

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 556.3

Лю Юй<sup>1</sup>

### СРАВНЕНИЕ ДВУХ МОДЕЛЕЙ МИГРАЦИИ РАССОЛОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

Для решения задачи миграции рассолов повышенной плотности в пресных подземных водах проведено сравнение модели внедрения несмешивающейся жидкости повышенной плотности в подземные воды и модели миграции растворов с непрерывным изменением плотности. На примере распространения рассола из солеотвала показано, что предпочтительнее применение второй модели для реальных слоистых гидрогеологических систем.

*Ключевые слова:* миграция рассолов, переменная плотность.

In order to solving the task of brines' migration with increasing density in fresh groundwater, a comparison is conducted between model immiscible liquid with increasing density and model of solutions' migration with variable density. The example of brines' propagation from the salt dump is shown the preferability of using the second model for real layered hydrogeological systems.

*Key words:* migration of brine, variable density.

**Введение.** Исследования и прогноз миграции рассолов, поступающих в подземные воды из солеотвалов, проводятся методами математического моделирования. В основном применяются методы, учитывающие непрерывную переменную плотность раствора, возникающую при смешивании поступающего в подземные воды концентрированного рассола с относительно пресными подземными водами. При этом возникает область загрязнения, которая состоит из более тяжелого ядра слабозабавленных концентрированных рассолов и окружающих соленых вод, изменяющих концентрацию соли до природной по мере удаления от ядра [Мироненко и др., 1988].

Однако предлагается и иной подход к моделированию концентрированного рассола, когда на основании струйности течения подземных вод вследствие гетерогенности среды миграции полагается, что рассол слабо разбавляется пресными водами, поэтому его можно рассматривать как несмешивающуюся тяжелую жидкость, которая погружается в более легкие пресные воды [Конюхов и др., 1998]. Дисперсию концентрации на границе ядра рассолов определяет частичное заполнение пор только рассолом или только пресной водой [Конюхов и др., 2002].

Сравнительный анализ методов [Коносавский и др., 2002] для однородной по параметрам среды миграции показал хорошее совпадение результатов. Однако для обычных в гидрогеологии слоистых систем эти методы дают существенное расхождение. Для адекватной имитации распространения растворенной соли необходимо довольно детальное деление пространства миграции на блоки моделирования

[Коносавский и др., 2002]. В реальных моделях и на персональных компьютерах проводить моделирование с такой детальностью практически невозможно вследствие большого времени решения нелинейных задач. Поэтому миграция рассолов была исследована на приближенной к натуре фильтрационной схеме с обычной и даже несколько более подробной, чем обычно, дискретизацией области моделирования.

**Моделирование миграции рассолов.** За основу модельной схемы для сравнения методов выбрана профильная задача для разреза по направлению потока подземных вод, проходящего через вытянутый поперек него солеотвал на южной окраине г. Соликамск. Сравнение методов осуществлялось на программах FILTRA [Коносавский и др., 2002] и комплекса Seep-Stran [Krahn J., 2004]. Первая программа реализовала модель миграции несмешивающихся жидкостей разной плотности, вторая — обычную миграцию смешивающихся жидкостей с учетом различной плотности подземных вод в конечно-элементной постановке. Область миграции, ее дискретизация, поля параметров и граничные условия были идентичны для двух способов моделирования.

Длина выбранного разреза 4400 м, расстояние от западной границы разреза до солеотвала 40 м, ширина солеотвала 660 м. На основании гидрогеологического описания [Мигунов, 1994; Мироненко и др., 1988] выделено 4 слоя с относительно однородными параметрами (рис. 1): 1) водоносный пласт аллювиальных, преимущественно песчаных отложений мощностью 20 м; 2) водоносный пласт известняков верхнесоликамского горизонта или терригенно-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, аспирант, e-mail: sail526@mail.ru

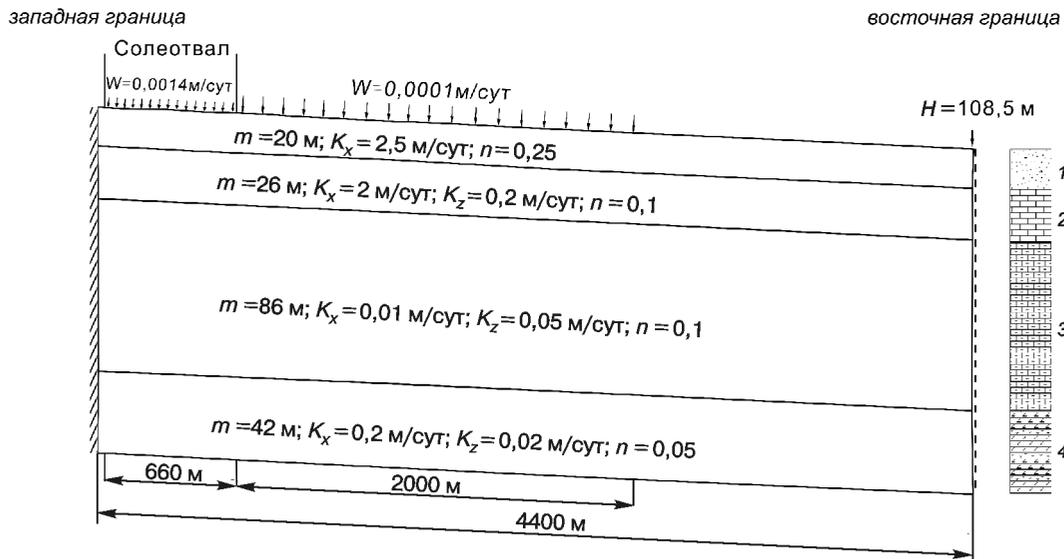


Рис. 1. Схема численной модели с геофильтрационными параметрами: 1 — песок; 2 — известняк; 3 — глинистый известняк; 4 — глина мергельная с гипсом

карбонатной толщи мощностью 26 м; 3) относительно водоупорный пласт глинистых известняков терригенно-карбонатной толщи мощностью 86 м; 4) слабоводоносный пласт нижнесоликамского водоносного горизонта или соляно-мергельной толщи мощностью 42 м. Среднее падение слоев на запад под углом 10°.

На восточной границе модели напор подземных вод принят равным 108,5 м (условное влияние р. Кама), западная граница задана непроницаемой. Инфильтрация рассола солеотвала составляет 0,0014 м/сут. С восточной стороны солеотвала задан участок с инфильтрацией 0,0001 м/сут и длиной 2000 м. Концентрация соли в воде, поступающей из

солеотвала, составляет 360 г/л при плотности 1,2 кг/л. Концентрация соли в природных водах принята нулевой при их плотности 1 кг/л. Фильтрационные параметры и активная пористость слоев приведены на рис. 1.

Область моделирования имеет 99 блоков по длине и 34 блока по высоте, всего 3366 блоков. По вертикали первый пласт был разбит на 4 блока, второй — на 5, третий — на 17 блоков и четвертый — на 8 блоков. Задача носит тестовый характер и отличается от реальных гидрогеологических условий.

**Результаты моделирования** двумя методами показаны на рис. 2. Отмечено, что на начальной стадии моделирования форма распределения миграции рас-

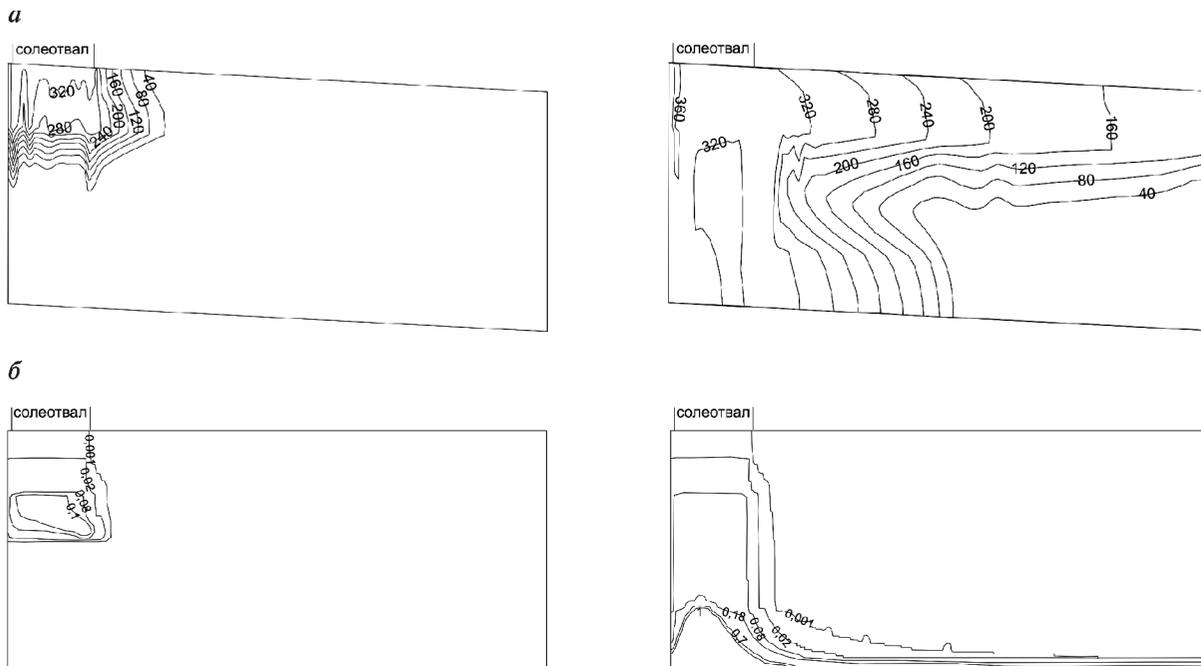


Рис. 2. Сравнительные схемы пути миграции рассолов двумя методами: а — переменной плотности Seep-Ctran; б — несмешивающихся жидкостей FILTRA; слева на 365 сут, справа на 7300 сут

солов под солеотвалом в обеих моделях схожа и выражается практически вертикальным опусканием столба рассола. Для модели переменной плотности большую роль в распространении растворенной соли играет третий водоупорный слой, по которому происходит растекание постепенно разбавляющегося рассола, тогда как в модели несмешивающихся жидкостей для изменения направления миграции с вертикального на горизонтальное необходим абсолютный водоупор — подошва последнего четвертого слоя модели. Хотя вертикальная проницаемость снижается по направлению миграции от верхнего к нижнему слою, горизонтальная проницаемость первого и второго слоев в 20–25 раз больше, чем третьего.

**Заключение.** Недостаток модели несмешивающихся жидкостей — отсутствие растворения на границе контакта пресной воды и рассола. Поэтому ядро

загрязнения всегда имеет максимальную плотность и движется строго вниз. К главным достоинствам модели в программе FILTERA относится возможность эффективно описать ее в рамках струйного проникновения тяжелой вытесняющей жидкости в область, изначально занятую более легкой водой, с приблизительным постоянством проницаемости по глубине.

Фактические данные о наблюдательных скважинах в ближних окрестностях солеотвалов Соликам-Березниковского района показывают загрязнение в небольшой концентрации на удалении от границ солеотвалов, но с увеличением ее по глубине [Мироненко и др., 1988]. Это свидетельствует о предпочтительном применении метода моделирования, основанного на миграции растворов переменной плотности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Коносавский П.К., Румынин В.Г., Синдаловский Л.Н. Особенности численного моделирования фильтрации потоков переменной плотности // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики: Сб. докл. конф. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. С. 533–550.

Конюхов В.М., Храмченков М.Г., Чекалин А.Н. Моделирование распространения тяжелых жидких загрязнений в слоистом водоносном пласте // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1998. Вып. 4. С. 36–43.

Конюхов В.М., Храмченков М.Г., Чекалин А.Н. Моделирование миграции разноплотностных жидкостей в

сильнонеоднородных пластах // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики: Сб. докл. конф. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. С. 405–412.

Мигунов Л.В. Инфильтрационная минеральная зональность надсолевых толщ. СПб.: Наука, 1994.

Мироненко В.М., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Л.: Недра, 1988.

Krahn J. Transport modeling with CTRAN/W. GEO-SLOPE International Ltd. Canada, 2004.

Поступила в редакцию  
22.02.2011