

УДК 622.271.45/48

Яковлев Алексей Викторович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
открытой геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: lubk_igd@mail.ru

Ворошилов Георгий Александрович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН

Шимкив Екатерина Сергеевна

научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН

Переход Татьяна Максимовна

ведущий инженер,
Институт горного дела УрО РАН

**УСТОЙЧИВОСТЬ ОТВАЛОВ
ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ
РАЗНОПРОЧНЫХ ПОРОД****Аннотация:*

На примере двух предприятий – АО «ЕВРАЗ КГОК» и АО «Оренбургские минералы» – показана возможность и целесообразность совместного складирования в отвалы скальных пород и отходов обогащения с целью обеспечения безопасности ведения отвальных работ, сокращения подотвальных площадей и уменьшения пылеобразования. Приведены результаты полевых и лабораторных исследований прочностных свойств отходов обогащения, в том числе в условиях водонасыщения, обоснованы прочностные свойства отвальной массы (смеси пород и отходов обогащения). Проведены эксперименты посредством визуального наблюдения за процессом смачивания отходов обогащения, их фильтрационной способностью и устойчивостью обводненного откоса. Произведен опыт с замачиванием модели отвального яруса в прозрачном сосуде параллелепипедной формы. Установлено, что отходы обогащения обладают высокой способностью поглощать воду, то есть высокой смачиваемостью, поэтому процесс пылеподавления путем увлажнения отвальной массы оросительной установкой должен дать положительный эффект. На основании геомеханических расчетов произведена оценка устойчивости отвалов, сложенных разнопрочными породами. Доказана гарантированная устойчивость отвалов, сложенных смесью скальных пород и отходов обогащения. Для пылеподавления рекомендуются два совместно применяемых способа: орошение экскаваторного забоя и зоны разгрузки думпкаров и отсыпка верхней части отвального яруса скальными породами.

Ключевые слова: отвал, ярус, отвальная масса, скальные породы, отходы обогащения, совместное складирование, прочностные свойства, устойчивость, геомеханические расчеты.

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.02.070

Yakovlev Alexey V.

Candidate of Technical Sciences,
Head of laboratory of open geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: lubk_igd@mail.ru

Voroshilov Georgy A.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

Shimkiv Ekaterina S.

Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

Perekhod Tatyana M.

Leading Engineer,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

**STABILITY OF DUMPS
WHILE STORING
ROCKS OF DIFFERENT STRENGTH***Abstract:*

The article uses the example of two enterprises – AO "EVRAZ KGOK" and AO "Orenburg minerals" – to show the possibility and expediency of joint dump storage of rocks and enrichment waste in order to ensure the safety of dump operations, reduce sub-basement areas and reduce dust formation. The paper presents the results of field and laboratory studies of the strength properties of enrichment waste, including under conditions of water saturation, the strength properties of the dump mass (a mixture of rocks and enrichment waste) are justified. Experiments carried out by visual observation of the wetting process of enrichment waste, their filtration capacity and the stability of the watered slope. An experiment with soaking a model of a dump tier in a transparent vessel of a parallelepiped shape. We established that the enrichment waste has a high ability to absorb water, that is, a high wettability, so the process of dust suppression by moistening the dump mass with an irrigation system should have a positive effect. Based on geomechanical calculations, we estimated the stability of dumps composed of different-strength rocks. The guaranteed stability of dumps stacked with a mixture of rocks and enrichment waste has been proved. For dust suppression, the paper recommend two jointly applied methods: irrigation of the excavator face and the dumpcart unloading zone and filling the upper part of the dump tier with rocks.

Key words: dump, tier, dump mass, rocks, enrichment waste, joint storage, strength properties, stability, geomechanical calculations.

* Статья подготовлена при выполнении Госзадания № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019-0005.

Введение

Изменение условий формирования отвалов, в частности, совместное складирование скальных вскрышных пород и отходов обогащения, по сравнению с первоначальным проектом следует отнести к переходному процессу [1], направленному на сокращение подотвальных площадей с дополнительной возможностью организации пылеподавления на поверхности отвалов отходов обогащения.

Исследования устойчивости отвалов разнопрочных пород проведены на базе двух предприятий – АО «ЕВРАЗ КГОК» и АО «Оренбургские минералы».

До 2007 г. экскаваторный отвал № 1 АО «ЕВРАЗ КГОК» формировался скальными вскрышными породами. В настоящее время более 50 % объема складированной отвальной массы представлено отходами обогащения, что влечет за собой изменение прочностных свойств отвальной массы и создает вероятность возникновения деформационных процессов в теле отвала.

Поводом для выполнения исследований устойчивости смеси скальных и рыхлых пород послужило возникновение закольных трещин на поверхности отвального яруса высотой 20 м вблизи зоны работы экскаватора и железнодорожных путей.

Современное состояние отвала характеризуется следующими условиями его формирования:

- в первый ярус отвала заскладированы породы вскрыши Главного карьера (до их утверждения в качестве строительного камня);

- во втором и третьем ярусах размещается строительный камень Главного карьера и карьера Южной залежи (после постановки на госбаланс в 1989 г.), а также породы вскрыши, поступающей из Северного и Западного карьеров, с перегрузкой и отправкой ее транзитом автосамосвалами на подсыпку дамб цеха хвостового хозяйства;

- строительные материалы, полученные в виде побочных продуктов при сухой магнитной сепарации отсыплются совместно со строительным камнем.

В соответствии с требованием «Правил охраны недр» (ПБ 07-601-03) временно не используемый строительный камень подлежит отдельному складированию и сохранению, поэтому строительный камень размещается отдельно от пород вскрыши во втором, третьем и четвертом ярусах отвала.

Побочную продукцию обогащения, которая также относится к строительным материалам (щебень и отсеvy) и имеет идентичный минералогический и химический состав, возможно складировать совместно со строительным камнем с целью минимизации воздействия отходов обогащения на территорию складирования с учетом требований по устойчивости смеси скальных пород и рыхлых отходов обогащения в отвальной массе [2 – 4].

На Киембаевском асбестовом ГОКе АО «Оренбургские минералы» складирование отходов обогащения в отвал сопровождается пылеобразованием из-за наличия в отвальной массе мелкодисперсных частиц и респираторных волокон асбеста. Для пылеподавления были выбраны два совместно применяемых способа: орошение экскаваторного забоя и зоны разгрузки думпкаров и отсыпка верхней части отвального яруса скальными породами.

Поэтому целью исследований является прогнозная оценка устойчивости комбинированного отвала, отсыпанного отходами обогащения и скальными породами. В данной работе рассматриваются два варианта формирования комбинированного отвала:

1. Скальными породами отсыпается верхняя часть 30-метрового яруса высотой до 5 м.

2. Скальными породами отсыпается верхняя часть 30-метрового яруса высотой до 5 м, а также поверхность откоса яруса.

Экспериментальные исследования и анализ результатов

С целью обеспечения безопасности ведения отвальных работ проведены полевые и лабораторные исследования прочностных свойств побочной продукции обогащения, обоснованы прочностные свойства отвальной массы (смеси пород и отсевов) и проведены геомеханические расчеты устойчивости отвала.

АО «ЕВРАЗ КГОК»

Прочностные характеристики скальных пород в отвале:

- сцепление $C = 0 \text{ т/м}^2$;
- угол внутреннего трения $\varphi = 36 - 38^\circ$.

Прочностные характеристики отходов обогащения в горнорудной промышленности [5 – 7]:

- сцепление $C = 0,015 - 0,016 \text{ т/м}^2$;
- угол внутреннего трения $\varphi = 31 - 33^\circ$.

Вышеуказанные различия прочностных свойств пород следует учитывать при обосновании устойчивых параметров отвалов.

Из отвала № 1 были отобраны образцы отходов сухой магнитной сепарации с естественной влажностью для испытаний методом одноплоскостного среза по неконсолидированно-недренированной схеме (быстрый сдвиг) с применением прибора П-10С. Испытания проведены при естественной влажности и искусственном водонасыщении образцов. Всего было проведено более 100 сдвигов образцов при различных нормальных нагрузках. В процессе испытаний были получены значения сдвигающих напряжений, отвечающих значениям нормальной нагрузки (табл. 1).

По этим данным был построен график $\tau = f(P)$ (рис. 1), по которому определены значения сцепления $C = 0 \text{ МПа}$ и угла внутреннего трения $\varphi = 28,5^\circ$.

Таблица 1

Результаты испытаний

Нормальная нагрузка P , МПа	Сдвигающее напряжение τ , МПа
0,05	0,03
0,1	0,05
0,15	0,08
0,2	0,11

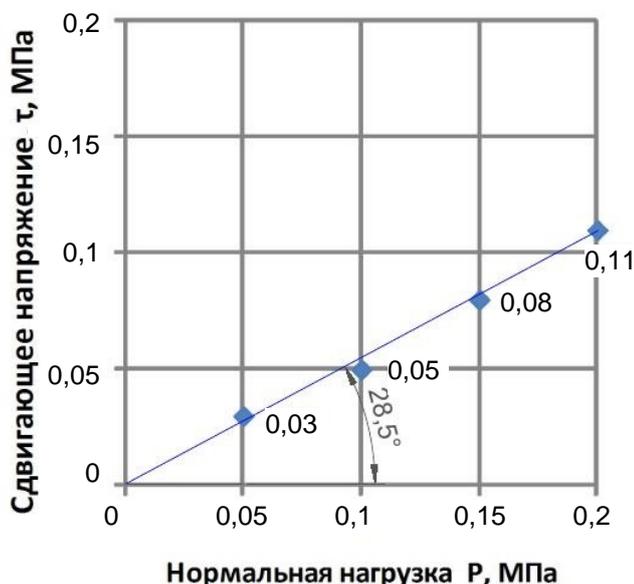


Рис. 1. График зависимости сдвигающих напряжений τ от нормальной нагрузки P

Отходы обогащения представлены материалом разной крупности, вплоть до мелкозернистых и пылеватых, поэтому минимальное сцепление должно присутствовать, как указано в литературных источниках.

Для расчетов были приняты следующие характеристики отходов обогащения: $C = 0,01$ МПа; $\varphi = 28,5^\circ$. Как показали эксперименты, дополнительное увлажнение отходов обогащения приводит к увеличению угла внутреннего трения до 31° .

Поскольку в отвальной массе отходы обогащения составляют около 50 % объема, для расчетов устойчивости отвальных ярусов смеси скальных и рыхлых пород приняты усредненные прочностные свойства: $C = 0,005$ МПа; $\varphi = 32,3^\circ$.

Обоснование устойчивых параметров отвалов производится по методике ВНИМИ [8], основанной на теории предельного равновесия «сыпучей среды», включающей также и предельное равновесие связной среды с трением.

Для обоснования устойчивости использован метод алгебраического сложения удерживающих и сдвигающих сил по потенциальной поверхности скольжения.

Коэффициент запаса устойчивости откоса при оценке его устойчивости определяется методом суммирования сдвигающих и удерживающих сил, действующих по наиболее напряженной поверхности.

Результаты расчетов показывают, что устойчивость отвального яруса высотой 20 м обеспечивается

- для скальной отвальной массы с коэффициентом запаса 1,049;
- для смеси скальной отвальной массы и отходов обогащения с коэффициентом запаса 1,039;
- для отходов обогащения с коэффициентом запаса 1,036.

С увеличением в отвальной массе доли отходов обогащения закономерно уменьшается коэффициент запаса устойчивости отвального яруса.

Углы откоса отвального яруса соответствуют углу внутреннего трения:

- для скальных пород – $36 - 38^\circ$;
- для смеси скальных пород и отходов обогащения – $32 - 33^\circ$;
- для отходов обогащения – $28 - 29^\circ$.

При коэффициенте запаса $n = 1,036 - 1,039$ возможны некоторые деформации поверхности отвального яруса в виде трещин. Однако наличие в отвальной массе скальных крупнокусковых пород препятствует развитию оползневых процессов.

АО «Оренбургские минералы»

Комбинированный отвал из отходов обогащения и скальных пород отсыпается на слабое основание, представленное глинами коры выветривания мощностью от 15 до 30 м. Поэтому были проведены испытания прочностных свойств не только отходов обогащения, но и пород основания отвала.

Исследования глин основания отвала производилось в лабораторных условиях на образцах, отобранных из скважин, пробуренных по периметру отвала. По результатам экспериментов установлены прочностные свойства пород основания отвала:

- угол внутреннего трения – 15° ;
- сцепление – 0,06 МПа.

Как показали исследования, отвальная масса, представленная отходами обогащения, по своим прочностным характеристикам соответствует пескам. При увеличении влажности от 1 до 20 % сцепление возрастает с 0,005 до 0,017 МПа, а угол внутреннего трения уменьшается с $35,5$ до $31,5^\circ$.

Наряду с определением прочностных свойств были проведены эксперименты посредством визуального наблюдения за процессом смачивания отходов обогащения, их фильтрационной способностью и устойчивостью обводненного откоса. Результаты подобных экспериментов приведены в [9, 10].

Был произведен опыт с замачиванием отвальной массы в прозрачном сосуде параллелепипедной формы. Из испытываемой породы была сформирована модель от-

вального яруса с углом откоса 60° . По истечении семи суток на модели яруса, полностью погруженного в воду, оползневых явлений не наблюдалось, за исключением локальных вывалов породы в нижней части откоса и незначительного прогиба поверхности яруса вблизи верхней бровки откоса. После удаления воды из сосуда модель была оставлена под наблюдением до высыхания, в процессе которого оползневых явлений не наблюдалось. Наоборот, с течением времени происходило упрочнение породы, выразившееся в ее цементации. Это же явление было замечено при сушке образцов породы в сушильном шкафу в процессе определения влажности при сдвиговых испытаниях.

Установлено, что отходы обогащения обладают высокой способностью поглощать воду, то есть высокой смачиваемостью. Скорость фильтрации достигает $0,15$ мм/с. Из этого следует, что процесс пылеподавления путем увлажнения отвальной массы оросительной установкой должен дать положительный эффект.

Для расчетов устойчивости отвала были приняты следующие прочностные характеристики скальных пород, отходов обогащения и пород основания отвала с учетом коэффициента запаса $n = 1,2$.

1. Скальные породы:

- угол сопротивления сдвигу – 38° ;
- сцепление – 0 т/м².

2. Отходы обогащения:

- угол внутреннего трения – $30,7^\circ$;
- сцепление – $0,42$ т/м².

3. Породы основания отвала:

- угол внутреннего трения – $11,7^\circ$;
- сцепление – $5,8$ т/м².

Расчеты устойчивости комбинированного отвала проведены по методике ВНИМИ для двух вариантов формирования отвала.

Для каждого из вариантов устойчивость рассчитана по трем вероятным поверхностям скольжения:

- поверхность скольжения располагается в теле отвала (без учета свойств основания отвала);
- поверхность скольжения проходит по контакту со слабым основанием;
- поверхность скольжения захватывает основание отвала.

В первом варианте формирования отвала, когда скальными породами отсыпается верхняя часть 30-метрового яруса высотой до 5 м, коэффициент запаса устойчивости составляет $n = 1,01$. Этот коэффициент запаса практически соответствует коэффициенту запаса устойчивости яруса, полностью сформированного отходами обогащения.

Следовательно, скальные породы, размещенные в верхней части яруса, практически не оказывают влияния на положение вероятной поверхности скольжения и на устойчивость отвального яруса.

Расчет устойчивости отвального яруса при прохождении вероятной поверхности скольжения по контакту с основанием показывает, что коэффициент запаса устойчивости составляет $n = 1,32$, то есть устойчивость яруса обеспечивается.

В случае, когда поверхность скольжения захватывает основание отвала, коэффициент запаса устойчивости возрастает до $n = 1,59$.

Анализ результатов проведенных расчетов показывает, что наиболее напряженная поверхность скольжения располагается в теле отвального яруса, а не на контакте с основанием и не в основании отвала.

Во втором варианте формирования отвала, когда скальными породами отсыпается не только верхняя часть яруса, но и поверхность откоса яруса, коэффициент запаса устойчивости составляет $n = 1,045$, что выше, чем при первом варианте формирования отвала. Это объясняется тем, что откос яруса оказывается пригруженным скальными породами, что благоприятствует повышению его устойчивости.

Выводы

1. На основании проведенных исследований прочностных свойств отходов обогащения и расчетов устойчивости отвальных ярусов обоснована безопасность формирования отвалов при совместном складировании скальных пород и отходов обогащения.
2. Многоярусный экскаваторный отвал № 1 АО «ЕВРАЗ КГОК» рекомендуется формировать с проектными параметрами по результирующему углу и расстоянию между смежными ярусами. Возникновение трещин на поверхности отвального яруса может быть вызвано неравномерностью осадки отвальной массы, в том числе из-за различия крупности скальных пород и отходов обогащения.
3. Расчеты устойчивости комбинированного отвала АО «Оренбургские минералы», основанные на проведенных экспериментальных исследованиях физико-механических свойств отходов обогащения и пород основания отвала, показывают, что внедрение технологии пылеподавления на отвале отходов обогащения путем орошения зоны работы экскаватора и разгрузки думпкаров и отсыпки поверхности отвала скальными породами не влечет за собой увеличения вероятности возникновения оползневых явлений по сравнению с существующей технологией отвалообразования. Для повышения коэффициента запаса устойчивости предлагается формировать отвал по варианту, при котором скальными породами отсыпается не только верхняя часть, но и поверхность откоса отвального яруса.

Список литературы

1. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург, УрО РАН, 284 с.
2. Ческидов В.И., Бобыльский А.С., 2017. Технологическо-экологические аспекты отвалообразования вскрышных пород на разрезах Кузбасса. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 5, С. 96 - 104.
3. Шершнева А.А., 2016. *Обоснование технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения*: Дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 147 с.
4. Шершнева А.А., Кисляков В.Е., 2019. *Отсыпка отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения*. Красноярск: СФУ, 132 с.
5. Казарян Г.Г., 2014. *Разработка технологии отвалообразования совместного складирования вскрышных пород и отходов обогащения*: дис. ... канд. техн. наук. Ереван, 156 с.
6. Казарян Г.Г., 2013. Способ совместно-раздельного складирования вскрышных пород карьера и хвостов обогащения в сложных рельефных условиях. *Вестник ГИГА. Сер. Металлургия, материаловедение, недропользование*, Вып. 16, № 1, С. 84 - 93.
7. Зотеев О.В., Пыталев И.А., Яшкина В.В., Гапонова И.В., 2019. Особенности формирования техногенной емкости на базе существующих внешних отвалов вскрышных пород. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, Вып. 3, С. 22 - 36.
8. *Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах*. Утв. Госгортехнадзором РФ 16.03.1998. СПб.: ВНИМИ, 1998, 208 с.
9. Бахаева С.П., Гурьев Д.В., 2014. Исследование влияния изменчивости физико-механических свойств полусухих хвостов на устойчивость отвала. *Безопасность труда в промышленности*, № 8, С. 54 - 57.
10. Бахаева С.П., Тур К.А., Илюшкин В.Д., 2020. Геомеханическое обоснование устойчивости отвала при совместном складировании песчано-глинистых пород и отходов обогащения. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 4, С. 49 - 59.

References

1. Yakovlev V.L., 2019. *Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [Study of transients as a new direction in the development of the methodology of integrated development of geo-resources]. Ekaterinburg, UrO RAN, 284 p.
2. Cheskidov V.I., Bobyl'skii A.S., 2017. *Tekhnologo-ekologicheskie aspekty otvaloobrazovaniya vskryshnykh porod na razrezakh Kuzbassa* [Technological and ecological aspects of dump formation of overburden rocks in the Kuzbass open cuts]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 5, p. 96 - 104.
3. Shershnev A.A., 2016. *Obosnovanie tekhnologii otsypki otvalov skal'nykh vskryshnykh porod pri skladirovaniy otkhodov obogashcheniya* [Justification of technology of filling dumps of rock overburden during the storage of enrichment waste]: Dis. ... kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet, 147 p.
4. Shershnev A.A., Kislyakov V.E., 2019. *Otsypka otvalov skal'nykh vskryshnykh porod pri skladirovaniy otkhodov obogashcheniya* [Dumping of rock overburden dumps during storage of enrichment waste]. Krasnoyarsk: SFU, 132 p.
5. Kazaryan G.G., 2014. *Razrabotka tekhnologii otvaloobrazovaniya sovmestnogo skladirovaniya vskryshnykh porod i otkhodov obogashcheniya* [Development of technology of dump formation of joint storage of overburden rocks and enrichment waste]: dis. ... kand. tekhn. nauk. Ere-van, 156 p.
6. Kazaryan G.G., 2013. *Sposob sovmestno-razdel'nogo skladirovaniya vskryshnykh porod kar'era i khvostov obogashcheniya v slozhnykh rel'efnykh usloviyakh* [A method of joint and separate storage of overburden rocks of the quarry and tailings of enrichment in difficult relief conditions]. *Vestnik GIUA. Ser. Metallurgiya, materialovedenie, nedropol'zovanie*, Vyp. 16, № 1, p. 84 - 93.
7. Zoteev O.V., Pytalev I.A., Yashkina V.V., Gaponova I.V., 2019. *Osobennosti formirovaniya tekhnogennoi emkosti na baze sushchestvuyushchikh vneshnikh otvalov vskryshnykh porod* [Peculiarities of the formation of technogenic capacity on the basis of existing external overburden dumps]. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, Vyp. 3, p. 22 - 36.
8. *Pravila obespecheniya ustoichivosti otkosov na ugol'nykh razrezakh Utv. Gosgortekhnadzorom RF 16.03.1998* [Rules for ensuring the stability of slopes at coal mines. Approved by Gosgortekhnadzor of the Russian Federation on 16.03.1998]. SPb.: VNIMI, 1998, 208 p.
9. Bakhaeva S.P., Gur'ev D.V., 2014. *Issledovanie vliyaniya izmenchivosti fiziko-mekhanicheskikh svoystv polusukhikh khvostov na ustoichivost' otvala* [Investigation of the influence of the variability of the physical and mechanical properties of semi-dry tails on the stability of the dump]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, № 8, p. 54 - 57.
10. Bakhaeva S.P., Tur K.A., Ilyushkin V.D., 2020. *Geomekhanicheskoe obosnovanie ustoichivosti otvala pri sovmestnom skladirovaniy peschano-glinistykh porod i otkhodov obogashcheniya* Geomechanical justification of stability of a dump during joint storage of sand-clay rocks and enrichment waste]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, № 4, p. 49 - 59.