

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ СРЕДЫ

Журавков М.А., Коновалов О.Л., Круподеров А.В., Хвесеня С.С.

The technology of determination of stress-strain state of massive with underground water is proposed in this paper. The main method which was used is finite element method. Taking into account of cross-feed influence of water and rock was achieved by using corresponding equilibrium and storage equations. Some results of simulations are represented.

Моделирование сопряженных гидрогеомеханических процессов является сложной, но в то же время актуальной задачей. В последние годы интерес к такого рода задачам неуклонно возрастает. Для месторождений соляных и калийных пород одной из характерных особенностей является увеличение водо/рассолопритоков в выработанное пространство с увеличением масштабов отработанного пространства. Причем данное явление наблюдается на различных месторождениях с подземным способом отработки. Перемещение (геомиграция) жидкой фракции в массивах горных пород при значительных объемах выделения жидкости в выработанное пространство требует применения специальных мероприятий, зачастую весьма экономически затратных.

При построении механико-математических моделей будем рассматривать гидрогеомеханические процессы как процессы геомиграции многофазных сред, где в качестве твердой фракции выступают горные породы, а жидкой фазы – вода или рассолы.

Для объективной и всесторонней характеристики состояния деформируемого твердого скелета с учетом наличия в массиве жидкой фракции при выполнении модельных исследований необходимо учитывать большой объем характеристик различной природы. Эти характеристики чрезвычайно разнообразны, обладают пространственно-временными свойствами и поэтому одним из наиболее приемлемых методов анализа является подход, базирующийся на построении компьютерных моделей. При таком подходе на основе поступающих новых данных можно оперативно осуществлять составление и обновление различных моделей применительно к решению разнообразных задач.

Одной из основных модельных задач является задача изучения процессов фильтрации свободной/связанной жидкости в массивах горных пород, порождаемых изменением геомеханического состояния породного массива вследствие ведения горных работ

Одним из подходов к решению проблемы исследования фильтрации жидкости в массивах горных пород является решение модельных механико-математических задач по изучению поведения двухфазной среды. Можно рассмотреть различные случаи механического поведения двухфазной среды. Одной из наиболее адекватных моделей для изучаемого класса прикладных задач представляется модель с упругим режимом поведения двухфазной среды [1]: напряженное состояние, возникающее в твердом деформируемом скелете, оказывает давление на жидкость, вследствие чего связанная жидкость приходит в движение; с другой стороны формирующееся давление в жидкой фазе представляет собой источник дополнительных напряжений в твердом деформируемом скелете.

Важным элементом обработки исходных физико-механических данных при построении модели является определение эффективных характеристик различных

структур (несоднородные породы, слои, пакки и т.п.) [2, 3]. Поэтому очевидно, что система информационных баз данных исходной информации должна содержать модуль вычисления эффективных (приведенных) характеристик породных структур.

Для массивов горных пород, вследствие значительной изменчивости и стохастичности характеристик с физико-механической информацией удобным средством являются разрабатываемые на базе вариационных принципов механики подходы, состоящие в определении не собственно значений механических характеристик, а интервалов («вилки»), в пределах которых находятся истинные значения характеристик для получения средних значений для всего изучаемого интервала.

Разработанный модуль в качестве базиса использует подходы Фойгта и Рейса и принцип Хашина–Штрикмана [4].

Так, программный модуль позволяет осуществлять отбор необходимых интервалов осреднения по возрасту, а также производить выбор данных по типу представления (бурение, камеральная обработка). После выполнения расчетов результаты представляются в виде отчета (рисунок 1).

Отчет			
Результаты осреднения:			
По Хащину-Штрикману:			
8.87E+08	≤	<i>Модуль сдвига</i>	≤ 8.90E+08
1.02E+09	≤	<i>Коэффициент объемного расширения</i>	≤ 1.02E+09
2.05E+09	≤	<i>Модуль Юнга</i>	≤ 2.08E+09
0.16	≤	<i>Коэффициент Пуассона</i>	≤ 0.164
По Фойгту-Рейсу:			
8.77E+08	≤	<i>Модуль сдвига</i>	≤ 9.01E+08
9.88E+08	≤	<i>Коэффициент объемного расширения</i>	≤ 1.04E+09
1.93E+09	≤	<i>Модуль Юнга</i>	≤ 2.20E+09
0.144	≤	<i>Коэффициент Пуассона</i>	≤ 0.179

Рисунок 1 – Пример отчета результатов осреднения

К сожалению, получаемые «вилки» для значений эффективных характеристик могут представлять собой значительные интервалы, вследствие чего рассмотренные методы осреднения не могут быть на практике применимы как общие подходы, а лишь как вспомогательные для выполнения предварительных оценок эффективных значений.

Еще одним методом определения физико-механических свойств является решение обратных задач, т.е. физико-механические свойства подбираются таким образом, чтобы результаты, получаемые по результатам моделирования, совпадали с результатами натуральных экспериментов. Именно этот метод был использован нами.

В результате тестовых модельных расчетов с учетом данных натуральных исследований получено, что достаточным для рассматриваемого класса задач является использование трех-четырех слоев с различными физико-механическими свойствами: осадочные породы, глинисто-мергелистая толща, соляная толща.

В качестве демонстрации эффективности использования предложенной модели рассмотрим прикладную задачу определения гидрогеомеханического состояния одного из участков породного массива разрабатываемого месторождения калийных солей Республики Беларусь. На рассматриваемом участке выполнялись натурные исследования, связанные с наблюдением изменения уровня жидкости в скважинах, вызванных влиянием подземных горных работ.

Постановка задачи. Задача состояла в построении модели, которая позволяет адекватно моделировать изменения гидрологического уровня в скважине, вызванные ведением горных работ (проходкой двух подземных лав). На основе модельных исследований необходимо так же выполнить оценку динамики состояния жидкости в водоносном пласте, построить предполагаемые зоны нарушения сплошности в подработанном массиве.

На рисунке 2 схематически представлено взаимное расположение отработываемых лав (15ЮП и 19ЮП) и скважины (785г), по которой велись натурные наблюдения.

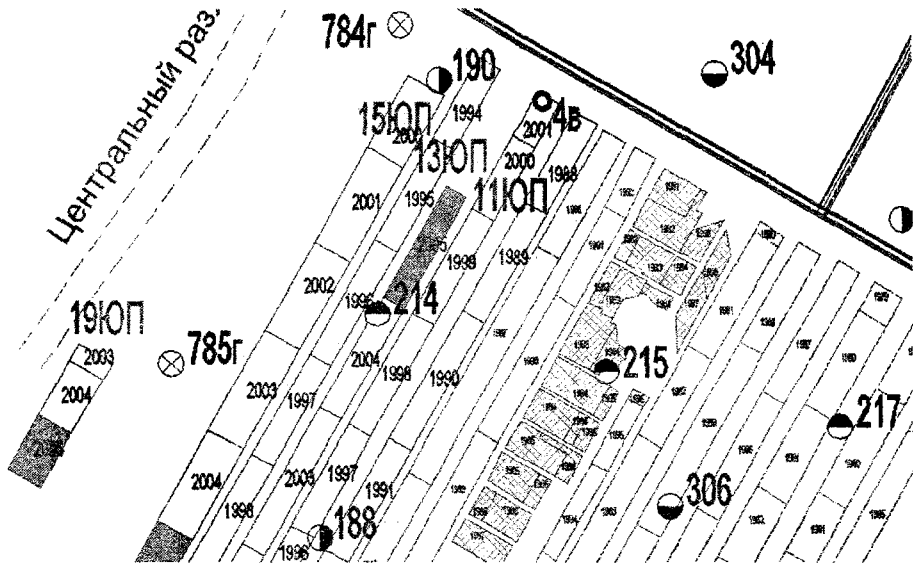


Рисунок 2 – Схема расположения лав и скважины.

Лавы расположены на глубине 560 м, расстояние между ними 1 км, ширина каждой лавы – 200 м, длина лавы 15ЮП – 3 км, длина лавы 19ЮП – 1 км. Скорость продвижения лав – 1 км/год. Скважина пробурена на глубину 500 м. Водоносный слой находится на глубине от 400 до 500 м. Выбор данного участка моделирования был обусловлен тем, что по нему имеются экспериментальные данные и таким образом имеется возможность проверки и корректировки построенной модели. Вычисления проводились на основе уравнений, описывающих совместное воздействие твердой и жидкой фаз.

Система уравнений, описывающих модельную задачу, выглядит следующим образом:

– уравнения равновесия породы с учетом порового давления жидкости

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0$$

– уравнение фильтрации жидкости с учетом влияния горного давления ([1])

$$\frac{\partial p}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) - \alpha_p \left(\frac{\partial (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{\partial t} \right),$$

где $a = \frac{k(1+\varepsilon)}{\gamma(a_v + \varepsilon\beta)}$, $\alpha_p = \frac{a_v}{a_v + \varepsilon\beta}$, ε – коэффициент пористости, β – коэффициент объемного сжатия жидкости, a_n – коэффициент уплотнения породы пласта ($\frac{dp_{rock}}{dt} = -a_v \frac{d\varepsilon}{dt}$), k – коэффициент фильтрации.

К данным уравнениям следует еще добавить граничные условия и начальное распределение давлений. Т.к. начальное распределение давление обычно либо постоянно, либо задается с постоянным градиентом (давление столба жидкости), то, решая задачу с нулевым начальным распределением давления и добавляя к нему начальное распределение давления, получим итоговое распределение. Следует также заметить, что, решая задачу с нулевым начальным распределением давления, мы фактически получаем величину изменения давления, что порой более важно, чем сами итоговые значения давления. То же самое касается граничных условий. В данном случае они принимались нулевыми. В качестве модели упругого поведения массива выбрана не изотропная, а трансверсально-изотропная модель, наиболее полно описывающая основные аспекты поведения массива.

Схема решения сформулированной модельной задачи следующая:

- Вычисляется напряженно-деформированное состояние ненарушенного тяжелого массива. Гидромеханические процессы на данном этапе не рассматриваются.
- Процесс удаления элементов, моделирующих выработанное пространство. На данном этапе «включаются» в рассмотрение гидромеханические процессы.
- Проведение компьютерных расчетов до получения установившегося состояния массива и давления жидкости.
- Анализ результатов вычислений на каждом шаге моделирования.

Расчеты выполнялись со следующими исходными данными:

- коэффициент фильтрации – $k = 2 \cdot 10^{-9}$ м/с;
- коэффициент пористости – $\varepsilon = 0,11$;
- коэффициент объемного сжатия жидкости – $\beta = 10^{-10}$ Па⁻¹;
- коэффициент уплотнения породы пласта – $a_n = 3 \cdot 10^{-9}$ Па⁻¹;
- упругие свойства наносов – $E_2 = 10E_1 = 1$ ГПа, $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$, $G_2 = 0,0577$ ГПа;
- упругие свойства ГМТ – $E_1 = E_2 = 5$ ГПа, $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$, $G_2 = 0,28$ ГПа;
- упругие свойства соляной пачки – $E_1 = E_2 = 14$ ГПа, $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$, $G_2 = 8,08$ ГПа.

В соответствии с приведенными системой разрешающих уравнений и физико-механическими свойствами массива была разработана трехмерная конечноэлементная модель. На рисунке 3 представлена расчетная область и конечноэлементная сетка модели.

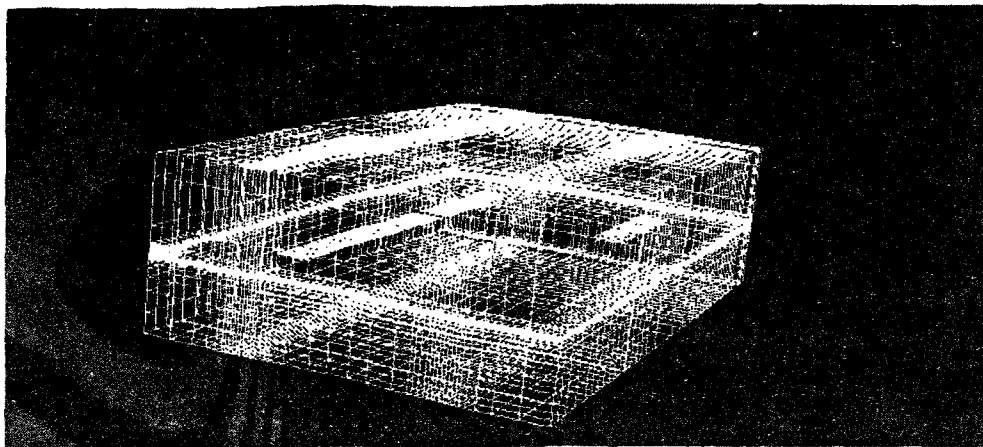


Рисунок 3 – Расчетная область и конечно-элементная сетка модели

Некоторые результаты выполненных исследований представлены на следующих рисунках. На рисунках 4–7 показано формирование зон нарушения сплошности и формирование зон спада (черный цвет на рисунках) и повышения (светлый цвет) давления жидкой фракции при продвижении лавы 15ЮП в вертикальном сечении, проходящем через центр данной лавы и параллельном ходу ее движения.

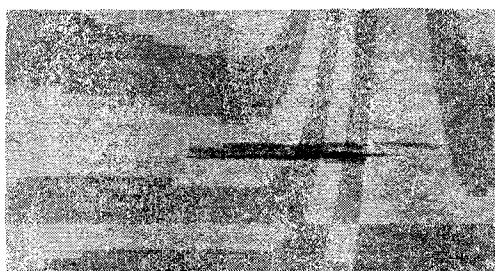


Рисунок 4 – Зоны нарушения сплошности на момент времени 1 год и 4 месяца

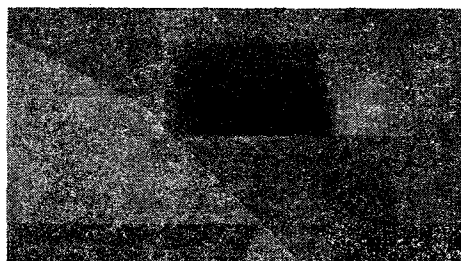


Рисунок 5 – Зоны повышения и спада давления на момент времени 1 год и 4 месяца с начала продвижения лавы 15ЮП

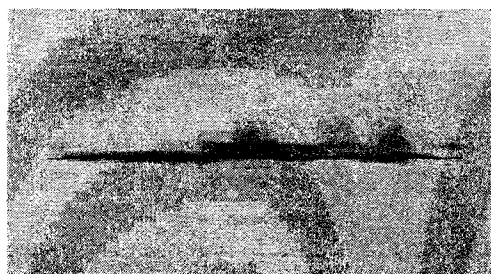


Рисунок 6 – Зоны нарушения сплошности на момент времени 2.5 года с начала продвижения лавы 15ЮП

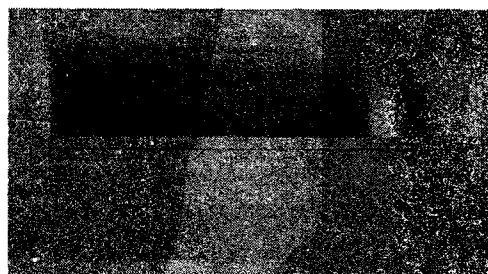


Рисунок 7 – Зоны повышения и спада давления на момент времени 2.5 года с начала продвижения лавы 15ЮП

На рисунке 8 показаны зоны нарушения сплошности в массиве на конец процессов сдвижения и деформирования в сечении, проходящем через центр лавы 15ЮП и перпендикулярном ходу ее движения. На рисунке 9 показаны изоповерхности зон нарушения сплошности в массиве на конец процессов сдвижения и деформирования.



Рисунок 8 – Зоны повышения и спада давления на момент времени 2.5 года с начала продвижения лавы 19ЮП

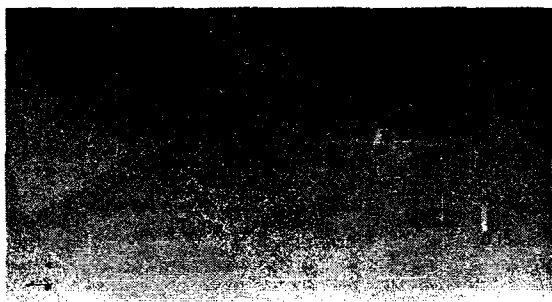


Рисунок 9 – Зоны повышения и спада давления на момент времени 2.5 года с начала продвижения лавы 19ЮП

Результаты модельных исследований сравнивались с данными натуральных экспериментов. На рис.9 представлены графики напоров ($h = p/\rho g$) в месте расположения скважины. Результаты, полученные по модели, – сплошная линия, данные замеров (реальных)– пунктирная линия.

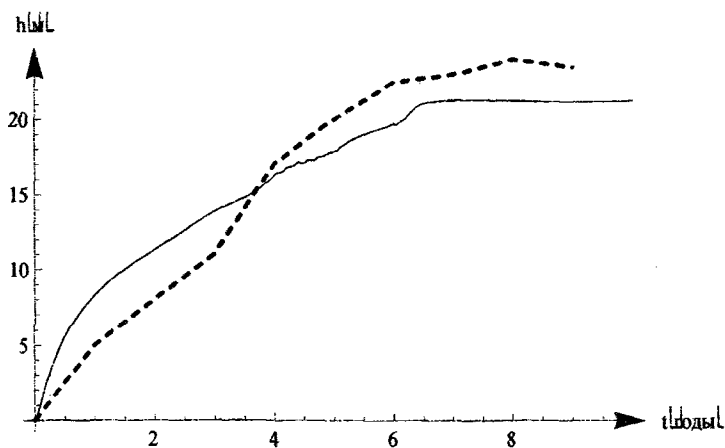


Рисунок 9 – Графики напоров

Как видно из графиков наблюдается не только хорошее качественное, но и количественное соответствие модельных и экспериментальных результатов исследований.

На основании экспериментальных исследований хорошо известным является тот факт, что зоны нарушения сплошности распространяются на высоту, равную примерно семидесяти вынимаемым мощностям обрабатываемого пространства. Результаты выполненных модельных исследований показали хорошее согласование с этим фактом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестаков, В.М. Динамика подземных вод / В.М. Шестаков. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 368 с.
2. Журавков, М.А. Информационные базы данных корпоративной системы геомеханического мониторинга как основа для моделирования геомеханических процессов / М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, С.С. Хвесеня // Геоинформатика. – 2009. – № 4. – С. 35–42.
3. Шашенко, А.И. Масштабный эффект в горных породах / А.И. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.В. Кужель. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – 126 с.
4. Журавков, М.А. Компьютерное моделирование в геомеханике / М.А. Журавков. – Минск: БГУ, 2008. – 444 с.