

- термоупругопластической постановке; – термовязкоупругопластической постановке без учета повреждаемости материалов при ползучести;
- термовязкоупругопластической постановке с учетом повреждаемости материалов при ползучести;
- термовязкоупругопластической постановке с учетом повреждаемости материалов при ползучести и с исследованием стадии распространения разрушения;
- термовязкоупругопластической постановке с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии.

3. Решен ряд практических задач при дифференцированном и совместном учете факторов, определяющих прочность и долговечность тонких многослойных оболочек вращения с простой и сложной формами меридиана, подверженных различным видам воздействий (центробежные силы, внутреннее давление, осевое усилие, воздействие водорода) и показана эффективность применения многослойных материалов.

4. Выполненные исследования могут быть основой для их дальнейшего развития в следующих направлениях:

- учет влияния вида напряженного состояния на скорость обезуглероживания;
- учет неоднородности распределения температурного поля по объему конструкций и его влияние их долговечность.

Работа представлена на VII научную конференцию с международным участием «Успехи современного естествознания», Дагомыс (Сочи), 4-7 сентября 2006г. Поступила в редакцию 12.09.2006г.

#### **Свойства подземных вод и технология их утилизации**

Зелинская Е.В., Воронина Е.Ю.,  
Вершинина В.П.

*Иркутский государственный  
технический университет*

Изучение гидрогеохимических свойств химических элементов, находящихся в подземных водах, является одним из важнейших вопросов, так как это предопределяет знание о состоянии и формах нахождения элементов, а следовательно их способность выделяться в технологических процессах в те или иные продукты.

Одним из перспективных методов извлечения металлов из растворов является ионный обмен. Рассолы, представляющие собой раствор нескольких солей, имеют достаточно сложный физико-химический состав и структуру (гл.3). Высокая минерализация и поликомпонентность обуславливают ряд особенностей поведения данных вод, как в процессе добычи, так и, в особенности, в процессе переработки. Применение ионообменного метода для извлечения микрокомпонентов из рассола возможно в связи с наличием в составе рассолов компонентов в ионной форме. Разница в процентном содержании ионных форм различных компонентов предопределяет вероятность их селективного выделения при использовании ионообменной технологии. Однако

высокая концентрация солей требует развития положений ионного обмена, разработанных в большинстве случаев для разбавленных растворов, в направлении применимости их к концентрированным системам.

На основании анализа теоретических закономерностей процесса ионного обмена, изучения условий извлечения щелочных и щелочно-земельных металлов и рассмотрения высокоминерализованных вод, как специфичной физико-химической системы, установлен ряд факторов, оказывающих значительное влияние на процесс ионообменного выделения металлов. Структура воды в таких системах изменена по сравнению с чистой водой, а, исходя из положений теории ионного обмена, гидратация обменивающихся ионов играет большую роль.

Факторы, влияющие на обмен металлов, по нашему мнению, разделяются на внутренние (свойства минерализованных вод) и внешние факторы системы (т.е. факторы процесса).

К важнейшим внутренним факторам системы относятся химический состав рассолов; общая минерализация; водородный показатель (рН); концентрация микро- и макрокомпонентов в рассоле; формы нахождения компонентов в рассоле; структурно-химические свойства рассолов; термодинамические свойства компонентов системы; зависимость сорбционного поведения ионов от их положения в Периодической системе.

К важнейшим внешним факторам системы относятся время процесса; тип и свойства катионитов; метод элюирования; тип и концентрация элюента.

В рамках данной работы, опираясь на значительный объем проведенных совместно с коллегами исследований по извлечению микрокомпонентов из природных рассолов и определению оптимальных условий ионного обмена, необходимо выявить наиболее важные закономерности ионного обмена из высококонцентрированных рассолов, обладающих специфическими физическими и структурно-химическими свойствами. Следует также определить границы применимости и эффективности ионообменного метода с учетом исходных характеристик природных рассолов. При этом основной задачей остается селективное выделение микрокомпонентов из рассолов, в частности стронция, с получением дополнительной продукции.

Объектами исследования ионообменных процессов являлись хлоридно-натриевые рассолы Коршуновского ГОКа и хлоридно-кальциевые рассолы, изливающиеся из эксплуатационной скважины №322 в районе Удачинского ГОКа, а также моделирующие их состав растворы.

Процесс ионного обмена складывается из ряда подпроцессов: извлечения ионов металлов из фазы рассола; их сорбции на смоле путем обмена с ионами смолы; извлечения ионов металлов из фазы ионита, т.е. десорбции. При ионообменном выделении металлов из поликомпонентных рассолов важным является выявить, на какой стадии возможно эффективное разделение макро- и микрокомпонентов, а также микрокомпонентов между собой

Равновесие является важным вопросом теории и практики ионного обмена. Обмен ионов представляет собой строго стехиометрическую реакцию. Рав-

новесие определяется свойствами и концентрациями присутствующих в системе компонентов, но не зависит от пути обмена. При обмене из системы, включающей более двух обменивающихся противоионов равновесие обмена уже не может быть независимым от третьего компонента. В связи со сложностью протекающих в данном случае процессов, вопросы равновесия в реальных системах с тремя и большим числом ионов, взаимодействующих с ионитом, приходится учитывать другие процессы, сопутствующие обмену ионов. В некоторых системах важную роль играют такие явления, как набухание, адсорбция, изменение степени диссоциации электролитов в фазе ионита и в растворе.

Для выявления условий равновесия были проведены кинетические исследования в статических условиях сорбции на одно-, двух- и трехкомпонентных растворах, моделирующих по содержанию ионов рассолы Удачинского ГОКа. На основании полученных результатов удалось установить, что состав системы оказывает значительное влияние на процесс достижения равновесия. Время установления равновесия увеличивается при переходе от одно-двух- к трехкомпонентным системам, константа скорости реакции уменьшается.

Скорость установления состояния равновесия в рассолах будет зависеть, в том числе, от состава рассолов, форм и состояния находящихся в нем компонентов. Это обусловлено сложностью системы и комплексом протекающих в ней процессов.

Рассматривая ионообменные процессы в концентрированных растворах, необходимо исходить из представления об этих процессах, как о конкуренции за гидратацию двух и более обменивающихся противоионов, в которой участвуют молекулы воды, коионы и фиксированные группы ионита.

Состояние равновесия определяется противоионом, наименее склонным к гидратации. Однако в случае многокомпонентных рассолов, различия гидратируемости различных ионов и взаимное влияние компонентов системы и растворителя настолько велики, что возникают определенные осложнения, приводящие к изменению значимости различных частиц как гидратирующих агентов, а именно:

- чем выше концентрация ионов, тем сильнее нарушается структура воды в области дальней гидратации. Однако различные ионы по разному влияют на ближнюю гидратацию, а именно, в области ближней гидратации происходит взаимодействие ионов раствора с функциональными группами ионита;

- число ионов противоположного знака в непосредственной близости от данного иона с увеличением концентрации быстро возрастает. Поэтому случаи сближения катионов с анионами становятся более частыми и взаимодействие между ними в обеих фазах приобретает большее значение. Иными словами, гидратация ионов частично заменяется комплексобразованием между ними. Роль этого фактора тем существеннее, чем меньше ионы защищены гидратными оболочками и чем ниже диэлектрическая постоянная среды. По этим причинам ионообменное равновесие отклоняется от закона действия масс;

- в непосредственной близости к поверхности ионита структура воды в рассоле упорядочена, что приводит к ослаблению гидратации иона, и снижению растворяющей способности раствора;

- по сравнению с разбавленными, в концентрированных растворах активность воды изменяется в зависимости от концентрации раствора. Характер гидратации ионов также неоднозначен при разных минерализациях рассолов. Таким образом, выявление характера влияния сопутствующих эффектов на равновесие ионного обмена в такой сложной системе может быть достигнуто только на основании сравнения опытных данных с информацией, касающейся состояния системы и входящих в нее элементов (растворителя ионов и других частиц).

Исследования кинетических и селективных свойств катионитов в многокомпонентных системах послужили основой для изучения закономерностей кинетики (установления времени, необходимого для контакта «катионит – рассол» и определения равновесного состояния системы) на рассолах Коршуновского и Удачинского месторождений, выбора наиболее перспективных сорбентов и оптимальных условий процесса.

Полученные результаты указывают на различия кинетики обмена стронция и кальция из дренажных вод карьера УГОКа на катионитах Ку2х8 и КБ-4Пх2. После достижения определенного максимума примерно на 60 минуте насыщение ионита стронцием начинает снижаться, вследствие замещения стронция на кальций. Состав рассолов также влияет на кинетику обмена. В более концентрированных рассолах скважины время установления равновесия для стронция выше, чем в дренажных водах.

На основании приведенных результатов по изучению кинетических свойств изучаемых катионитов можно сделать выводы, что для извлечения стронция из данных вод (с учетом их состава и форм нахождения элементов в рассолах) лучше использовать КБ-4Пх2.

На основании результатов исследований для дренажных вод была предложена схема, включающая фильтрацию с целью удаления взвешенных веществ; коллективную сорбцию в течение 2 часов на сорбенте КБ4П2; десорбцию компонентов на основе метода вытеснительной хроматографии: десорбцию кальция раствором HCl 6n концентрации в течение 10 минут (извлечение стронция при этом составляет 26 %); десорбцию стронция раствором HCl 4n концентрации в течение 10 минут (извлечение стронция при этом составляет 52,72 %); кристаллизацию с разделением стронция и кальция.

Исследования проведены при поддержке Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы на 2006-2008 годы. Мероприятие 1. Тематический план». Программа Федерального Агентства по образованию РФ. (Науки о ЗЕМЛЕ. Горное дело).

Работа представлена на VII научную конференцию с международным участием «Успехи современного естествознания», Дагомыс (Сочи), 4-7 сентября 2006г. Поступила в редакцию 04.09.2006г.

УДК 665.75

**Моделирование и исследование структуры ламинарного течения плоской затопленной свободной струи высоковязкого мазута**

Камалов Р.Ф., Шамсутдинов Э.В.

Исследовательский центр проблем энергетики

В настоящее время, когда резервы энергосбережения за счет внешних источников практически исчерпаны, разработка методов снижения затрат тепловой энергии при циркуляционном подогреве жидкого органического топлива в резервуарах невозможна без изучения характера происходящих тепловых и гидродинамических процессов. Наибольшую трудность при этом вызывает исследование структуры ламинарного потока жидкого органического топлива.

Исследованию струйного течения жидкостей посвящено большое количество работ [1 – 5]. Большое количество из них посвящено моделированию течений невязких сжимаемых жидкостей (газов) при условии турбулентности потока [1, 2]. Также аналитически решены задачи течения плоской струи, выте-

$$\frac{\partial u_{x^*}}{\partial t^*} + u_{x^*} \frac{\partial u_{x^*}}{\partial x^*} + u_{z^*} \frac{\partial u_{x^*}}{\partial z^*} = -\frac{16\rho^2 b^2 \delta^3 g_{x^*}}{9G_{\max}^2} - \frac{\partial p}{\partial x^*} + \frac{4\mu b}{3G_{\max}} \left[ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \mu \frac{\partial u_{x^*}}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left( \mu \frac{\partial u_{x^*}}{\partial z^*} \right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_{z^*}}{\partial t^*} + u_{x^*} \frac{\partial u_{z^*}}{\partial x^*} + u_{z^*} \frac{\partial u_{z^*}}{\partial z^*} = -\frac{16\rho^2 b^2 \delta^3 g_{z^*}}{9G_{\max}^2} - \frac{\partial p}{\partial z^*} + \frac{4\mu b}{3G_{\max}} \left[ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \mu \frac{\partial u_{z^*}}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left( \mu \frac{\partial u_{z^*}}{\partial z^*} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_{x^*}}{\partial x^*} + \frac{\partial u_{z^*}}{\partial z^*} = 0, \quad (3)$$

где  $u_{x^*}$  и  $u_{z^*}$  – безразмерные компоненты вектора скорости,  $p$  – давление,  $t^*$  – время,  $x^*$ ,  $z^*$  – независимые переменные,  $m$  – динамическая вязкость,  $g_{x^*}$ ,  $g_{z^*}$  – компоненты вектора ускорения сво-

кающей из узкой щели и смешивающейся с неподвижной окружающей вязкой жидкостью [3], а также при истечении струи жидкости в открытое пространство [4, 5].

В работе проведено численное исследование гидродинамических характеристик ламинарного потока плоской затопленной свободной струи мазута в пространстве, заполненном мазутом.

Численное исследование гидродинамических характеристик плоской затопленной свободной струи мазута производилось при следующих допущениях:

1. поток вязкой жидкости ламинарный;
2. теплофизические свойства вязкой жидкости, такие как плотность  $\rho$ , теплоёмкость  $c_p$  и теплопроводность  $\lambda$  меняются в ходе процесса незначительно;

3. объёмной силой, влияющей на процесс истечения плоской затопленной свободной струи мазута из насадки в пространство, является сила тяжести.

Система уравнений движения и неразрывности в безразмерном виде имеют вид:

бодного падения  $\mathbf{g}^*$ ,  $Q_{\max}$  – максимальный расход вязкой жидкости на выходе из насадки. Введённые безразмерные величины  $u_{x^*}$ ,  $u_{z^*}$ ,  $p$ ,  $t^*$ ,  $x^*$ ,  $z^*$  определяются при помощи следующих соотношений:

$$x^* = \frac{x}{d}, \quad z^* = \frac{z}{d}, \quad t^* = \frac{3Q_{\max}}{4rb d^2} t, \quad u_{x^*} = \frac{4rb d u_x}{3Q_{\max}}, \quad u_{z^*} = \frac{4rb d u_z}{3Q_{\max}}, \quad p = \frac{16rb^2 d^2 P}{9Q_{\max}^2}. \quad (4)$$

Для решения уравнений движения и неразрывности используется метод конечных элементов. Используя метод Фэдо-Галеркина (с учетом начальных и граничных условий), получаем систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Для ее решения используется метод Рунге-Кутты.

В результате численных исследований получены распределения линий тока, полей вектора скорости и линий равных значений компоненты  $w_y$  вектора вихря при тчении плоской затопленной свободной струи жидкого органического топлива.

Численные исследования проводились при следующих условиях: расход мазута через плоскощелевую насадку равен  $G = 8,33$  кг/с (удельный расход равен  $G = 0,1327$  кг/(м·с)). Радиус насадки  $\delta$  равен 6 мм. Максимальная скорость потока мазута  $u_{\max} = 0,0183$  м/с. В этом случае определяющие параметры задачи принимают следующие значения:  $Re' = 0,02452$ ;  $Fr' = 175,272$ . Время, выраженное в секундах, связано с безразмерным временем как  $t = 0,3274 t^*$ .

Распределение линий тока имеют плавный характер в течение всего процесса движения жидкости. При времени равном  $t^* = 10; 40; 100$  линии тока практически повторяют друг друга. Видно, что только небольшая часть потока движется вверх, а основная часть тормозится в верхней области и уходит вбок. В дальнейшем при времени  $100 < t^* \leq 1,05 \cdot 10^6$  линии тока направлены вверх и большая часть потока охватывает всю ширину резервуара. Лишь малая часть потока уходит вбок. При этом времени возникает зона возвратных течений мазута. Наличие возвратных течений предполагает в этом случае существование застойных зон, которые имеют вид неправильных овалов.

Из анализа полученного распределения линий тока видно, что практически во все рассматриваемые интервалы времени происходит веерное расхождение направлений движения частиц потока. Основной поток вязкой жидкости сохраняет свое направление лишь в области соизмеримой с шириной насадки.