

На правах рукописи



Шагиева Файруза Ингелевна

**ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ  
ИНЖЕКЦИИ ГАЗА В НАСЫЩЕННУЮ ЛЬДОМ (ПАРАФИНОМ)  
ПОРИСТУЮ СРЕДУ И ПРИ ТЕЧЕНИИ ПАРА В КАНАЛЕ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

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

Тюмень 2011

Работа выполнена на кафедре математического анализа и прикладной математики ГОУ ВПО «Бирской государственной социально-педагогической академии»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Шагапов Владислав Шайхулагулович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кислицын Анатолий Александрович  
  
кандидат физико-математических наук  
Киреев Виктор Николаевич

Ведущая организация: Институт механики и машиностроения  
Казанского ИЦ РАН

Защита состоится «24» июня 2011 г. в 16<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан «21» мая 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук, доцент



Мусакаев Н.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Поведение пористых сред, насыщенных многофазными средами, при внешнем воздействии (тепловом, электромагнитном, акустическом и др.) и происходящие вследствие этого процессы представляют как теоретический, так и практический интерес. Большое внимание к данной теме связано не только с освоением нетрадиционных источников природных энергоресурсов, но и с проблемами очистки пористых катализаторов от склеротических бляшек, образовавшихся вследствие отложений твердой фазы.

Для создания научных основ технологий эффективной очистки катализаторов от отложений твердой фазы, выявления особенностей процессов термической обработки пористых материалов и прогнозирования возможных последствий нарушения технологических параметров необходимо построение адекватных математических моделей, расширяющих теоретические представления об особенностях теплофизических и гидродинамических процессов в таких системах, что определило **цель настоящей работы**:

- исследование теплофизических и гидродинамических процессов, возникающих при инъекции теплоносителя (газ или пар) в проницаемые пористые среды, частично насыщенные твердой составляющей, претерпевающей фазовый переход, а также анализ влияния давления нагнетания, температур, проницаемости и других параметров на динамику процесса;
- математическое моделирование процесса течения пара в трубчатом канале, сопровождаемого конденсацией на его стенках;
- изучение влияния исходного концентрационного состава бинарной смеси на динамику процесса ректификации.

**Научная новизна** заключается в следующем.

- Впервые в автомодельной постановке получены решения задач для гидродинамических и тепловых полей при закачивании газа и пара в пористые среды, частично насыщенные твердой составляющей, претерпевающей фазовый переход, с учетом массового содержания воды в насыщенном паре.

- Для задачи инъекции насыщенного пара в пористую структуру получено аналитическое решение в гомобарическом приближении для ближней зоны. Установлено, что наиболее эффективным режимом для более интенсивного плавления твердой фазы является нагнетание в пористую среду «чистого» пара.

- Разработана теоретическая модель течения водяного пара через вертикальный трубчатый канал, охлаждаемый извне. Изучено влияние геометрических параметров канала, массового расхода пара и температуры внешней охлаждающей среды на интенсивность конденсации пара в трубке.

**Достоверность** результатов диссертации обеспечивается соблюдением фундаментальных принципов механики сплошной среды и условий применимости ее законов. Все полученные результаты объяснены с позиций механики сплошной среды и согласуются с результатами работ других авторов, близких по содержанию к данной работе.

**Практическая ценность.** Полученные в диссертации результаты имеют широкий спектр приложений в практике и могут быть использованы при разработке теоретических основ высокоэффективных технологий добычи битумных и высоковязких нефтей, а также в различных технологических процессах, связанных с очисткой от склеротических бляшек с применением закачки пара в насыщенные пористые среды.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях и научных школах:

- IV, VI, VII Всероссийская научно-практическая конференция «ЭВТ в обучении и моделировании» (Бирск, 2005 г., 2007 г., 2009 г.);
- Российская научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2006 г., 2011 г.);
- IX Всероссийский теоретический съезд по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006 г.);
- VI Региональная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике, физике и химии (Уфа, 2006 г.);
- XIII, XIV и XV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Ростов-на-Дону, 2007 г., Уфа, 2008 г., Кемерово-Томск, 2009 г.);
- Всероссийская конференция «Механика и химическая физика сплошных сред» (Бирск, 2007 г.);
- Всероссийская школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (Уфа, 2007 г.);

- Всероссийская научно-практическая конференция «Обратные задачи в приложениях» (Бирск, 2008 г.);
- Научная конференция аспирантов и студентов (Бирск, 2009 г.);
- Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (Кемерово, 2010 г.);
- Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Бирск, 2010 г.);
- Российская конференция «Многофазные системы: природа, технологии, общество», посвященная 70-летию академика Р.И. Нигматулина (Уфа, 2010 г.).

Кроме того, результаты диссертационной работы регулярно докладывались на семинарах Проблемной лаборатории математического моделирования и механики сплошных сред под руководством профессоров С.М. Усманова и В.Ш. Шагапова.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, в том числе одна из них в журнале, рекомендованном ВАК РФ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 109 страниц, в том числе 26 рисунков. Список литературы состоит из 117 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований. Сформулирована цель и кратко изложена структура диссертации.

В **первой** главе представлен анализ теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию теплофизических и гидродинамических процессов в пористых средах и многофазным течениям в каналах. Также приведен обзор существующих численных и аналитических моделей процесса воздействия паром на насыщенные пористые среды.

Во **второй** главе рассмотрены численные модели инъекции теплоносителя в пористую среду. Рассмотрены задачи нагнетания нагретого газа в пласт, насыщенный газом и льдом, и инъекции насыщенного пара в пористую среду, изначально заполненную газом и парафином. Предложены упрощенные модели, описывающие процессы тепло- и массопереноса. Исследовано влияние параметров, определяющих начальное состояние пористой среды, давления нагнетания, температуры и влагосодержания пара на темп

распространения гидродинамических и температурных полей в пористой среде. Проанализированы полученные автомодельные решения в зависимости от начальных и граничных условий, а также от параметров, определяющих свойства пористой среды.

В п.2.1 рассмотрена задача о фронтальном плавлении льда в пористой среде при закачке теплого газа. При постановке задачи о фронтальном плавлении льда полагалось, что в начальный момент времени пористый пласт насыщен газом и льдом, при давлении  $p_0$  и температуре  $T_0$ . Через границу пласта закачивается теплый газ при давлении  $p_e$  и температуре  $T_e$  (рис.1).

Основные уравнения для данной задачи – уравнения сохранения массы, закон Дарси, уравнения состояния газа и притока тепла (без учета баротермического эффекта) – имеют вид:

$$\begin{aligned}
 mS_{g(i)} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (mS_{g(i)} \rho_g v_{g(i)}) &= 0, \\
 \frac{\partial}{\partial t} (mS_l \rho_l) &= 0, \\
 mS_{g(i)} v_{g(i)} &= -\frac{k_{g(i)}}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad p = \rho_g R_g T, \\
 \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_g mS_{g(i)} v_{g(i)} \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \\
 \rho c &= (1-m)\rho_{sk} c_{sk} + m \sum_{j=g,l,a} S_j \rho_j c_j, \quad \lambda = (1-m)\lambda_{sk} + m \sum_{j=g,l,a} S_j \lambda_j.
 \end{aligned} \tag{1}$$

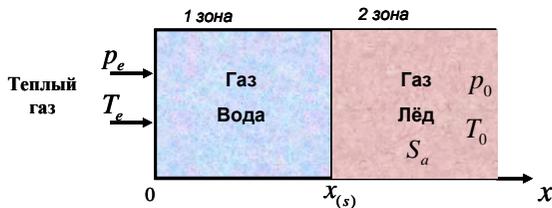


Рис.1. Схема инжекции теплого газа в пористую среду, насыщенную газом и льдом.

Здесь  $m$  – пористость,  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $\rho_j$ ,  $c_j$  и  $\lambda_j$  ( $j = sk, a, l, g$ ) – истинная плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности  $j$ -й фазы,  $S_j$  ( $j = a, l, g$ ) – насыщенность пор  $j$ -й фазой,  $v_g$ ,  $k_g$  и  $\mu_g$  – скорость, проницаемость и динамическая вязкость для

газовой фазы,  $\rho c$  и  $\lambda$  – удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы. Нижние индексы  $g$ ,  $l$ ,  $a$  и  $sk$  относятся к параметрам газа, воды, льда и скелета пористой среды соответственно.

Зависимость коэффициента проницаемости для газа  $k_g$  от газонасыщенности  $S_g$  задана на основе формулы Козени:

$$k_g = k_* \frac{(mS_g)^3}{(1 - mS_g)^2} \approx k_0 S_g^3 \quad (2)$$

где  $k_0$  – соответствует проницаемости «чистого скелета».

На границе ближней и дальней областей должны выполняться условия баланса массы и тепла:

$$\begin{aligned} \rho_l m S_l (v_l - \dot{x}_{(s)}) &= \rho_a m S_a (v_a - \dot{x}_{(s)}), \\ \rho_{g(1)} m S_{g(1)} (v_{g(1)} - \dot{x}_{(s)}) &= \rho_{g(2)} m S_{g(2)} (v_{g(2)} - \dot{x}_{(s)}), \\ -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)^- + \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)^+ &= m \rho_a l_a S_a \dot{x}_{(s)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\dot{x}_{(s)}$  – скорость движения этой границы,  $l_a$  – удельная теплота плавления льда.

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} t = 0: \quad S_a &= S_{a0} \quad (S_g = 1 - S_{a0}), \quad T = T_0, \quad p = p_0 \quad (x \geq 0), \\ x = 0: \quad T &= T_e, \quad p = p_e \quad (t > 0). \end{aligned} \quad (4)$$

Сформулированная задача имеет автомодельное решение. Автомодельная и безразмерные переменные введены в виде:

$$\xi = x / \sqrt{\aleph^{(T)} t} \quad \aleph^{(T)} = \lambda / \rho c, \quad P = p / p_0, \quad \theta = T / T_0, \quad (5)$$

где  $\aleph^{(T)}$  – температуропроводность пласта.

На рис. 2 приведены распределения давления – (а), (в) и температуры – (б), (г) в зависимости от автомодельной координаты при различных давлениях нагнетаемого газа. В исходном состоянии пористая среда с коэффициентом абсолютной проницаемости  $k_0 = 10^{-12} \text{ м}^2$  находится при давлении  $p_0 = 0.1$  МПа и температуре  $T_0 = 270$  К, льдонасыщенность  $S_a = 0.5$ . Линии 1, 2 и 3 для (а) и (б) получены при давлениях нагнетаемого газа  $p_e = 0.2, 3$  и 5 МПа, для (в) и (г) при  $p_e = 0.2, 5$  и 10 МПа, температура газа  $T_e = 285$  К. Справа от (а) и (б) приведены растянутые по координате фрагменты картин ближней и дальней областей пористой среды.

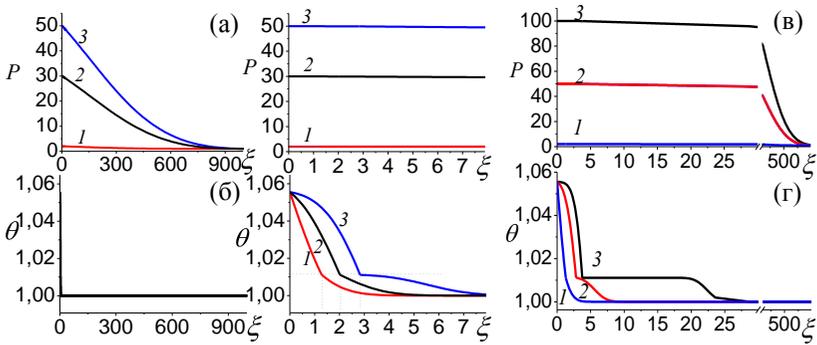


Рис.2. Распределения давления – (а), (в) и температуры – (б), (г) в пласте при различных значениях давления  $p_e$  нагнетаемого газа:

(а), (б) 1 – 0.2 МПа; 2 – 3 МПа; 3 – 5 МПа;  
 (в), (г) 1 – 0.2 МПа; 2 – 5 МПа; 3 – 10 МПа.

Из рис.2 в, г видно, что при более высоких давлениях большую роль играет конвективный перенос тепла (теплопроводностью можно пренебречь). Температура уменьшается до температуры плавления льда практически скачком за счет затрат тепла на плавление. Резкий перепад на переднем фронте объясняется тем, что происходит поршневое выталкивание того газа, который находился в пористой среде.

На рис.3 показано влияние давления  $p_e$  (а) и температуры  $T_e$  (б) на положение подвижной границы. Из представленных графиков видно, что с ростом давления и температуры нагнетания плавление льда происходит быстрее.

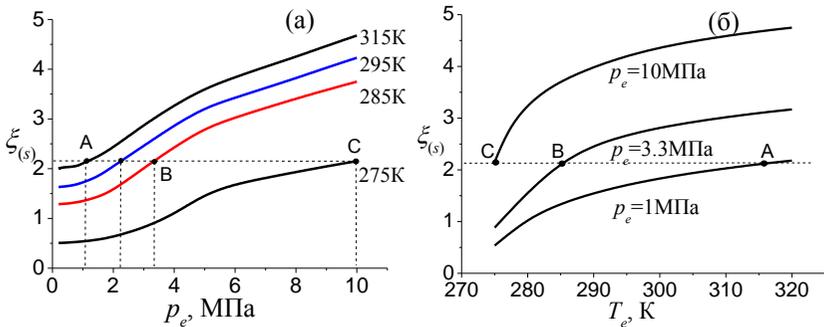


Рис.3. Положение фронта плавления льда в зависимости от давления  $p_e$  и температуры  $T_e$  нагнетаемого газа.

В п.2.2 рассмотрена задача об инъекции насыщенного пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином. Пар может содействовать влагу в виде мелких капелек (тумана).

В исходном состоянии полубесконечный пористый пласт является однородным с температурой  $T_0$  и давлением  $p_0$ . В момент времени  $t > 0$  через левую границу пласта ( $x = 0$ ) производится закачка влажного пара с температурой  $T_e$  и массовым содержанием воды  $\varphi$  при постоянном давлении  $p_e > p_0$  (рис.4).

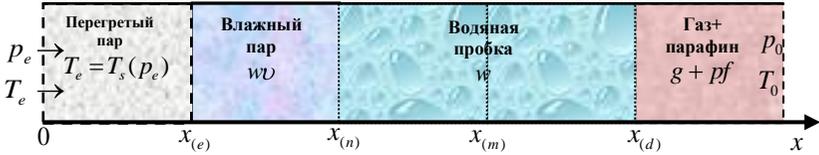


Рис.4. Схема нагнетания пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином.

В ближней и дальней зонах принята гипотеза гомобаричности, когда гидравлическим сопротивлением в дальней и ближней зонах можно пренебречь, тем самым интенсивность закачки влажного пара будет лимитироваться гидравлическим сопротивлением образовавшейся водяной пробки.

Основные уравнения, описывающие процесс нагнетания влажного пара в пористую среду, имеют вид:

$$\frac{\partial(m\rho_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m\rho_i v_i) = 0; \quad (i = w\omega, w, g, p), \quad (6)$$

$$m v_i = -\frac{k}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (i = w\omega, w, g), \quad (7)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_w m v_w \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + m \rho_w l_w \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} + v_w \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right), \quad (8)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_w m v_w \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (9)$$

$$\rho = m_s(1-\nu)\rho_w + (1-m_s)\rho_s + m_s \nu \rho_p, \quad \lambda = m_s(1-\nu)\lambda_w + m_s \nu \lambda_p + (1-m)\lambda_s,$$

$$\rho c = m_s(1-\nu)\rho_w c_w + (1-m_s)\rho_s c_s + m_s \nu \rho_p c_p,$$

где  $\rho_i$ ,  $\mu_i$  и  $v_i$  ( $i = w\omega, w, g, s, p$ ) – соответственно плотность, динамическая вязкость и скорость  $i$ -й фазы,  $c_i$  и  $\lambda_i$  ( $i = w\omega, w, g, p$ ) – удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности  $i$ -й фазы,  $k$  –

коэффициент абсолютной проницаемости,  $\rho c$  – удельно-объемная теплоемкость системы «пористая среда-пар, вода или газ»,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности системы «пористая среда-вода или газ»,  $l_w$  – удельная теплота фазового перехода воды в пар. Здесь нижние индексы  $w, u, w, g, s, p$  относятся к параметрам влажного пара, воды, газа, пористого скелета и парафина, соответственно. Будем полагать, что  $\rho c \approx \rho_s c_s = \text{const}$ ,  $\lambda \approx \lambda_s = \text{const}$ .

Данная задача имеет автомодельное решение. Безразмерные давление, температура и автомодельная переменная имеют вид:

$$P = \frac{p - p_0}{p_e - p_0}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_e - T_0}, \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{k^{(T)}t}}, \quad (10)$$

где  $k^{(T)}$  – коэффициент температуропроводности системы.

В автомодельных переменных построены аналитические решения, описывающие распределения температуры и давления в пласте:

$$P = \frac{\xi_{(d)} - \xi}{\xi_{(d)} - \xi_{(n)}}, \quad \xi_{(n)} < \xi < \xi_{(d)}$$

$$\theta = 1 + (\theta_p - 1) \int_{\xi_{(n)}}^{\xi} Ed\xi \Big/ \int_{\xi_{(n)}}^{\xi_{(m)}} Ed\xi, \quad \xi_{(n)} \leq \xi \leq \xi_{(m)}, \quad (11)$$

$$\theta = \theta_p \left( 1 - \int_{\xi_{(m)}}^{\xi} Ed\xi \Big/ \int_{\xi_{(m)}}^{\xi_{(d)}} Ed\xi \right), \quad \xi_{(m)} \leq \xi \leq \xi_{(d)}$$

где  $E(\xi) = e^{-(\xi - \alpha\xi_{(d)})^2}$ .

В работе в автомодельной постановке решается система трансцендентных уравнений для трех автомодельных координат границ  $\xi_{(n)}$ ,  $\xi_{(m)}$  и  $\xi_{(d)}$ , по значениям которых полностью определяются поля давления и температур:

$$\frac{Pe}{\xi_{(d)} - \xi_{(n)}} = 2\xi_{(d)}, \quad (12)$$

$$(1 - \theta_p) \frac{e^{-(\xi - \alpha\xi_{(m)})^2}}{\int_{\xi_{(n)}}^{\xi_{(m)}} e^{-(\xi - \alpha\xi_{(d)})^2} d\xi} - \theta_p \frac{e^{-(\xi - \alpha\xi_{(m)})^2}}{\int_{\xi_{(m)}}^{\xi_{(d)}} e^{-(\xi - \alpha\xi_{(d)})^2} d\xi} = 2 \frac{mv\tilde{\rho}_p}{Ja_p} \xi_m, \quad (13)$$

$$-(1-\theta_p) \frac{e^{-\left(\xi-\alpha\xi_{(m)}\right)^2}}{\int_{\xi_{(n)}}^{\xi_{(m)}} e^{-\left(\xi-\alpha\xi_{(d)}\right)^2} d\xi} = 2 \frac{m\tilde{\rho}_w(1-\varphi)}{Ja_w} (\xi_{(n)} - \xi_{(d)}), \quad (14)$$

где  $Pe = \frac{k\Delta P}{m\mu_w k^{(T)}}$ ,  $\alpha = \frac{m\rho_w c_w}{\rho c}$ .

На рис. 5а сплошными линиями представлены распределения безразмерных давления и температуры в зависимости от автомодельной координаты при объемной парафинонасыщенности  $\nu = 0.5$  для различных давлений на границе  $x = 0$ , определяющих интенсивность закачки. Штриховые линии получены без учета тепловых затрат на расплавление парафина. Для коэффициента проницаемости среды принято значение  $k = 10^{-14} \text{ м}^2$ .

Из представленных графиков видно, что с ростом давления на границе растет температура и протяженность прогретой зоны. Из анализа графиков также следует, что перепад температуры реализуется в тонком слое в зоне фильтрации жидкости, вблизи границы фазовых переходов ( $\xi = \xi_{(d)}$ ).

На рис. 5б иллюстрируется влияние содержания парафина в пористой среде на распределения давления и температуры в зависимости от автомодельной координаты. Видно, что с увеличением парафинонасыщенности  $\nu$  вследствие повышения тепловых затрат на расплавление парафина протяженность прогретой зоны уменьшается.

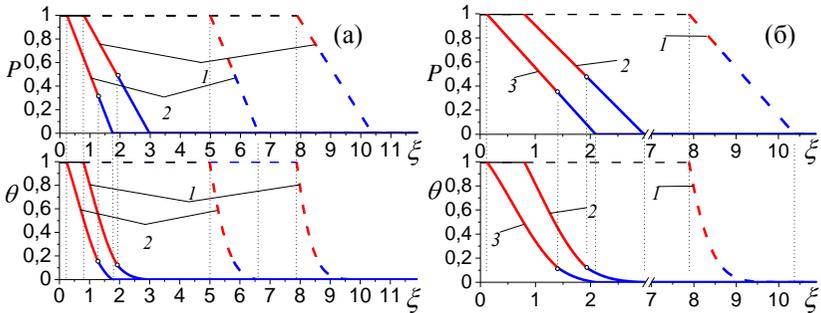


Рис.5. Зависимости давления и температуры от автомодельной координаты.

(а) – при различных значениях давления и температуры нагнетания:

1 –  $p_e = 2.3 \text{ МПа}$ ,  $T_e = 493 \text{ К}$ , 2 –  $p_e = 1 \text{ МПа}$ ,  $T_e = 451 \text{ К}$ ;

(б) – при различных значениях парафинонасыщенности:

1 –  $\nu = 0$ , 2 –  $0.5$ , 3 –  $0.9$ .

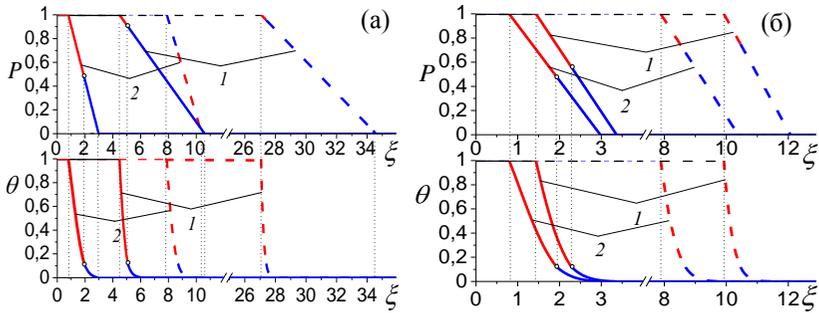


Рис.6. Зависимости давления и температуры от автомодельной координаты.  
 (а) – при различных значениях коэффициента проницаемости пористой среды:  
 $1 - k = 10^{-13} \text{ м}^2$ ,  $2 - 10^{-14} \text{ м}^2$ ;  
 (б) – при различных массовых содержаниях жидкости в закачиваемом паре:  
 $1 - \varphi = 0.5$ ,  $2 - 0.75$ .

На рис.6а показано влияние проницаемости пористой среды на гидродинамические и температурные поля в пористой среде. Штриховые линии получены без учета тепловых затрат на расплавление парафина. Видно, что с уменьшением коэффициента проницаемости характерная толщина слоя, в котором реализуется температурный перепад, растет и постепенно приближается к толщине зоны фильтрации воды. Абсолютная толщина слоя жидкостной пробки, образующейся за счет конденсации влажного пара, с увеличением коэффициента проницаемости пористой среды также растет.

На рис. 6б представлены распределения давления и температуры от автомодельной координаты при различных значениях влажности закачиваемого пара. С ростом влагосодержания закачиваемого пара при фиксированном значении граничного давления снижается темп проникания теплоносителя в пористую среду. Это обстоятельство связано с ростом гидравлического сопротивления при движении влажного пара из-за существенного утолщения водяной пробки за счет большей конденсации закачиваемого пара.

В **третьей** главе приведена математическая модель, описывающая гидродинамические и теплофизические процессы при прохождении пара через вертикальный трубчатый канал, охлаждаемый извне. Результаты расчетов на основе данной модели могут быть применены для нахождения оптимальных режимов (обеспечивающих полную конденсацию пара) функционирования исследуемых реакторов.

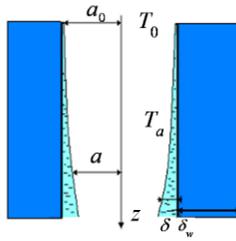


Рис.7. Схема течения пара в канале, сопровождаемого его конденсацией.

Для удобства выбран цилиндрический канал длины  $z$  радиуса  $a_0$  расположенный вертикально. Внешняя поверхность канала охлаждается жидкостью с температурой  $T_w$ . В процессе движения пара вдоль трубы с исходной температурой  $T_0$  происходит конденсация пара на стенке этого канала за счет разницы температур пара и стенки канала (рис.7).

Для описания движения пара в трубчатом канале, сопровождаемого конденсацией на его стенках, используем следующие уравнения.

Уравнение сохранения массовых расходов для пара и тонкой пленки жидкости:

$$\frac{dm_v}{dz} = -2\pi a j, \quad (15)$$

$$\frac{dm_l}{dz} = 2\pi a j, \quad (16)$$

где  $m_v$  и  $m_l$  – массовые расходы пара и жидкости,  $j$  – интенсивность конденсации пара, отнесенная на единицу поверхности пленки,  $a$  – живой радиус канала.

Уравнение импульсов для пара и тонкой пленки жидкости:

$$m_v \frac{dw_v}{dz} = -S \frac{dP}{dz} + \rho_v^0 g S - 2\pi a \tau + \frac{dm_v}{dz} (w_{v_0} - w_v), \quad (17)$$

$$m_l \frac{dw_l}{dz} = -(S_0 - S) \frac{dP}{dz} + \rho_l^0 g (S_0 - S) + 2\pi a \tau - \frac{dm_l}{dz} (w_{l_0} - w_l) - 2\pi a_0 \tau_w, \quad (18)$$

где  $w_v$ ,  $w_l$  – соответственно скорости движения пара и воды,  $S$  и  $S_0$  – площади поперечных сечений канала с учетом толщины конденсата и площадь сечения самого канала,  $\rho_v^0$  и  $\rho_l^0$  – плотности пара и жидкости,  $P$  – давление в трубе,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\tau$  и  $\tau_w$  –

касательные напряжения на поверхности пленки и между конденсатом и стенкой канала.

Уравнение теплопроводности для пара:

$$m_v c_v \frac{dT}{dz} = \frac{m_v}{\rho_v^0} \frac{dP}{dz} - \frac{dm_v}{dz} c_v (T - T_a) - 2\pi a q^-, \quad (19)$$

где  $c_v$  – удельная теплоемкость пара,  $T_a$  – температура поверхности конденсата.

На поверхности конденсата примем условие теплового баланса:

$$jl = -q^- + q^+. \quad (20)$$

Здесь  $q^+$  и  $q^-$  – интенсивность тепловых потоков от конденсата к стенке канала и от пара к конденсату соответственно:

$$q^+ = \frac{T_a - T_w}{\frac{\delta}{\lambda_l} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_w}{\lambda_l}}, \quad q^- = \frac{\lambda_v \text{Nu}_v}{2a} (T - T_a), \quad (21)$$

$$\delta_w = \frac{z_w}{\text{Nu}_{sr}}, \quad \text{Nu}_{sr} = 0.726(\text{Pr}_w \cdot \text{Gr})^{1/4}, \quad \text{Gr} = g z_w^3 (T_a - T_w) \frac{\beta}{\nu_l^2},$$

где  $\delta_w$  и  $z_w$  – толщина и длина внешнего слоя воды, предназначенной для охлаждения канала,  $\beta$  – коэффициент теплового расширения.

Температуру на поверхности конденсата будем считать равной равновесной температуре  $T(p)$ :

$$T_a = T(p) = T_* \ln^{-1} \left( \frac{P_*}{P} \right).$$

На основе полученных уравнений, задавая условия на входе ( $z = 0$ )

$$m_v = m_{v,0}, \quad m_l = 0 \quad (w_l = 0), \quad P = P_0, \quad T = T_0, \quad a = a_0,$$

решаем задачу Коши и в результате находим распределения гидродинамических и теплофизических параметров вдоль реактора и на выходе из реактора ( $z = z_e$ ).

На рис. 8. представлена зависимость интенсивности охлаждения пара и скоростей пара и конденсата от радиуса канала, а также наличия рифления внешней части трубы. Расчеты производились для трубчатого канала с толщиной стенок 1мм, закачиваемый пар находится при температуре  $T_0 = 373\text{K}$  и давлении  $P_0 = 0.1\text{МПа}$ , температура охлаждающей канал воды  $T_w = 283\text{K}$ .

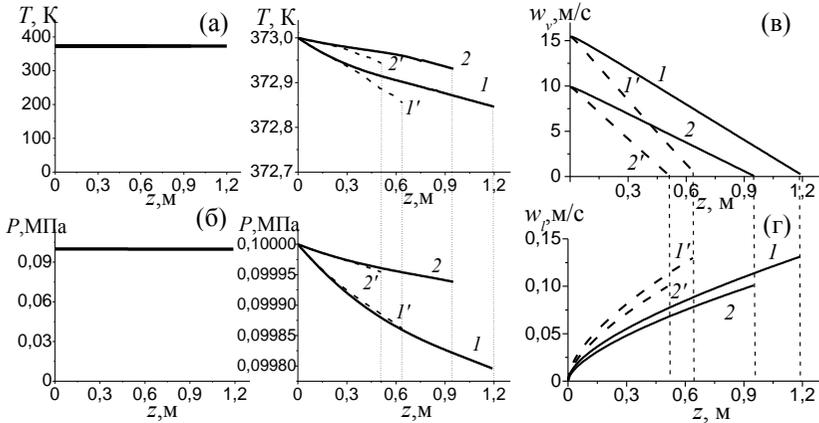


Рис.8. Изменение температуры (а) и давления (б) пара, скорости пара (в) и скорости конденсата (г) вдоль трубы длиной  $z$  при массовом расходе пара  $m_{\text{п,0}} = 0.45 \text{ г/с}$ . Линии 1 и 2 соответствуют радиусу канала в 4 и 5 мм. Пунктирные линии получены с учетом внешней рифлености трубы.

Из представленных графиков на рис.8 видно, что перепады температуры и давления пара по длине канала незначительны. Если внешняя поверхность трубки сделана рифленой, то в этом случае конденсация пара происходит быстрее.

В случае металлической трубки теплопередача в основном лимитируется тепловым сопротивлением охлаждающей жидкости. Тепловое сопротивление этой жидкости определяется эффектами конвекции. Поэтому в процессе охлаждения большую роль играет площадь контакта внешней поверхности канала с охлаждающей жидкостью. Одним из способов повышения этой площади является создание рифлений на поверхности трубы. Т.о. увеличивая внешнюю поверхность за счет рифления можно увеличить теплоотдачу, что сопровождается более интенсивной конденсацией.

Во **второй части третьей главы** проведено математическое моделирование процессов, происходящих при работе трубчатой ректификационной установки. Данная установка состоит из емкости с исходным сырьем и трубчатого канала, который охлаждается и на его стенках происходит конденсация. В процессе нагревания емкости рассматриваемая двухкомпонентная (первая компонента – это вода, вторая – этиловый спирт) смесь испаряется, и ее пары попадут в трубчатый канал с температурой стенки  $T_w$ .

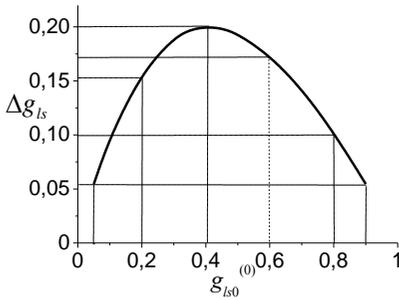


Рис.9. Зависимость прироста концентрации продукта ректификации в зависимости от начального состава смеси.

На рис. 9 показана зависимость величины увеличения концентрации спирта, определяемой как  $\Delta g_{ls} = g_{ls}^{(e)} - g_{ls}^{(0)}$  от  $g_{ls}^{(0)}$  — отвечающего за исходный состав смеси. Видно, что наиболее оптимальным режимом, когда величина  $\Delta g_{ls}$  максимальна, является режим, когда исходная массовая концентрация смеси составляет 40%. В данном случае, в продукте ректификации массовое содержание спирта будет на 20% больше, чем в исходной смеси.

Рис. 10 иллюстрирует изменение во времени массовых концентраций спирта в жидкости, в паре и в емкости для сбора продукта ректификации для разных значений начального массового содержания спирта. Сплошные линии – массовые концентрации спирта в исходной емкости, пунктирные – массовые концентрации спирта в паре, точечные – массовые концентрации спирта в емкости для сбора продукта ректификации. Как видно из графиков рис. 10 максимальная величина массового содержания спирта в паре и соответственно в полученной смеси в емкости для сбора продукта ректификации имеет место в начале процесса. Дальнейшая ректификация способствует увеличению объема конечного продукта. С течением времени массовое содержание спирта в исходной жидкости уменьшается, что сопровождается также уменьшением массового содержания спирта в паре и, как следствие, массового содержания спирта в емкости для сбора полученного ректификата. Для получения заданного содержания

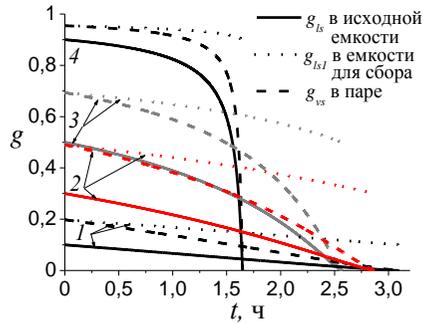


Рис.10. Динамика массового содержания спирта в жидкости и паре при различных значениях начальной массовой концентрации спирта. Линии 1, 2, 3 и 4 соответствуют  $g_{ls0}^{(0)} = 0.1, 0.3, 0.5$  и  $0.9$ .

спирта в смеси в емкости для сбора ректификата следует подобрать определенное время перегонки.

Таким образом, построенная математическая модель функционирования реактора позволяет проследить темпы изменения концентрационного состава продукта реактора в зависимости от состава исходного сырья.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе проведено исследование гидродинамических и теплофизических процессов, происходящих при нагнетании теплоносителя (теплого газа или пара) в насыщенные твердой фазой и газом пористые среды и при течении пара в каналах. Проведен анализ различных режимов течения в зависимости от значений определяющих параметров и параметров пористой среды или канала. Основные результаты и выводы диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Установлено, что при инъекции теплого газа в пористый пласт, насыщенный в исходном состоянии газом и льдом, повышение амплитуды давления нагнетания газа ( $\Delta p = p_e - p_0$ ) приводит к росту протяженности прогретой зоны, например, при увеличении  $\Delta p$  в 50 раз прогретая зона становится больше в два раза. Показано, что при высоких давлениях нагнетания газа ( $p_e = 5 \div 10 \text{ МПа}$ ) в пористый пласт главную роль в переносе тепла играет конвекция (молекулярной теплопроводностью можно пренебречь).

2. При закачке пара в пласт, насыщенный парафином и газом, глубина проникновения теплоносителя в пористую среду в значительной мере зависит от гидравлического сопротивления движению водяной пробки, образовавшейся за счет конденсации закачиваемого пара. Поэтому наиболее эффективным для термического разрушения образовавшегося в пористой среде парафина является нагнетание в пористую среду «чистого» пара, так как в этом случае толщина водяной пробки минимальна.

3. Установлено, что интенсивность конденсации пара на внутренних стенках трубчатого канала лимитируется теплообменом между внешней стенкой канала и охлаждающей жидкостью, осуществляемым в режиме термогравитационной конвекции (влияние теплового сопротивления металлических стенок канала и стекающей пленки ничтожно мало). Поэтому, увеличивая поверхность контакта

внешней стенки при фиксированном внутреннем радиусе и длине канала, можно добиться более быстрой конденсации пара.

4. Построена математическая модель процессов, происходящих при работе трубчатой ректификационной установки. Расчеты в рамках данной модели позволяют определить интенсивность ректификации, изменение состава продукта. Показано, что зависимость прироста концентрации спирта при ректификации от начального состава двухкомпонентной смеси имеет максимум при массовой концентрации спирта в составе исходной бинарной смеси около 40 процентов.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Работа, опубликованная в журнале, рекомендованном ВАК РФ:*

1. *Шагиева Ф.И., Галеева Г.Я.* Об инъекции влажного пара в пористую среду, частично насыщенную парафином // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 2. С. 257-261.

*В других изданиях:*

2. *Шагиева Ф.И., Шагапов В.Ш.* К постановке задачи об инъекции пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином // ЭВТ в обучении и моделировании: Сборник научных трудов. IV региональная научно-метод. конференция. Бирск, 2005. Ч.1. С. 111-114.

3. *Шагиева Ф.И., Шагапов В.Ш.* Постановка задачи об инъекции пара в пористую среду, насыщенную частично газом и парафином // Наука и образование. Сборник материалов. Под редакцией С.М. Усманова и Ю.П. Правдина. Бирск, 2006. С. 47-51.

4. *Нурисламов О.Р., Шагиева Ф.И., Насырова Л.А.* Некоторые автомодельные фильтрационные и пристеночные течения с фазовыми переходами // IX Всероссийский теоретический съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Т. II. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И.Лобачевского, 2006. С. 137.

5. *Шагиева Ф.И., Насырова Л.А.* Математическая модель процесса инъекции пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином // Мавлютовские чтения. Механика жидкости и газа. Уфа, 2006. Т.4. С. 82-84.

6. *Шагиева Ф.И.* Об инъекции пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином // VI Региональная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике, физике и химии: Сборник трудов. Т. 2. Математика. Уфа: РИЦ БашГУ, 2006. С. 112-119.

7. *Шагиева Ф.И.* Математическая модель процесса инжекции пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином // Наука в школе и вузе: Материалы научной конференции аспирантов и студентов. Часть II. Под общ. ред. Ш.Г. Зиятдинова. Бирск: Бирск. гос. соц.-пед. акад., 2006. С. 101-104.

8. *Шагиева Ф.И., Шагапов В.Ш.* Об инжекции пара в пористую среду // ЭВТ в обучении и моделировании: Сборник научных трудов. Отв. ред. С.М. Усманов. IV региональная научно-методическая конференция. 20-21 апреля 2007 г., Бирск: БирГСПА, 2007. С. 192-198.

9. *Шагиева Ф.И., Шагапов В.Ш.* Инжекция пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином, подверженную «склерозу» // Сборник тезисов, материалы Четырнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-14, Уфа): материалы конференции, тезисы докладов: Т.1. Екатеринбург–Уфа: издательство АСФ России, 2008. С. 531.

10. *Шагиева Ф.И., Шагапов В.Ш.* Инжекция пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином, подверженную «склерозу» // Вестник БирГСПА. Бирск, 2007. С. 101-104.

11. *Шагиева Ф.И., Шагапов В.Ш.* Математическое моделирование процесса движения пара в трубчатом реакторе // Всероссийская научно-практическая конференция “Обратные задачи в приложениях”. Бирск, 2008. С. 255-257.

12. *Шагиева Ф.И.* Математическая модель процесса инжекции пара в пористую среду, насыщенную газом и парафином // Всероссийская школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании». Математика. Том 2. Уфа: РИЦ БашГУ, 2008. 328 с.

13. *Шагиева Ф.И., Шагапов В.Ш.* Об инжекции влажного пара в пористую среду, частично насыщенную парафином // Вестник государственной социально-педагогической академии. Под общ. ред. проф. С.М. Усманова. Бирск: БирГСПА., 2010. С. 96-100.

14. *Шагиева Ф.И.* Математическая модель процесса ректификации двухкомпонентной смеси // Мавлютовские чтения: Российская научно-техническая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения член-корр. РАН, д.т.н., проф. Р.Р. Мавлютова: сб. трудов в 5 т. Том 4. Механика жидкости и газа. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 254-258.

15. *Шагиева Ф.И.* О процессе ректификации двухкомпонентной смеси // Наука в школе и вузе: Материалы научной конференции аспирантов и студентов. Под общ. ред. А.Ф. Пономарева. Бирск: Бирск. гос. соц.-пед. акад., 2011. С. 109-111.

Шагиева Файруза Ингелевна

**ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ  
ИНЖЕКЦИИ ГАЗА В НАСЫЩЕННУЮ ЛЬДОМ (ПАРАФИНОМ)  
ПОРИСТУЮ СРЕДУ И ПРИ ТЕЧЕНИИ ПАРА В КАНАЛЕ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Лицензия на полиграфическую деятельность 002037 от 08 ноября 2001 года,  
выданная Поволжским межрегиональным территориальным управлением  
Министерства Российской Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Подписано в печать 20.05.2011г.

Гарнитура «Times». Печать на ризографе с оригинала.

Формат 60x84/16. Усл.-печ.л.1.2. Уч.-изд.л.0.5.

Бумага писчая. Тираж 100 экз. Заказ № 11.

Цена договорная.

452453, Республика Башкортостан, г. Бирск, ул. Интернациональная, д. 10.  
ГОУ ВПО «Бирская государственная социально-педагогическая академия»  
Отдел множительной техники БирГСПА