

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юфин А.П. Определение потерь напора при гидротранспорте мелких фракций угля по горизонтальным трубам. – Сб. «Гидравлика сооружений и динамика русел». – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 126с.
2. Мучник В.С. Опыт подземной добычи угля гидравлическим способом и пути его совершенствования. – М.: Углетехиздат, 1956. – 224с.
3. Кнороз В.С. Движение гидросмесей в напорных трубопроводах и метод расчета. – М.: Известия ВНИИГ, т.30, 1941. – 256с.
4. Технические указания по расчету напорного гидравлического транспорта грунтов. – ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Л.: Энергия, 1967. – 45с.
5. Трайнис В.В. Параметры и режимы гидравлического транспортирования угля по трубопроводам. – М.: Наука, 1970. – 192с.
6. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. 293с.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Издательство иностранной литературы, 1956. 528с.
8. Справочник по обогащению углей / Под ред. И.С. Благова, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина. 2-е изд. – М.: Недра, 1984. 614с.

□ Автор статьи:

Коровина
Юлия Викторовна
-аспирант каф. экологии и ес-
тествознания (Новокузнецкий фи-
лиал-институт КемГУ)

УДК 622.271.333:626:550.372

Е. В. Костюков, С. М. Простов, С. П. Бахаева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МАССИВА ГИДРООТВАЛА

Значительная часть горно-добывающих предприятий Кузбасса разрабатывают месторождения каменного угля с 1950–60 гг. На современном этапе развития горные работы приближаются к конечной глубине отработки, а балансовых запасов остается на 10–15 лет эксплуатации. Дальнейшая работа таких предприятий зависит, главным образом, от освоения прилегающих участков, разработка которых в ряде случаев осложнена горно-геологическими или техногенными условиями. К неблагоприятным относятся территории, представляющие собой замкнутые до проектных отметок и законсервированные гидроотвалы.

С целью освоения дополнительных запасов угля Кедровский угольный разрез с 2002 года ведет гидромеханизированный смыв намывных отло-

жений гидроотвала № 3. Для изучения состава, строения и свойств массива были выполнены инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания, которые включали бурение трех скважин, отбор и лабораторные исследования монолитов намывных грунтов и последующую установку в скважинах датчиков порового давления для периодических наблюдений (рис. 1) [1].

Сеть датчиков порового давления представляет собой станцию гидрогеомеханического мониторинга, которая предназначена для организации непрерывных наблюдений за изменением порового давления и развития опасных деформаций массива во время ведения гидромеханизированных работ [2]. Анализ эпюр распределения избыточного порового давления и инженерно-геологического

строения массива (рис. 1) показывает, что изменение статического напряженного состояния массива в районе скв. № 1 произошло в результате отсыпки ограждающей перемычки из скальных вскрышных пород разреза на поверхности гидроотвала [3]. Формирование статического напряженного состояния в районе скв. № 2 связано с наличием слоя дресвяно-щебенистого грунта мощностью более 20 м в верхней части разреза. В районе скв. № 3 наблюдается незначительное увеличение порового давления в средней части намывного слоя под действием собственного веса грунтов.

Анализ результатов гидрогеомеханического мониторинга позволяет оценивать напряженное состояние массива в отдельных точках в пределах сети наблюдательных скважин на

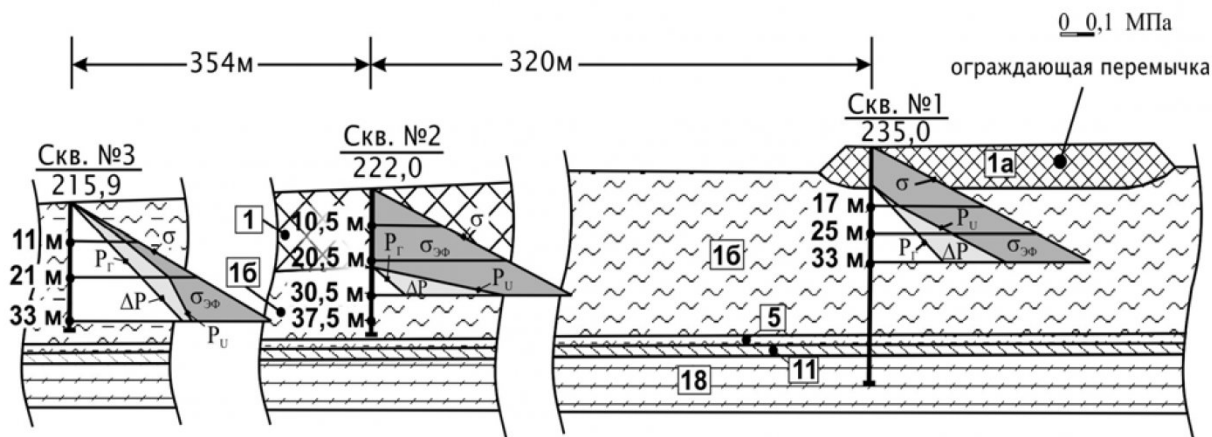


Рис. 1. Инженерно-геологические и гидрогеологические условия намывного массива гидроотвала № 3 (слева от скважин указана глубина установки датчиков порового давления, справа – эпюры полных, эффективных напряжений и порового давления, построенные по данным гидрогеологических наблюдений):

1 – техногенный грунт, представлен суглинком дресвянистым, твердым; 1а – насыпной грунт, представлен глыбовым и дресвяно-щебенистым грунтом; 1б – намывной грунт, представлен суглинком мягко и тугопластичной консистенции, насыщен водой; 5 – суглинок серого цвета, аллювиальный, полутвердой консистенции, насыщенный водой; 11 – аргиллит серый, выветрелый до глины твердой, очень плотный, маловлажный; 18 – скальный грунт, представлен аргиллитом прочным, трещиноватым;

σ – полные напряжения; $\sigma_{эф}$ – эффективные напряжения; P_u – поровое давление; ΔP – избыточное поровое давление; P_r – гидростатическое давление

дату производства замера. Вместе с тем, интерес представляет непрерывный в пространстве и во времени прогноз напряженного состояния намывного массива гидроотвала и деформационных процессов в результате развития горных работ.

Для решения данной задачи авторами разработана численная геомеханическая модель. Анализ напряженно-деформированного состояния массива выполнялся методом конечных элементов. Использовался традиционный подход, предусматривающий разбиение модели исследуемого объекта на непересекающиеся компоненты простой геометрии. Механическое поведение модели выражается с помощью значеный искомым функций на множестве узловых точек элементов посредством решения соответствующих дифференциальных уравнений [4].

Типичный конечный элемент e определяется узлами i, j, m и т.д., а также границами в виде прямых линий (рис. 2). Смещения в любой точке элемента определяются вектором-

столбцом $\{f(x, y)\}$:

$$\{f(x, y)\} = [N]\{\delta\}^e = [N_i, N_j, N_m, \dots] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_m \\ \dots \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где компоненты $[N]$ являются специальными функциями и должны быть выбраны так, чтобы при подстановке координат соответствующих узлов в уравнение (1) были получены соответствующие узловые смещения, а $\{\delta\}^e$ есть ряд узловых смещений данного элемента. Так например, в случае плоского напряженного состояния вектор-столбец

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix}$$

характеризует горизонтальные и вертикальные смещения типичной точки внутри элемента, а компоненты

$$\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}$$

являются соответствующими

смещениям узла i .

Зная смещения во всех точках элемента, можно определить деформации ϵ любого элемента. Результатом является соотношение, которое в матричном виде может быть записано следующим образом:

$$\{\epsilon\} = [B]\{\delta\}^e, \quad (2)$$

где $[B]$ – матрица смещения, определяемая из уравнения (1) в зависимости от специальных интерполирующих функций N . Если принять функции B линейными, то деформации будут постоянными по всему элементу.

Для случая плоского напряженного состояния деформации определяют через смещения по известным соотношениям:

$$\begin{aligned} \{\epsilon_x\} &= \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \right\} = \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} U \right\}; \\ \{\epsilon_y\} &= \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} \right\} = \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} V \right\}; \\ \{\gamma_{xy}\} &= \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\} = \\ &= \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} U + \frac{\partial N}{\partial x} V \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где U, V – компоненты сил.

Материал на границах элемента может испытывать начальные деформации, которые вызываются изменением температуры, усадкой и т.д. Если эти деформации обозначить $\{\varepsilon_0\}$, то напряжения будут вызваны различием между реальными и первоначальными деформациями. В этом случае связь между напряжениями и деформациями будет описываться следующей зависимостью:

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}), \quad (4)$$

где $[D]$ – матрица упругости, отражающая соответствующие свойства материала,

$[D]=$

$$\frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \times \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix};$$

E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона.

Для плоского напряженного состояния рассматривают три компоненты напряжения, соответствующие трем компонентам деформаций. Напряженное состояние каждого элемента описывается следующим образом:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

Выражение

$$\{F\}^e = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_m \\ \dots \end{Bmatrix},$$

определяет силы в узлах, которые эквивалентны граничным напряжениям и нагрузкам, распределенным по элементу. Каждая из сил $\{F_i\}$ должна содержать такое же число компонентов, как и соответствующие смещения в узлах $\{\delta_i\}$, и должна действовать в соответствующих направлениях.

Распределенные нагрузки

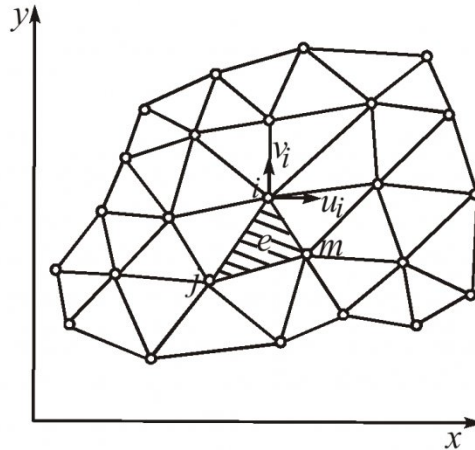


Рис. 2. Плоское напряженное состояние области, разбитой на конечные элементы

$\{p\}$ определяют как силы, действующие на единицу объема материала элемента, в направлениях, соответствующих направлениям смещений $\{f\}$ в этом узле.

В случае плоского напряженного состояния:

$$\{F_i\} = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \end{Bmatrix}; \quad \{p\} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix},$$

где компоненты U и V соответствуют направлениям смещений

u и v ; X и Y являются компонентами массовой силы.

Чтобы определить силы в узлах эквивалентными реальным граничным напряжениям и распределенным нагрузкам, необходимо задать произвольное (виртуальное) смещение в узлах и приравнять внешнюю и внутреннюю работу, произведенную различными силами и напряжениями на этих переме-



Рис. 3. Алгоритм моделирования геомеханического состояния техногенного массива

щениях.

Принимая во внимание приведенные выше уравнения, можно получить соотношение описывающее силы в узлах любого элемента расчетной конструкции:

$$\{F\}^e = \{F\}_y^e + \{F\}_p^e + \{F\}_{\varepsilon 0}^e, \quad (6)$$

где $\{F\}_y^e$ – силы упругой деформации; $\{F\}_p^e$ – силы в узлах, возникающие за счет распределенных нагрузок; $\{F\}_{\varepsilon 0}^e$ – силы, возникающие от начальной деформации.

Целесообразно с целью повышения точности расчетов использовать экспериментально-аналитический метод исследования.

Разработанный авторами алгоритм моделирования приведен на рис. 3.

Началу моделирования предшествует выполнение следующих операций, заключающихся в обработке геологических и экспериментальных данных:

- составление масштабной модели массива;
- выделение различных геологических слоев и выбор модели их деформирования;
- расчет распределенных внешних нагрузок (в рассматриваемых выше условиях - от веса ограждающей переемычки и слоя дресвяно-щебенистого грунта в районе скв. № 2);

- определение граничных условий (нижняя граница модели на контакте намывных грунтов со скальным массивом считается неподвижной, конечные элементы у левой и правой границ модели наделены свойством "бесконечности" продольных размеров).

Следующий этап моделирования заключается в установлении диапазона изменения деформационных свойств грунтов (модуля Юнга E , коэффициента Пуассона μ) на основании результатов инженерно-геологических изысканий.

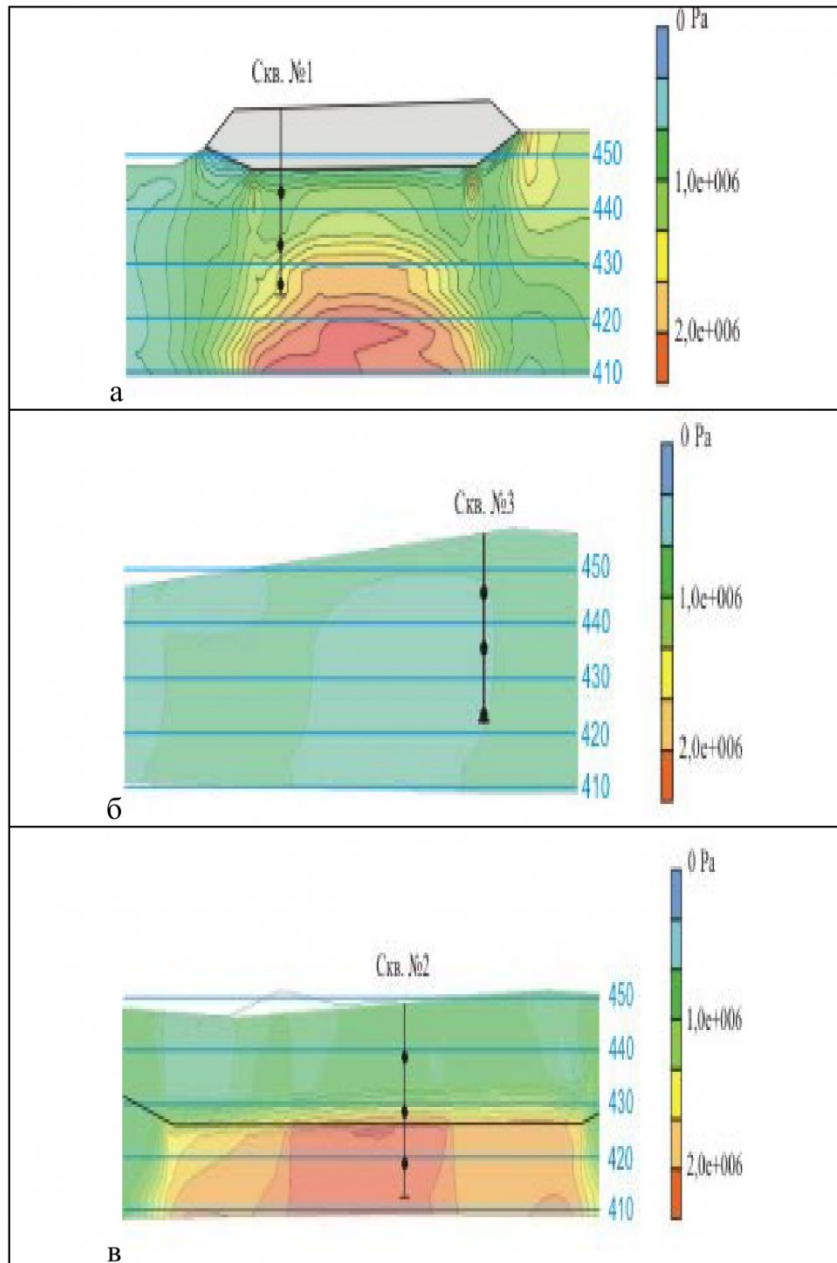


Рис. 4. Фрагменты аналитической модели распределения порового давления в техногенном массиве гидроотвала в районе стационарных наблюдательных гидрогеологических скважин №1 (а), №2 (б) и №3 (в)

Исходные характеристики закладывают в модель и производят вычисления порового давления воды в грунтах методом конечных элементов. Полученные значения порового давления сравнивают с данными натурных наблюдений в точках установки датчиков (рис. 1). Если расхождение Δ между расчетным и фактическим значением превышает установленный предел ($\Delta_{don} = 5\%$), то производят циклическую корректировку

исходных параметров ($E + \Delta E$), до тех пор, пока не выполнится требуемое условие ($\Delta \leq \Delta_{don}$). Выполнение этого условия означает, что адекватность аналитической модели обеспечена, и дает возможность приступать к моделированию напряженно-деформированного состояния массива.

Отдельные результаты выполненных исследований приведены на рис. 4.

В частности, в результате

выполненных расчетов установлено, что нагрузки от веса ограждающей перемычки обусловили формирование в намывном массиве зоны повышенного порового давления (рис. 4, а). Наиболее напряженное ядро этой зоны расположено в средней части под ограждающей перемычкой и смещено в сторону гидромеханизированного забоя из-за дополнительного пригруза намывного массива пульпой, сбрасываемой за ограждающую перемычку в течение трех лет (с 2002 по 2004 г.). На формирование повышенного порового давления в

районе скв. № 2 (рис. 4, б) определяющее влияние оказывает слой дресвяного грунта мощностью около 23 м, представленный смесью намывных суглинков и обломков скальных вскрышных пород расположенного рядом Пихтовского отвала. Рядом с гидромеханизированным забоем № 4 (рис. 4, в) массив находится в более разгруженном состоянии, поэтому поровое давление в этом направлении заметно снижается.

В результате корректирования расчетных показателей порового давления по данными натурных наблюдений были

уточнены параметры численной модели намывного массива, что позволяет выполнить точный расчет напряжений и деформаций, в том числе при изменении расчетного профиля массива в результате ведения гидромеханизированных горных работ.

Реализация предложенного в настоящей статье подхода позволяет повысить точность прогноза деформационных процессов при экспериментально-аналитическом исследовании состояния геотехнических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев, А. И. Опыт отработки намывных четвертичных пород с площади бывшего гидроотвала №3 ОАО "Разрез Кедровский" / А. И. Федосеев, В. Р. Вегнер, С. И. Протасов, С. П. Бахаева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 3. – С. 268–273.
2. Простов, С.М. Прогноз безопасного состояния намывного массива участка открытых горных работ на основе гидрогеологического мониторинга / С. М. Простов, Е. В. Костюков, С. П. Бахаева и др. // Вестник КузГТУ. – 2006. - № 5 – С. 12–16.
3. Бахаева, С. П. Исследование гидрогеомеханических процессов техногенных массивов / С. П. Бахаева, С. И. Протасов, Е. В. Костюков и др. // Вестник КузГТУ. – 2005. – № 3 – С.41–43.
4. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., 1989. The Finite Element Method, 4th Ed., Vol. 1. McGraw-Hill.

□ Авторы статьи:

Костюков
Евгений Владимирович
– канд. техн. наук, науч. сотр. Кемеровского Представительства
ВНИМИ

Простов
Сергей Михайлович
– докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Бахаева
Светлана Петровна
– канд. техн. наук, доц. каф. маркшейдерского дела и геодезии, зам. дир. НФ "КУЗБАСС-НИИОГР"