

УДК 622.271.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ОТВАЛЬНОЙ МАССЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ОТВАЛОВ



А. А. ПАВЛОВИЧ,
зав. лабораторией, канд. техн. наук,
pavlovich_aa@pers.spmi.ru



А. Ю. ХОРЕВА,
научный сотрудник, канд. техн. наук

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

Введение

Постоянная интенсификация горных работ и отсутствие доступных площадей для складирования вскрышных пород приводят к необходимости максимального использования приемной способности фактически эксплуатируемых отвалов или формированию новых отвалов в сложных условиях, в которых увеличивается вероятность возникновения деформаций сооружений [1–3]

В отличие от бортов карьера и его участков, на отвалах горных пород деформации различных масштабов могут наблюдаться уже на ранних стадиях их формирования. Основной причиной их возникновения является несоответствие инженерно-геологических условий фактическим параметрам отвалов [4–6].

Основными трудностями при изучении условий отвалообразования является определение состояния массива не только до момента возведения сооружения, но и после, с учетом всех особенностей его эксплуатации.

Изучение инженерно-геологических условий отвалообразования условно можно разделить на две составляющие: изучение основания и изучение тела отвала. Первое весьма широко регламентировано в методических указаниях и действующих нормативных документах [7]. В то же время второй аспект является предметом дискуссий, а применяемые инструменты для изучения отвала аналогичны инструментам, применяемым для изучения пород основания. В частности, возникают сложности при определении свойств крупнообломочных

Представлены результаты лабораторных испытаний отвальных смесей с различной крупностью фракций и разной влажностью. Лабораторные испытания проводили методом одноплоскостного среза с использованием системы GCTS RDS 200 (диаметр срезной коробки 150 мм) и прибора компании ELE (диаметр срезной коробки 63 мм) для скальных пород в разрыхленном состоянии.

Выполнено сопоставление результатов лабораторных испытаний отвальных смесей с зависимостями Т. М. Лепса, которые используют в зарубежной практике для определения прочностных свойств отвальных пород. Сделан вывод о возможности использования кривых Лепса для решения простых практических задач. Для оценки прочностных свойств отвальных смесей следует разрабатывать специальную программу исследований с учетом всех особенностей эксплуатации отвалов и использовать необходимый для решения задач подход (лабораторные и натурные испытания, моделирование).

Ключевые слова: отвал, основание отвала, отвальная масса, физико-механические свойства, одноплоскостной срез, угол внутреннего трения, сцепление, откос

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.08

пород или их смесей с песчано-глинистыми породами. В связи с этим в данной статье рассматривается подход к определению физико-механических свойств отвальной массы.

Сложности при определении физико-механических свойств отвальной массы

При выполнении инженерно-геологических изысканий основное внимание уделяют породам основания. Изучение отвальной массы (при наличии отвала) имеет подчиненное значение или вовсе не проводится.

Однако в любом случае на основании результатов инженерно-геологических изысканий следует выполнять обоснование устойчивости откосов проектируемого отвала.

В связи с этим при отсутствии фактического отвала физико-механические свойства отвальной массы определяют по аналогии [8]. При проведении испытаний прочностные свойства отвальной массы весьма часто являются заниженными. Особенно наглядно это проявляется для эксплуатируемого отвала. При выполнении расчетов устойчивости откосов по заниженным показателям все ярусы отвала, которые находятся в устойчивом состоянии, имеют значения коэффициентов запаса, близкие к предельному состоянию, или вовсе указывающие на разрушение откоса. Такое несоответствие прежде всего может быть связано с тем, что при проведении испытаний крупные включения пород отсеиваются, что

приводит в рамках проводимого масштаба испытаний к занижению сдвиговой прочности.

К более сложным случаям следует отнести совместное складирование пород с относительно низкой и высокой сдвиговой прочностью [9].

Определение физико-механических свойств отвальной массы связано со следующими трудностями:

- неравномерное поступление различных литологических разностей в отвал, что приводит к сложности прогнозирования, где и как располагается конкретная порода [10–12];
- изменение особенностей поведения раздробленных пород под нагрузкой [11, 13];
- сложный гранулометрический состав пород (в отвале встречаются как пыль, так и куски породы с линейным размером более 1 м) [10, 14, 15];
- наличие локальных участков (линз) с большей или меньшей плотностью и, соответственно, с различными коэффициентами разрыхления [10, 16];
- ограниченность приборной базы для испытаний крупнообломочных пород; при выполнении испытаний разрыхленных пород необходимо учитывать, что нагрузка, действующая на основание и в теле отвала, превосходит обычные типовые нагрузки от зданий; в этом случае лабораторное оборудование, используемое для изысканий, не подходит для испытаний отвальной массы (нагрузки должны быть более 0,03 МПа и достигать величин первых МПа); кроме того, лабораторные испытания грунтов проводят в сдвиговой коробке диаметром порядка 7 см, а размеры кусков в отвальной массе могут достигать метровых значений; это предопределяет необходимость создания допущений или применения сдвиговых коробок увеличенной площади [17].

Все это приводит к тому, что для расчетов принимают некие «приведенные свойства», учитывающие все указанные выше особенности.

Также многие исследователи отмечали, что при формировании скальных отвалов на прочном основании считать их устойчивость и оценивать коэффициент запаса не имеет смысла. В таких условиях высота отвала при угле естественного откоса ограничивается прочностью пород в куске [18].

Методы для определения прочностных свойств отвальной массы

В настоящее время выделяют следующие направления изучения прочностных свойств отвальной массы:

- лабораторные испытания заполнителя в отвальной массе;
- натурные испытания [19–21];
- эмпирические подходы, основанные на гранулометрическом составе отвальной массы и свойствах материнской породы [22];
- моделирование отвальной массы и определение оптимальных соотношений пород в смеси [20, 23–25].



Рис. 1. Состав отвальной массы на участке локальной деформации

Лабораторные испытания заполнителя в отвальной массе. Испытания проводят с использованием соответствующего оборудования и с учетом нормативных требований для грунтов. Полученные прочностные свойства заполнителя приравнивают к отвальной массе. Такой подход объясняется тем, что разрушение отвала происходит не по крупному и прочному куску, а между ними — по заполнителю. Так, на участках деформаций или просадок видно, что по поверхности разрушения преобладают не метровые куски, а заполнитель (рис. 1). Из рисунка также следует, что дисперсный грунт обладает не только углом внутреннего трения, но и сцеплением. С течением времени отвал консолидируется, и несущая способность его может увеличиваться. Имеются примеры, когда для разноски отвала взрывали отвальную массу.

Преимуществом данного подхода является возможность массового испытания образцов заполнителя отвальной массы (с разных участков в плане и по глубине отвала), а также возможность моделирования различных условий (гранулометрический состав, плотность и влажность), что особенно актуально для этапа проектирования, когда отсутствуют фактические данные по реальной отвальной массе.

Натурные испытания хотя и считаются надежным методом определения свойств, но все же имеют недостатки по сравнению с лабораторными испытаниями:

- трудоемкость и, как следствие, ограниченность объемов испытаний;
- образцы характеризуют лишь ограниченный по площади и объему участок;
- отсутствие возможности проведения испытаний образцов, находящихся внутри отвала или непосредственно в районе возможного положения поверхности скольжения;
- сложность обеспечения нормальных напряжений, характеризующих отвал [17].

Эмпирические подходы, основанные на гранулометрическом составе отвальной массы и свойствах материнской породы. Данное направление получило весьма широкое распространение в гидротехническом строительстве.

Многие авторы устанавливали корреляционные зависимости физико-механических свойств скальных несвязных пород с размерами кусков, коэффициентами однородности, коэффициентами разрыхления, формой кусков и т. д. При использовании данного подхода могут быть уточнены прочностные свойства отвальной массы, принимаемые для расчетов [22].

Моделирование отвальной смеси. Моделирование может быть физическим или математическим.

Физическое моделирование отвальной массы позволяет учесть либо средний размер куска, либо общее соотношение кусков [20, 26–28]. В первом случае нарушается подобие взаимоотношений сыпучей среды, поэтому наиболее часто при моделировании используют соотношение среднего размера куска со средним куском в теле отвала. Во втором случае гранулометрический состав определяется в пропорциях, соответствующих отвальной смеси. Однако данный подход весьма трудоемок и субъективен в связи со сложностью установления гранулометрического состава отвальной массы [29].

При наличии в отвальной смеси пород с разными прочностными свойствами необходимо испытывать смеси, характеризующие соотношение складированных пород в отвале. Такой подход позволяет моделировать конкретные условия. При проведении данных испытаний могут быть выработаны рекомендации по порядку и особенностям складирования отвальной массы.

Виртуальные эксперименты основаны на применении численного моделирования для конкретных условий (литологии, различных форм кусков, неоднородности образца и т. д. [7, 30, 31]. В ходе данных экспериментов могут быть изучены особенности поведения образцов, с другой стороны, могут быть определены эквивалентные свойства породы, характеризующие эти особенности [9, 32].

Методы исследований

Для определения свойств отвальной массы были проведены лабораторные испытания образцов, а также выполнены анализ и систематизация результатов испытаний на примере различных дисперсных скальных пород. Лабораторные испытания образцов осуществляли с целью:

- оценки влияния крупности фракций на результаты испытаний образцов отвальной смеси в различных сдвиговых условиях;
- установления влияния влажности на сдвиговую прочность смеси.

Лабораторные испытания проводили методом одноплоскостного среза с использованием сервогидравлической испытательной системы GCTS RDS 200 (диаметр срезной коробки 150 мм) и прибора одноплоскостного среза компании ELE (диаметр срезной коробки 63 мм) для скальных пород в разрыхленном состоянии, их смесей и непосредственно отвальной массы. Схема испытаний – быстрый срез.

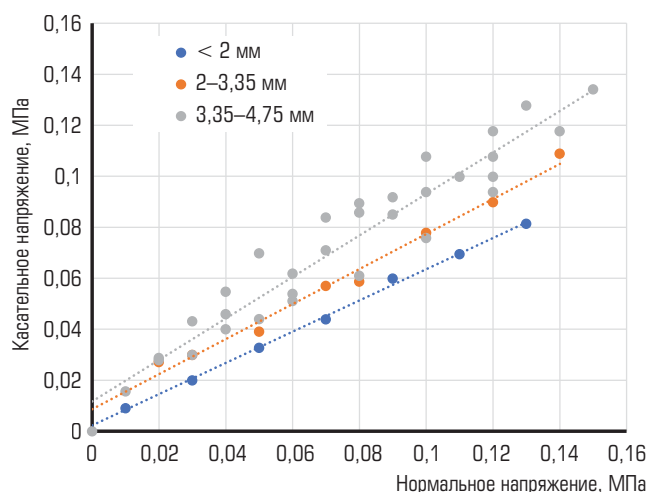


Рис. 2. Результаты испытаний образцов с различным средним размером кусков на одноплоскостной срез

Результаты испытаний

Влияние крупности фракции на результаты испытаний. На рис. 2 приведен пример испытания образцов скальных дисперсных пород на одноплоскостном приборе с малой площадью среза. Испытанные образцы имели различные средние размеры кусков. Из графика на рис. 2 следует, что с увеличением среднего размера куска относительно срезной коробки сдвиговая прочность увеличивается. Это прежде всего связано с расширением влияния граничных условий.

С другой стороны, для оценки влияния данного эффекта были построены графики зависимости сцепления от диаметра используемой срезной коробки для образцов отвальной смеси в сухом и влажном состоянии (рис. 3). Из графиков следует, что наименьшие значения сцепления характерны для образцов, испытанных на приборе со срезной коробкой большего диаметра (150 мм). При этом для влажных пород эта зависимость не такая явная. Угол внутреннего трения во всех случаях находился в диапазоне 2–5°.

Опыты показывают, что при выполнении испытаний необходимо учитывать размер кусков относительно срезной коробки. При больших размерах на сдвиговую прочность начинает оказывать влияние прочность непосредственно самих кусков породы [28]. С другой стороны, при увеличении влажности данный эффект может быть не столь сильно выражен в связи с тем, что вода способствует проскальзыванию кусков относительно друг друга.

Влияние влажности смеси на сдвиговую прочность. Для оценки влияния влажности отвальной смеси на ее прочностные свойства были построены паспорта прочности при естественной влажности и в увлажненном состоянии (рис. 4). Из графиков видно, что увлажненные породы по сравнению с сухими имеют более низкие прочностные свойства.

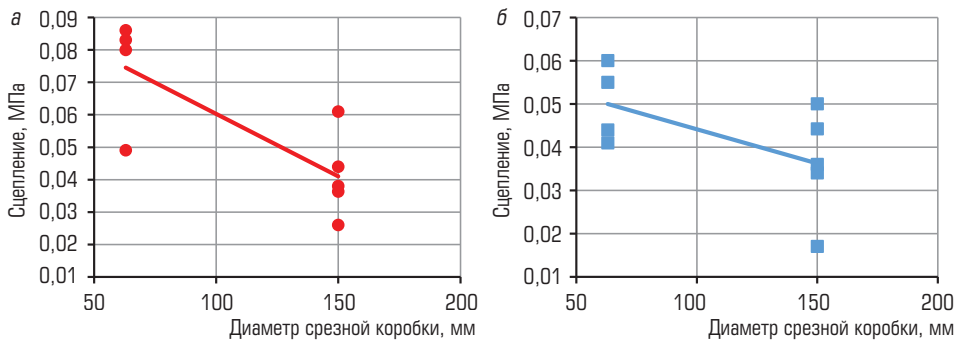


Рис. 3. Графики зависимости сцепления от диаметра срезной коробки для образцов отвальной смеси в сухом (а) и влажном (б) состоянии

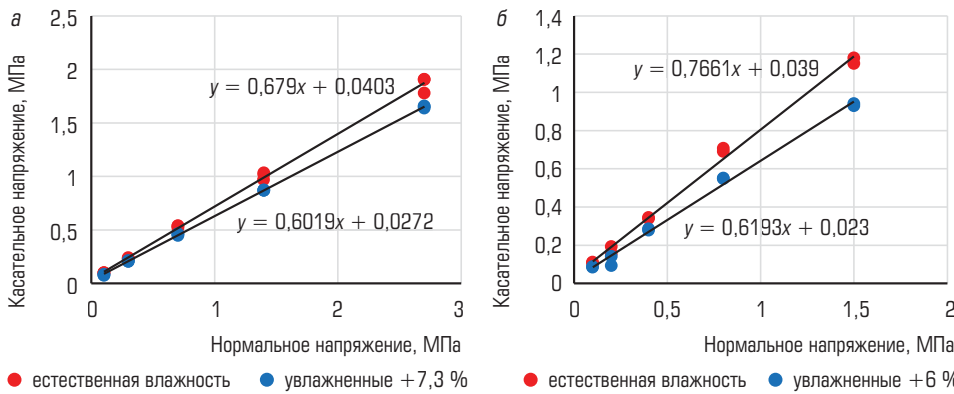


Рис. 4. Паспорта прочности дисперсных пород в воздушно-сухом и увлажненном состоянии: а – пироксениты, $\sigma_{сж} = 124$ МПа; б – аргиллит, $\sigma_{сж} = 34$ МПа

Далее был построен точечный график в координатах «угол внутреннего трения – сцепление», на котором отображены результаты испытаний на одноплоскостной срез образцов различных пород с использованием сервогидравлической испытательной системы GCTS RDS 200 с диаметром срезной коробки 150 мм (рис. 5). На данном графике выделены два диапазона, соответствующих увлажненным и сухим породам: для увлажненных – сцепление 1,5–5 т, угол внутреннего трения 31–37°; для сухих образцов диапазон более узкий и характеризуется более высокими значениями сцепления – 3,5–6 т и угла внутреннего трения – 34–38°.

В таблице сведены результаты испытаний разных пород в монолитном и дисперсном состоянии при различной влажности. Из данных таблицы следует, что значения угла внутреннего трения разрыхленных пород в воздушно-сухом и увлажненном состоянии отличаются от монолита на 1–7°, причем для разрыхленных пород в воздушно-сухом состоянии отличие составляет всего 1–3°.

Из данных таблицы и рис. 5 следует, что для определения физико-механических свойств отвальной массы применительно к простым условиям можно использовать следующий упрощенный подход: $\varphi_{отв} = \varphi_M - 1-5^\circ$; $C_{отв} = 0,01 \div 0,05$ МПа; $\gamma_{отв} = \gamma_M / k_p$, где $\varphi_{отв}$ и φ_M – угол внутреннего трения отвальной массы и массива горных пород; $C_{отв}$ – сцепление отвальной массы; $\gamma_{отв}$ и γ_M – плотность отвальной массы и массива горных пород; k_p – коэффициент разрыхления.

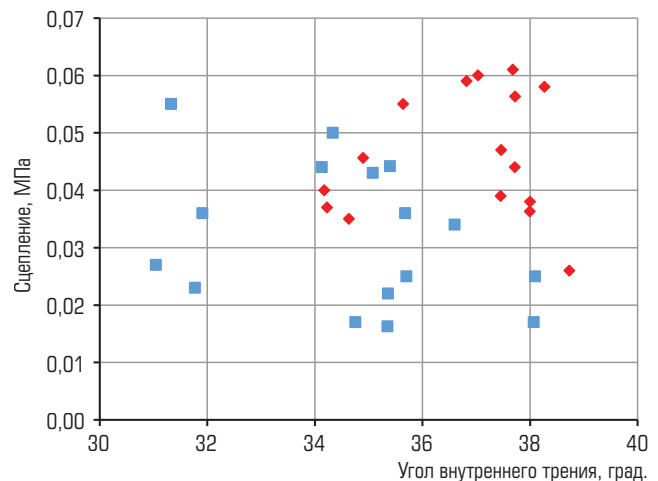


Рис. 5. Результаты испытаний на срез дисперсных пород в сухом (красные точки) и увлажненном (+6÷8 %) (синие точки) состоянии на сервогидравлической испытательной системе GCTS RDS 200 с диаметром срезной коробки 150 мм

Анализ результатов испытаний. В зарубежной практике для получения прочностных свойств отвальной смеси используют зависимости, которые были систематизированы и получены Лепсом, а затем усовершенствованы другими его коллегами [33]. Так, в Чили были проведены масштабные трехосные

Результаты испытаний разных крепких пород в монолитном и дисперсном состоянии при различной влажности

| Породы | Сцепление, МПа | | | Угол внутреннего трения, градус | | | Предел прочности на одноосное сжатие, МПа |
|--|----------------|---------|------------|---------------------------------|---------|------------|---|
| | Сухие | Влажные | В монолите | Сухие | Влажные | В монолите | |
| Аргиллит (влажный + 6 %) | 0,039 | 0,023 | 10 | 37 | 32 | 39 | 34 |
| Брекчия (влажная + 6 %) | 0,060 | 0,017 | 21 | 37 | 35 | 38 | 74 |
| Йолиты (влажные + 6 %) | 0,035 | 0,036 | 23 | 35 | 32 | 37 | 143 |
| Алевролиты (влажные + 7,5%) | 0,036 | 0,044 | 24 | 38 | 35 | 39 | 102 |
| Оливиниты (влажные + 7,5 %) | 0,055 | 0,055 | 26 | 36 | 31 | 39 | 94 |
| Известняк (влажный + 6 %) | 0,059 | 0,025 | 27 | 37 | 36 | 39 | 89 |
| Алевролиты (влажные + 6 %) | 0,061 | 0,050 | 29 | 38 | 34 | 39 | 103 |
| Фениты (влажные + 6,4 %) | 0,058 | 0,025 | 32 | 38 | 38 | 40 | 160 |
| Пироксениты (влажные + 7,3 %) | 0,040 | 0,027 | 38 | 34 | 31 | 36 | 124 |
| Кварцитовидный песчаник (влажный + 6 %) | 0,038 | 0,034 | 71 | 38 | 37 | 39 | 229 |
| Кварцит-карбонатный песчаник (влажный + 6 %) | 0,044 | 0,036 | 71 | 38 | 36 | 38 | 183 |

испытания на оборудовании лаборатории IDIEM Чилийского университета в г. Сантьяго [34, 35]. Данное оборудование позволяет проводить испытания образцов высотой 2 м и диаметром 1 м в условиях контролируемого напряжения и давления до 2,5 МПа. В результате данных исследований было выявлено, что поведение отвальной смеси, в том числе и из скальных пород, имеет нелинейный характер: $\tau = a\sigma^b$, где τ – прочность на сдвиг; σ – нормальное напряжение; a и b – константы (параметры паспорта прочности для конкретной породы).

Однако при решении практических задач по-прежнему чаще всего используют прямолинейную зависимость для описания поведения отвальной массы. На рис. 6 приведено качественное сопоставление результатов лабораторных испытаний, выполненных в Горном университете с кривыми, полученными Лепсом и его коллегами. Необходимо отметить, что график Лепса характеризует сухие породы.

Из рис. 6 следует, что диапазон прочностных свойств разрыхленных пород, полученный в Горном университете для сухих пород, находится в зоне между зависимостями Лепса для средних и низких показателей. Для влажных пород этот диапазон выходит за нижнюю границу зависимостей Лепса. Это связано с тем, что графики Лепса были построены для сухих пород.

В целом из сопоставления результатов следует, что для простых условий зависимости Лепса могут быть использованы для решения практических задач.

Заключение

Отвал является инженерным сооружением. Поэтому еще на стадии проектирования необходимо обосновывать его параметры, которые обеспечат безопасное ведение горных работ. Кроме того, все более актуальным становится вопрос формирования ярусов большой высоты [1, 11, 13, 36, 37], что позволит значительно снизить затраты на складирование вскрышных пород. Однако для принятия таких решений необходимо иметь надежные исходные данные для расчетов.

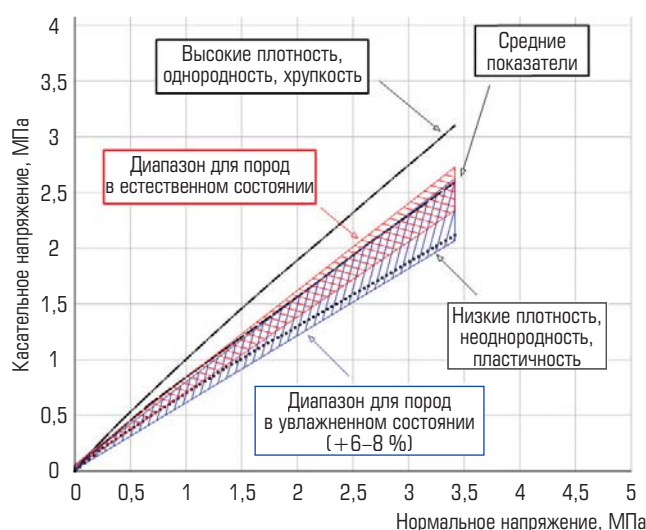


Рис. 6. Сопоставление результатов лабораторных испытаний отвальной массы, выполненных в Горном университете (синяя и красная штриховка) с кривыми, полученными Лепсом и его коллегами (линии черного цвета)

В связи с этим в данной работе представлены результаты лабораторных испытаний отвальных смесей на одноплоскостной срез и приведено их сопоставление с зависимостями Лепса.


Анализ результатов выполненных исследований показал, что лабораторные испытания на одноплоскостной срез разрыхленных пород позволяют учитывать индивидуальные особенности проектируемого сооружения. Однако лабораторные испытания на сдвиговых установках с малой площадью среза характеризуются большим разбросом значений и имеют лишь приближенный характер. Поэтому при формировании типовых «несложных» отвалов допустимо использовать кривые по

аналогии с данными Лепса или использовать вышеприведенные зависимости. В более сложных инженерно-геологических условиях или при одновременном складировании разнопрочных пород следует разрабатывать специальную программу исследований отвальных смесей с учетом всех особенностей эксплуатации отвалов и использовать необходимый для решения задач подход (лабораторные и натурные испытания, моделирование).

В перспективе оценка прочностных свойств отвальных смесей, полученных с использованием эмпирических формул, основанных на данных о неравномерном складировании

различных пород, реальном распределении гранулометрического состава в теле отвала с учетом зон с различной плотностью пород и зон разрыхления, позволит повысить надежность выполняемых расчетов.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 55–61
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.08

Determination of strength properties for slope stability estimate in dumps

Information about authors

A. A. Pavlovich¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, pavlovich_aa@pers.spmi.ru

A. Yu. Khoreva¹, Researcher, Candidate of Engineering Sciences

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

Abstract

Persistent intensification of mining in lacking of land for overburden storage necessitates maximizing intake capacity of the available dumps and involves dumping in difficult and deformation-prone conditions. A dump can start deforming at early stage of construction. The main cause of deformation is inconsistency of the dump design and the actual geotechnical conditions. Justification of slope stability of dump projects should rest upon site survey results. This article describes the lab-scale tests of rock refuse mixtures. The testing aimed to assess the influence of grain size and moisture content of samples on their shearing strength. The single-plane shear tests used GCTS RDS 200 system and ELE device for strong and loose rocks. The test data of rock refuse mixtures are compared with the dependences developed by Leps, which are commonly used abroad to determine strength properties of rock refuse in dumps. The analysis of the test results proves that the lab-scale single-plane shear testing of loose rocks allows taking into account special features of a project structure. On the other hand, the lab-scale shearing machines with a small shear area provide a wide scatter of data only suitable for an approximate analysis. Therefore, in construction of standard "simple" dumps, it is permissible to use curves analogous to Leps' relations, or the relations from this study.

Keywords: dump, dump bed, rock refuse, physical and mechanical properties, single-plane shear, internal friction angle, cohesion, slope.

References

- 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.
- Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Vasileva A. D., Mukhina A. S. Engineering-geological and ecological concerns in operation and reclamation of high slope dumps at open-pit mines in Kuzbass. *GIAB*. 2021. No. 8. pp. 164–178.
- Petrova T. A., Astapenko T. S., Kologrivko A. A., Esman N. M. Reducing the geo-environmental impact of halite waste storage. *GIAB*. 2022. No. 10-1. pp. 155–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_155
- Fisenko G. L. Slope stability of pit walls and dumps. 2nd enlarged and revised edition. Moscow : Nedra, 1965. 378 p.
- Read J., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Collingwood : CSIRO Publishing, 2009. 487 p.
- Zhabko A. V. A New concept of slope stability design. *GIAB*. 2022. No. 10. pp. 104–124.
- Glazunov V. V., Burlutsky S. B., Shuvalova R. A., Zhdanov S. V. Improving the reliability of 3D modelling of a landslide slope based on engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 771–782.

- Hawley M., Cuning J. (Eds.). Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design. Leiden : CRC Press/Balkema, 2017. 370 p.
- Ter-Martirosyan Z. G., Mirnyi A. Yu. Dependence of mechanical properties on nonuniformity of soils. *Inzhenernaya geologiya*. 2013. No. 4. pp. 60–67.
- LapteV Yu. V. Geometrization of strong rock segregation by coarseness in dumping : Theses of Dissertation of Doctor of Engineering Sciences. Ekaterinburg, 2007. 44 p.
- Kutepova N. A., Moseykin V. V., Kondakova V. N., Pospekhov G. B., Straupnik I. A. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *GIAB*. 2022. No. 12. pp. 77–93.
- Kondakova V. N., Pospekhov G. B. Influence of specific properties of manmade ground on piling parameters. *New Ideas in Geosciences : XIV International Conference Headnotes*. Moscow : Izdatelstvo RGGRU im. S. Ordzhonikidze, 2019. Vol. 3. pp. 139–141.
- Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Vasileva A. D. External dump stability substantiation and monitoring in Kuzbass. *GIAB*. 2019. No. 4. pp. 109–120.
- Radchenko G. A. Natural segregation of dumped stone materials. *Hydrotechnical Construction*. 1967. Vol. 1, Iss. 5. pp. 431–435.
- Morozov M. G. Use of segregation effect of industrial waste toward ecological and technological efficiency of mining : Theses of Dissertation of Candidate of Engineering Sciences. Ekaterinburg, 1998. 27 p.
- Kustov V. V. Using the regularities of the segregation of rock overburden on the dump slope to increase the competence of man-made embankment. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost: problemy i puti sovershenstvovaniya*. 2019. No. 2(3). pp. 131–138.
- Molina S. L., Bradfield L., Fityus S. G., Simmons J. V., Lizcano A. Design of a 720-mm Square Direct Shear Box and Investigation of the Impact of Boundary Conditions on Large-Scale Measured Strength. *Geotechnical Testing Journal*. 2020. Vol. 43, Iss. 6. DOI: 10.1520/GTJ20190344
- Popov V. N., Nesmeyanov B. V., Popov S. V. Strong rock dump stability : Tutorial. Moscow : Gornaya kniga, 2010. 122 p.
- Boos I. Yu., Patachkov I. V., Latypov V. D., Rudenko E. A., Aktelova A. Yu. et al. Determination of physical and mechanical characteristics (ρ and k) and estimation of stability of dump mass on results of natural tests in the conditions of Gorevsky deposit. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal*. 2020. No. 4. pp. 54–65.
- Akram Deiminiat, Li Li, Feitao Zeng, Pabst T., Chiasson P. et al. Determination of the Shear Strength of Rockfill from Small-Scale Laboratory Shear Tests: A Critical Review. *Hindawi Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020. ID 8890237. DOI: 10.1155/2020/8890237
- Kutepova N. A., Kutepov Yu. I., Kudashov E. S., Daniliev S. M. Strength of phosphogypsum mixed with nepheline slime in construction of embankments of gypsum ponds. *GIAB*. 2020. No. 10. pp. 67–78. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-67-78
- Akishev A. N., BokiY I. B., Zoteev O. V., Zolotin V. G. Parameters of external dump formation at open pit mines of Nyurbinsky MPp. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2021. Vol. 8, No. 1. pp. 218–224.
- Bakhaeva S. P., Tur K. A., Ilyushkin V. D. Geomechanical substantiation of the dump stability during joint storage of overburden sandy-clayey rocks and beneficiation waste. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. No. 4. pp. 49–59.
- Azéma E., Linero S., Estrada N., Lizcano A. Shear strength and microstructure of polydisperse packings: The effect of size span and shape of particle size distribution. *Physical Review*. 2017. Vol. 96, Iss. 2. 022902. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.022902

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 sovremennoy 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