

25. Linero S., Fityus S., Simmons J. V., Azéma E., Estrada N. et al. Influence of particle size–shape correlation on the shear strength of scaled samples of coarse mine waste. *Slope Stability 2020 : Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Perth, 2020. pp. 667–676.
26. Azéma E., Linero S., Estrada N., Lizcano A. Does modifying the particle size distribution of a granular material (i.e., material scalping) alters its shear strength? *Powders and Grains 2017 : Proceedings of the 8th International Conference on Micromechanics on Granular Media*. 2017. EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 140. 06001. DOI: 10.1051/epjconf/201714006001
27. Molina S. L., Azéma E., Estrada N., Fityus S., Simmons J. et al. Impact of grading on steady-state strength. *Géotechnique Letters*. 2019. Vol. 9, Iss. 4. pp. 328–333.
28. Shabaev S. N. Influence of the size of uniformly graded bulk media particles on strength characteristics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*. 2020. Vol. 18, No. 2. pp. 62–70.
29. Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 822–832.
30. Pomortseva A. A., Karasev M. A., Pospekhov G. B. Engineering and geological support of the stability of the heap leach pad. *Uspekhi sovremenno ego estestvoznaniya*. 2021. No. 1. pp. 63–69.
31. Novozhenin S. Yu., Mitusova N. M. Slope stability estimation of pitwall and dumps by mathematical modeling in Plaxis 3D. *Marksheyderskiy vestnik*. 2022. No. 1(146). pp. 33–38.
32. Zuev B. Yu. Methodology of modeling nonlinear geomechanical processes in blocky and layered rock masses on models made of equivalent materials. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 542–552.
33. Leps T. M. Review of shearing strength of rockfill. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*. 1970. Vol. 96, No. SM4. pp. 1159–1170.
34. Linero S., Palma C., Apablaza R. Geotechnical Characterisation of Waste Material in Very High Dumps with Large Scale Triaxial Testing. *Slope Stability 2007 : Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Perth, 2007. p. 59–75.
35. Ovalle C., Linero S., Dano C., Bard E., Hicher P.-Y. et al. Data Compilation from Large Drained Compression Triaxial Tests on Coarse Crushable Rockfill Materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020. Vol. 146, Iss. 9. 06020013. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002314
36. Naimova R. Sh., Raimzhanov B. R. Process flow chart for high dumping by stacking conveyors on nonuniform base. *GIAB*. 2020. No. 9. pp. 125–136.
37. Protosenya A.G., Kutepov Yu.Yu. Stability estimation of hydraulic fills in undermined areas. *GIAB*. 2019. No. 3. pp. 97–112. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-97-112

УДК 622.271.45:661.63

ИЗУЧЕНИЕ И ПРОГНОЗ УПЛОТНЕНИЯ ФОСФОГИПСА В ОТВАЛАХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ИХ ВМЕСТИМОСТИ



Ю. Ю. КУТЕПОВ,
старший научный сотрудник, канд. техн. наук,
Kutepov_YuYu@pers.spmi.ru



М. А. КАРАСЕВ,
профессор кафедры, доцент, д-р техн. наук

Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Ограниченность площадей для размещения отходов различных производств на земной поверхности предопределяет необходимость решения геомеханических задач, связанных с обеспечением максимальной вместимости и устойчивости откосов отвальных сооружений. Современные тенденции изучения и прогнозирования геомеханических процессов в массивах

Рассмотрены геомеханические задачи, возникающие при формировании отвалов из фосфогипса – специфического материала, образующегося попутно при производстве фосфорной кислоты. Установлены особенности его деформирования при размещении в техногенные массивы инженерно-технических сооружений. Проанализированы модели деформационного поведения пород, с помощью которых можно выполнять прогнозирование геомеханических процессов в отвалах фосфогипса. Приведены результаты численного моделирования уплотнения техногенного массива отвала в объемной постановке. Расчетами обоснована возможность дополнительного размещения в сооружение фосфогипса в объеме 15 % от запланированного проектом.

Ключевые слова: фосфогипс, уплотнение, моделирование, метод конечных элементов, отвалы, промышленные отходы, техногенные грунты

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.09

техногенных горных пород различных инженерно-технических и горнотехнических сооружений (отвалов, полигонов и других насыпей) показывают целесообразность применения численного моделирования. Это связано с отсутствием реальных объектов на момент начала проектно-исследовательских работ, которые можно было бы изучить во взаимосвязи с природной

геологической средой, а также в плане формирования состава, состояния и свойств слагающих их пород. Первичная информация при этом содержит обычно только общие сведения о проектируемом сооружении: необходимая емкость, площадь основания и его инженерно-геологические условия, исходный состав пород (вскрышных или перерабатываемого полезного ископаемого, отходов) и технология производства, в том числе отвальных работ. При проектировании таких объектов основной инженерно-технической задачей является обоснование параметров техногенных насыпей [1–3]. В связи со сложностью и многофакторностью происходящих при формировании насыпей процессов техногенеза прогноз устойчивости откосов и вместимости сооружения следует осуществлять с применением численных геомеханических моделей, которые по мере поступления новых данных о свойствах пород и их деформационном поведении могут уточняться и совершенствоваться, обеспечивая безопасность и технико-экономическую эффективность формирования и функционирования отвальных сооружений [4, 5].

Обычно обоснование оптимальных параметров формирования насыпей на поверхности земли осуществляют по результатам расчетов устойчивости методами предельного равновесия [6–9], статистических методов [10–12] или численного моделирования [13–15]. Использование компьютерной техники предопределило в последние десятилетия применение программных комплексов в плоской и пространственной постановках: Plaxis, Abaqus, продуктов RocScience и др. для решения прикладных задач геомеханики. В настоящей работе, построенной в парадигме развития численного моделирования геомеханических процессов, рассмотрены подходы к решению практической задачи оценки уплотнения фосфогипса и вместимости отвалов.

Особенности формирования отвалов фосфогипса

Одним из специфических материалов, размещаемых на земной поверхности в объекты хранения – отвалы и полигоны, является фосфогипс – сопутствующий полезный продукт получения фосфорной кислоты. В зависимости от применяемого способа переработки исходного сырья (апатита или фосфорита) на выходе технологической цепочки образуется либо дигидрат, либо полугидрат сульфата кальция, отличающиеся между собой химико-минеральным составом и поведением при гидратации и дегидратации [16, 17]. Образовавшийся материал при размещении в отвал на начальном этапе формирует рыхлый пористый скелет с небольшой плотностью и структурной прочностью, зависящей от модификации фосфогипса. В дальнейшем, по мере наращивания техногенного массива по высоте и преодоления структурной прочности, происходят уплотнение пород и уменьшение высоты отвала, величина которого может достигать на отдельных объектах 25 % от планируемой [18]. Данный процесс имеет позитивное технико-экономическое значение, так



Рис. 1. Полигон № 2 в г. Воскресенске [19]

как позволяет увеличить вместимость отвала без расширения его параметров.

Изучение процессов консолидации фосфогипсов и прогнозирование вместимости сооружений проводили применительно к отвалам (полигонам), расположенным в городах Воскресенск (рис. 1) и Балаково Московской и Саратовской областей [16]. Это самые крупные в Российской Федерации объекты из фосфогипса, высота которых превышала 60 м при площадях основания от 60 до 159,6 га, а вместимость составляла от 15 до 60 млн м³ [19]. За 12 лет геодезических наблюдений за отметками поверхностей полигона № 2 в г. Воскресенске и Балаковского отвала зарегистрированы ее оседания соответственно на 13 и 10 м, при этом максимальная высота по состоянию на декабрь 2022 г. данных сооружений составляла 106 и 76 м. На законсервированном с 1990 г. Воскресенском полигоне № 1 геодезической съемкой установлено максимальное оседание 60-метрового отвала в пределах 15 м. Данные исследования позволили установить значительное по величине уплотнение фосфогипсового материала, а также скорректировать его деформационные свойства, необходимые для выполнения прогнозов консолидации пород отвальных массивов. В свою очередь, они позволят рассчитать их вместимость при достижении проектных параметров по высоте.

Модели деформирования фосфогипса

Результаты изучения физико-механических свойств фосфогипсов [20–23] свидетельствуют о том, что в свежееотсыпанном состоянии они характеризуются высокой пористостью, что предопределяет в последующем их повышенную сжимаемость в массиве отвала под воздействием постепенно нарастающих нагрузок. Это, в свою очередь, обуславливает различие между объемами материала, вывезенного с предприятия в отвал за период эксплуатации последнего, и объемами техногенных грунтов, сформировавшихся за эти годы в отвальном сооружении. По этой же причине неопределенным является вопрос и о массе фосфогипсов, находящихся в отвале.

Определение объемов и массы техногенных пород в отвале расчетным путем обусловлено принятыми деформационными характеристиками, количество и форма представления которых зависят от метода решения задачи. При использовании упрощенных методов расчета деформаций отвальных масс в качестве модели среды принимают линейную модель, параметром которой является модуль объемного сжатия. Этот параметр может быть получен как лабораторными, так и полевыми методами. Однако исследование процессов деформирования фосфогипсов показало, что модуль объемного сжатия в значительной степени зависит от достигнутой величины напряжений и деформаций, т. е. наблюдается нелинейное приращение объемных деформаций на величину приложенной нагрузки. Выполненные авторами исследования показали, что деформационные характеристики таких пород существенно различаются в зависимости от способа их определения. Так, наблюдается различие в результатах, полученных прессиометрическими методами и в лабораторных условиях. При этом необходимо отметить, что лабораторные данные более близко совпадают с деформационными параметрами, определяемыми обратными расчетами по известным величинам осадок, фиксируемых геодезическими методами на объектах мониторинга.

Повышение достоверности прогноза геомеханических процессов при формировании отвалов фосфогипса в части развития объемных деформаций может быть достигнуто за счет применения методов численного моделирования, позволяющих учесть нелинейный характер изменения физических и деформационных параметров в диапазоне сжимающих напряжений [24–27]. В общем виде связь между достигнутой величиной средних напряжений и объемными деформациями устанавливается через законы пластического упрочнения материала. Данные для получения параметров пластического упрочнения могут быть получены только в лабораторных условиях.

Для описания механического поведения фосфогипса с точностью, достаточной для выполнения инженерных расчетов, могут быть использованы упругопластические модели (рис. 2) с одной поверхностью упрочнения, например такие, как шатровая модель Друкера – Прагера [28] или модель Soft Soil [29], также можно применять модели с двойным упрочнением, среди которых наибольшее распространение на практике получили модель Hardening Soil [30] и ее аналоги. Модели с двойным упрочнением позволяют повысить достоверность прогноза деформаций отвальной массы в краевой зоне, где более активно формируются деформации формоизменения, т. е. их применение обосновано для определения горизонтальных деформаций поверхности откоса отвала. Также могут применяться модели, обладающие существенно более широким функционалом, но обычно их использование излишне для решения практических задач, к тому же требуется значительно больше материалов исследований

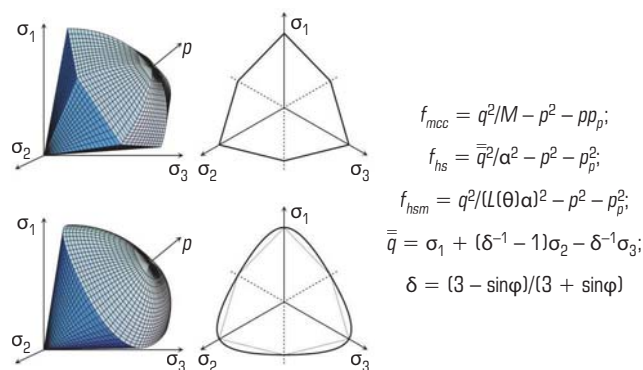


Рис. 2. Поверхность пластического течения и уравнения шатровых поверхностей пластического течения [30]:

f_{mcc} – функция поверхности пластического течения модели критического состояния Cam-Clay; f_{hs} – функция поверхности пластического течения модели упрочняющегося грунта; f_{hsm} – функция поверхности пластического течения модели упрочняющегося грунта с учетом малых деформаций; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные максимальные, средние и минимальные напряжения; p – средние напряжения; q – интенсивность нормальных напряжений; \bar{q} – модифицированный показатель интенсивности нормальных напряжений; M и α – параметры, определяющие форму шатровой поверхности пластического течения; p_p – параметр пластического упрочнения; $L(\theta)$ – параметр формы поверхности пластического течения в девиаторной плоскости; δ – показатель объемной прочности; ϕ – угол внутреннего трения

механического поведения фосфогипса для определения параметров этих моделей.

Как показали выполненные ранее исследования [18], параметры моделей деформирования фосфогипса, полученные по результатам лабораторных испытаний, достаточно хорошо отражают характер изменения его напряженно-деформированного состояния (НДС) в рамках элементарного объема. В то же время их использование для прогноза деформаций отвальной массы не позволяет получить достоверный результат, хотя качественно картина скоростей развития вертикальных деформаций совпадает. По-видимому, это связано с невыдержанной структурой фосфогипса в теле отвала и различием в его физическом состоянии, что определяет значительное расхождение в характере его деформирования. В настоящее время геомеханическая модель отвала фосфогипса не сформулирована в завершённом виде, требуется проведение дополнительных исследований как в части влияния физического состояния фосфогипса на его механическое поведение, так и распределения этих характеристик в теле отвала. Таким образом, параметры моделей деформирования среды необходимо определять по результатам

лабораторных исследований и в дальнейшем корректировать по данным натурных наблюдений (рис. 3). Параметры модели определяют на основании итерационного подхода, и в целом их величины увязаны с высотой отвала фосфогипса, что не позволяет их распространять на отвалы произвольной формы и размеров.

Авторами показано, что для выполнения практических расчетов параметры закона объемного упрочнения могут быть определены на основании обратных расчетов по данным геодезических замеров смещений поверхности отвала фосфогипса на различных этапах его формирования. Такой подход позволяет определить, на сколько уплотняется каждый новый слой отсыпаемых пород отвальной массы, а также объемные деформации нижерасположенных слоев фосфогипса (рис. 4). Методика определения объемного упрочнения заключалась в следующем. На первом этапе по результатам лабораторных исследований выполняют построение диаграммы изменения объемных деформаций фосфогипса от средних напряжений. Устанавливают начальное значение коэффициента пористости e_0 и соответствующее ему значение начальной плотности фосфогипса в неуплотненном состоянии. Далее строят диаграмму изменения объемного веса фосфогипса от коэффициента пористости. На втором этапе разрабатывают упрощенную численную модель одномерного уплотнения фосфогипса, позволяющую ориентировочно определить высоту отвала при начальном значении коэффициента пористости. Потенциальную высоту отвала устанавливают на основании обработки результатов геодезических наблюдений за деформированием отвала на протяжении всего периода его эксплуатации, что позволяет определить теоретическую недеформированную высоту отвала. Кривую объемного упрочнения отстраивают на основании итерационного подхода, приняв за начальную кривую результаты лабораторных испытаний и изменяя ее до того момента, пока расчетная высота отвала не совпадет с фактической. На третьем этапе выполняют дополнительную калибровку закона упрочнения на пространственной численной модели прогноза деформаций фосфогипса.

Предложенный подход был многократно апробирован при прогнозе изменения вместимости отвала фосфогипса при заданной его проектной высоте, где он показал хорошую сходимость с фактическими данными. В качестве калибровочных использовали данные, полученные на аналогичных отвалах фосфогипса, которые корректировали по геодезическим замерам деформаций формируемого отвала.

В целом необходимо отметить, что предложенный в работе подход к определению параметров объемного упрочнения отвальной массы фосфогипса позволяет с достаточной точностью прогнозировать изменение вместимости отвала, что требует ее корректировки по результатам натурных наблюдений. В то же время проведение исследований, направленных на формирования физико-химико-механической модели

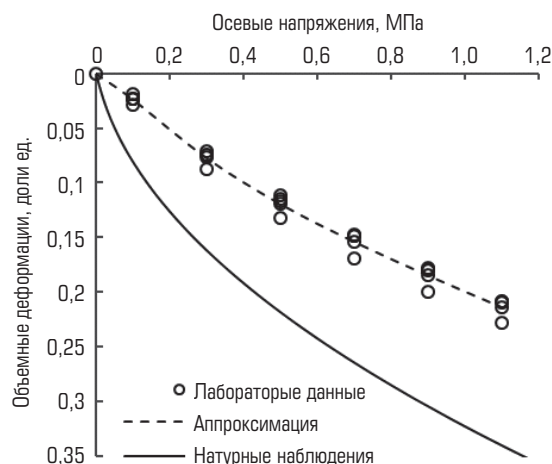


Рис. 3. Характерная компрессионная кривая деформирования фосфогипса, полученная по данным лабораторных испытаний, и усредненная компрессионная кривая отвальной массы фосфогипса, полученная по результатам натурных наблюдений (составлена авторами)

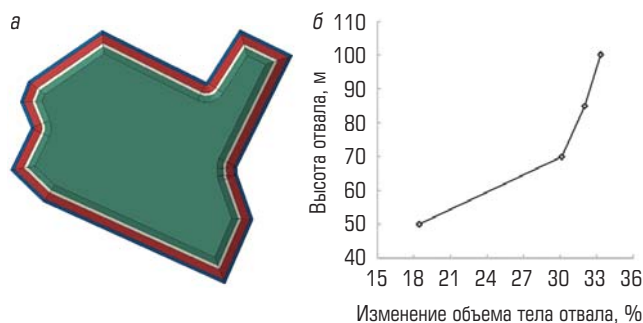


Рис. 4. Схема отвала фосфогипса (а) и характер изменения его объема по мере отсыпки (б) (составлена авторами)

деформирования фосфогипса, которая учитывала бы влияние не только НДС на его механическое поведение, но также и его физическое состояние как результат химического преобразования его структуры, все еще является актуальным. Создание унифицированной модели деформирования фосфогипса позволит в значительной степени повысить достоверность прогноза геомеханических процессов при формировании отвальной массы и уменьшить число допущений и эмпирических зависимостей, применяемых при выполнении таких прогнозов.

Численное моделирование уплотнения фосфогипса в отвале

Численное моделирование геомеханических процессов проводили применительно к многоярусному отвалу высотой

Физико-механические свойства фосфогипса (составлена авторами)

Параметр модели HS	Фосфогипс существующего отвала	Полугидратный фосфогипс
E_{50}^{ref} , кН/м ²	1850	3500
E_{oed}^{ref} , кН/м ²	1850	3500
E_{ur}^{ref} , кН/м ²	5550	10500
ν_{ur}	0,2	0,2
$m_{(power)}$	0,5	0,3
K_0	0,53	0,53
ρ^{ref} , кН/м ²	100	100
c , кН/м ²	25	25
ϕ (phi), градус	27	27
ψ (psi), градус	0	0

П р и м е ч а н и е. E_{50}^{ref} – секущий модуль упругости при 50 %-ном значении ($\sigma_1 - \sigma_3$) из трехосных испытаний; E_{oed}^{ref} – тангенциальный модуль упругости из компрессионных испытаний; E_{ur}^{ref} – модуль упругости при разгрузке–повторном нагружении из компрессионных испытаний; m_{power} – показатель степени для описывания влияния ограничивающего давления на модуль упругости, определяется из компрессионных испытаний; c – эффективное сцепление; ϕ – эффективный угол внутреннего трения; ψ – угол дилатансии.

около 76 м и площадью основания 159,6 га, который планируется в перспективе сформировать до высоты 120 м. Решение задачи его уплотнения по мере наращивания выполняют в следующей последовательности: создание геометрической модели сооружения с разделением ее на кластеры (инженерно-геологические элементы) – выбор для каждого из них соответствующей модели и обоснование физико-механических свойств – присвоение соответствующих материалов для каждого кластера – создание конечно-элементной сетки – задание граничных условий – задание пьезометрической поверхности – создание древа расчетных шагов – назначение действий для каждого шага – выполнение расчетов. Подготовку геометрической модели осуществляли на основе данных геодезической съемки методом фотограмметрии с применением беспилотных летательных аппаратов [31–34].

Решение задачи рассматривается в гравитационной постановке. При этом смещения по низу модели были запрещены во всех направлениях, а в боковых частях – только в горизонтальном направлении. Поскольку деформации основания по сравнению с деформациями фосфогипса незначительные, основание отвала совершенно безболезненно исключали из численной модели. Учитывая продолжительность периода отсыпки фосфогипса в отвал и изменение его свойств во времени, механические параметры модели приняты усредненными по всему массиву. Их величины были определены в лабораторных

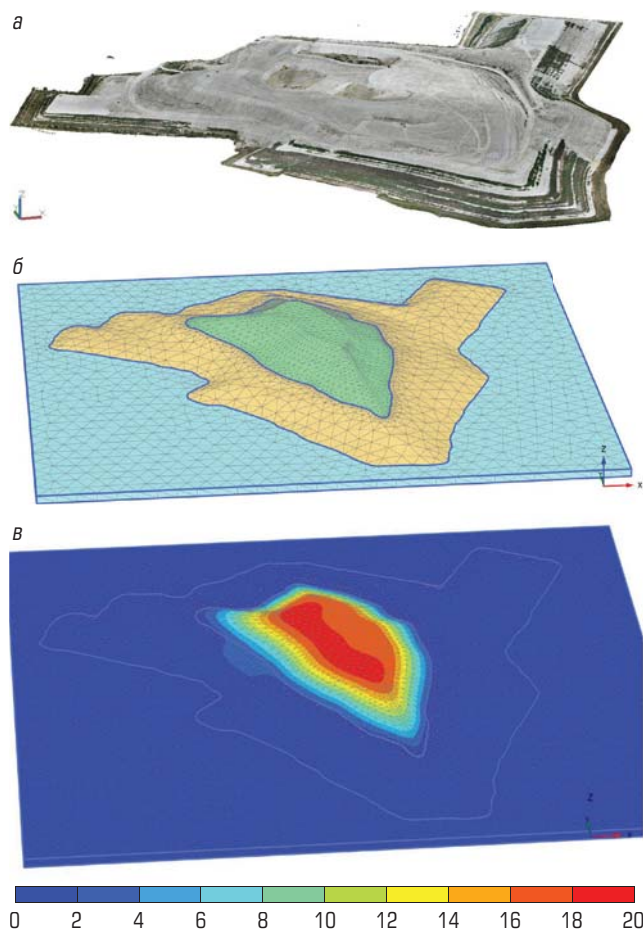


Рис. 5. Численное моделирование уплотнения отвала фосфогипса в пространственной постановке (составлено авторами):

a – исходное облако точек; *б* – конечно-элементное представление модели; *в* – эпюра распределения вертикальных смещений (м) при наращивании отвала до высоты 120 м

условиях и на основании обратных расчетов по данным натурных наблюдений. Расчетные физико-механические свойства фосфогипса приведены в **таблице**. При обосновании модуля упругости в условиях разгрузки и повторного нагружения принято $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$ [35–37] из-за отсутствия данных его непосредственного определения. В рамках решения подобных задач такое допущение приемлемо ввиду прямолинейной траектории нагружения материала. Коэффициент бокового давления пород при консолидации принят по рекомендациям Яку (1944): $K_0 = 1 - \sin\phi$. Опорный уровень напряжений ρ^{ref} и коэффициент Пуассона ν_{ur} при разгрузке – повторном нагружении приняты по умолчанию.

Прогноз деформаций в рамках разработанной модели состоял из пяти расчетных шагов. На начальном шаге в теле существующего отвала (кластер желтого цвета на **рис. 5**)

создавали поле начальных напряжений и вводили гравитацию, после чего происходило перераспределение напряженного состояния, а реализованные деформации в модели обнулялись. На последующих расчетных шагах выполняли поэтапное наращивание отвала слоями по 10 м (кластеры зеленого цвета на рис. 5) и на каждом этапе осуществляли расчет НДС и определение абсолютных деформаций в модели.

На всех этапах использовали корректирующий расчет Лагранжа, который в программе Plaxis называется Updated Mesh analysis. Данный подход позволял учесть изменение положений узловых точек конечно-элементной модели, т. е. каждая следующая итерация расчета начинается с деформированного состояния системы. Использование данного инструмента необходимо в условиях больших деформаций массива для корректного прогноза величин деформаций.

Результаты численного моделирования уплотнения отвала фосфогипса под собственным весом представлены в виде эпюр вертикальных деформаций (см. рис. 5). Максимальная осадка по верхней бровке сооружения при наращивании его до высоты 120 м составит 18,1 м. Данная осадка реализуется за счет уплотнения массива как существующего отвала, так и отсыпаемого при наращивании. Путем сопоставления геометрии проектного контура отвала и получившегося при моделировании после реализации деформаций возможно рассчитать остаточную вместимость отвала с учетом развития деформаций уплотнения. Таким образом, расчетами установлено, что вместимость рассматриваемого отвала увеличилась на 15 % относительно проектных показателей.

Заключение

Получение фосфорной кислоты при переработке апатитового и фосфоритового сырья сопровождается образованием побочного продукта – фосфогипса, размещаемого в инженерно-технические сооружения: отвалы, полигоны, гипсонакопители. Данный материал обладает специфическими химико-минеральным составом и физико-механическими


свойствами, поэтому, попадая в техногенный массив, проявляет повышенную склонность к деформационному процессу уплотнения.

Изучение объектов размещения на земной поверхности фосфогипса выполняли применительно к отвалам и полигонам, характеризующимся значительными высотами (от 60 до 108 м) и площадью (от 60 до 159,6 га). Геодезическими наблюдениями установлены значительные оседания поверхностей, изменяющиеся от 10 до 15 м.

Исследования различных видов фосфогипса в лабораторных и натурных условиях при выполнении деформационного мониторинга позволили обосновать модель деформационного поведения данных пород в сооружении и определить их механические свойства. Учитывая сложные конфигурации объектов размещения фосфогипса и специфику деформационного поведения данных техногенных пород, прогнозирование их уплотнения следует выполнять с применением численного моделирования методом конечных элементов в объемной постановке.

Применительно к одному из объектов разработана простейшая численная модель и выполнены прогнозные расчеты уплотнения, которые позволили определить возможность размещения в сооружение дополнительных объемов фосфогипса в пределах 15 % от проектных при наращивании отвала до высоты 120 м. Это даст возможность получить значительный экономический эффект благодаря сохранению ценных земель, снижению расходов на их рекультивацию и капитальных затрат на строительство нового отвала.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 61–67
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.09

Analysis and prediction of phosphogypsum compaction in dumps for dump capacity substantiation

Information about authors

Yu. Yu. Kutepov¹, Senior Researcher, Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Candidate of Engineering Sciences, Kutepov_YuYu@pers.spmi.ru
M. A. Karasev¹, Professor of Department, Doctor of Engineering Sciences

¹Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Phosphoric acid production in apatite and phosphate rock processing involves by-production of phosphogypsum which is placed in dumps, landfills and gypsum storage facilities. Phosphogypsum has specific mineral and chemical composition, possesses peculiar physical and mechanical properties, and it is highly susceptible to compaction when piled in dumps.

The lab-scale and in-situ deformation testing and monitoring of various phosphogypsum types made it possible to substantiate the deformation behavior model of the rock and to determine its mechanical properties. In view of the complex structure of phosphogypsum storage facilities and considering the deformation specifics of this manmade rock, prediction of phosphogypsum compaction should use 3D FEM-based modeling.

Numerical modeling improves reliability of geomechanical behavior prediction in phosphogypsum dumps in terms of the volumetric deformation by taking into account

nonlinear variations in physical and deformation parameters of the material in the range of compressive stresses. In a general case, the values of average stresses and bulk deformations are correlated via the laws of plastic compaction.

A 3D model was constructed and compaction prediction was carried out as a case-study of a waste dump. The studies revealed possibility of increasing the phosphogypsum dump size by 15% of the project size with the height increase of the dump to 120 m. The significant economic effect comes from the land preservation, as well as from the reduction of cost of land reclamation and new dump construction.

Keywords: phosphogypsum, compaction, modeling, finite element method, dumps, industrial waste, manmade ground.

References

- Hawley M., Cuning J. Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design. Leiden : CRC Press/Balkema, 2017. 370 p.
- Kondakova V. N., Pomortseva A. A., Pospelov G. B. The Comparison of the Russian and Foreign Mining Wastes Classification Systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 666, No. 5. 052001. DOI: 10.1088/1755-1315/666/5/052001
- Kondakova V. N., Pospelov G. B. Dependence between the parameters of storage of artificial soils from their specific properties. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. London : CRC Press, 2019. pp. 11–17.
- Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Mukhina A. S., Moseykin V. V. Geological, geotechnical and geocological problems of reclamation of land disturbed by dumping in open pit coal mining in Kuzbass. *GIAB*. 2022. No. 5. pp. 5–24.
- Trushko V. L., Protosenya A. G. Prospects of geomechanics development in the context of new technological paradigm. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 162–166.
- Karablin M., Gurev D., Prostov S. Automated Stability Analysis of Soil Slopes. *Proceedings of IV International Innovative Mining Symposium*. 2019. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 105. 01015. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501015
- Thiebes B., Bell R., Glade T., Jäger S., Anderson M. et al. A WebGIS decision-support system for slope stability based on limit-equilibrium modelling. *Engineering Geology*. 2013. Vol. 158. pp. 109–118.
- Bakhaeva S. P., Gurev D. V. Stability Prediction in Earthfill Dams with Regard to Spatial Variability of Strength Properties of Loamy Soil. *Journal of Mining Science*. 2020. Vol. 56, No. 1. pp. 20–28.
- Zhabko A. V. A new concept of slope stability design. *GIAB*. 2022. No. 10. pp. 104–124.
- Cheskidov V., Kassymkanova K.-K., Lipina A., Bornman M. Modern Methods of Monitoring and Predicting the State of Slope Structures. *Proceedings of IV International Innovative Mining Symposium*. 2019. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 105. 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501001
- Obregon C., Mitri H. Probabilistic approach for open pit bench slope stability analysis – A mine case study. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29, Iss. 4. pp. 629–640.
- Duong V. B., Fomenko I. K., Nguyen T. K., Vi. T. H. L., Zerkal O. V. et al. Application of GIS-based bivariate statistical methods for landslide potential assessment in Sapa, Vietnam. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2022. Vol. 333, No. 4. pp. 126–140.
- Glazunov V. V., Burlutsky S. B., Shuvalova R. A., Zhdanov S. V. Improving the reliability of 3D modeling of a landslide slope based on engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 771–782.
- Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Karasev M. A., Kutepov Yu. Yu. Prediction of deformation of hydraulic-mine dumps overlaid with dump embankment. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 12. pp. 23–27. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.05
- Pendin V. V., Fomenko I. K., Gorobtsov D. N., Nikulina M. E. Integrated modeling of waste dump slope stability. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 11. pp. 92–96. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.17
- Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Levin B. V., Mironov V. E. Geomechanical provision of phosphogypsum stockpiling in high stacks. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses : Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. London : CRC Press, 2018. Vol. 2. pp. 1241–1248.
- Smirnov Yu. D., Suchkov D. V., Danilov A. S., Goryunova T. V. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity. *Eurasian Mining*. 2021. No. 2. pp. 92–96. DOI: 10.17580/em.2021.02.19
- Kutepova N. A., Korobanova T. N. Features of deformation development in phosphogypsum dumps near the Balakovo town in the Saratov Region. *GIAB*. 2017. No. 10. pp. 132–140.
- Ivochkina M. A. Engineering-geological maintenance of phosphogypsum dump stability : Dissertation of Candidate of Engineering Sciences. Saint-Peterburg, 2013. 172 p.
- Fuleihan N. F. Phosphogypsum Disposal-The Pros & Cons of Wet Versus Dry Stacking. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 46. pp. 195–205.
- Ting Lu, Wensong Wang, Zuoan Wei, Yonghao Yang, Guansen Cao. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of phosphogypsum. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, Iss. 14. pp. 17468–17481.
- Kutepova N. A., Kutepov Yu. I., Kudashov E. S., Danilev S. M. Strength of phosphogypsum mixed with nepheline slime in construction of embankments of gypsum ponds. *GIAB*. 2020. No. 10. pp. 67–78.
- Saenko Yu. V., Shiranov A. M., Nevzorov A. L. Mechanical properties of phosphogypsum and trends its utilization. *Construction and Geotechnics*. 2021. Vol. 12, No. 3. pp. 84–93.
- Alekseev A. V., Iovlev G. A. Adjustment of hardening soil model to engineering geological conditions of Saint-Petersburg. *GIAB*. 2019. No. 4. pp. 75–87.
- Zhabko A. V. Rock failure criteria. *GIAB*. 2021. No. 11-1. pp. 27–45.
- Zuev B. Yu. Methodology of modeling nonlinear geomechanical processes in blocky and layered rock masses on models made of equivalent materials. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 542–552.
- Iovlev G. A., Piskunov N. S., Bakhvalov E. D., Ochukurov V. I. Optimizing nonlinear soil body models for geotechnical conditions of Saint-Petersburg. *GIAB*. 2022. No. 7. pp. 148–163.
- Garner S., Strong J., Zavalangos A. The extrapolation of the Drucker–Prager/Cap material parameters to low and high relative densities. *Powder Technology*. 2015. Vol. 283. pp. 210–226.
- Vermeer P. A., Neher H. P. A soft soil model that accounts for creep. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Ten Years of Plaxis International : Proceedings of the International Symposium*. Rotterdam : A.A. Balkema, 1999. pp. 249–261.
- Benz T., Wehnert M., Vermeer P. A. A Lode Angle Dependent Formulation of the Hardening Soil Model. *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Goa, 2008. pp. 653–660.
- Vasilev M. Yu. Features technology of modelling waste bank phosphite by results to laser-scanning survey. *Journal of Mining Institute*. 2011. Vol. 189. pp. 198–201.
- Verbilo P. E., Iovlev G. A., Petrov N. E., Pavlenko G. D. Application of information modeling technologies for surveying support of mining operations. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 60–79.
- Gusev V. N., Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Study of a set of factors influencing the error of surveying mine facilities using a geodesic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 173–179.
- Mustafin M. G., Kovyazin A. V. Using of spatial models of objects for geodetic monitoring of deformation processes. *Journal of Mining Institute*. 2012. Vol. 198. pp. 191–193.
- Plaxis 3D. 3D engineering designs. Available at: <https://www.plaxis.ru/product/plaxis-3d/> (accessed: 15.12.2022).
- Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Ten Years of Plaxis International : Proceedings of the International Symposium*. Rotterdam : A.A. Balkema, 1999. pp. 281–290.
- Strokova L. A. definition of parameters for numerical modeling of soil behavior. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2008. Vol. 313, No. 1. pp. 69–74.