
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.131

ПРОГНОЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ КОНСОЛИДАЦИИ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ

© 2016 г. А. М. Гальперин, Е. А. Семенова

НИТУ “МИСИС”, Ленинский пр., д. 6, Москва, 119049 Россия.

E-mail: galperin_a@mail.ru; evgeniya270990@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2015 г.

Рассматриваются геомеханические процессы, определяющие состояние бортовых и отвальных массивов на карьерах: уплотнение породных толщ вследствие глубокого водопонижения (депрессионное уплотнение); развитие деформаций сдвига и снижение прочности пород во времени, уплотнение отвальных насыпей и намывных массивов (гидроотвалов и хвостохранилищ), а также их естественных оснований. Механизм уплотнения пород в результате водопонижения состоит в том, что снижение напоров при практически неизменном общем давлении приводит к росту эффективных напряжений.

Для решения практических задач, связанных с освоением глубоких обводненных месторождений, получены зависимости для инженерных расчетов депрессионного уплотнения при различных закономерностях деформирования горных пород. Обоснованы условия применения одномерных задач консолидации для расчетов деформаций и прочности бортов карьеров и отвалов во времени. Рассматриваются задачи уплотнения пород с учетом динамики горных работ.

Ключевые слова: консолидация, осадка, несущая способность, рекультивация.

ВВЕДЕНИЕ

Состояние бортовых и отвальных массивов на карьерах определяется масштабом и скоростью развивающихся в них геомеханических процессов депрессионного уплотнения, сдвиговой ползучести, уплотнения тела и основания отвалов. Вопросы сдвиговой ползучести и длительной прочности глинистых пород рассмотрены применительно к открытым разработкам КМА и строительным объектам Сочинской олимпиады в работе [5].

Преимущественно нестационарным характером протекающих в карьерных откосах процессов обуславливается самостоятельное значение исследований изменений во времени прочности и деформируемости пород ненарушенной (в бортах карьеров и основаниях отвалов) и нарушенной (в теле отвалов) структуры. Решение частных задач прогнозирования геомеханических процессов позволяет производить оценку изменений состояния верхних слоев литосферы при развитии открытых горных работ, необходимую с по-

зиции охраны природы и проектирования карьеров [15].

При этом целесообразно развивать принципы управления состоянием пород в массиве по следующим направлениям [13]:

- внедрение натуральных методов контроля свойств и состояния пород в массиве на всех стадиях освоения месторождений для получения информации из “первоисточника” и на этой основе уменьшение величины коэффициента запаса устойчивости карьерных откосов за счет повышения достоверности исходных данных;
- регламентирование инженерных мероприятий по управлению состоянием пород.

При прогнозировании нестационарных геомеханических процессов в бортах карьеров и отвалах должны учитываться специфические особенности развития этих процессов в зависимости от вида горнотехнических сооружений. Изменение во времени состояния обводненных несцементированных (песчано-глинистых) и полускальных

пород в бортах глубоких карьеров можно схематически представить следующим образом:

- вследствие водопонижения происходит увеличение эффективных напряжений и уплотнение (упрочнение) породных слоев;
- при отстройке бортов измененные вследствие депрессионного уплотнения породы разупрочняются из-за снижения петростатической нагрузки;
- в сформировавшихся откосах развивается процесс снижения во времени прочности слагающих их пород, обусловленный перестройкой структуры под действием сдвигающих напряжений.

Таким образом, на процесс упрочнения бортового массива за счет снятия гидродинамического и гидростатического давления накладывается процесс снижения во времени прочности этих пород, влияние которого определяется сроком стояния откосов. Наиболее значительно влияние этого процесса проявляется на нерабочих бортах карьеров. С учетом совместного влияния отмеченных процессов для обеспечения устойчивости нерабочих бортов может потребоваться постепенное их выполаживание или проведение дополнительных инженерных мероприятий с целью достижения запланированных экономических показателей разработки месторождения.

ДЕФОРМАЦИИ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Прогноз уплотнения массива вследствие снижения напоров (уровней) водоносных горизонтов позволяет оценивать масштаб деформаций слоев и изменений прочности пород в окрестности открытых и подземных горных выработок. Деформации массивов под влиянием водопонижения или нефтеотбора изучались в различных странах в связи с оседанием земной поверхности и авариями наземных сооружений [3, 9, 11].

На Южно-Белозерском железорудном месторождении (Запорожский железорудный комбинат, Украина) оседание земной поверхности в результате глубокого водопонижения (до 200 м) превысило 3 м. Деформации породных массивов под влиянием водопонижения наблюдались также в Челябинском и Львовско-Волынском угольных бассейнах, Никопольском марганцево-рудном бассейне, на месторождениях КМА [6].

Представительные исследования депрессионных осадок при открытых разработках угля выполнены в австралийском штате Виктория.

За 17 лет (1960–1977 гг.) при снижении напоров на 120–125 м зафиксированы осадки толщ песчано-глинистых пород, достигавшие 2 м [19].

При прогнозировании деформаций породных массивов вследствие водопонижения необходимо располагать данными о динамике роста депрессионной нагрузки, значениях коэффициентов депрессионного уплотнения и фильтрации, величинах начального градиента фильтрации и структурной прочности пород, параметрах ползучести их минерального скелета. Механизм сжатия пород в результате водопонижения состоит в том, что снижение напоров при практически неизменном общем давлении приводит к росту эффективных напряжений и уменьшению пористости пород.

Устойчивость *рабочих бортов* карьеров для различных периодов эксплуатации месторождений может обеспечиваться преимущественно путем маневрирования скоростью и направлением подвигания фронта горных работ, а также интенсивностью осушения.

Масштаб изменений во времени состояния скальных пород, слагающих борта глубоких карьеров, определяется прежде всего уровнем напряжений. Очевидно, что наиболее существенно в этом случае проявляется влияние длительной прочности пород. При наличии зон ослабления массива в виде заполненных глинистым материалом трещин на величину порового давления в глинистом заполнителе (и, соответственно, величину сопротивления его сдвигу) заметное влияние оказывают водопонижение и разгрузка массива в результате отстройки контура борта.

Если технико-экономическими расчетами установлена необходимость проведения дополнительных инженерных мероприятий, большое практическое значение приобретают исследования процесса снижения во времени прочности пород, искусственно измененных путем инъецирования в бортовой массив специальных закрепляющих и стабилизирующих материалов. Получение экспериментальных кривых длительной прочности позволяет регламентировать масштабы работ по искусственному закреплению пород с учетом срока службы откосов.

Важный элемент проектирования открытых разработок – определение высоты и объема *карьерных отвалов*, а также потребных для их размещения площадей [15]. Основной процесс, с которым связано изменение состояния отвальных пород во времени, – их уплотнение (под действием внешней нагрузки – для оснований, или собственного веса – для тела отвалов). В

зависимости от фазового состава (водонасыщенности) породных масс отвалов для прогнозных расчетов их уплотнения используется аппарат теории фильтрационной консолидации или ползучести.

Для отвальных насыпей первостепенный интерес представляет оценка их начальной устойчивости, так как в связи с перемещением фронта отвала откосы возобновляются по истечении весьма непродолжительных периодов (порядка нескольких месяцев). Если основание или тело отвала сложены глинистыми породами, привлечение аппарата теорий консолидации и ползучести позволяет определить геометрические параметры насыпей с учетом ряда технологических факторов, оказывающих совокупное влияние на сопротивление пород сдвигу. При этом степень уплотнения породных слоев следует устанавливать с помощью зависимостей, в которые вводятся скорость подвигания фронта отвала, и затем использовать выбранный по величине степени уплотнения график сопротивления пород сдвигу для оценки устойчивости откосов. Таким образом, производится проверка режима отвалообразования с позиций устойчивости откосов, и оценивается эффективность мероприятий по инженерной подготовке слабых оснований.

Нарушение земель горными работами может быть уменьшено за счет максимального использования овражно-балочной сети для размещения *гидроотвалов*, а также увеличения их высоты и емкости на базе управления процессами уплотнения породных масс. Управление состоянием намывных глинистых пород возможно при послойном намыве, для проверки режима которого целесообразно применять решения задач фильтрационной консолидации, соответствующие различным этапам работы намывных слоев. Использование этих теоретических зависимостей позволяет определять осадки породных масс и производить оценку устойчивости гидроотвалов с учетом изменения во времени прочности пород их тела и основания.

Первичная информация о показателях изменения во времени напряженно-деформированного состояния пород, используемых при прогнозе геомеханических процессов, может быть получена в ходе разведочных работ. При этом с целью оперативного и надежного определения этих характеристик следует отдавать предпочтение натурным исследованиям: испытаниям прессиометрическим, штамповым и с помощью пенетров-крыльчаток; замерам порового давления в глинистых породах и осадок породных толщ,

сжимаемых в результате опытного водопонижения и т.д. Первостепенное значение для получения объективных исходных данных на стадии проектирования имеет привлечение метода инженерно-геологических аналогий с целью определения характеристик длительной прочности (из обратных оползневых расчетов откосов действующих карьеров на объектах-аналогах) и уплотняемости породных масс отвалов (по результатам наблюдений за деформациями насыпей и намывных сооружений) [3, 4].

Для определения исходных параметров к расчетным зависимостям, характеризующим напряженно-деформированное состояние обводненных массивов песчано-глинистых и полускальных пород, наиболее пригодны универсальные стабилметры ВЮГЕМ (автор Н.П. Верещагин). Стабилметры компрессионного типа позволяют определить следующий комплекс показателей [10]: коэффициент сжимаемости α ; модуль осадки e_p ; модуль деформации E ; модуль упругости E_y ; модуль набухания E_n ; коэффициент бокового расширения μ ; коэффициент депрессионной осадки λ_n ; коэффициент бокового распора ξ ; величина структурной прочности P_C ; параметры ползучести δ , δ_1 . Также представляют интерес разработки НПП "Геотек" (г. Пенза) и зарубежные стабилметры BISHOP WESLEY [2, 20, 21].

Для лабораторных определений параметров ползучести, длительной прочности и фильтрационных характеристик горных пород целесообразно использовать универсальные стабилметры, пригодные для испытания пород различных инженерно-геологических классов в широком диапазоне нагрузок.

Для практических расчетов уплотнения преимущественно применяют решения одномерных и плоских задач фильтрационной консолидации породных массивов.

Решение плоской задачи может быть использовано как "эталонное" при оценке пригодности одномерных задач для расчетов уплотнения оснований упорных призм и толщ намывных тонкодисперсных грунтов. Решения плоской задачи фильтрационной консолидации двухфазных пород рассматривались преимущественно для полубесконечных массивов, нагруженных сосредоточенной силой, полосовой и полубесконечной нагрузками. При расчетах уплотнения сжимаемая толща учитывалась путем рассмотрения деформации слоя, выделенного из однородного полупространства. Очевидно, картина деформаций в

пределах сжимаемой толщи существенно меняется в случае предположения залегания на некоторой глубине несжимаемой части основания [12].

Уравнение уплотнения двухфазной среды для плоской задачи может быть представлено следующим образом:

$$C_v \left(\frac{\partial^2 P_u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial P_u}{\partial t}, \quad (1)$$

где C_v – коэффициент консолидации, м²/сут; P_u – поровое давление.

Коэффициент консолидации $C_v = \frac{k_\phi (1 + \varepsilon_{cp})}{\Delta_v a_{cp}}$;

k_ϕ – коэффициент фильтрации, м/сут; ε_{cp} – средняя приведенная пористость (коэффициент пористости) в рассматриваемом диапазоне уплотняющих нагрузок; Δ_v – плотность воды, т/м³; a_{cp} – средний коэффициент сжимаемости.

Решение уравнения (1) для слоя конечной мощности может быть представлено в виде:

$$P_u = \int_D \sigma_0(x', z') G(x, x', z, z') dx' dz', \quad (2)$$

где $\sigma_0(x', z')$ – начальная величина давления в поровой воде.

При представлении функции Грина $G(x, x', z, z')$ в виде произведения функции Грина для бесконечного $G(x, x')$ и ограниченного $G(z, z')$ стержней [6, 14] используют выражение:

$$P_u = \frac{1}{h \sqrt{\pi C_v t}} \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int_0^h \sigma_0(x', z') \times \left\{ \exp \left[\frac{-(x - x')^2}{4 C_v t} \right] \times \right. \\ \left. \times \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \sin \frac{i \pi z'}{h} \sin \frac{i \pi z}{h} \exp \left[- \left(\frac{i \pi}{h} \right)^2 C_v t \right] \right\} dz', \quad (3)$$

где $h = 2d$; $d = m/2$ и $d = m$ соответственно при двустороннем и одностороннем дренировании слоя мощностью m .

Приняв σ_0 не зависящим от x' и z' и проинтегрировав выражение (3) по этим переменным, получаем формулу для определения порового давления в условиях одномерной задачи. Начальная величина порового давления для условий плоской задачи определялась с использованием решения аналогичной задачи теории упругости в интерпретации К.Е. Егорова, производившего расчеты

деформаций и напряжений в случае загрузки основания равномерно распределенной полосовой нагрузкой [6, 12].

После интегрирования выражения (3) по x' и z' были получены расчетные формулы для определения порового давления в слое, нагружаемом мгновенно прикладываемыми равномерно распределенной нагрузкой, сосредоточенной силой и постепенно возрастающей нагрузкой. Поровое давление при постепенно возрастающей нагрузке определялось путем дополнительного интегрирования выражений для случая, когда нагрузка прикладывалась мгновенно [6].

Решения получены для двух задач, различающихся по условиям на контактной поверхности. Первая задача соответствует условию отсутствия касательных напряжений на нижней поверхности слоя (случай скольжения слоя); вторая – условию отсутствия горизонтальных смещений на этой поверхности (случай прилипания слоя). Общее условие для обеих задач – отсутствие вертикальных перемещений на нижней контактной поверхности.

Величины порового давления, определенные для условий одномерной и плоской (случай полубесконечного массива) задач, сопоставлялись с результатами расчетов по формулам плоской задачи уплотнения слоя конечной мощности. Результаты расчетов P_u для первой ($z = 0$, $\tau = 0$) и второй ($z = 0$, $u = v = 0$) задач отличались незначительно (примерно на 10%), поэтому основной объем вычислений выполнялся с использованием менее громоздких формул для первой задачи.

Сопоставление данных одномерной задачи с результатами расчетов порового давления для слоя мощностью m_1 , нагруженного равномерно распределенной нагрузкой q на полосе шириной $2a_1$ (рис. 1а), позволило установить, что для середины полосы сходимость значений порового давления тем лучше, чем больше отношение a_1/m_1 .

Построен график зависимости $\lambda = f(a_1/m_1)$, где $\lambda \leq 1$ – коэффициент перехода от плоской к одномерной задаче – отношение площадей эпюр порового давления (при $C_v t = 0 \div 10$). Таким образом, выявление характера зависимости $\lambda = f(a_1/m_1)$ позволяет установить пределы применимости одномерной задачи ($\lambda \approx 1$ при $a_1/m_1 \geq 5$) для инженерных расчетов уплотнения бортовых и отвальных массивов (рис. 1б).

Теоретический анализ процессов деформирования породных массивов, обусловленных перераспределением напряжений в твердой и жидкой фазах горных пород, выполнялся главным образом применительно к разработке газовых и не-

фтяных месторождений. Для условий глубокого водопонижения при освоении месторождений твердых полезных ископаемых С.В. Кузнецовым [9] и В.М. Чуйко [18] представлены расчетные зависимости для определения напряжений и деформаций в пределах дренируемой толщи. Эти зависимости базируются на линейном законе деформирования минерального скелета породы и теории упругого режима фильтрации. В.А. МIRONENKO предложил подход к прогнозу депрессионного уплотнения породных толщ, обеспечивающий определение осадок пород также и после окончания фильтрационной стадии консолидации [11, 22].

При намыве гидроотвалов создаются условия для возникновения значительного по величине порового давления и существенного снижения прочности пород. В слоях большой мощности при породах с низкими фильтрационными характеристиками рассеивание порового давления протекает медленно, что следует учитывать при назначении темпов отвалообразования.

Использование решений задач консолидации позволяет определять осадки породных масс и производить оценку устойчивости намывных сооружений, исходя из прочности неконсолидированных грунтов их тела и основания. Для решения практических задач, связанных с освоением глубоких обводненных месторождений, необходимо располагать зависимостями, позволяющими выполнять инженерные расчеты депрессионного уплотнения при различных закономерностях деформирования горных пород.

С учетом больших размеров полей водопонижения в плане открывается возможность применения одномерных задач при введении ряда ограничений.

Величина депрессионной нагрузки (q_d) определяется по формуле:

$$q_d = \Delta H \gamma_w, \quad (4)$$

где ΔH – снижение напора; γ_w – плотность воды.

Нагрузка может быть приведена к полосовой в соответствии со схемой, показанной на рис. 2, где депрессионная воронка разбивается на блоки-прямоугольники. В пределах каждого блока нагрузка рассматривается как равномерно распределенная и $q = \Delta H_{cp} \gamma_w$. Положение депрессионной поверхности на различные моменты времени принимается по данным расчетов осушения (на стадии проектирования) или натурных наблюдений (на стадии освоения месторождений). С учетом проведенного выше сопоставле-

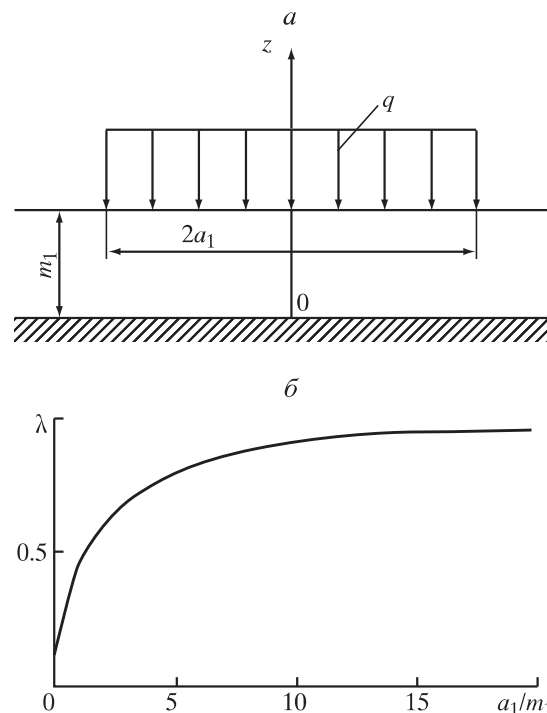


Рис. 1. Расчетная схема слоя конечной мощности в условиях плоской задачи (а) и зависимость λ от отношения a_1/m_1 (б).

ния площадей эпюр порового давления (степеней уплотнения) для условий плоской и одномерной задач при инженерных расчетах ширину блоков (полос загрузки) $2a_1$ и $2a_2$ целесообразно принимать равной не менее пятикратной мощности сжимаемых слоев.

В условиях глубокого водопонижения сжатие надрудной толщи на наиболее показательных объектах – месторождениях Запорожского и Белгородского железорудных узлов, связано с уплотнением слоев глинистых, песчаных, карбонатных пород, а также выветрелых сланцев. Как показал теоретический анализ экспериментальных исследований ВНИМИ (на компрессионных приборах высокого давления), ВИОГЕМ и МГИ (на универсальных стабилометрах) для прогноза уплотнения этих литологических разностей могут использоваться решения следующих задач:

- фильтрационной консолидации слоя квазидвухфазной породы (для любых песков и глин преимущественно в пределах верхних горно-геологических ярусов);
- ползучести слоя квазиоднофазной породы (для карбонатных пород и сланцев);
- фильтрационной консолидации и ползучести слоя двухфазной породы (уточнение расчетов по слоям глин с высоким коэффициентом естественной уплотненности и глиноподобных сланцев).

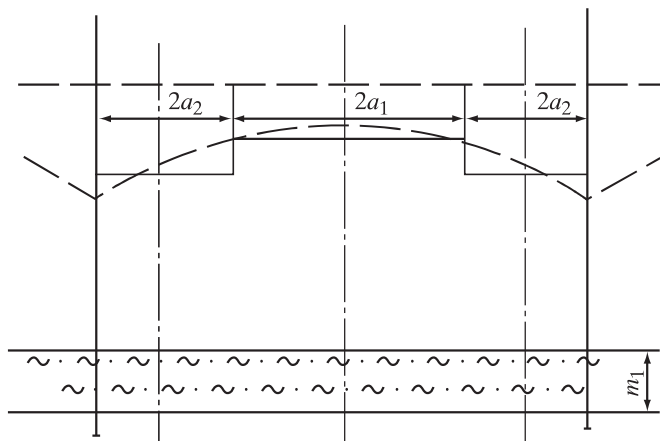


Рис. 2. Схема приведения депрессионной нагрузки к полусовой.

Перечисленные случаи одномерной деформации породных слоев целесообразно рассматривать на различных этапах их уплотнения (под постоянной и постепенно возрастающей нагрузками).

Для определения напоров в поровой воде и осадки слоев глинистых пород с учетом начального градиента напора использовано полученное В.А. Флориным решение задачи об уплотнении слоя при заданном постоянном напоре на одной из его границ [16]. Применительно к случаю постепенного роста депрессионной нагрузки в ходе водопонижения по закону $q = at$ выполнено интегрирование напорной функции $H(Z, t)$ и осадки $S(t)$ при экспоненциальном $K(t - \tau) = \delta e^{-\delta_1(t - \tau)}$ и гиперболическом $K(t - \tau) = \delta(t - \tau)^{-\delta_2}$ виде ядра ползучести.

Решение задачи фильтрационной консолидации и ползучести квазидвухфазных пород для постепенно возрастающей нагрузки получено путем преобразования и дополнительного интегрирования выражений для определения напорной функции и степени уплотнения породных слоев, предложенных Ю.К. Зарецким [17].

Обработка результатов натурных замеров порового (нейтрального давления) в поле водопонижения Южно-Белозерского железорудного месторождения в сочетании с данными лабораторных испытаний на стабилометрах ВАОГЕМ пород надрудной толщи позволила определить начальный градиент напора для глинистых пород и общую осадку сжимаемых слоев [6].

С учетом значительных размеров гидроотвалов в плане для определения давлений в поровой воде и осадки породных слоев использованы решения одномерных задач фильтрационной консолидации. Исходя из специфики формирования гидроот-

валов тонкодисперсных и смешанных пород, рассмотрены следующие задачи уплотнения слоев:

- переменной мощности, возрастающей во времени (период намыва), когда в процессе консолидации не только растет нагрузка, но и увеличивается путь фильтрации воды;
- под действием собственного веса породных масс после завершения формирования слоя;
- под действием постепенно возрастающей нагрузки (период намыва вышележащих слоев);
- после окончания намыва вышележащих слоев – под действием их веса.

Полная осадка и поровое давление для рассматриваемого слоя определялись на основе принципа суперпозиции [3].

Уплотнение слоя *грунтов переменной мощности* (мощность постепенно возрастает от нуля до некоторой заданной величины) рассматривалось Р. Гибсоном и М.В. Малышевым [3, 17]. Особенность таких задач состоит в том, что в процессе консолидации не только растет нагрузка, но и увеличивается длина пути фильтрации воды в слое.

Исходное уравнение уплотнения трехфазного грунта имеет вид:

$$\omega_1 \frac{\partial P_u}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_u}{\partial z^2} C_v + f(t), \quad (5)$$

где z – координата рассматриваемой точки; $f(t)$ – скорость нагружения, имеющая размерность давления, отнесенного ко времени; ω_1 – коэффициент, учитывающий влияние защемленного воздуха.

Скорость нагружения:

$$f(t) = \gamma' v_n = \gamma' \frac{\partial h(t)}{\partial t}, \quad (6)$$

где v_n – скорость увеличения толщины слоя; γ' – плотность породы.

$$\gamma' = \frac{1}{1 + \varepsilon_{cp}} \{ \Delta - \gamma_b [1 + \varepsilon_{cp} (1 - G_1)] \}, \quad (7)$$

где Δ – плотность минеральных частиц, G_1 – коэффициент водонасыщения породы, ε_{cp} – средняя приведенная пористость (коэффициент пористости), γ_b – плотность воды.

При полном водонасыщении породы ($G_1 = 1$)

$$\gamma' = \frac{\Delta - \gamma_b}{1 + \varepsilon_{cp}}. \quad (8)$$

В практических расчетах плотность намывных пород гидроотвала принимается равной γ' лишь при совпадении уровня воды с верхней границей слоя.

В коллективной монографии под редакцией Н.А. Цытовича [17] М.В. Малышев предложил решения задач уплотнения слоя переменной мощности как при полном, так и при неполном водонасыщении породы. На основе этих решений определялось давление в поровой воде для периода намыва при расположении слоя водонасыщенных пород на водоупоре или дренаже.

Соотношения, полученные М.В. Малышевым, использованы в качестве исходных при определении степени уплотнения для слоя переменной мощности, а также порового давления и степени уплотнения в период уплотнения сформировавшегося намывного слоя под действием собственного веса слагающих его пород. Для определения порового давления и степени уплотнения слоя под действием постепенно возрастающей или постоянной внешней нагрузки предложены зависимости, используемые также для прогноза уплотнения оснований сухих отвалов [3, 8]. Для упрощенных расчетов уплотнения маловодонасыщенных пород тела отвальных насыпей можно использовать решения компрессионных задач ползучести.

Расчетные формулы и графики для определения порового давления и степени уплотнения для намывных массивов и отвальных оснований приведены в работах [3, 4].

Разработанная МГИ и ОАО “Трест Энергогидромеханизация” технология формирования гидроотвалов предусматривает создание в намывных массивах тонкодисперсных пород дренажных призм – аналогов дренажных прорезей в слабых естественных основаниях. Дренажные призмы располагаются на значительном расстоянии одна от другой, поэтому расчеты уплотнения намывных оснований следует проводить по схеме свободных деформаций [1]. Технология формирования гидроотвалов обуславливает анизотропность намывных оснований: коэффициент фильтрации пород в горизонтальном направлении в 5–20 раз больше, чем в вертикальном. Ускорение консолидации водонасыщенных пород связано с процессом отжима воды из порового пространства и движения ее к песчаной подушке и в дренажную призму (прорезь), т.е. в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Общее уравнение консолидации для этой двухмерной задачи [1]:

$$\frac{K_r}{\gamma_b} \frac{\partial^2 P_u}{\partial x^2} + \frac{K_z}{\gamma_b} \frac{\partial^2 P_u}{\partial z^2} = \frac{a_z}{1 + \varepsilon_{cp}} \frac{\partial P_u}{\partial t}, \quad (9)$$

где K_r , K_z – коэффициенты фильтрации соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях; a_z – коэффициент сжимаемости грунта в вертикальном направлении.

Решение задачи находится по формуле Н. Карилло с использованием решений двух одномерных задач:

$$P_{u_{rz}} = (P_{u_r} P_{u_z}) / P_{u_0}, \quad (10)$$

где $P_{u_{rz}}$, P_{u_z} , P_{u_r} – поровое давление при движении воды одновременно в песчаную подушку и дренажную прорезь, только в дренажную прорезь и только в песчаную подушку, соответственно.

Общая степень уплотнения U_Σ получается по теореме Н. Карилло из выражения:

$$1 - U_\Sigma = (1 - U_r)(1 - U_z), \quad (11)$$

где U_r , U_z – степени уплотнения при движении воды, соответственно, в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Осадка слоя на момент t определяется в виде $S(t) = S_\infty U_\Sigma$.

С учетом структурной прочности $P_{стр}$ и начального градиента напора I_0 начальное поровое давление P_{u_0} и радиус влияния дренажной прорези R_ϕ определяются в виде:

$$P_{u_0} = q - P_{стр}, \quad (12)$$

$$R_\phi = q - P_{стр} / \gamma_b I_0. \quad (13)$$

Решения задач фильтрационной консолидации позволяют удовлетворительно описывать развитие осадок тонкодисперсных намывных пород в пределах 80–90% максимальной (стабилизированной) осадки. Для повышения точности описания процесса уплотнения может быть использовано решение одномерной задачи консолидации и ползучести двухфазных пород с учетом взаимодействия фаз, полученное Ю.К. Зарецким [17].

Анализ полученных экспериментальным путем зависимостей порового давления и относительной осадки от времени t показал, что около 90% осадки глинисто-меловых паст приходится на период фильтрационной консолидации (до достижения поровым давлением нулевого значения). Испытания образцов пастообразных пород в условиях закрытой системы показали, что отношение максимальной величины порового давления к нагрузке близко к единице.

Из решения задачи нелинейной фильтрационной консолидации вытекает, что коэффициент консолидации может быть приближенно принят в виде [7]:

$$C_v = C_v^0 \exp(-\lambda' \cdot q), \quad (14)$$

де C_v^0 – начальный коэффициент консолидации (при $q = 0$); λ' – параметр нелинейной консолидации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа результатов натурных наблюдений и лабораторных экспериментальных исследований при составлении инженерно-геологической документации становится возможным указать в качестве исходных данных значения реологических параметров в соответствии с горно-геологической этажностью породного массива конкретного месторождения.

Управление долговременной устойчивостью бортов карьеров и отвальных массивов песчано-глинистых и полускальных пород необходимо рассматривать как непрерывный адаптационный процесс, включающий прогноз, контроль и целенаправленное изменение интенсивности геомеханических процессов на всех этапах открытых горных работ. Обеспечение долговременной устойчивости бортов карьеров и отвалов должно базироваться на установленных взаимосвязях интенсивности геомеханических процессов и динамики горных работ.

Взаимосвязи между геомеханическими и технологическими параметрами процессов деформирования и разрушения бортовых и отвальных массивов показывают, что интенсивность депрессионного уплотнения зависит от мощности слоев, характеристик депрессионной сжимаемости, темпа снижения уровней водоносных горизонтов, размеров карьеров в плане и в профиле, скорости подвигания фронта и углубления горных работ. Снижение прочности и развитие сдвиговых деформаций пород в бортах карьеров определяется структурными особенностями массива, параметрами длительной прочности и сдвиговой ползучести, величиной действующих по поверхности скольжения сдвигающих напряжений, скоростью подвигания фронта и углубления горных работ. Интенсивность уплотнения отвальных массивов определяется скоростью подвигания фронта отвальных насыпей или темпом намыва гидроотвалов, мощностью слоев, последовательностью укладки раздельно-зернистых и тонкодисперсных масс, показателями сжимаемости пород с учетом

их нелинейной зависимости от уплотняющих нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. М.: Стройиздат, 1983. 248 с.
2. Бишоп А., Хенкель Д. Определение свойств грунтов в трехосных испытаниях. М.: Гостройиздат, 1961. 231 с.
3. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ. М.: Изд-во МГГУ, 2003. 473 с.
4. Гальперин А.М. Управление состоянием намывных массивов на горных предприятиях. М.: Недра, 1988. 199 с.
5. Гальперин А.М., Ческидов В.В., Бородин Ю.В., Демидов А.В. Прогноз и контроль нестационарных геомеханических процессов в горнотехнической и строительной практике // Геоэкология. 2014. № 6. С. 553–559.
6. Гальперин А.М., Шафаренко Е.М. Реологические расчеты горнотехнических сооружений. М.: Недра, 1977. 246 с.
7. Зарецкий Ю.К. Консолидация торфяного основания // Основания, фундаменты, механика грунтов. 1970. № 6. С. 12–15.
8. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов. М.: Наука, 1967. 270 с.
9. Кузнецов С.В. Горное давление и деформация массива горных пород при осушении водоносных горизонтов // Научно-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. № 5. С. 164–174.
10. Методические указания по определению деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород. Белгород: ВИОГЕМ, 1973. 86 с.
11. Мироненко В.А., Котов И.Г. Исследование сжимаемости горных пород Южно-Белозерского железорудного месторождения под влиянием глубокого водопонижения // Вопросы инженерной геологии при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений, шахт и карьеров. Л.: Географ. общество СССР, 1969. Вып. 1. С. 79–87.
12. Панюков П.Н., Ржевский В.В., Истомин В.В., Гальперин А.М. Геомеханика отвальных работ на карьерах. М.: Недра, 1972. 183 с.
13. Ржевский В.В., Реватов М.А. Принципы управления состоянием бортов глубоких карьеров // Горный журнал. 1975. № 1. С. 38–40.
14. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 724 с.

15. Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В., Коваленко В.С. Проектирование карьеров. 3-е изд., перераб. М.: Высшая школа, 2009. 694 с.
16. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. II. М.: Госстройиздат, 1960. 407 с.
17. Цытович Н.А., Зарецкий Ю.К., Малышев М.В., Абедев М.Ю., Тер-Мартirosян З.Г. Прогноз скорости осадок оснований сооружений (консолидация и ползучесть многофазных грунтов). М.: Стройиздат, 1967. 238 с.
18. Чуйко В.М. Прогноз деформаций водоносных пород под влиянием водоотбора при освоении месторождений полезных ископаемых // Матер. Всесоюз. совещ. по проблемам теории прогноза инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. Белгород: ВИОГЕМ, 1975. С. 180–183.
19. Gloe C.S. Bodensetzung infolge Grundwasserentzugs, erläutert am Beispiel des Latroba – Tals, Viktoria, Australien. Braunkohle. 1979. Heft 8. S. 261–267.
20. <http://npp-geotek.ru/>
21. Menzies B.K. A computer controlled hydraulic triaxial testing system // Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977/Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver (Eds) American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1988. P. 82–94.
22. Mironenko V.A. Change of physico-mechanical properties and deformation of clay rocks as a result of deep water lowering // Bulletin of Engineering geology. 1972. № 5. P. 111–114.
- calculations of mining engineering structures]. Moscow, Nedra, 1977. 246 p. (in Russian).
7. Zaretskii, Yu.K. *Konsolidatsiya torfyanogo osnovaniya* [Consolidation of peat ground basement]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1970, no. 6, 12–15 p. (in Russian).
8. Zaretskii, Yu.K. *Teoriya konsolidatsii gruntov* [Theory of soil consolidation]. Moscow, Nauka, 1967, 270 p. (in Russian).
9. Kuznetsov, S.V. *Gornoe davlenie i deformatsiya massiva gornykh porod pri osushenii vodonosnykh gorizontov* [Confining pressure and deformation of rock massif upon aquifer drainage]. *Nauchno-tekhnicheskie problemy razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh*, Moscow, IFZ AN USSR, 1974, no. 5, 164–174 p. (in Russian).
10. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu deformatsionnykh, prochnostnykh i fil'tratsionnykh kharakteristik gornykh porod* [Methodological instructions for defining deformation, strength and filtration characteristics of rocks]. Belgorod, VIOGEM, 1973, 86 p. (in Russian).
11. Mironenko, V.A., Kotov, I.G. *Issledovanie szhimaemosti gornykh porod Yuzhno-Bezozerskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya pod vliyaniem glubokogo vodoponizheniya* [Study of rock compressibility in the Yuzhno-Bezozerskoe iron-ore deposit under the impact of deep dewatering]. *Voprosy inzhenernoi geologii pri proektirovanii, stroitel'stve i ekspluatatsii podzemnykh sooruzhenii, shakht i kar'erov* [Engineering geological issues upon designing, construction, and operation of subsurface facilities, mines and quarries]. Leningrad, Geograf. obshchestvo SSSR, 1969, issue 1, pp. 79–87 (in Russian).
12. Panyukov, P.N., Rzhetskii, V.V., Istomin, V.V., Galperin A.M. *Geomekhanika otval'nykh rabot na kar'erakh* [Geomechanics of damping works in quarries]. Moscow, Nedra, 1972, 183 p. (in Russian).
13. Rzhetskii, V.V., Revazov, M.A. *Printsipy upravleniya sostoyaniem bortov glubokikh kar'erov* [Management principles of the state of deep quarry sides]. *Gornyi zhurnal*, 1975, no. 1, pp. 38–40 (in Russian).
14. Tikhonov, A.N., Samarskii, A.A. *Uravneniya matematicheskoi fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka, 1966. 724 p. (in Russian).
15. Trubetskoi, K.N., Krasnyanskii, G.L., Chronin, V.V., Kovalenko, V.S. *Proektirovanie kar'erov* [Design of open pits]. 3rd edition. Moscow, Vysshaya shkola, 2009, 694 p. (in Russian).
16. Florin, V.A. *Osnovy mekhaniki gruntov* [Fundamentals of soil and rock mechanics]. Vol. 2. Moscow, Gosstroyizdat, 1960. 407 p. (in Russian).
17. Tsytovich, N.A., Zaretskii, Yu.K., Malyshev, M.V., Abelev, M.Yu., Ter-Martirosyan, Z.G. *Prognoz skorosti osadok osnovanii sooruzhenii (konsolidatsiya i polzuchest' mnogofaznykh gruntov)* [Forecast of foundation settling velocity (consolidation and creep in multiphase soils)]. Moscow, Stroizdat, 1967, 238 p. (in Russian).

REFERENCES

1. Abelev, M.Yu. *Stroitel'stvo promyshlennykh i grazhdanskikh sooruzhenii na slabykh vodonasysnykh gruntakh* [Building of industrial and civil engineering structures on weak water-saturated soils]. Moscow, Stroizdat, 1983, 248 p. (in Russian).
2. Bishop A., Henkel D. *Opredelenie svoistv gruntov v trekhsosnykh ispytaniyakh* [Soil properties definition in triaxial tests]. Translated from English. Moscow, Gosstroyizdat. 1961. 231 p. (in Russian).
3. Galperin, A.M. *Geomekhanika otkrytykh gornykh rabot* [Geomechanics of open pit mining]. Moscow, Izd. MGPU, 2003. 473 p. (in Russian).
4. Galperin, A.M. *Upravlenie sostoyaniem namyvnykh massivov na gornykh predpriyatiyakh* [Management of hydraulic fill massifs at mining enterprises]. Moscow: Nedra, 1988. 199 p. (in Russian).
5. Galperin, A.M., Cheskidov, V.V., Borodina, Yu.V., Demidov, A.V. *Prognoz i kontrol' nestatsionarnykh geomekhanicheskikh protsessov v gornotekhnicheskoi i stroitel'noi praktike* [Forecast and control of nonstationary geomechanical processes in mining engineering and building practice]. *Geokologiya*, 2014, no. 6, 553–559 p. (in Russian).
6. Galperin, A.M., Shafarenko, E.M. *Reologicheskie raschety gornotekhnicheskikh sooruzhenii* [Rheological

18. Chuiko, V.M. *Prognoz deformatsii vodonosnykh porod pod vliyaniem vodootbora pri osvoenii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Forecast of water-saturated rock deformation under the influence of water intake in developing mineral deposits]. *Proceedings of the all-USSR meeting in the problems of theory of forecasting engineering-geological conditions of the mineral deposits*. Belgorod, VIOGEM, 1975, 180–183 p. (in Russian).
19. Gloe, C.S. Bodensetzung infolge Grundwasserentzugs, erläutert am Beispiel des Latroba – Tals, Viktoria, Australien. Braunkohle. 1979. Heft 8. P. 261–267.
20. Website <http://npp-geotek.ru/>
21. Menzies, B.K. A computer controlled hydraulic triaxial testing system/ *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, pp. 82–94.
22. Mironenko, V.A. Change of physico-mechanical properties and deformation of clay rocks as a result of deep water lowering. *Bulletin of the Int. Ass. of Engineering Geology*, 1972, no. 5, pp. 111–114.

FORECAST OF GEOMECHANICAL PROCESSES AT MINING ENTERPRISES ON THE BASIS OF ROCK MASS CONSOLIDATION THEORY

A. M. Galperin, E. A. Semenova

*NITU “MISiS”, Leninsky pr. 6, Moscow, 119049, Russia.
E-mail: galperin_a@mail.ru; evgeniya270990@mail.ru

The following geomechanical processes that define the state of open pit walls and dump massifs are considered: densification of rock strata due to the considerable lowering the water level (depressional compaction); development of shear deformation and the rock strength reduction with time, compaction of dumps and fill massifs (hydraulic dumps and tailing dams), as well as their natural ground basement. The mechanism of rock compression as a result of lowering the water level consists in the growth of efficient stresses due to the pressure head reduction upon the virtually constant general pressure. To solve practical tasks related to the development of deeply occurring watered mineral deposits, we obtained the equations for the engineering calculation of depressional compaction for various regularities of rock massif deformation. The conditions are substantiated for applicability of one-dimensional consolidation problems for calculation of deformation and the stability of open pit walls and dumps in time. The problems of rock compaction are considered taking in consideration the dynamics of mining works.

Equations are deduced for the problems of depressional compaction and the compaction of rock massifs in the watered and dry dumps in two- and three-phase media. The issues of the initial accounting for the gradient filter, the mineral skeleton creep, and the non-linear consolidation of the weak-structural soils are highlighted. The consideration of time factors with respect to stability forecast and deformation of slope constructions in the Russian mining engineering practice is presented.

Keywords: *consolidation, settlement, bearing capacity, reclamation.*