

УДК 519.688

В.И. Попов, А.С. Курилко

ИНФИЛЬТРАЦИЯ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННОГО РАСТВОРА В МЕРЗЛЫЙ МАССИВ

На основе вычислительного эксперимента рассматривается процесс миграции высокоминерализованного техногенного рассола в мерзлом горном массиве.

Ключевые слова: алмазное месторождение, криолитозон, высокоминерализованный рассол, горной порода, паровая влага.

Обработка некоторых алмазных месторождений сопровождается притоком в карьер высокоминерализованных подземных рассолов. Приток составляет до 80 м³/час. Минерализация вод достигает 350 г/л. Из-за высокой концентрации галогенов, сброс дренажных рассолов в речную сеть запрещен. Поэтому захоронение осуществляется в терригенно-карбонатные многолетнемерзлые породы кембрийского возраста, залегающие в интервале глубин 150—250 м.[1].

В основе используемого метода захоронения рассолов лежит способность высокоминерализованных вод плавить текстурообразующие льды в горных породах в широком диапазоне отрицательных температур [1, 2].

В данной работе на основе вычислительного эксперимента рассматривается процесс миграции высокоминерализованного техногенного рассола в мерзлом горном массиве. Основное внимание при этом сосредоточено на моделировании фазового состояния рассола и процессов конвективного и диффузионного переноса рассола в массиве, включая соответственно, механизмы разбавления порового рассола и плавления льда при контакте с рассолом.

Описываемый процесс также может быть связан с организацией некоторых технологий выщелачивания в условиях криолитозоны, например, при использовании реагентов, сохраняющих высокую активность в высокоминерализованном рассоле, обеспечивающем проницаемость мерзлой горной породы.

Для упрощения, вычислительный эксперимент проведен в предположении однородности горных пород, характеризующихся одной формой уравнения фазового равновесия поровой влаги.

В качестве дополнительного условия предполагается возможность аналитического представления уравнения фазового равновесия порового раствора в виде $T_F = T_F(w, C)$, учитывающем специфические характеристики среды — потенциал адсорбционного взаимодействия, величину удельной поверхности, концентрацию порового раствора [3].

Математическая модель процесса теплопереноса при промерзании состоит из трех уравнений параболического типа с конвективным членом; 1) уравнения конвективной теплопроводности; 2) диффузионно — конвективного движения влаги; и 3) растворенного компонента; замы-

каемые уравнением фазового равновесия поровой влаги объединяющим параметрами термодинамического равновесия — температуру, влагосодержание и концентрацию. С помощью введения параметра захвата — $k_{ЗАХ}$ предусмотрено возможность селективности растворенного компонента на границе лед-растол.

1) Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial (cpT)}{\partial t} = -\nabla J_T + LpI_F; \quad (1)$$

2) Уравнение переноса влаги

$$\frac{\partial (w)}{\partial t} = -\nabla J_w - I_F; \quad (2)$$

3) Уравнение переноса солей

$$\frac{\partial (wC)}{\partial t} = -\nabla J_C - k_{ЗАХ}CI_F; \quad (3)$$

Где потоки компонентов включая конвективный перенос имеют вид

$$J_w = -K\nabla w + K\delta_{CW}\nabla C - K\delta_{TW}\nabla T +$$

$$+V_f = J_w^m + V_f$$

$$J_C = -WD_C\nabla C + CJ_w = J_C^m + CV_f$$

$$J_q = -\lambda\nabla T + c_w\rho_w TJ_w = J_q^m + c_w\rho_w TV_f, \quad (4)$$

где ∇ — двумерный набла-оператор. Система (1—4) замыкается уравнением состояния порового раствора, учитывающим специфические характеристики среды — потенциал адсорбционного взаимодействия, величину удельной поверхности, концентрацию порового раствора.

$$T_p = T_p(w, C). \quad (5)$$

В случае слоистой среды его параметры индивидуальны для каждого слоя.

Решение системы уравнений осуществляется на основе конечно — разностных соотношений полученных с помощью интегро-интерполяционного метода. При решении задачи о

фазовом превращении использован ранее разработанный метод прямого (не итерационного) определения количества влаги замерзающей на каждом шаге по времени [3]. При этом используются процедуры расщепления по физическим процессам исходной системы уравнений (1—4).

Для рассматриваемой задачи инфильтрации геометрия области представлена на рис.1. В начальный момент периода времени $T_{пер}$ в течение времени $eT_{пер}$ ($0 < e < 1$) высокоминерализованный растол с температурой $T_{рас}$ и концентрацией $C_{рас}$ инфильтрирует на участке $(0, L)$ границы Γ_4 поверхности породного массива имеющего отрицательную температуру — $T_{мас}$. По окончании времени инфильтрации $eT_{пер}$ граничные условия на участке $(0, L)$ меняются на условия изоляции по массе, т.е. соответствующие потоки равны нулю, температурное граничное условие первого рода заменяется на условие конвективного теплообмена. Далее по времени процесс периодически повторяется произвольное количество раз.

На остальной части границы Γ_4 постоянно действует конвективный теплообмен с воздушной средой с температурой $T_{ср}$, потоки влаги и солей равны нулю.

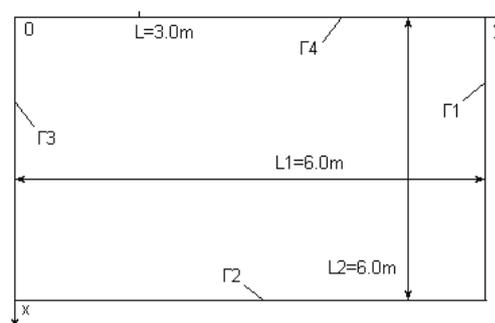


Рис. 1. Схема расчетной двумерной области

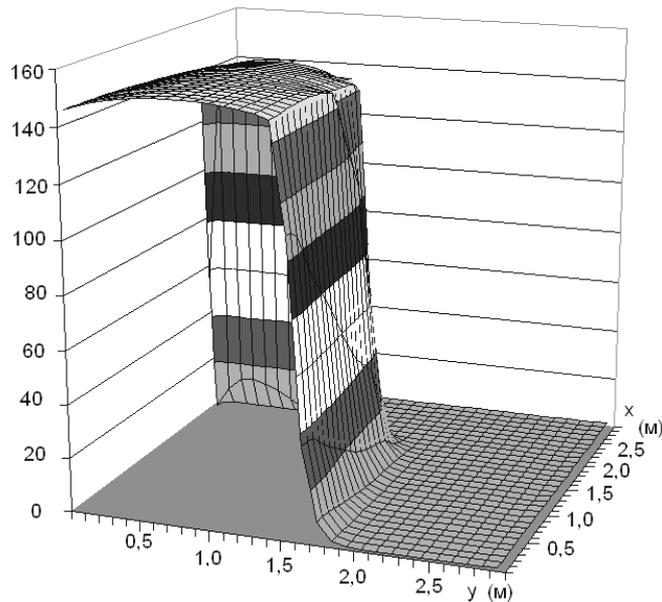


Рис. 2. Распределение концентрации (C/C_0) в мерзлом массиве при инфильтрации рассола с поверхности

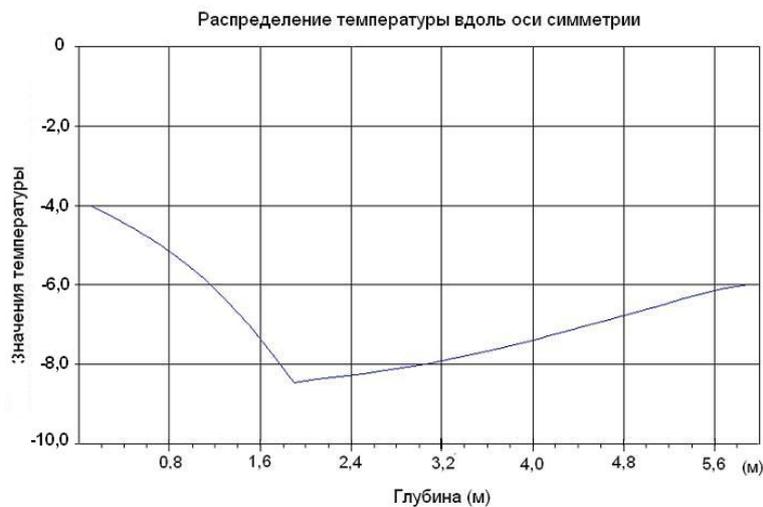


Рис. 3. Распределение температуры вдоль оси симметрии в горном массиве при взаимодействии инфильтрационного потока со льдом

Координатная ось Ox — является осью симметрии. На оси симметрии Ox — граница Γ_3 , границах Γ_2 и Γ_1 также ставятся условия равенства нулю потоков тепла, влаги и соли. Так как массив имеет отрицательную температуру то

величины содержаний воды льда и концентрации определяются на основе уравнения фазового равновесия по начальным значениям однородного влагосодержания и концентрации заданных для талого состояния.

На рис. 2 представлены результаты вычислительного эксперимента по прогнозу развития зоны повышенной концентрации при инфильтрации рассола в мерзлый массив. Расчеты проведены для значений коэффициента $e=0.5$; температуры массива $T_{\text{мас}}=-4^{\circ}\text{C}$; температуры рассола $T_{\text{рас}}=-4^{\circ}\text{C}$; концентрации рассола $C_{\text{рас}}=300C_0$; начальная концентрация порового раствора в массиве $C_0=1$ г/л.; начальная влажность массива равна 0,2. Температура среды теплообмена также равна -4°C .

По вертикальной оси рисунка отложены относительные (C/C_0) значения концентрации рассола в мерзлом массиве. По оси (y) глубина в метрах, а по оси (x) соответствующие расстояния от оси симметрии. Скорость инфильтрации определяется на основании выражений [4] для миграции в силовом поле под действием сил тяготения. Тогда выражение для скорости миграции будет:

$$V_f = B \cdot (D_C / kT) \cdot g \cdot \Delta\rho = B \cdot (D_C / kT) \times \\ \times g \cdot \rho_0 (\beta_T T + \beta_C C).$$

Где приращение плотности определяется выражением:

$$\rho_w = \rho_0 (1 + \beta_T \cdot T + \beta_C \cdot C).$$

На рис. 3 приведены результаты расчета температуры на момент $t=700$ суток вдоль оси симметрии. Понижение температуры вызвано процессами расплавления льда рассолом и соответствующим поглощением скрытой теплоты фазового перехода. Обнаружена зависимость величины понижения температуры от скорости фильтрации, что связано с энергетическими затратами на увеличивающийся объем расплавляемого рассолом льда.

Результаты расчетов качественно соответствуют основным особенностям процесса захоронения [1,2] высокоминерализованных рассолов — определяя снижение температуры в зоне плавления льда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В. Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки «Удачная» в многолетнемерзлые породы [Текст]/С.В. Алексеев, А.В. Дроздов, Т.И. Дроздова, Л.П. Алексеева// Криосфера Земли, 2002. — Т. VI. — № 2. — С. 61—65.
2. Климовский И.В. Гидрогеологические условия полигона подземного захоронения дренажных вод трубки «Удачная»/И.В. Климовский, С.П. Готовцев, В.В. Шепелев// Криосфера Земли, 2002. — Т. VI. — № 3. — С. 45—50.

3. Попов В.И. Новый метод решения задач промерзания в спектре температур// Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны: Труды международной научно-практической конференции (г. Якутск 14 — 17 июня 2005 г.). Том 2. — Якутск: Изд-во института мерзлотоведения СО РАН. — 2005. — С. 57-59.

4. Туницкий Н.Н. Методы физико-химической кинетики//Н.Н. Туницкий, В.А. Каминский, С.Ф. Тимашев/М.: Химия . 1972. 198 с. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Курилко А.С. — доктор технических наук, заведующий лабораторией горной теплофизики,
Попов В.И. — кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, igds@ysn.ru

