

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК.623.131

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТСЫПКИ ОТВАЛОВ “СУХИХ” ПОРОД НА ГИДРООТВАЛАХ

© 2015 г. Ю. И. Кутепов*, Н. А. Кутепова*, М. А. Карасев*, Н. Г. Фоменко**

*Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”, 21-я линия В.О., г. Санкт-Петербург, 199155 Россия. E-mail: koutepov@mail.ru

** ОАО “УК” Кузбассразрезуголь”, филиал “Талдинский угольный разрез”, Новокузнецк, 654054 Россия. E-mail: fomenko@tld.kru.ru

Поступила в редакцию 15.09.2014 г.

Рассмотрены геомеханические аспекты проблемы формирования отвалов сухих пород на намывных массивах гидроотвалов. В Эйлеровой постановке выполнено численное моделирование процессов внедрения дезинтегрированных скальных пород в слабые намывные грунты; получена картина формоизменения и трансформирования структуры намывного массива в зависимости от интенсивности его нагружения при отвалообразовании.

Ключевые слова: гидроотвал, намывной массив, сухие отвалы, численное моделирование, Эйлерова постановка, геодинамические процессы, трансформация формы.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке угольных и рудных месторождений полезных ископаемых открытым способом в России применяется гидромеханизация, сопровождающаяся гидромониторной разработкой вскрышной толщи с последующей гидравлической транспортировкой и намывом дезинтегрированных водонасыщенных грунтовых масс (пульпы) в специальные отвальные сооружения – гидроотвалы. За все время использования данного способа в Кузбассе и Курской магнитной аномалии (КМА) было удалено соответственно 1 и 0.5 млрд. м³ пород глинистого и глинисто-мелового состава. Для размещения таких объемов в гидроотвалы потребовалось изъять из сфер сельскохозяйственного и лесного производства значительные площади ценных земель. Так, в Кузбассе для гидравлического складирования вскрышных пород построено более 50 сооружений общей площадью около 7000 га, различной высоты, площади и емкости. Намывные массивы гидроотвалов сложены водонасыщенными отложениями, характеризующимися большой влажностью, сильной сжимаемостью и низкой прочностью.

Одно из направлений рационального землепользования при разработке месторождений полезных ископаемых (МПИ) – размещение отвалов вскрышных на территориях гидроотвалов, эксплуатация которых прекращена. Однако отва-

лообразование на слабом намывном основании осложнено опасными геодинамическими процессами, которые создают определенные риски для работы людей и горнотранспортных механизмов [1, 2]. Обеспечение безопасности в данном случае базируется на изучении и прогнозировании деформационного поведения системы “отвал – гидроотвал”.

Обычно гидроотвалы располагают в оврагах и балках, формируя техногенные геологические тела – намывные массивы сложной формы, ограниченной снизу поверхностью существующего рельефа, сверху – практически горизонтальной поверхностью карты намыва, с боков – откосами сооружения. Отсыпка отвалов на гидроотвалах сопровождается оползнями подподошвенного типа (рис. 1а) и деформациями оседания (рис. 1б), которые постепенно приводят к трансформации намывного массива. Выдавливание слабых грунтов весом отсыпаемой насыпи сокращает мощность намывных пород под отвалом и увеличивает ее перед фронтом отвалообразования.

В зависимости от высоты отвального яруса, направления и интенсивности развития отвальных работ на гидроотвале, а также его инженерно-геологических условий, сформированный первоначально намывной массив изменяет свои размеры и форму, что сказывается на условиях консолидации пород, параметрах природно-тех-

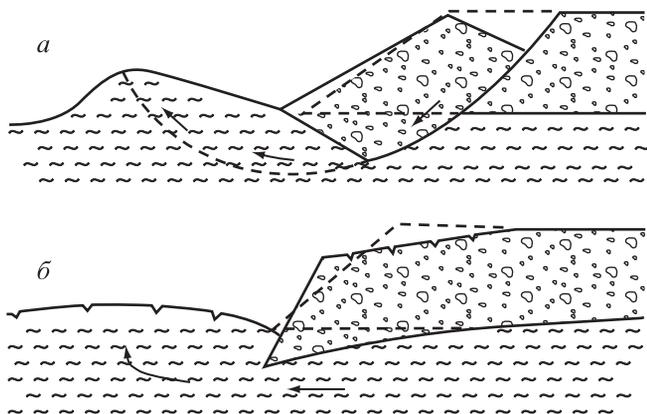


Рис. 1. Виды деформаций отвалов на гидроотвалах (а и б см. объяснение в тексте).

нической системы (ПТС) “отвал – гидроотвал” и устойчивости ее откосов. Поэтому при обосновании безопасных параметров и технологии отвалообразования на гидроотвалах весьма важная задача – прогнозирование величины внедрения отвальной насыпи в намывной массив, изменения мощности и формы последнего.

В настоящее время отсутствуют стандартные методы расчета рассмотренных деформационных процессов, что связано, по всей видимости, со значительными величинами пластических деформаций в намывных грунтах. В работе сделана попытка разработать эффективный метод математического моделирования геомеханических процессов в массивах, сложенных слабыми водонасыщенными грунтами, нагруженных отвальными насыпями. Необходимо также отметить, что в процессе отсыпки пород сухого отвала на намывные грунты происходит не только их внедрение с выдавливанием последних, но и формирование в нагружаемом массиве избыточного порового давления, рассеивание которого может продолжаться длительное время – от нескольких до десятков лет. В данной работе вопросы рассеивания порового давления и уплотнения грунтов под действием веса отсыпаемого сухого отвала, а также устойчивости откосов ПТС не рассматриваются.

МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Традиционно при выполнении численного моделирования геомеханических процессов используется метод конечных элементов (МКЭ) в Лагранжевой постановке, в которой материал жестко связан с узлами элементной сетки, и смещения узлов приводят к деформациям элементов (рис. 2

а, б). В такой постановке достаточно просто оперировать граничными условиями и отслеживать их изменения в процессе численного моделирования. Однако при наличии больших деформаций происходит значительное искажение элементной сетки, что с определенного момента приводит к накоплению недопустимых погрешностей при определении первичных (усилия, перемещения) и вторичных переменных (напряжения и деформации), а в последующем – к значительному расхождению решения.

Альтернатива Лагранжевой постановке – Эйлерова постановка, в которой узлы элементной сетки остаются неподвижными, а материал перемещается через элементную сетку (рис. 2 в, г). Такой подход исключает искажения элементной сетки, качество которой определяется только ее начальным состоянием. Однако отслеживать свободные поверхности, характеризующие границы материала весьма трудоемко. В Эйлеровой постановке элемент может быть заполнен материалом не на 100% (см. рис. 2 г).

Эйлерова постановка применяется при решении нелинейных проблем, включая задачи об экстремальных контактных условиях, значительных деформациях и перемещениях тела, динамических процессах, задачах, связанных с повреждением, разрушением, эрозией.

При отсыпке сухих пород отвала ожидается их значительное внедрение в намывные грунты, которое будет сопровождаться очень большими де-

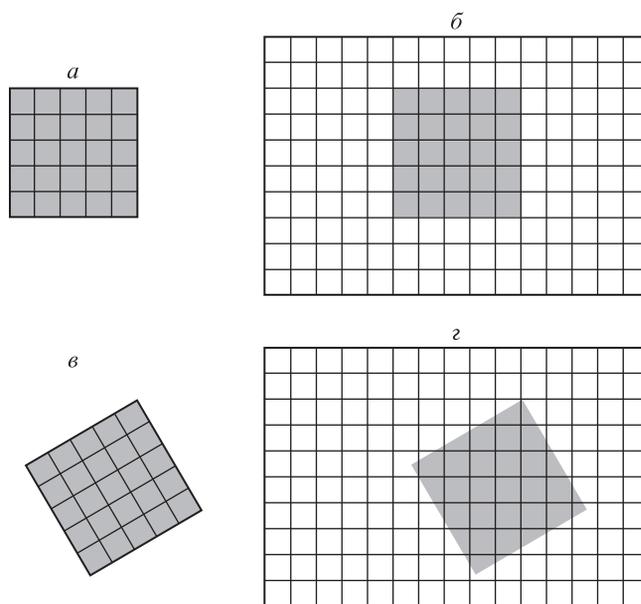


Рис. 2. Взаимосвязь между элементной сеткой и материалом в Лагранжевой постановке (а, б) и Эйлеровой постановке (в, г).

формациями. Решение такой задачи в Лагранжевой постановке с применением неявных методов анализа весьма затруднено, тогда как Эйлера постановка и явный динамический метод анализа позволяют достаточно эффективно решать такой класс задач.

При явном методе численного анализа уравнение движения записывается в форме приращений следующим образом:

$$M\ddot{u} = P - I, \quad (1)$$

где M – узловая матрица масс; \ddot{u} – вектор узловых ускорений; вектор P – внешних и I – внутренних сил.

Ускорение в начале данного инкремента t вычисляется как:

$$\ddot{u}|_{(t)} = (M)^{-1} (P - I)|_{(t)}. \quad (2)$$

Проинтегрировав ускорения по времени и воспользовавшись правилом центрального дифференцирования, получим изменение скорости при постоянном ускорении. Для того, чтобы определить скорость в середине данного инкремента, изменение скорости добавим к величине скорости, полученной в середине предыдущего инкремента:

$$\dot{u}|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{u}|_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{(\Delta t|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)})}{2} \ddot{u}|_{(t)}. \quad (3)$$

Проинтегрировав скорость по времени и добавив перемещения на начало инкремента, получим перемещения на конец инкремента:

$$u|_{(t+\Delta t)} = u|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{u}|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)}. \quad (4)$$

Далее выполняется вычисление приращений деформаций внутри элементов, приращений напряжений, и осуществляется сборка узловых внутренних сил.

Для получения точного результата размер инкремента должен быть достаточно малым (таким, чтобы ускорение практически не изменялось в течение инкремента). Так как вычислительные затраты на нахождение неизвестных в каждом инкременте несущественны, то общее время расчета при решении высоко нелинейных квазистатических задач вполне приемлемо по сравнению с аналогичными временными затратами при использовании неявных методов численного анализа.

Представленный выше подход реализован в качестве базового функционала в программном комплексе Abaqus/Explicit для выполнения многоцелевых прочностных расчетов, который и использовался для численного моделирования отсыпки сухих пород отвала на намывные грунты.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Моделирование процессов выдавливания намывных пород из-под отвала и замещения их отвальными породами производилось для условий гидроотвала на р. Еланный Нарык в Кузбассе. Данное сооружение построено в 1996 г. и эксплуатировалось до 2014 г., в него поступали вскрышные породы глинисто-суглинистого состава. Гидроотвал овражно-балочного типа с двусторонним обвалованием площадью 100 га и высотой более 50 м. Его емкость обеспечена двумя плотинами № 1 (низовой) и № 2 (верховой), перегораживающими русло реки. Намывной массив гидроотвала по гранулометрическому составу разделяется на три зоны: песчано-супесчаную, суглинистую и глинистую. Породы выделенных зон охарактеризованы расчетными показателями физико-механических свойств (таблица).

Расчетные параметры и физико-механические свойства намывных пород и пород отвала, принятые для выполнения численного моделирования

Слой	Плотность, кг/м ³	Модуль деформации, МПа	Коэффициент поперечной деформации	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град
Дамба	2000	40	0.45	5	30
Породы сухих отвалов	1800	40	0.35	15	28
Намывные породы (песчано-супесчаная зона)	1900	16	0.35	5	15
Намывные породы (суглинистая зона)	1900	12	0.35	15	7.5
Намывные породы (глинистая зона)	1900	8	0.35	30	5

После завершения намыва гидроотвала на его поверхность планируется отсыпать отвал общей высотой 90 м четырьмя ярусами: 20, 20, 20 и 30 м. Гидрогеомеханическое обоснование безопасных параметров отвалообразования предполагает последовательное решение следующих задач: 1 – прогноз изменения параметров и формы намывного массива при отсыпке первого 20-метрового отвального яруса; 2 – обоснование устойчивых параметров ПТС “отвал–гидроотвал” с учетом развития в намывном массиве, переформированном в результате отсыпки первого яруса избыточного порового давления.

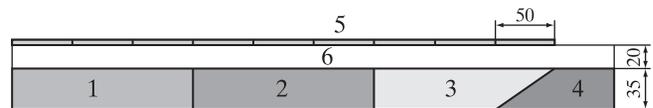
Данная работа рассматривает решение только первой задачи.

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ОТСЫПКИ ОТВАЛА НА ГИДРООТВАЛЕ

Численное моделирование внедрения сухих пород отвала в намывные грунты применительно к объекту исследований выполнялось с учетом следующих предпосылок и допущений:

- численное моделирование выполнялось в плоско-деформационной постановке;
- численное моделирование выполнялось в динамической постановке, что позволило эффективно моделировать процесс отсыпки пород, который сопровождается большими пластическими деформациями;
- при моделировании не учитывается уплотнение тела отвала за счет консолидационных процессов, объемные деформации реализуются только за счет упругих свойств (предполагалось, что процесс отсыпки осуществляется достаточно быстро, значительного рассеивания порового давления не происходит, а деформации, вызванные консолидацией намывных грунтов, будут учтены на следующей стадии численного моделирования, которая в данной статье не рассматривается);
- отсыпка сухого отвала на намывном массиве выполняется от дамбы (от правой границы) в направлении левой границы модели заходами по 50 м;
- моделирование отсыпки каждой заходки выполняется в две стадии:

1 – непосредственно отсыпка пород сухого отвала на намывные породы; 2 – затухание деформаций отвала; граничные условия не изменяются (продолжительность затухания процессов деформирования определяется для каждой конкретной заходки на основании наблюдения за скоростью развития деформаций во времени);



- 1 – намывные породы (песчано-супесчаная зона);
- 2 – намывные породы (суглинистые породы);
- 3 – намывные породы (глинистые породы); 4 – дамба;
- 5 – участки отсыпок сухого отвала;
- 6 – пространство, не заполненное материалом

Рис. 3. Геометрическое представление модели численного моделирования процессов внедрения отвальных пород в намывной массив.

- механическое поведение намывных пород и пород сухого отвала описывается упругопластической моделью Кулона–Мора;
- основание гидроотвала в явном виде при выполнении численного моделирования не рассматривалось, а заменялось граничным условием, моделирующим абсолютно жесткое основание.

Имитация отсыпки сухих пород отвала осуществлялась через участок модели номер 5 (рис. 3), который представляет собой специальное граничное условие (применимо только для задач в Эйлеровой постановке), позволяющее поступать материалу из-за пределов модели через данную границу.

Задача рассматривалась в следующих граничных условиях:

- перемещения по левой границе модели запрещены (рассматривается как плоскость симметрии);
- перемещения по правой границе модели запрещены;
- перемещения по низу модели запрещены;
- пространство между намывными породами и границей 5, на которой установлено специальное граничное условие, не заполнено материалом, другой материал свободно перемещается в эту область.

Для описания среды согласно модели Кулона–Мора необходимо, помимо двух упругих констант, три пластических параметра: сцепление c , угол внутреннего трения φ и угол дилатансии ψ .

Классическое условие пластичности для сыпучих сред (закон трения Кулона) можно записать в виде уравнения:

$$f = \tau - c - \sigma_n \operatorname{tg}(\varphi), \quad (5)$$

где τ – предел прочности сдвигу на рассматриваемой площадке; σ_n – нормальное напряжение,

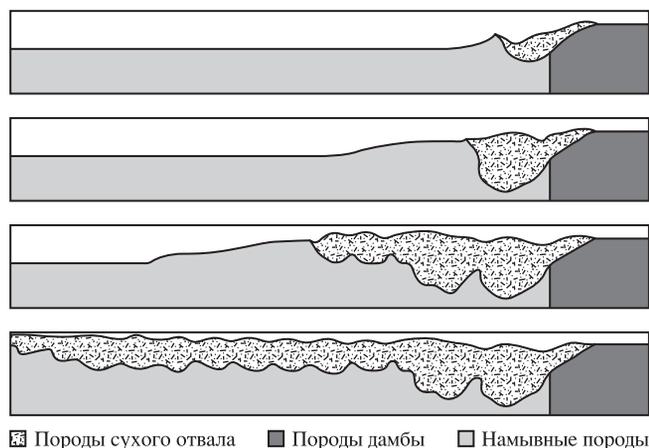


Рис. 4. Внедрение сухих пород отвала в намывные породы гидроотвала.

действующее перпендикулярно рассматриваемой площадке.

В пространстве главных напряжений условие пластичности (5) можно представить набором из 6 уравнений вида:

$$f_1 = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)\sin(\varphi) - c \cos(\varphi), (6)$$

которые в целом описывают поверхность пластического течения, где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные максимальные, средние и минимальные нормальные напряжения соответственно.

Параметры упругопластической модели Кулона–Мора для намывных пород и сухих пород отвала представлены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Выполнено пошаговое моделирование процесса отсыпки сухого отвала на гидроотвале (рис. 4). Анализ результатов позволяет говорить о том, что максимальное внедрение, сопоставимое с мощностью насыпи (высоты отвального яруса), наблюдается на участке глинистой зоны в краевой части модели (у дамбы). Кроме вертикального внедрения пород сухого отвала происходит выдавливание намывных пород из-под насыпи в неперегруженную зону перед фронтом движущегося яруса.

По мере продвижения отвала вглубь гидроотвала величина внедрения насыпи уменьшается, так как часть нагрузки передается на ранее внедренные отвальные породы. Также, исходя из результатов геомеханического моделирования, установлена тенденция уменьшения глубины внедрения отвальных пород по мере смещения фронта горных работ из глинистой зоны в суглинистую и далее – в песчано-супесчаную. Рассматривая деформации намывных пород, вызванных внедрением в них пород сухого отвала, можно отметить, что намывные породы при этом перемещаются из одной зоны в другую, частично перемешиваются там, образуя новые по составу и строению техногенные грунты. Таким образом, техногенный массив ПТС “отвал – гидроотвал” на отдельных участках характеризуется трехслойным строением (сверху вниз): 1) породы сухих отвалов; 2) намывные породы, нарушенные и перемешанные; 3) ненарушенные намывные отложения.

ВЫВОДЫ

В целом получена качественная картина, характеризующая конечный результат развития гидрогеомеханических процессов при отвалообразовании на слабом основании, а именно новую структуру техногенного массива с выделением намывных пород двух типов. Это позволит прогнозировать инженерно-геологические условия ПТС, выполнить расчеты избыточного порового давления, обосновать рекомендации по устойчивым параметрам откосов, разработать технологические схемы ведения отвальных работ и установить критерии для выполнения мониторинга безопасности и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Ермошкин В.В. Обеспечение безопасности гидроотвалов при их экскавации и размещении отвалов “сухих” пород // Гидромеханизация –2006: Матер. 4-го съезда гидромеханизаторов России. М.: Изд-во МГГУ, 2006. Вып. 4. С. 296–304.
2. Рекомендации по инженерно-геологическому обоснованию параметров отвалов сухих пород, отсыпаемых на гидроотвалах. Л.: ВНИМИ, 1985. 82 с.

GEOMECHANICAL SUBSTANTIATION OF DRY WASTE ROCK ACCUMULATION WITHIN HYDRAULIC SLUDGE DUMPS

Yu. I. Koutepov*, **N. A. Koutepova***, **M. A. Karasev***, **N. G. Fomenko****

**National Mineral Resource University “Gornyi”, V.O. 21-ya liniya, St.Petersburg, 199155 Russia.*

E-mail: koutepovy@mail.ru

***Kuzbassrazrezugol JSC, Novokuznetsk, 654054 Russia. E-mail: fomenko@tld.kru.ru*

The article considers geomechanical aspects of dry waste rock formation on hydraulically accumulated sludge dumps. The Eulerian approach is used for numerical simulation of crushed rocks intrusion into weak sludge deposits. The pattern of reshaping and restructuring of hydraulic sludge massif is obtained depending on the intensity of its loading upon waste dump accumulation.

Keywords: *sludge pond, aggraded massif, dry dumps, numerical simulation, Eulerian approach, large deformation, geodynamical processes, shape transformation.*