

УДК 532.546

ТЕРМОГИДРОДИНАМИКА БИНАРНОЙ СМЕСИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

© 2011 г.

А.А. Афанасьев

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

afanasyev@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Исследуются многофазные течения бинарных смесей в пористой среде с учетом описания реальных свойств смеси в широком диапазоне давления и температуры. Предложен новый подход для описания однофазных, двухфазных, а также трехфазных течений смеси, при до- и закритических термодинамических условиях. Гидродинамика процесса фильтрации существенно зависит от фазовой диаграммы смеси. Подробно исследована фазовая диаграмма смеси углекислый газ–вода. В рамках подхода рассмотрены задачи, описывающие природные течения в геотермальных системах, процессы подземного сжижения углекислого газа и ретроградные эффекты в течениях углеводородов.

Ключевые слова: пористая среда, фильтрация, термодинамика, фазовые переходы, многофазное течение.

Введение

Описание неизотермических фильтрационных течений с учетом корректного термодинамического описания свойств среды представляет собой сложную задачу. Для ее решения необходимо привлечение не только системы законов сохранения, отвечающей непосредственно за гидродинамическую составляющую процессов, но и сложных, нелинейных, явно не разрешимых термодинамических соотношений. Природа этих соотношений, в случае равновесных по отношению к внутренним процессам в среде течений, связана с экстремальным свойством одной из термодинамических функций. Например, энтропия изолированной термодинамической системы в состоянии равновесия имеет максимум. Таким образом, система законов сохранения замыкается не конечными дифференциальными или интегральными соотношениями, а задачей условного экстремума для определения свойств среды. Решение подобной системы существенно усложняется по сравнению с классическими моделями механики сплошных сред [1]. В каждый момент времени необходимо решать множество задач условного экстремума, соответствующих различным координатам в пространстве, а затем их решения учесть в системе законов сохранения.

Актуальность термогидродинамических моделей течений жидкостей и газов, допускающих нелинейное поведение свойств среды с фазовыми переходами и критическими явлениями, обусловлена тем, что подобные течения реализуются в широком спектре как природных, так и техно-

генных процессов. Течения со сложными фазовыми переходами реализуются при добыче геотермальной энергии из нагретых до высоких температур недр Земли, при разработке газоконденсатных месторождений, при утилизации нагретых промышленных отходов (углекислого газа) в водоносных пластах.

Предложен новый подход для описания неизотермических течений бинарной смеси в пористой среде в широком диапазоне термобарических условий. Предполагается возможность перехода через критические параметры смеси, при которых ее свойства имеют математические особенности. Допускается реализация различных однофазных, двухфазных и трехфазных термодинамических равновесий смеси: равновесий типа жидкость–пар, жидкость–жидкость и жидкость–жидкость–пар [2].

Математическая модель

При решении задач фильтрации широко распространены уравнения состояния кубического типа, по которым свойства среды определяются по заданным давлению P , температуре T и составу смеси x [2]. В подобных переменных P , T , x уравнения фильтрации имеют математические особенности в окрестности критических параметров смеси. Также в переменных P , T , x нельзя определить трехфазные равновесия бинарной смеси. Предложен новый метод расчета свойств смеси в переменных P , h , x [3]. Использование энтальпии h в качестве параметра, определяющего состояние смеси, позволяет исключить отмечен-

ные выше трудности, имеющиеся в переменных P, T, x .

Процедура определения свойств разбита на два этапа. На первом этапе по кубическому уравнению состояния [2] в переменных P, h, x определяется термодинамический потенциал бинарной смеси σ -энтропия:

$$\sigma = \sigma(P, h, x). \quad (1)$$

Первый этап, на котором выполняются наиболее трудоемкие вычислительные процедуры, выполняется один раз, а его результат – потенциал (1) – впоследствии может многократно использоваться на втором этапе – расчете многофазных равновесий. Для определения термодинамических равновесий на втором этапе решается следующая задача условного экстремума:

$$\sum_{i=1}^3 \sigma_i V_i \rightarrow \max, \quad \sum_{i=1}^3 V_i = 1, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^3 h_i V_i = h_t, \quad \sum_{i=1}^3 x_i V_i = x_t.$$

Здесь V – молярная доля фазы, индекс $i = 1, 2, 3$ соответствует параметрам фазы, а индекс t соответствует общим, просуммированным по фазам, параметрам. По постановке задачи (2) заданы P, h_p, x_t и термодинамический потенциал (1), неизвестны параметры фаз h_i, x_i , их молярные доли V_i .

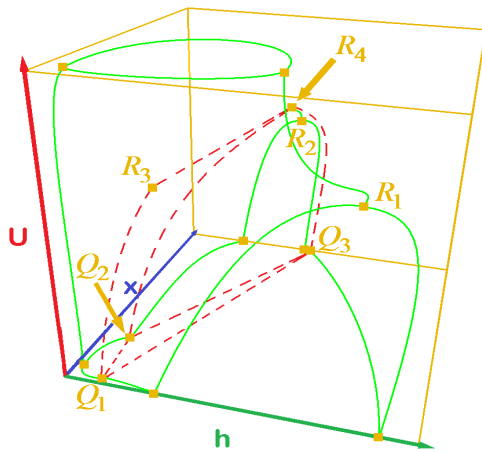


Рис. 1

На рис. 1 приведена фазовая диаграмма смеси углекислый газ–вода, рассчитанная при помощи задачи (2) ($U = \ln(P/P_{\text{атм}})$). Здесь $R_1(R_2)$ – критическая точка воды (углекислого газа). Внутри области $Q_1Q_2Q_3R_4R_3$ смесь находится в трехфазном состоянии жидкость–жидкость–пар, а внутри области, ограниченной зелеными линиями, – в двухфазном состоянии жидкость–жидкость или жидкость–пар.

Течение различных смесей в пористой среде

Задача (2) использовалась для определения свойств среды в различных задачах гидродинамики. Рассмотрены течения в геотермальной системе Campi Flegrei (Италия). Эта система питается из недр Земли смесью воды и углекислого газа, находящейся в закритическом термодинамическом состоянии (рис. 2). Рассмотрены одномерные и трехмерные решения задачи. Впервые выявлен автоколебательный режим течения, позволяющий дать новую интерпретацию циклическому поведению системы на поверхности. Показано, что в трехмерном решении (см. рис. 2) переход через критическую температуру происходит не в изолированной точке, а на окружности с центром на оси симметрии задачи.

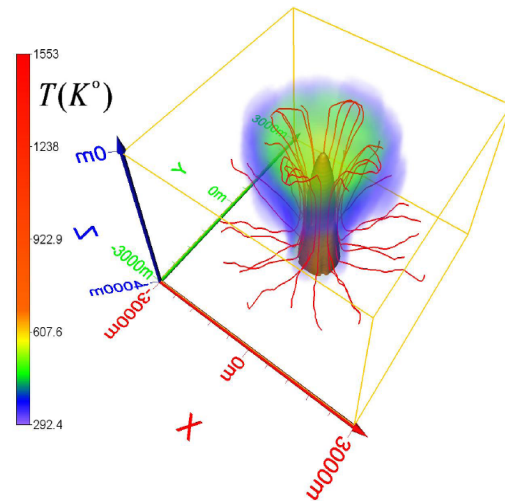


Рис. 2

Рассмотрена задача о закачке углекислого газа в водоносный пласт. Показано, что возможны параметры закачки, при которых образуется зона трехфазного течения смеси углекислый газ–вода (область $Q_1Q_2Q_3R_4R_3$) с фазой сжиженного углекислого газа. Существование такой зоны может способствовать более компактному и безопасному подземному хранению углекислого газа.

Показано, что в рамках предлагаемого подхода можно описать ретроградные эффекты в фильтрационных течениях углеводородов. Рассмотрена задача об отборе из недр Земли метан-пропановой смеси и описан сайклинг-процесс, позволяющий извлечь газовый конденсат.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №09-01-92434-КЭ_a) и программ Президента РФ для поддержки молодых ученых и ведущих научных школ (МК-575.2010.1, НШ-4810.2010.1).

Список литературы

1. Бармин А.А., Цыпкин Г.Г. Математическая модель инъекции воды в геотермальный пласт, насыщенный паром // Изв. РАН. МЖГ. 1996. №6. С. 92–98.
2. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при

разработке месторождения нефти и газа. М.: Грааль, 2002. 575 с.

3. Афанасьев А.А. Математическая модель неизо-термической многофазной фильтрации бинарной смеси // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. №1. С. 90–100.

THERMOHYDRODYNAMICS OF A BINARY MIXTURE IN A POROUS MEDIA*A.A. Afanasyev*

Multiphase flows of a binary mixture in a porous media subjected to wide-range variations of pressure and temperature are studied, describing real properties of the mixture. A new method is proposed for the simulation of single-phase, two-phase and three-phase flows of a mixture under sub- and supercritical thermodynamic conditions. The hydrodynamics of the filtration process greatly depends on the phase diagram of the mixture. A phase diagram of the water– carbon dioxide mixture is studied in detail. Flows accompanying natural processes in a geothermal reservoir, underground carbon dioxide liquefaction and retrograde condensation in the process of gas condensate formation are considered within in the framework of the proposed method.

Keywords: porous media, thermodynamics, phase transitions, multiphase flow.