

# ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ БЕЗ УЧЕТА КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ

П. А. Машенькин, М. Л. Сидоров, И. В. Горев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

## Введение

Настоящее время характеризуется существенным технологическим прогрессом. Вместе с технологическим развитием наблюдается ухудшение экологии из-за ряда антропогенных факторов. Среди всех этих факторов можно выделить увеличение химического производства, мусорных свалок, хранилищ радиоактивных отходов (РАО), недропользование и т. д. Все эти факторы сильно влияют на загрязненность поверхностных и подземных вод. Для обеспечения нашей безопасности и улучшения экологической обстановки необходимо развивать инструменты и методы контроля и прогнозирования загрязнения вод. Одним из таких инструментов является пакет программ «НИМФА». В умелых руках гидрогеолога с помощью «НИМФЫ» можно провести расчет по влиянию химических и ядерных отходов на подземные воды, возможные водозаборы питьевой воды, спрогнозировать влияние и эффективность защитных мер. На XVI сессии школы-семинара «Промышленная безопасность и экология» уже были доклады посвященные пакету программ «НИМФА» [1]. В данном докладе пойдет речь о развитии возможностей «НИМФЫ» в части возможности решения задач фильтрации воды в почве вблизи к дневной поверхности.

## Описание комплекса программ:

Комплекс программ состоит из препроцессора ПС (программного средства) НИМФА, счетного модуля и постпроцессора. На рис. 1 изображен вид препроцессора

при работе задания данных для одного из объектов Росатома.

В препроцессоре задается геометрия модели, параметры для построения счетной сетки, задаются граничные условия задачи, задаются источники и стоки (реки, озера, скважины, атмосферные осадки) и характеристики породы. Также в отдельной вкладке задаются параметры счета задачи. Результатом работы препроцессора является созданный файл с расширением *xml*, который является входным параметром для счетного модуля. Счетный модуль производит расчет задачи на современных многопроцессорных ЭВМ с возможностью счета на распределённой памяти. Результатом работы счетного модуля считаются текстовые файлы выдачи и файлы формата *efr*, которые можно отобразить программой *ScientificView* (разработка РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИТМФ). Также важная информация о балансах потоков воды хранится в файле *disbalance.txt*.

Постпроцессор *ScientificView* отвечает за визуализацию трёхмерных полей полученных из счетного модуля. На рис. 2 приведено поле напора одного из объектов Росатома.

На рис. 3 приведено поле насыщенности и отфильтрованы ячейки с воздухом (доля воды меньше 10 %) для отображения линзы грунтовых вод:

## Математическая модель и метод расчета двухфазной фильтрации воды и воздуха

Математическая модель двухфазной фильтрации может быть описана двумя законами сохранения вещества (воды и возду-

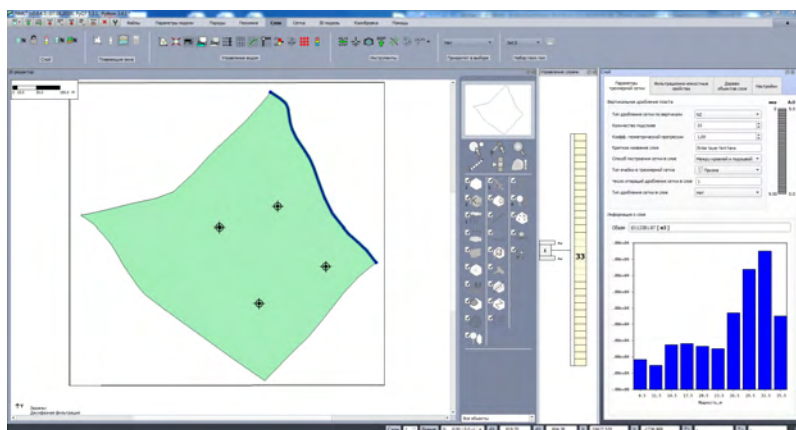


Рис. 1. Вид окна задания данных в препроцессоре ПС НИМФА

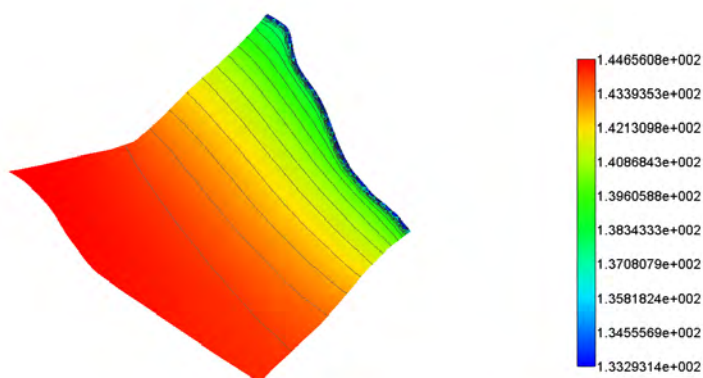


Рис. 2. Поле напоров одного из объектов Росатома

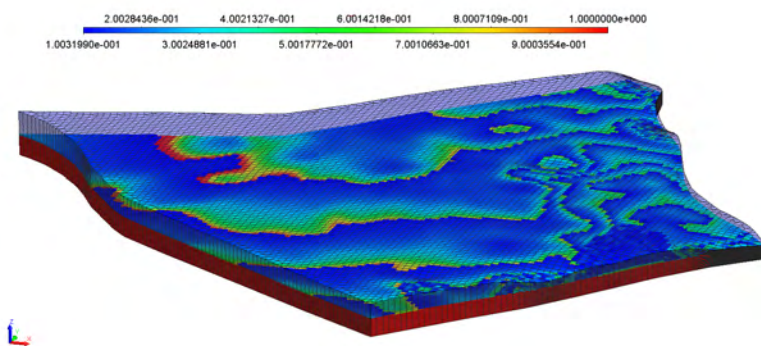


Рис. 3. Поле насыщенности и положения линзы грунтовых вод

ха), обобщенным законом Дарси для воздуха и воды и начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial mS}{\partial t} + \text{div}(V_w) = q_w \quad (1)$$

$$\frac{\partial mS_g}{\partial t} + \text{div}(V_g) = q_g \quad (2)$$

$$V_i = -K\lambda_i(\text{grad}P - \rho_i \bar{g}) \quad i = w, g \quad (3)$$

$$\lambda_i = \frac{k_i}{\mu_i} \quad i = w, g .$$

Здесь,  $m$  – пористость,  $S$  – насыщенность воды,  $S_g$  – насыщенность воздуха,  $t$  – время,

$V_w$  – скорость фильтрации воды, – скорость фильтрации воздуха,  $q_w$  – функция источника/стока воды,  $q_g$  – функция источника/стока воздуха,  $K$  – абсолютная проницаемость породы,  $k_w$  – относительная фазовая проницаемость воды,  $k_g$  – относительная фазовая проницаемость воздуха,  $\mu_w$  – вязкость воды,  $\mu_g$  – вязкость воздуха,  $\rho_w$  – плотность воды,  $\rho_g$  – плотность воздуха,  $\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения.

Сумма насыщенностей фаз равна единице:

$$S_w + S_g = 1.$$

Начальные условия задаются для давлений и насыщенности:

$$P(x, y, z, t = 0) = P_0, \quad (4)$$

$$S(x, y, z, t = 0) = S_0. \quad (5)$$

На границе могут задаваться также значения давления и насыщенности:

$$P(x, y, z, t)|_{\partial\Omega} = P_B(x, y, z, t), \quad (6)$$

$$S(x, y, z, t)|_{\partial\Omega} = S_B(x, y, z, t). \quad (7)$$

Также может стоять условие заданного потока воды и газа:

$$\vec{V}_i \cdot \vec{n}|_{\partial\Omega} = f_i(x, y, z, t) \quad i = w, g. \quad (8)$$

В уравнении (3) относительные фазовые проницаемости (ОФП) являются функцией насыщенности. Благодаря присутствию ОФП функции, в мат. модели происходит учет взаимовлияния жидкости и воздуха. Отличие от нуля или единицы функции ОФП говорит о том, что фазы мешают друг другу, увеличивается потеря скорости при одинаковом перепаде давления за счет межфазных взаимодействий. Типичный вид функций ОФП приведен на рис. 4:

Видно, что функции  $k_1$  и  $k_2$  являются монотонно возрастающей и убывающей со-

ответственно. В случае трещиноватой среды или из-за малости капиллярных эффектов, ОФП зачастую можно считать линейными функциями насыщенности.

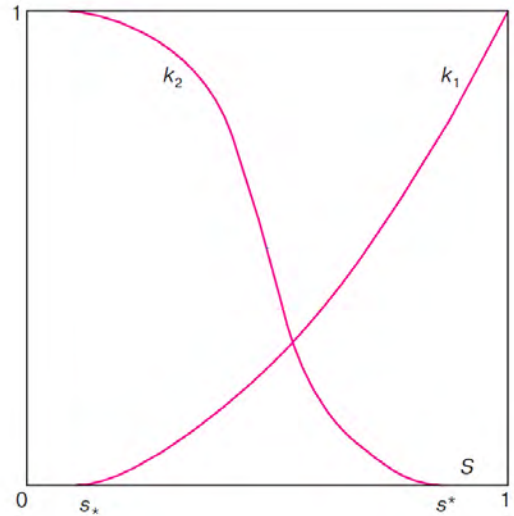


Рис. 4. Типичный вид функции ОФП для двухфазной системы

Особенностью процесса совместной фильтрации воды и воздуха является отличие их характеристик (плотность и вязкость) на несколько порядков. Данная особенность должна учитываться при построении алгоритма расчета задач фильтрации воды и воздуха. Для повышения устойчивости счета используется неявная разностная схема всей симтемы (без расщеплений). Полученная нелинейная система решается неточным методом Ньютона с использованием приема *pseudo time stepping*. Полученная методика была протестирована и верифицирована.

### Тестирование и верификация

На сегодняшний день одной из самых распространенных и следовательно проверенных программ является программа MODFLOW [2]. Поэтому именно на его тестовой базе было решено проверить работоспособность методики расчета двухфазной фильтрации.

Tecm basic1

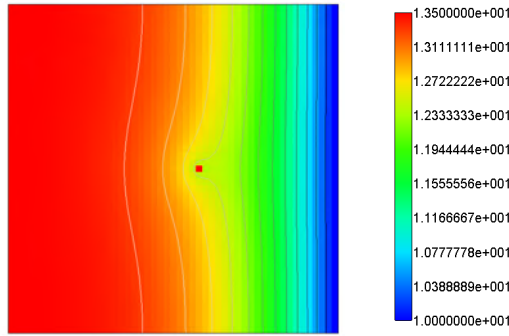


Рис. 5. Поле напоров MF и НИМФА

Напор в верхней ячейки со скважиной без воздуха 11,67 м в НИМФЕ, напор в MF 11,98 м. Разница не более 8 % по отношению к полному перепаду напора.

Tecm basic1 (модифицированный – отключена инфильтрация воды)

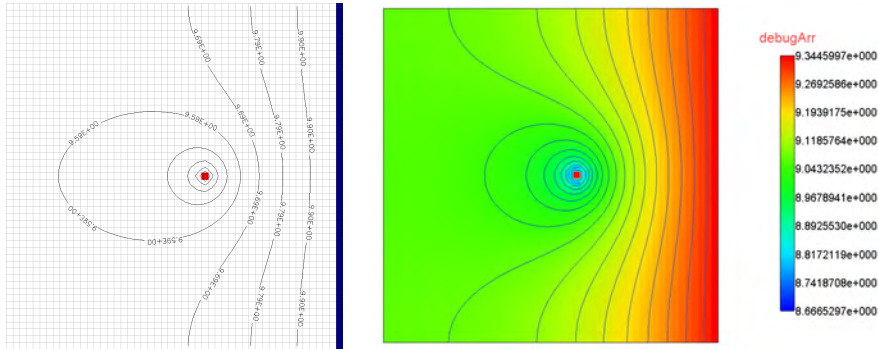


Рис. 6

Напоры в ячейках со скважиной равняются 8,96 м и 8,66 м для MF и ПК НИМФА соответственно (при общем перепаде напора 2,22 м). Разница менее 1,5 %.

Tecm basic4

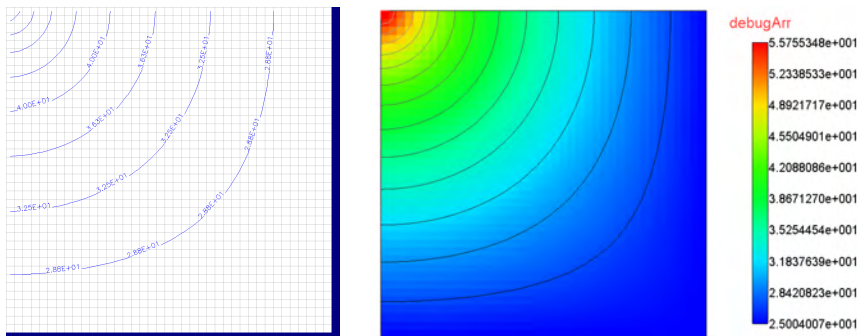


Рис. 7

Напоры в левом верхнем углу по MF и по ПК НИМФА равны 56,56 м и 55,75 м соответственно. Общий перепад напора 30 м. Разница по отношению к общему перепаду напора не более 3 %.

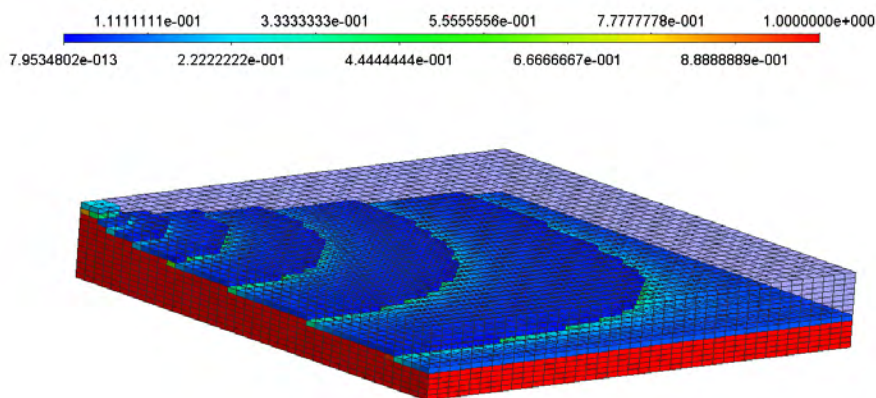


Рис. 8. Зеркало грунтовых вод для тестовой задачи basic4

### Тест TUTORIAL 3

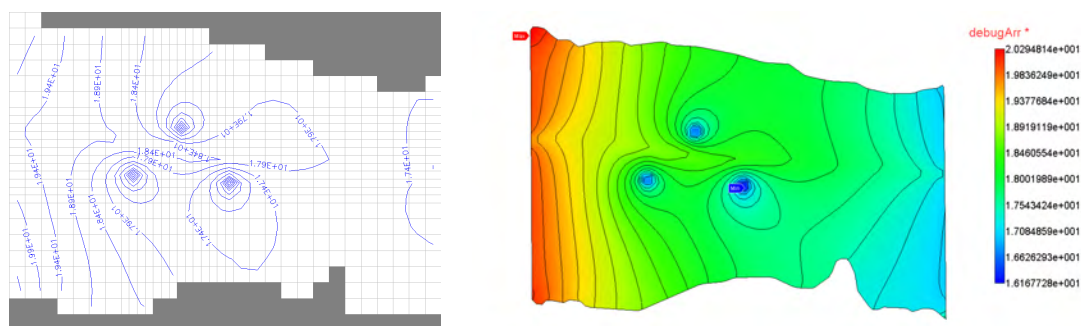


Рис. 9. Поля напоров для задачи TUTORIAL\_3 [2]

Количественное сравнение не имеется возможности привести, так как при подготовке задачи не было точной информации о координатах источников и границы области оцифровывались вручную, что в себе несет некую погрешность (погрешность начальных данных).

### **Выводы**

В докладе был представлен краткий обзор пакета программ НИМФА и его новые возможности (модуль двухфазной фильтрации). Показано, что модуль прошел тестирование на тестах одной из самых распространенных программ по моделированию течений воды в пористых средах. Данный модуль существенно расширяет возможности пакета программ НИМФА.

### **Список литературы**

1. Семенов М. Е. Численное моделирование геофильтрации и геомиграции на объектах госкорпорации «РОСАТОМ» с использованием программного комплекса «НИМФА» // Промышленная безопасность и экология: Мат. XVI сессии школы-семинара. – Саров, 2017. С. 193–197
2. McDonald M. C. and Harbaugh A. W. 1981. MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, U. S. Geological Survey, Open-file report.