(r_d, z_d) + \theta_0 + \Gamma h - \Gamma_2(z_d + h). \end{aligned} \quad (20)$$

где $\Gamma = q_z/\lambda_z$, $\Gamma_1 = q_z/\lambda_{z1}$, $\Gamma_2 = q_z/\lambda_{z2}$, q_z – составляющая естественного теплового потока Земли. Температура закачиваемой жидкости (для простоты в скважине нулевого радиуса) изменяется согласно заданной зависимости $\theta_0(t)$

$$\theta|_{r=0} = \theta_0(t). \quad (21)$$

В отличие от известных (Михайлов П.Н., Ахметова О.В.), постановка задачи учитывает наличие источников, обусловленных химической реакцией и ненулевое начальное распределение температурного поля, вызванного предшествующими технологическими процессами.

Задача (15) – (21) приведена к безразмерным переменным с использованием соотношений

$$\begin{aligned} r &= r_d/h, \quad u = u_d \cdot h/a_{z1}, \quad Q(r, Fo) = (h^2/\theta_{11}a_{z1})Q_d(r_d, t), \quad \Lambda = \lambda_{z1}/\lambda_z, \\ \lambda &= \lambda_{z2}/\lambda_{z1}, \quad z = z_d/h, \quad Fo = ta_{z1}/h^2, \quad \chi = c_1\rho_1/c\rho, \quad \alpha^{-2} = a_{z2}/a_{z1}, \\ T_0(Fo) &= (\theta_0(t) - \theta_0 + \Gamma z_d)/\theta_{11}, \quad T_1 = (\theta_1 - \theta_0 + \Gamma h + \Gamma_1(z_d - h))/\theta_{11}, \\ T_2 &= (\theta_2 - \theta_0 - \Gamma h + \Gamma_1(z_d + h))/\theta_{11}, \quad T = (\theta - \theta_0 + \Gamma z_d)/\theta_{11}, \\ T_p(r, z) &= D(r_d, z_d)/\theta_{11}, \quad T_{p1}(r, z) = D_1(r_d, z_d)/\theta_{11}, \quad T_{p2}(r, z) = D_2(r_d, z_d)/\theta_{11}, \\ Fi_+ &= 1/2 \cdot \left[1 + \lambda \sqrt{a_{z1}/a_{z2}} \right], \quad Fi_- = 1/2 \cdot \left[1 - \lambda \sqrt{a_{z1}/a_{z2}} \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

После обезразмеривания произведена оценка вклада радиальной теплопроводности в процессы теплопереноса и сделан вывод о возможности пренебрежения соответствующей составляющей в уравнении теплопереноса.

Решение соответствующей параметризованной задачи отыскивается в виде асимптотической формулы по формальному параметру $T_j = T_j^{(0)} + \varepsilon T_j^{(1)} + \varepsilon^2 T_j^{(2)} \dots + \varepsilon^n T_j^{(n)} + \Theta_j^{(n)}$, где индекс j соответствует номеру области. Постановка расцепленной задачи для нулевого коэффициента имеет вид

$$\frac{\partial T_1^{(0)}}{\partial \text{Fo}} - \frac{\partial^2 T_1^{(0)}}{\partial z^2} = 0, \quad z > 1, \text{Fo} > 0, \quad (23)$$

$$\frac{\partial T_2^{(0)}}{\partial \text{Fo}} - \alpha^{-2} \frac{\partial^2 T_2^{(0)}}{\partial z^2} = 0, \quad z < -1, \text{Fo} > 0, \quad (24)$$

$$\frac{\partial T^{(0)}}{\partial \text{Fo}} + u(r, \text{Fo}) \frac{\partial T^{(0)}}{\partial r} - \frac{\chi}{2} \left(\left. \frac{\partial T_1^{(0)}}{\partial z} \right|_{z=1} - \lambda \left. \frac{\partial T_2^{(0)}}{\partial z} \right|_{z=-1} \right) = Q(r, \text{Fo}), \quad (25)$$

$$\begin{aligned} |z| < 1, r > 0, \text{Fo} > 0, \\ T_1^{(0)}|_{z=1} = T_2^{(0)}|_{z=-1} = T^{(0)}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$T^{(0)} \Big|_{\text{Fo}=0} = T_p(r, z), \quad (27)$$

$$T_1^{(0)} \Big|_{\text{Fo}=0} = T_{p1}(r, z), \quad T_2^{(0)} \Big|_{\text{Fo}=0} = T_{p2}(r, z), \quad T^{(0)}|_{r=0} = T_0(\text{Fo}). \quad (28)$$

Трудности окончательной формулировки задачи для нулевого коэффициента асимптотического разложения связаны с противоречивостью условия (27), поскольку оно предполагает приравнивание двух величин, одна из которых $T^{(0)}$ не зависит от z .

Для преодоления математических трудностей, связанных с учетом начального распределения, осуществлена модификация «в среднем точного» асимптотического метода. Для этого сформулирована задача для остаточного члена нулевого приближения. Модифицированное условие найдено с выполнением требований тривиального решения усредненной задачи для остаточного члена. Установлено, что решение задачи для «асимптотически осредненного» остаточного члена $\langle \Theta^{(0)} \rangle_a$ является тривиальным при выполнении неклассического средне интегрального условия

$$T^{(0)} \Big|_{\text{Fo}=0} = \langle T_p(r, z) \rangle. \quad (29)$$

Показано, что задача для нулевого коэффициента с условием (29) вместо (27) имеет ненулевое единственное решение, а осредненная задача для остаточного члена имеет только тривиальное решение $\langle \Theta^{(0)} \rangle_a = 0$.

Найдены аналитические решения задачи в нулевом асимптотическом приближении, показано, что известные модели следуют как частные из полученного решения. В случае, когда $u = J(2r)$, $T_0 = \text{const}$ и источники зависят только от горизонтальной координаты $Q = Q(r)$, имеем следующее выражение для температурного поля центрального пласта

$$\begin{aligned}
T^{(0)} = & T_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{\chi F_{i+} r^2}{2J \sqrt{F_0 - r^2 / J}} \right) \Phi_1 + \frac{2}{J} \int_0^r Q(r') \operatorname{erfc} \left(\frac{\chi F_{i+} V}{2J \sqrt{F_0 - V / J}} \right) \Phi_2 r' dr' + \\
& + \frac{2}{J} \int_0^r \langle T_p(r', z') \rangle \Psi(A, B) \Phi_2 r' dr' + \frac{\chi}{J} \int_0^r r' dr' \int_1^\infty T_{p1}(r', z') dz' \Psi(A + z' - 1, B) \Phi_2 + \\
& + \frac{\chi \alpha^2}{J} \int_0^r r' dr' \int_{-\infty}^{-1} T_{p2}(r', z') dz' \Psi(A - \alpha(z' + 1), B) \Phi_2.
\end{aligned} \quad (30)$$

Для окружающих пород получим

$$\begin{aligned}
T_1^{(0)} = & T_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{\chi F_{i+} r^2 / J + z - 1}{2\sqrt{F_0 - r^2 / J}} \right) \Phi_1 + \frac{2}{J} \int_0^r Q(r') \operatorname{erfc} \left(\frac{\chi F_{i+} V / J + z - 1}{2\sqrt{F_0 - V / J}} \right) \Phi_2 r' dr' + \\
& + \frac{2}{J} \int_0^r \langle T_p(r', z') \rangle \Psi(C, B) \Phi_2 r' dr' + \frac{\chi}{J} \int_0^r \int_1^\infty T_{p1}(r', x') \Psi(C + x' - 1, B) dx' \Phi_2 r' dr' + \\
& + \frac{\lambda \chi \alpha^2}{J} \int_0^{r-1} \int_{-\infty}^{-1} T_{p2}(r', x') \Psi(C - \alpha(x' + 1), B) dx' \Phi_2 r' dr' + \\
& + \frac{1}{2\sqrt{\pi F_0}} \int_0^1 T_{p1}(r, x') \exp \left(-\frac{[(x' - 1) + (z - 1)]^2}{4F_0} \right) dx' - \\
& - \frac{1}{2\sqrt{\pi F_0}} \left[\int_\infty^z T_{p1}(r, x') \exp \left(-\frac{(x' - z)^2}{4F_0} \right) dx' - \int_1^z T_{p1}(r, x') \exp \left(-\frac{(x' - z)^2}{4F_0} \right) dx' \right].
\end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
T_2^{(0)} = & T_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{\chi F_{i+} r^2 / J - F}{2\sqrt{F_0 - r^2 / J}} \right) \Phi_1 + \frac{2}{J} \int_0^r Q(r') \operatorname{erfc} \left(\frac{\chi F_{i+} V / J - F}{2\sqrt{F_0 - V / J}} \right) \Phi_2 r' dr' + \\
& + \frac{2}{J} \int_0^r \langle T_p(r, z') \rangle \Psi(S, B) \Phi_2 r' dr' + \frac{\chi}{J} \int_0^r \int_0^1 T_{p1}(r', x') \Psi(S - x' + 1, B) dx' \Phi_2 r' dr' + \\
& + \frac{\lambda \chi \alpha^2}{J} \int_0^{r-1} \int_{-\infty}^{-1} T_{p2}(r', x') \Psi(S - \alpha(x' + 1), B) dx' \Phi_2 r' dr' - \\
& - \frac{\alpha}{2\sqrt{\pi F_0}} \int_{-\infty}^{-1} T_{p2}(r, x') \exp \left(-\frac{[(x' + 1) + (z + 1)]^2}{4F_0} \right) dx' +
\end{aligned} \quad (32)$$

$$+ \frac{\alpha}{2\sqrt{\pi Fo}} \left[\int_{-\infty}^z T_{p2}(r, x') \exp\left(-\frac{(x'-z)^2}{4Fo}\right) dx' - \int_{-1}^z T_{p2}(r, x') \exp\left(-\frac{(x'+z)^2}{4Fo}\right) dx' \right],$$

где $A = \chi Fi_+ V/J$, $B = Fo - V/J$, $\Phi_1 = \Phi(Fo - r^2/J)$, $\Phi_2 = \Phi(Fo - V/J)$, $V = r^2 - r'^2$,
 $\Psi(\alpha, \beta) = \left(\frac{\alpha}{\sqrt{\pi\beta}}\right) \exp(-\alpha^2/4\beta)$, $C = A+z-1$, $F = a(z+1)$, $S = A-F$,
 $\Phi(x)$ – единичная функция Хевисайда.

На рис. 4 – 5 представлены нормированные на максимальное значение температуры \tilde{T} изотермы поля начальных возмущений, рассчитанных при $T_0 = 0$, $Q(r) = 0$.

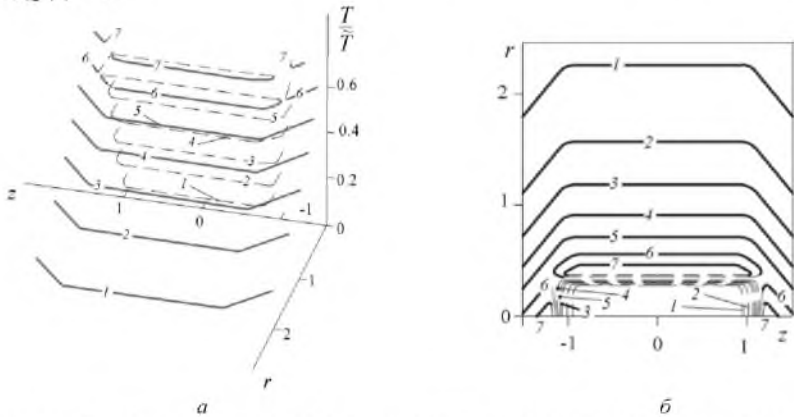


Рис. 4. Изотермы поля начальных возмущений (сплошные линии – передний фронт температурных возмущений, штриховые – задний фронт) при $Fo = 0.04$: 1 – $T/\tilde{T} = 0.1$; 2 – 0.2; 3 – 0.3; 4 – 0.4; 5 – 0.5; 6 – 0.6; 7 – 0.7

Рисунки дают представление о динамике пространственных изменений поля, вызванных предшествующими закачке кислоты технологическими процессами, представленными в рассматриваемой модели начальными возмущениями температуры. В расчетах приняты следующие параметры: $\alpha = 1$, $\chi = 1$, $\lambda = 1$, $Fi_+ = 1$, $J = 30$.

На рис. 4 – 5, а изображены пространственные зависимости температуры от координат r и z , а на 4 – 5, б плоское изображение линий равной температуры того же, что и на а, температурного поля. В расчетах принято, что максимальное значение начального возмущения температуры локализовано в скважине в интервале пласта ($r = 0$, $-1 < z < 1$). Кривые для малых времен закачки $Fo = 0.004$, представленных на рис. 4, свидетельствуют о возникновении температурного «вала», продвигаемого в удаленные участки пласта. Максимальное значение температуры «вала» достигается при $r = 0.35$ и со-

ставляет 0.9 амплитуды исходного температурного возмущения. Формируется «задний температурный фронт», который на рисунках представлен штриховыми линиями.

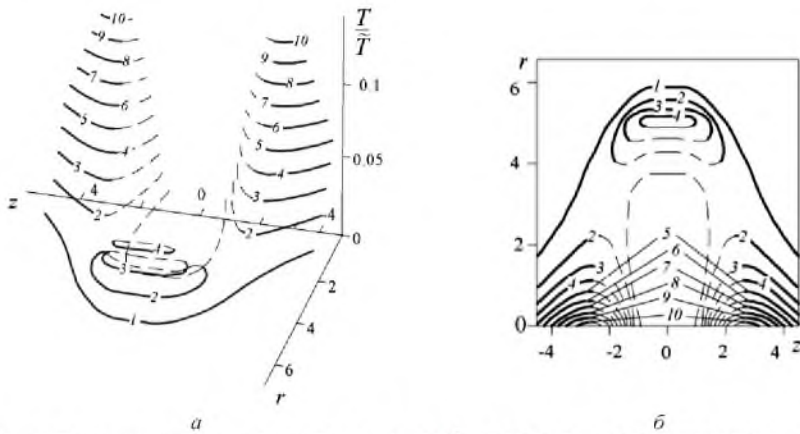


Рис. 5. То же, что и на рис. 4 при $Fo = 1$: 1 - $T/\bar{T} = 0.0125$; 2 - 0.025; 3 - 0.0375; 4 - 0.05; 5 - 0.0625; 6 - 0.075; 7 - 0.0875; 8 - 0.1; 9 - 0.1125; 10 - 0.125

Максимальные значения температуры в окружающих породах локализованы вблизи скважины $r = 0$ на расстоянии $z = 0.2$ от границы пласта. Таким образом, максимальные значения температуры в породах продвигаются вдоль скважины, удаляясь от границ пласта.

Итак, осуществлена постановка, развита модификация асимптотического метода и найдено решение задачи о температурном поле, возникающем при закачке соляной кислоты в карбонатосодержащий пласт, которое может быть использовано для расчетов температуры на этапе закачки при циклическом кислотном воздействии.

В третьей главе рассмотрена задача о температурном поле на этапе прекращения закачки кислотного раствора или выдержки химически активного реагента в карбонатосодержащем пласте. Главное отличие в постановке этой задачи от рассмотренной в главе 2 заключается в предположении, что $u_d = 0$. Как и в предшествующей задаче, учтен вклад температурных возмущений в начальный момент времени, которые определяются предыдущей историей тепловых воздействий, наследуемых с этапа закачки. Учет начальных возмущений позволяет исследовать поля температуры на этапе выдержки при циклическом кислотном воздействии.

Для построения асимптотического решения задачи с такими условиями использована развитая в предыдущей главе асимптотическая модификация. Найдены решения для температурных полей в нулевом приближении, с учетом предыдущих этапов тепловых воздействий за счет кислотной обработки

пласта. Полученные выражения могут быть широко использованы для расчетов пространственно-временных распределений температуры в периоды прекращения закачки химически активных и радиоактивных растворов в подземные горизонты.

На рис. 6 – 7 представлены нормированные на максимальное значение температуры \tilde{T} изотермы поля начальных возмущений. Рисунки дают представление о динамике пространственных изменений поля, вызванных предшествующими выдержке технологическими процессами, представленными в рассматриваемой модели начальными возмущениями температуры. На рис. 6 – 7, *a* изображены пространственные зависимости температуры от координат r и z , а на 6 – 7, *б* – плоское изображение линий равной температуры того же, что и на *a*, температурного поля.

В расчетах принято, что максимальное значение начального возмущения температуры локализовано в скважине в интервале пласта ($r = 0, -1 < z < 1$). Кривые для малых времен $Fo = 0.1$, представленные на рис. 6, свидетельствуют о том, что максимальное значение температуры составляет 0.9 амплитуды исходного температурного возмущения. Рис. 6 и 7 иллюстрируют последующее «распространение» изотерм малого относительного значения температурных возмущений и «сжатии» изотерм с высокими значениями с их последующим исчезновением.

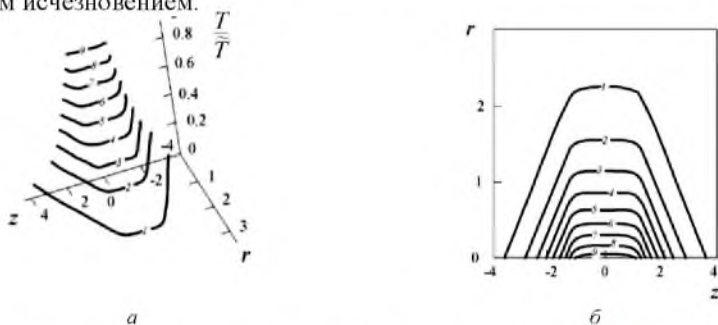


Рис. 6. Изотермы поля начальных возмущений при $Fo = 0.1$: 1 – $T/\tilde{T} = 0.1$, 2 – 0.2, 3 – 0.3, 4 – 0.4, 5 – 0.5, 6 – 0.6, 7 – 0.7, 8 – 0.8, 9 – 0.9

Построены пространственно-временные зависимости температурного поля на этапе выдержки солянокислотного раствора в карбонатосодержащем пласте, которые демонстрируют динамику температурных возмущений.

В четвертой главе рассмотрена задача о температурном поле, инициированном отбором продуктов реакции из карбонатосодержащего пласта, которая учитывает вклад начальных возмущений.

Постановка задачи отличается от постановки двух выше перечисленных температурных задач тем, что рассматривается случай движения продуктов

реакции из бесконечности к скважине т.е. $u_d < 0$. Предполагается, что соляная кислота не полностью прореагировала и при обратном токе вступает в реакцию с карбонатным скелетом, создавая дополнительные источники тепла, а температурные возмущения эволюционируют с этапа выдержки.

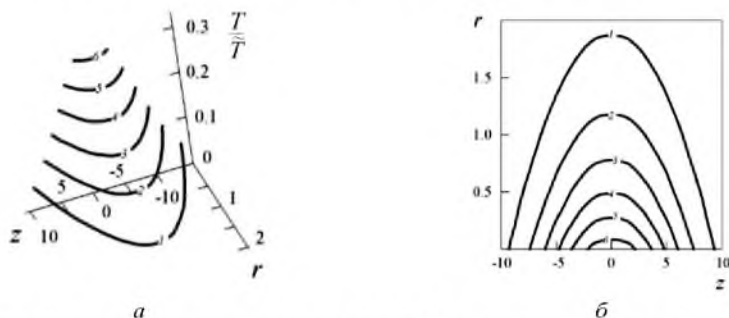


Рис. 7. То же, что и на рис. 6 при $Fo = 10$: 1 – $T/\bar{T} = 0.06$, 2 – 0.12, 3 – 0.18, 4 – 0.24, 5 – 0.30, 6 – 0.36

На основе развитого при участии автора асимптотического метода получено аналитическое решение для расчетов средней температуры в пласте и температуры в окружающих породах при отборе продуктов реакции из карбонатосодержащего пласта.

Рисунки 8 – 9 дают представление о динамике пространственных изменений поля \tilde{T} , вызванных предшествующими отбору жидкой фазы раствора кислоты с продуктами реакции технологическими процессами, представленными в рассматриваемой модели начальными возмущениями температуры.

Кривые для малых времен закачки $Fo = 0.1$, представленных на рис. 10, соответствуют начальной стадии эволюции поля, которое в некотором смысле повторяет его исходное состояние. Максимальное значение температуры достигается при $r = 0$ в интервале пласта. С увеличением времени отбора $Fo = 1$ (рис. 9) максимальные значения температуры в окружающих породах, локализованные вблизи скважины $r = 0$, наблюдаются при $z = \pm 2.02$.

Таким образом, максимальные значения температуры в породах продвигаются вдоль скважины, удаляясь от границ пласта $z = \pm 1$.

Итак, полученные приближенные решения позволяют оценивать динамику температурного поля при отборе флюида из продуктивного пласта.

Важно отметить, что несмотря на то, что решения задач в главах 2 – 4 найдены в нулевом асимптотическом приближении, полученные выражения для температурных полей являются, в отличие от известных, более общими, поскольку известные решения следуют из полученных в работе как частные случаи.

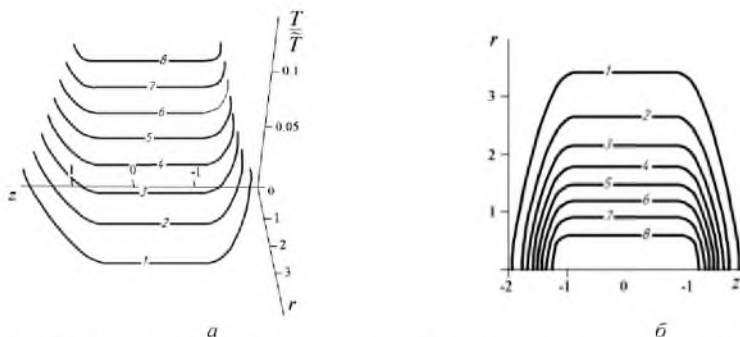


Рис. 8. Изотермы поля начальных возмущений (сплошные линии – передний фронт температурных возмущений, штриховые – задний фронт) при $Fo = 0.1$: 1 – $T/\tilde{T} = 0.017$; 2 – 0.034; 3 – 0.051; 4 – 0.068; 5 – 0.085; 6 – 0.102; 7 – 0.12; 8 – 0.137

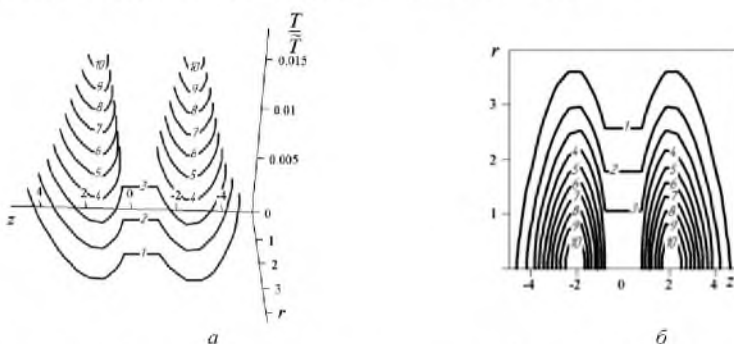


Рис. 9. То же, что и на рис. 8 при $Fo = 1$: 1 – $T/\tilde{T} = 0.0125$; 2 – 0.025; 3 – 0.0375; 4 – 0.05; 5 – 0.0625; 6 – 0.075; 7 – 0.0875; 8 – 0.1; 9 – 0.1125; 10 – 0.125

В пятой главе описаны результаты лабораторных экспериментов, выполненных на созданной автором установке (рис. 10), позволяющей фиксировать температурные поля и изменение массы за счет выделения углекислого газа в ходе химической реакции в реальном времени.

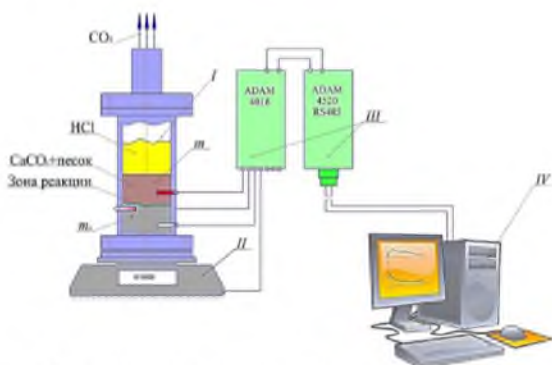


Рис. 10 Лабораторная установка: I – рабочая камера; II – лабораторные весы; III – модуль оцифровки «ADAM», IV – персональный компьютер

Для проверки развитой теории осуществлены экспериментальные исследования взаимодействия раствора соляной кислоты с пористыми структурами, содержащими известняк (рис. 11), и произведен их анализ.

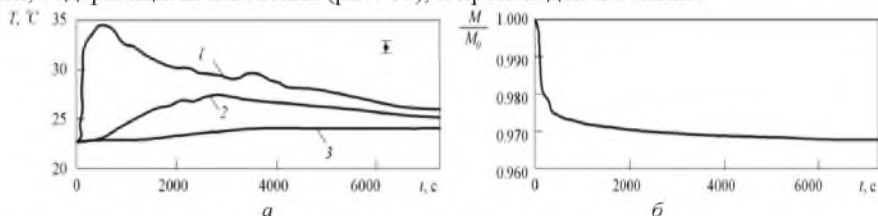


Рис. 11. Графики зависимости температуры (а), массы (б), от времени при использовании 10% раствора соляной кислоты: 1, 2, 3 – показания первой, второй и третьей термодпары соответственно

Показано, что температурные эффекты, зарегистрированные при взаимодействии 10 % и 18 % - ных растворов соляной кислоты с образцами, содержащий дисперсный мел и известняк месторождения «Шахтау», лежат в пределах $37.2 - 46.8^{\circ}\text{C}$ (рис. 11, а и б), что согласуется с теорией и является основой для широкого использования термометрии при контроле за процессом СКО. Такие температурные аномалии могут быть зарегистрированы в скважине с помощью обычных термометров, а развитая в главах 1 – 4 теория может быть успешно использована для интерпретации скважинных термограмм.

Установлено, что химическая реакция взаимодействия образцов, содержащих мел и известняк месторождения «Шахтау», с раствором соляной кислоты имеет первый порядок. С использованием этого экспериментального факта была осуществлена постановка химико-гидродинамических и температурных задач, решение которых получено в главах 1 – 4 настоящей диссертации.

Определена константа скорости химической реакции взаимодействия карбонатосодержащих образцов и соляной кислоты (рис. 12). Показано, что

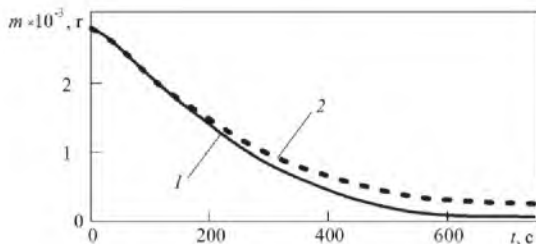


Рис. 12. График зависимости массы от времени при растворении шарообразного образца из мела в 10%-ом растворе соляной кислоты, 1 – расчетная кривая, 2 – экспериментальная кривая

для мела и известняка константа химической реакции равны $\alpha = 2.73 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и $\alpha = 5.57 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. Большой разброс данных объясняется разнообразным строением карбонатосодержащих пород, поэтому важно осуществлять подобные измерения для пластовых пород, извлечённых из скважин, в которых планируется проведение обработки ПЗП.

Полученные значение порядка и констант химической реакции также использованы при проведении расчетов в выражениях для плотности источников химической реакции и тепловыделения, представленных в предшествующих главах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Научные материалы, изложенные в диссертации, представляют собой единую теорию полей температуры и плотности при кислотном воздействии на пласт, а рассмотренная модификация асимптотического метода является достаточно общей и обеспечивает построение «точного в среднем» аналитического решения задач подземной термо- и гидродинамики.

Основные результаты и выводы работы.

1. Построена математическая модель, описывающая взаимосвязанные поля температуры и концентрации раствора кислоты, текущей по проницаемому карбонатосодержащему пласту, окруженному непроницаемой средой с учетом предыдущих изменений плотности кислоты пористости и температуры.

2. Произведен анализ физических процессов, происходящих при воздействии кислоты в карбонатосодержащий пласт, осуществлена математическая постановка задачи о температурных процессах при кислотном воздействии с учетом теплоты химических реакций применительно к проницаемым пластам с учетом предшествующих этапов закачки и циклов. Найдены аналитические решения нелинейных задач химической кинетики, возникающих при кислотной обработке пористых пластов. Получены зависимости плотности кислоты от начальной пористости среды, плотности кислоты от времени и коэффициента скорости реакции, пористости от времени и плотности кислоты. Определены время подхода фронта кислоты к данной точке коллектора и время возникновения заднего фронта реакции. Установлена немонотонная зави-

симость размеров зоны реакции от положения переднего фронта. На основании найденных выражений для положения зон реакции и времени запаздывания, осуществлены расчеты, построены графические зависимости и дан анализ пространственно-временных изменений размеров зоны реакции с учетом многостадийности и цикличности.

3. Построены функции плотностей источников тепла химических реакций, входящих в уравнение энергии, описывающее кислотное воздействие на карбонатосодержащий пласт с учетом этапности и цикличности.

4. Разработана модификация асимптотического метода, позволяющая получить приближенные аналитические решения задач скважинной теплофизики с ненулевыми начальными условиями, такие, что нулевое асимптотическое приближение совпадает с решением задачи, осредненной по толщине пласта. Показано, что для получения такого решения в задаче о температурном поле в скважине, достаточно потребовать, чтобы решение осредненной задачи для остаточного члена нулевого коэффициента асимптотического разложения обращалось в ноль. Использование следующего отсюда модифицированного граничного условия, заключающегося в том, что начальные значения температуры в интервале пласта совпадают с интегральными средними, обеспечивает построение точного в среднем асимптотического решения задачи о температурном поле в пористом пласте с различными источниками и ненулевыми начальными условиями.

6. На основе полученных решений создана диалоговая программа, позволяющая прогнозировать результаты кислотного воздействия и возникающие при этом температурные поля в пласте и окружающих породах.

7. Для более глубокого изучения физических процессов, протекающих при взаимодействии соляной кислоты с карбонатной породой, собрана экспериментальная установка. Определены кинетические параметры протекания химической реакции, в частности порядок и константа скорости химической реакции. Анализ полученных данных использован при решении химико-гидродинамических задач и описании плотности источников химической реакции. Получены экспериментальные зависимости температуры и убыли массы от времени, характеризующие температурные аномалии при взаимодействии соляной кислоты с карбонатосодержащими образцами.

8. Сопоставление расчетных теоретических зависимостей с результатами экспериментальных исследований показывает их хорошее согласование. Анализ расчетов позволяет заключить, что нулевое приближение описывает величину температурных эффектов в пластах с точностью, достаточной в большинстве практических расчетов.

9. На основе разработанной теории и анализа лабораторных экспериментальных кривых показано, что использование термометрии позволяет оценивать эффективность СКО ПЗП. Полученные результаты открывают новые

перспективы совершенствования технологии воздействия и контроля за процессом кислотной обработки на основе измерения температуры.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus

1. Kabirov I.F. Heat conduction and heat transfer in technological processes problem on the temperature field in an anisotropic bed with sources in the presence of convection / A.I. Filippov, O.V. Akhmetova, I.F. Kabirov // Journal of engineering physics and Thermophysics. – 2012. – Volume 4. – Issue 6. – pp. 802 – 815.

Кабилов И.Ф. Задача о температурном поле в анизотропном слое с источниками при наличии конвекции / А.И. Филиппов, О.В. Ахметова, И.Ф. Кабилов // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т.85. – №4. – С.738 – 753.

2. Kabirov I.F. Account of the number of stages and of cyclicality in the problem on acidic stimulation of an oil-bearing stratum / A.I. Filippov, I.F. Kabirov, A.R. Karimov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Volume 88. – Issue 6. – pp. 848 – 857.

Кабилов И.Ф. Учет этапности и цикличности в задаче о кислотном воздействии на нефтяной пласт / А.И. Филиппов, И.Ф. Кабилов, А.Р. Каримов // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т.88. – №4. – С.767 – 773.

3. Kabirov I.F. asymptotic representation of the temperature field in injection stages during the cyclic acidizing of the formation / A. I. Filippov, O. V. Akhmetova, A. A. Kovalski, and I. F. Kabirov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2016. – Volume 89. – Issue 6. – pp. 1426–1437.

Кабилов И.Ф. Асимптотическое представление температурного поля на стадиях закачки при циклической кислотной обработке пласта / А.И. Филиппов, О.В. Ахметова, А.А. Ковальский, И.Ф. Кабилов // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т.89. – №6. – С.738 – 752.

4. Kabirov I. V. The temperature field of heat sources in the anisotropic, inhomogeneous layer of a liquid / A. I. Filippov, O. V. Akhmetova and I. F. Kabirov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2013. – Volume 54. – No. 7. – pp. 637 – 649.

Кабилов И.Ф. Температурное поле источников тепла при закачке жидкости в анизотропный неоднородный пласт / А.И. Филиппов, О.В. Ахметова, И.Ф. Кабилов // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т.54. №6. – С.95 – 111.

Статьи, входящие в перечень ВАК

5. Кабилов И.Ф. Задача о квазистационарном температурном поле в анизотропном поле слое с источниками и при наличии конвекции / А.И. Филиппов, О.В. Ахметова, И.Ф. Кабилов, // Научно – технический вестник Поволжья. – 2011. – №5. – С.9 –22.

6. Кабилов И.Ф. Теплообмен при отборе химически активного или радиоактивного флюида из продуктивного пласта / А.И. Филиппов, О.В. Ахметова, И.Ф. Кабилов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2017 – Т.3. №1. – С.58 – 78.

7. Кабилов И.Ф. Температурное поле пласта после прекращения фильтрации тепловыделяющего раствора / А.И. Филиппов, О.В. Ахметова, И.Ф. Кабилов // Прикладная физика и математика. – 2017. – № 4. – С.38 – 58.

8. Кабиров И.Ф. Поле пористости карбонатного пласта на этапе выдержки при циклическом кислотном воздействии / А.И. Филиппов, А.А. Ковальский, И.Ф. Кабиров // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2018. – № 3. – С.74 – 80.

Тезисы конференций

9. Кабиров И.Ф. Серия опытов взаимодействия соляной кислоты с карбонатосодержащим шарообразным образцом // Интеллектуальный потенциал XXI века: тезисы докл. II Международная студенческая научно-практическая конференция «Интеллектуальный потенциал XXI века» (Новосибирск, 2010 г.). – Новосибирск, 2010 - С.185 – 188.

10. Кабиров И.Ф. Установка для проведения серии опытов по изучению температурных полей в карбонатосодержащих породах// Наука и современность: тезисы докл. X Международная студенческая научно-практическая конференция (Новосибирск, 11.04.2011 г.). – Новосибирск, 2011 - С.45 – 47.

11. Кабиров И.Ф. Асимптотическое решение задачи о температурном поле на стадии отбора при циклической обработке пласта кислотой // Современные проблемы математической физики и вычислительной математики: тезисы докл. Международная конференция (Москва, 31.1 – 3.11. 2016 г.). – Москва, 2016 – С.175.

12. Кабиров И.Ф. Исследование температурного поля на стадии закачки при циклической обработке пласта кислотой // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, 23.05 – 26.05. 2016 г.). – Минск, 2016 – С.443 – 447

13. Кабиров И.Ф. Поле пористости карбонатного пласта на этапе выдержки при циклическом кислотном воздействии // Физика конденсированного состояния и ее приложения: тезисы докл. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции (Стерлитамак, 13.09 – 15.09. 2018 г.). – Стерлитамак, 2018 – С.63 – 67