

holes with high technical and economic indexes. The data received as the result of the study of sludge accumulation in vuggs form the basis for the development of the rational mode parameters for the process of drilling bore holes.

**Key words:** Bore hole, cavity, clay-mud accumulations, device for processing, clay, drilling mud.

Поступила 19.04.2016



УДК 622.271.33:624.131.543

Наука

А. С. Ковров /к. т. н./

ГВУЗ «Национальный горный университет»

## Оценка сейсмических воздействий на устойчивость откосов насыпного массива

O. S. Kovrov /Cand. Sci. (Tech.)/

National Mining University

### Assessment of seismic influence on the slope stability of filled-up rock mass

**Цель.** Комплексная оценка устойчивости откосов насыпи под ленточные конвейеры участка циклично-поточной технологии (ЦПТ) скальных пород вскрыши Первомайского карьера ПАО «Северный ГОК» для обоснования эффективных противооползневых мероприятий.

**Методика.** Для исследования геомеханической устойчивости насыпного массива и откосов путепровода ЦПТ использованы следующие методы: гидрогеологический анализ, визуальные наблюдения за особенностями объекта; фотосъемка; численное моделирование устойчивости откосов насыпи в программе конечно-элементного анализа Phase2.

**Результаты.** Расчет устойчивости откосов насыпи для открытой галереи ленточных конвейеров, основания тела насыпи и откосов борта карьера показал, что устойчивость насыпного массива обусловлена комплексным воздействием геологических, гидрогеологических и техногенных факторов. Геометрические параметры сооружения ЦПТ, физико-механические свойства пород насыпи и сейсмические воздействия играют ключевую роль в обеспечении стабильной эксплуатации объекта и его устойчивости. Выполнено численное моделирование различных вариантов укрепления откосов насыпи, при этом наиболее эффективными способами являются разнообразные по форме пригрузки и удерживающие упорные призмы из скальных пород.

**Научная новизна.** Определены коэффициенты запаса устойчивости (КЗУ) насыпного массива и откосов насыпи по профилям с учетом физико-механических свойств сложноструктурного насыпного массива, его обводненности, нагрузок горнотранспортного оборудования и сейсмических воздействий. Выявлены участки породного массива наиболее подверженные геомеханическим деформациям и смещениям.

**Практическая значимость.** На основании результатов моделирования разработаны противооползневые мероприятия для обеспечения стабильной эксплуатации комплекса ЦПТ, обеспечивающие устойчивость откосов насыпи и борта карьера. (Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.)

**Ключевые слова:** циклично-поточная технология (ЦПТ), устойчивость откосов карьеров, устойчивость насыпных массивов, оползень, обводнение массива пород, сейсмические воздействия, коэффициент запаса устойчивости, критерий прочности Кулона – Мора.

**Актуальность работы.** Использование пустых пород на карьерах для сооружения разнообразных по форме и назначению насыпных массивов является неотъемлемой частью технологии открытых горных работ.

При применении циклично-поточной технологии (ЦПТ) с расположением конвейера по

борту карьера наклонную траншею располагают как на ненарушенном массиве горных пород, так и на насыпном массиве, представленном разрушенными скальными породами.

Создание подобных насыпных массивов, которые, по сути, являются дисперсными и несвязными, требует постоянного геомеханического

мониторинга. Такая необходимость обусловлена требованиями безопасной эксплуатации и устойчивости насыпных массивов на карьерах с учетом физико-механических свойств пород, их обводненности, статических и динамических нагрузок горнотранспортного оборудования и сейсмических воздействий.

Массовые взрывы на карьерах обуславливают мощное сейсмическое воздействие на устойчивость бортов и отвалов. Влияние сейсмических колебаний на развитие оползневых процессов в откосах связных или насыпных массивов разнообразно и зависит от ряда факторов: геометрических параметров, прочностных характеристик и обводненности массива, наличия поверхностей ослаблений, внешних нагрузок, магнитуды колебаний.

**Цель** работы заключается в комплексной оценке устойчивости откосов насыпи под ленточный конвейер участка циклично-поточной технологии (ЦПТ) скальных пород вскрыши Первомайского карьера ПАО «Северный ГОК» с учетом сейсмических воздействий для обоснования эффективных противооползневых мероприятий.

**Задачи работы.** Выполнить численное моделирование устойчивости насыпного массива откосов траншеи ЦПТ и выявить причины оползневых процессов; определить коэффициенты запаса устойчивости для продольного и поперечных профилей с учетом сейсмических воздействий; разработать противооползневые мероприятия, обеспечивающие устойчивость бортов карьера и сооружений насыпи ЦПТ.

**Методология.** Для исследования геомеханической устойчивости насыпного массива и откосов путепровода ЦПТ использованы следующие методы: гидрогеологический анализ, визуальные наблюдения за особенностями объекта; тахеометрическая съемка; электрометрическая диагностика массива; фотосъемка; расчеты устойчивости откосов насыпи в программе конечно-элементного анализа Phase2 компании Rocscience Inc.

В качестве критерия прочности для оценки устойчивости насыпи выбран критерий Кулона – Мора. Гидравлические свойства для каждой литологической разности массива пород задаются согласно эмпирическому методу Ван Генухтена. Сейсмические воздействия на массив в программе Phase2 задаются посредством безразмерных сейсмических коэффициентов в горизонтальном и вертикальном направлениях.

**Анализ последних исследований.** Оценка сейсмического воздействия на откосы, как природных землетрясений, так и индуцированных техногенной деятельностью человека, имеет су-

щественное прикладное значение, прежде всего для обеспечения безопасности жизнедеятельности человека.

Обычно в инженерных программах геотехнического анализа влияние фактора сейсмичности оценивается посредством приложения квазистатических нагрузок в массиве, без учета уже существующих деформаций и смещений, что снижает достоверность расчетов [1]. Тем не менее, методы оценки сейсмических воздействий на откосы постоянно совершенствуются, учитывая наиболее значимые факторы [2]. Вариации этих факторов, влияющих на состояние откоса, показывают, что применение вероятностного подхода при оценке их устойчивости является более надежным по сравнению с детерминистическими моделями. В качестве переменных параметров породного массива принимаются сцепление, угол внутреннего трения и удельный вес [3]. Для целостной оценки устойчивости однородных откосов необходимо учитывать наличие в массиве трещин или других нарушений сплошности среды [4], а также уровень грунтовых вод и обводненность массива пород, что существенно влияет на коэффициент запаса устойчивости [5].

Фактор сейсмического воздействия часто выступает в качестве триггерного, инициируя активный оползневый процесс в предельно устойчивом откосе, что требует комплексного геомеханического анализа.

**Исходные данные.** Первомайский карьер принадлежит Публичному акционерному обществу «Северный горно-обогачительный комбинат» (ПАО «Северный ГОК», г. Кривой Рог, Украина), который входит в состав Метинвест Холдинга и является крупнейшим в Европе горнодобывающим предприятием с законченным циклом подготовки доменного сырья – железорудного концентрата и окатышей. Карьер имеет в длину 3100 м, ширину 2600 м, глубину 475 м при максимальной проектной глубине отработки – 650 м. Нижний его горизонт находится на отметке – 355 м. Транспортировка рудной горной массы с нижних горизонтов карьера осуществляется большегрузными автосамосвалами до дробильного узла на горизонте – 115 м, и далее на поверхность конвейером. Скальные вскрышные породы транспортируют автомобильно-железнодорожным транспортом.

Ввиду интенсивного понижения горных работ, увеличения объемов скальной вскрыши и дальности ее транспортирования руководство комбината приняло решение о строительстве комплекса циклично-поточной технологии (ЦПТ) для транспортирования скальных вскрышных пород. Согласно планам строитель-

## ГОРНОРУДНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

ства ленточные конвейеры № 5П и 6П скального комплекса ЦПТ располагаются в открытой галерее на верхних горизонтах от +111,0 м до +62 м, пересекая несколько верхних вскрышных уступов [6].

Горными работами карьера обнажены существовавшие ранее водоносные горизонты. В них отсутствуют подземные воды ввиду образовавшейся депрессионной воронки. Однако накопление осенне-зимней влаги или обильных атмосферных осадков может частично возобновить временное движение подземных вод и их наполнение в пониженных участках на поверхности, что приводит к оползневым процессам. В этой связи возникла необходимость в разработке противооползневых мероприятий, обеспечивающих устойчивость сооружений под конвейер, а также уступов и борта карьера.

Сооружение открытого конвейера для транспортировки отвальной массы от бункера с гор. 77 м до пункта приема породы гор. 89 м сооружается на насыпном грунте, представленном суглинками в их естественном залегании и отсыпкой красно-бурыми глинами и скальными породами (рис. 1).

При строительстве насыпи – основания галереи для конвейерного подъемника вскрышного комплекса ЦПТ – произошли оползни: один – в верхней его части и несколько – по верхним уступам карьера мягкой вскрыши. Четвертичные отложения на рассматриваемом участке представлены лессовидными суглинками различной степени пористости, пластичности, наличием включений, а также плотными красно-бурыми глинами [6].

При визуальном исследовании участка от гор. 77 до гор. 89 м были отмечены 2 участка у подножия левосторонней части откоса, где в

понижениях скапливаются атмосферные осадки (рис. 1). Наличие растительности в виде разнотравья свидетельствует о том, что вода в понижениях удерживается продолжительное время. Такое явление вблизи насыпных массивов из глинистых пород имеет место при их высокой естественной влажности или при наличии водоупорных литологических разностей, препятствующих нормальной фильтрации.

Поверхность рассматриваемого участка отсыпана скальными вскрышными породами на основание, представленное красно-бурыми суглинками. Отсыпка скальной породой откосов и поверхности насыпной дороги не обеспечивает ее долговременную устойчивость. При визуальном обследовании установлено, что возникновение оползней на левосторонних откосах сооружения обусловлено геометрическими параметрами, физико-механическими характеристиками суглинков и влажностью пород вследствие атмосферных осадков и влияния грунтовых вод.

Для комплексной оценки геомеханической устойчивости рассматриваемого объекта в алгоритме моделирования необходимо учесть ряд наиболее значимых факторов: геологическую структуру массива, гидрогеологические факторы, нагрузки от горнотранспортного оборудования и сейсмическое воздействие от массовых взрывов на карьере.

**Исходные данные для расчета.** Физико-механические свойства пород приведены в табл. 1.

Коэффициенты фильтрации  $K_f$  для вскрышных пород месторождения приняты следующие: насыпь (суглинок рыжевато-бурый с песчано-глинистым заполнением, мелким щебнем кварцита) –  $4,0 \cdot 10^{-5}$  м/с; суглинки желто-

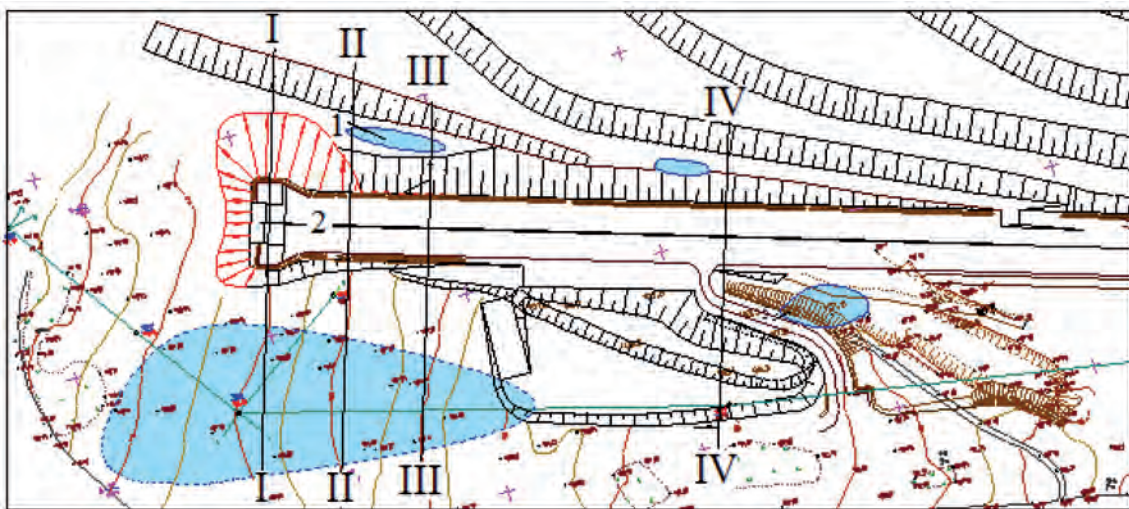


Рис. 1. План строительства насыпи ЦПТ [6]:

1 – водоем под оползнем; 2 – верхняя площадка насыпи;  
I-I', II-II', III-III', IV-IV' – оползнеопасные профили насыпи

Физико-механические характеристики вскрышных пород

Наименование вскрышных пород	Плотность $\gamma$ (*), МН/м <sup>3</sup>	Угол внутреннего трения $\varphi$ (*), град	Сцепление $C$ (*), МПа	Предел прочности на растяжение $R_p$ , МПа	Модуль деформации $E_d$ (*), МПа
1а - тело насыпи из красно-бурой глины горизонтов 3а, 3б	0,017	16/11	0,038/0,02	0,050	24/10
1б - пригрузка откосов из скальных пород	0,025	35/30	10/10	15/15	108
2а - суглинок лессовидный желто-бурый макропористый, твердой и полутвердой консистенции	0,0176	26/22	0,032/0,016	0,050	13/6
2б - погребенная почва - суглинок серовато-бурый макропористый тугопластичный до пластичного	0,0184	25/19	0,04/0,031	0,057	14/5
2в - суглинок лессовидный палево-желтый макропористый, пылеватый, полутвердый до пластичного	0,0181	23/21	0,04/0,02	0,057	19/6
2г - суглинок лессовидный желтовато-бурый низкопористый, от твердой до тугопластичной консистенции	0,0187	25/23	0,04/0,02	0,065	23/16
2д - погребенная почва-суглинок темно-серый карбонатный пластичный, до мягкопластичного	0,0184	25/22	0,044/0,024	0,051	11/10
2е - суглинок лессовидный светло-желтый, мягкопластичной консистенции	0,0192	25/22	0,03/0,013	0,062	10/10
3а - суглинок красно-бурый с включениями карбонатов и гипса, твердой и полутвердой консистенции	0,0190	25/23	0,052/0,026	0,075	24/17
3б - глина красно-бурая с включениями карбонатов и гипса, твердой и полутвердой консистенции	0,02	21/16	0,075/0,043	0,125	22/18

(\*) - значение показателя для пород в водоненасыщенном / водонасыщенном состоянии.

бурые -  $3,65 \cdot 10^{-6}$  м/с; суглинки красно-бурые -  $7,25 \cdot 10^{-7}$  м/с; глины красно-бурые -  $5,5 \cdot 10^{-7}$  м/с.

Статические и динамические нагрузки учитываются от строительных конструкций галерей ленточных конвейеров № 5П и 6П, автосамосвалов БелАЗ-7547, тяговых агрегатов ОПЭ-1АМ и думпкаров ВС-105 [7].

Для ленточных конвейеров при шаге роликоопор 1 м удельные нагрузки на грунт составят: для холостого хода  $P_{\text{конв1}} = 0,057$  МПа; для нагруженного конвейера при производительности 1600 т/ч и скорости ленты 1,6 м/с  $P_{\text{конв2}} = 0,193$  МПа.

Расчетные нагрузки от БелАЗ-7547  $P_a = 0,56$  МПа. Расчетные нагрузки на рельсовый путь от тягового агрегата ОПЭ-1АМ на насыпь  $P_{\text{т.а.}} = 0,844$  МПа, от думпкара 2ВС-105  $P_{\text{д1}} = 0,148$  МПа (холостой) и  $P_{\text{д2}} = 0,448$  МПа (груженный).

Для оценки сейсмического воздействия на насыпь ЦПТ в программе Phase2 возможно задавать максимальные значения ускорений акселерограмм в диапазоне 0,05–0,8 (в долях ускорения

свободного падения  $g$ ), что соответствует землетрясению с магнитудой 6–10 баллов.

**Результаты расчетов устойчивости насыпного массива ЦПТ.** Предварительный анализ устойчивости насыпного массива по всей длине трассы ЦПТ [8] позволил выявить участки наиболее подверженные деформационным процессам с учетом прочностных характеристик насыпного массива и внешних нагрузок. Беря во внимание важность устойчивого функционирования участка ЦПТ при максимальном воздействии гидрогеологических, климатических и техногенных факторов, целесообразно оценить устойчивость наиболее оползнеопасных участков с учетом максимальных нагрузок от сооружения автодороги и железнодорожных путей, а также статических и динамических нагрузок от автосамосвалов БелАЗ-7547, тяговых агрегатов ОПЭ-1АМ и думпкаров ВС-105, сейсмических воздействий от массовых взрывов на карьере.

Численное моделирование устойчивости насыпи под конвейеры ЦПТ по профилям позволило выявить наиболее уязвимые участки, под-

## ГОРНОРУДНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

верженные деформациям и оползневым процессам. На основании полученных результатов были предложены мероприятия по укреплению насыпного массива, в частности для профилей I-I, II-II, III-III, IV-IV. Для остальных участков ЦПТ мероприятия по укреплению насыпи не требуются, поскольку они находятся в устойчивом состоянии ( $KЗУ > 2,0$ ).

Для оценки сейсмического воздействия на выбранные участки ЦПТ в программе Phase2 выполнено численное моделирование сейсмического воздействия на откос с произвольно выбранным углом  $\alpha = 35^\circ$ , что соответствует углу естественного откоса при строительстве насыпи ЦПТ (рис. 2а). Откос является однородным с усредненными значениями физико-механических характеристик для насыпного массива: модуль деформации  $E_d = 24$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,35$ , плотность  $\gamma = 0,017$  МН/м<sup>3</sup>, предел прочности на растяжение -  $R_p = 0,05$  МПа, сцепление  $C = 0,038$  МПа, угол внутреннего трения  $\varphi = 16^\circ$ . Сейсмические коэффициенты для горизонтального  $s_{гор}$  и вертикального  $s_{верт}$  направления в плоской модели заданы в диапазоне от 0,1 до 0,5.

Без влияния внешних нагрузок откос насыпи с учетом прочностных характеристик массива находится в устойчивом состоянии

( $KЗУ = 2,22$ ). Введение в расчет сейсмических коэффициентов  $KЗУ$  существенно изменяется: при  $s_{верт} = 0,1-0,5$  и  $s_{гор} = 0,1$ ,  $KЗУ = 1,47-1,23$ ; при  $s_{верт} = 0,1-0,5$  и  $s_{гор} = 0,5$ ,  $KЗУ = 0,49-0,77$ . Положительным моментом является то, что все кривые, представленные на рис. 3, пересекаются в области значений  $KЗУ = 1,0 \pm 0,1$ , близкой к моменту обрушения массива. Очевидно, что для обеспечения инженерной устойчивости откоса  $s_{верт} \leq 0,2$  и  $s_{гор} = \leq 0,2$ .

Анализ устойчивости насыпного массива ЦПТ с учетом физико-механических и гидрогеологических характеристик детально рассмотрен в работах [6; 9]. Рассмотрим далее устойчивость по поперечным профилям I, III, III и IV, наиболее подверженным оползневым процессам с учетом внешних нагрузок и сейсмических воздействий.

*Профиль I-I.* На данном участке насыпи, расположенном частично на земной поверхности, на левостороннем откосе имеются трещины отрыва в результате оползневых явлений. Участок I-I является устойчивым ( $KЗУ = 1,63$ ), однако в результате фильтрационных процессов в массиве или сейсмических воздействий могут возникать деформационные процессы в теле насыпи, состоящей из суглинков (рис. 4а). В обводненном массиве  $KЗУ = 1,02$ , при динамических на-

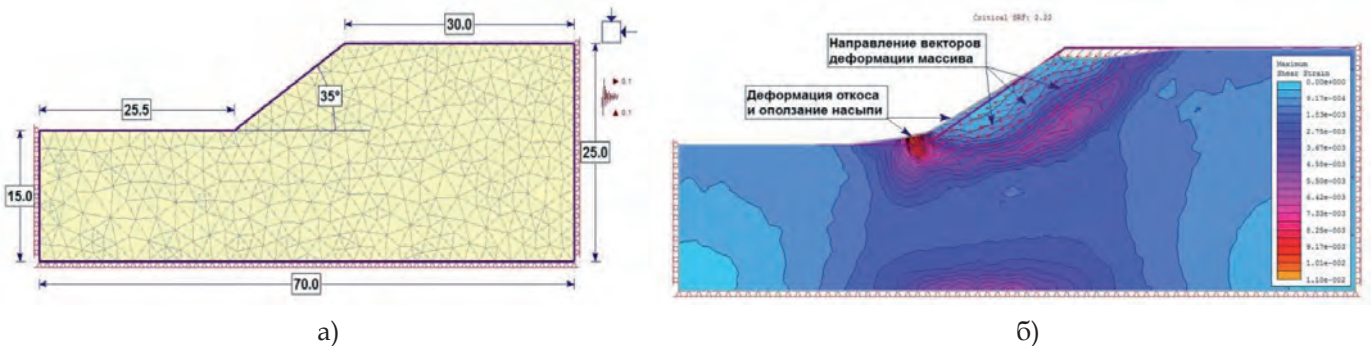


Рис. 2. Модель откоса насыпного массива ЦПТ без внешних нагрузок (а) и расчет его устойчивости (б)

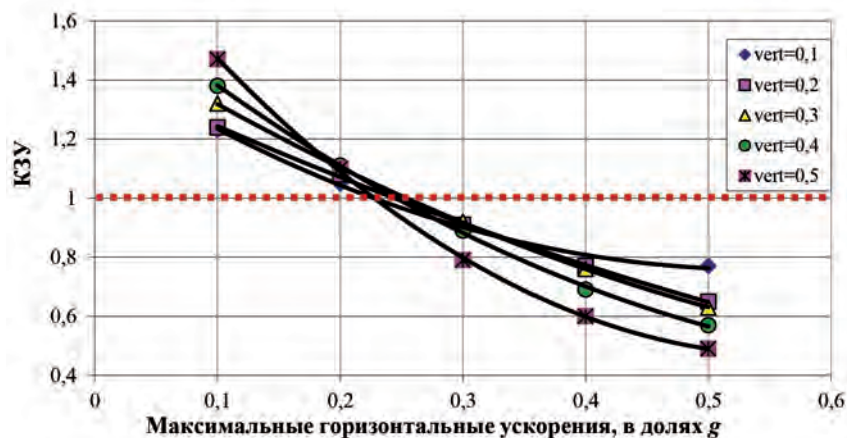


Рис. 3. Результаты моделирования сейсмического воздействия на устойчивость откоса насыпного массива

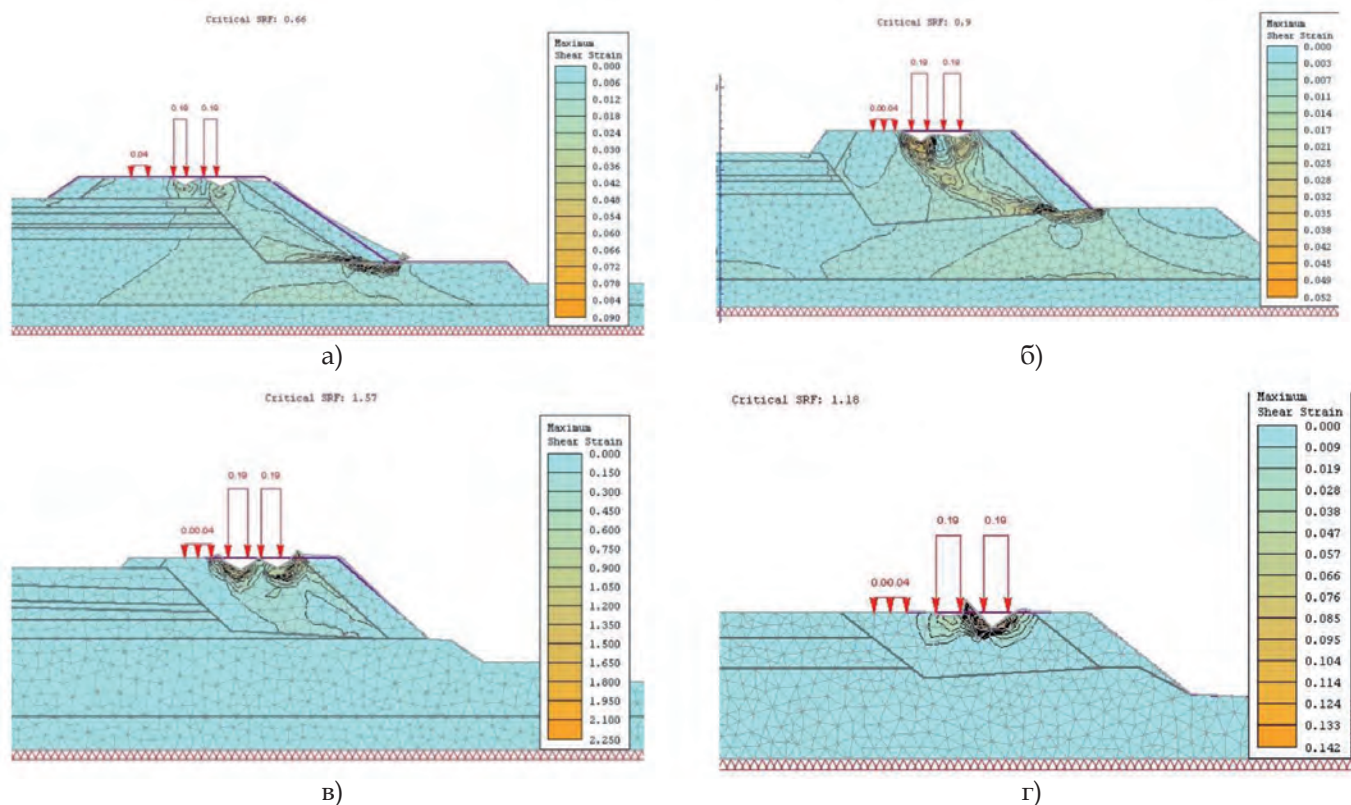


Рис. 4. Устойчивость насыпи по профилям при динамических нагрузках от конвейеров и автотранспорта с учетом сейсмических воздействий:

- а) – профиль I-I (КЗУ = 0,66); б) – профиль II-II (КЗУ = 0,90);
- в) – профиль III-III (КЗУ = 1,57); г) – профиль IV-IV (КЗУ = 1,18)

грузках от конвейеров и автотранспорта и с учетом сейсмических воздействий  $KЗУ = 0,92$ .

*Профиль II-II.* Насыпной массив на данном участке устойчив ( $KЗУ = 2,0$ ). Пригрузкой из скальных пород предохраняет поверхность откоса от деформаций (рис. 4б). Однако, как и для профиля I-I, смещения затрагивают тело насыпи и при условии снижения прочностных свойств пород возможно смещение пригрузки вместе с частью насыпного массива. При заданных геометрических параметрах обводненном массиве  $KЗУ = 1,62$ , при динамических нагрузках от конвейеров и автотранспорта и с учетом сейсмических воздействий  $KЗУ = 0,90$ .

*Профиль III-III.* На данном участке насыпи скальные породы, отсыпанные для закрепления поверхности откоса, подвергаются оползанию (рис. 4в).  $KЗУ = 10,7$ , в обводненном массиве  $KЗУ = 6,93$ , а с учетом динамических нагрузок от конвейеров и автотранспорта и сейсмических воздействий  $KЗУ = 1,57$ .

*Профиль IV-IV.* Насыпь ЦПТ не испытывает существенных деформаций и  $KЗУ = 4,22$  (рис. 4г). В обводненном массиве  $KЗУ = 2,56$ , с учетом динамических нагрузок и сейсмических воздействий  $KЗУ = 1,18$ .

На основании результатов численного моделирования геомеханической устойчивости ис-

следуемого объекта разработаны и предложены мероприятия по укреплению насыпного массива. Мероприятия по наиболее оползнеопасным профилям предполагают сооружение разнообразных по форме упорных призм из скальных и вскрышных пород на левостороннем откосе насыпи ЦПТ. Рекомендуемые углы откосов  $\alpha = 30-35^\circ$ .

Результаты численного моделирования устойчивости насыпи ЦПТ по профилям с учетом статических и динамических нагрузок от конвейеров и автосамосвалов, обводненности насыпного массива, а также сейсмических воздействий от массовых взрывов сведены в табл. 2.

При расчете КЗУ было установлено, что максимально негативное влияние имеет сейсмика при массовых взрывах.

Особенно разрушающее действие она приобретает в комплексе с динамическими нагрузками, что доказывает необходимость минимизировать влияние нагрузок. Так, при моделировании процесса устойчивости без кардинальных мероприятий в комплексе с сейсмикой ни один расчет КЗУ не дал более 2 ед. В расчетах было принято влияние сейсмичности до 8 баллов, что соответствует ближнему рубежу до очага взрыва. Учитывая дальность расположения добычных уступов и характер расположения вскрыш-

Таблица 2

## Результаты расчетов КЗУ для насыпного массива ЦПТ

Состояние массива	Нагрузки	Профили участка ЦПТ															
		I-I		II-II		III-III		IV-IV		V-V		VI-VI		VII-VII		VIII-VIII	
		*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
Необводненный массив	Без внешних нагрузок	1,63	5,54	2,00	3,32	10,70	-	4,22	-	3,01	6,15	1,85	3,71	19,59	-	7,12	-
	Статические нагрузки	1,59	-	1,90	-	5,73	-	4,22	-	2,85	5,51	-	-	-	-	-	-
	Динамические нагрузки	1,49	5,04	1,63	3,14	2,14	-	1,95	-	2,82	5,23	-	-	3,57	-	6,89	-
	Статические нагрузки + сейсмика	1,13	-	1,37	-	5,13	-	3,05	-	1,51	4,37	-	-	-	-	-	-
Обводненный массив	Динамические нагрузки + сейсмика	1,06	3,05	1,20	1,64	2,06	-	1,94	5,51	1,49	4,13	-	4,59	3,24	-	4,72	-
	Без внешних нагрузок	1,02	5,21	1,62	3,26	6,93	-	2,56	-	2,06	5,67	1,19	-	3,09	8,20	6,02	-
	Статические нагрузки	0,99	-	1,46	-	3,16	-	2,17	-	2,03	4,16	-	-	-	-	-	-
	Динамические нагрузки	0,92	4,91	1,23	3,12	1,25	2,35	1,18	-	2,01	4,13	-	-	2,77	-	5,94	8,48
Необводненный массив	Статические нагрузки + сейсмика	0,71	-	1,03	-	3,59	-	1,91	-	1,04	3,32	-	2,48	-	-	-	-
	Динамические нагрузки + сейсмика	0,66	3,02	0,90	1,62	1,57	1,75	1,18	3,15	1,03	3,15	-	2,31	2,67	4,11	3,11	3,15

Примечания: \*без укрепления насыпи; \*\*с учетом мероприятий по укреплению насыпи ЦПТ

ных уступов, обработка которых производится с ведением взрывных работ, КЗУ был рассчитан с более низкой сейсмичностью.

Анализ влияния сейсмических нагрузок показал, что в зависимости от конструкции изучаемого разреза (литология, гидрогеология и форма насыпи) КЗУ с каждым баллом сейсмичности изменяется на 0,13–0,21 ед. Поэтому при выборе противооползневых мероприятий в расчетах необходимо учитывать сейсмичность как вид нагрузки. Максимальные значения сейсмических коэффициентов для участка ЦПТ не должны превышать 0,2, что соответствует магнитуде в 8 баллов.

**Выводы.** Устойчивость насыпного массива участка ЦПТ обусловлена комплексным воздействием следующих факторов: геометрические параметры насыпного массива, физико-механические свойства пород и их обводненность, динамические нагрузки от горнотранспортного оборудования, сейсмическое воздействие взрывов и т. д. Сейсмическое воздействие при проведении взрывных работ на карьере является одним из главных факторов снижения КЗУ насыпного массива.

На основании результатов численного моделирования геомеханической устойчивости исследуемого объекта разработаны и предложены мероприятия по укреплению насыпного массива посредством сооружения разнообразных по форме упорных призм из скальных и вскрышных пород на левостороннем откосе насыпи ЦПТ.

Для обеспечения безопасного и долговременного функционирования участка ЦПТ максимальные значения сейсмических коэффициентов не должны превышать 0,2, что соответствует магнитуде в 8 баллов.

#### Библиографический список / References

1. Liangzhi You, Radoslaw L. Michalowski (1999). *Displacement charts for slopes subjected to seismic loads*. Computers and Geotechnics. Vol. 25, Issue 1, July 1999, pp. 45–55. ([http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0266-352X\(99\)00016-6](http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0266-352X(99)00016-6))
2. Masahiro Shinoda (2015). *Seismic stability and displacement analyses of earth slopes using non-circular slip surface*. The Japanese Geotechnical Society. *Soils and Foundations* 2015; 55(2): 227–241. (<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.sandf.2015.02.001>)
3. Johari A., Khodaparast A. R. (2015). *Analytical stochastic analysis of seismic stability of infinite slope*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 79, part A, December 2015, pp. 17–21. (<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.soildyn.2015.08.012>)
4. Lian-Heng Zhao, Xiao Cheng, Yingbin Zhang, Liang Li, De-jian Li. *Stability analysis of seismic*

*slopes with cracks*. Computers and Geotechnics. Vol. 77, July 2016, pp. 77–90. (<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.compgeo.2016.04.007>)

5. Lu L., Wang Z. J., Song M. L., Arai K. (2015). *Stability analysis of slopes with ground water during earthquakes*. Engineering Geology. Vol. 193, 2 July 2015, pp. 288–296. (<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enggeo.2015.05.001>)

6. Четверик М. С. Обоснование устойчивости насыпи под конвейерную галерею комплекса циклично-поточной технологии на Первомайском карьере / М. С. Четверик, Е. В. Бабий // Геотехническая механика. Межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 123. – С. 142–152.

Chetverik M. S., Babiy Ye. V. *Obosnovanie ustoichivosti nasypi pod konveyernuyu galereyu kompleksa cyklichno-potochnoi tekhnologii na Pervomaiskom karriere*. Geotekhnicheskaya mekhanika. Mezhdovedstvennyi sbornik nauchnykh trudov. Dnepropetrovsk, 2015. Issue. 123, pp. 142–152.

7. Открытые горные работы. Справочник / К. Н. Трубецкой, М. Г. Потапов, К. Е. Винницкий, Н. Н. Мельников [и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.

Trubeckoi K. N., Potapov M. G., Vinnitskiy K. Ye., Melnikov N. N. *Otkrytyye gornyye raboty*. Moscow, Gornoye byuro, 1994. 590 p.

8. Ракишев Б. Р. Обеспечение геомеханической устойчивости насыпей для конвейеров при циклично-поточной технологии / Б. Р. Ракишев, А. С. Ковров, С. К. Молдабаев, Е. В. Бабий // Вестник НАН Республики Казахстан. – 2016. – Т. 2, № 360. – С. 103–110.

Rakishev B. R., Kovrov A. S., Moldabayev S. K., Babiy Ye. V. *Obespecheniye geomekhanicheskoi ustoichivosti nasypei dlya konveyerov pri ciklichno-potochnoi tekhnologii*. Vestnik NAN Respubliki Kazakhstan. 2016, vol. 2, no. 360, pp. 103–110.

**Purpose.** Comprehensive assessment of the slope stability of the filled-up rock massif embankment for cyclic and progressive technology (CPT) conveyors at the Pervomaiskiy quarry of PJSC «Severnyi GOK» to justify effective anti-landslide measures.

**Methodology.** To study the geomechanical stability of filled-up rock massif and slopes of the CPT line the following methods are used: hydrogeological analysis, visual observation of the object, numerical modeling of the embankment slope stability in the finite element analysis software Phase2.

**Finding.** The calculations of the embankment slope stability for the open belt conveyor gallery, the base of the embankment body and pit wall slopes shows that the bulk massif is conditional on the complex influence of geological, hydrogeological and technogenic factors. Geometrical parameters of CPT facilities, physical-mechanical properties of the filled-up rock embankments



and seismic impacts play a crucial role in ensuring the stable operation of the CPT line and its sustainability. The numerical modeling of different options to strengthen the slopes of the filled-up massif is carried out, and the most effective techniques for these purposes are used as different by geometry retaining mounds and resistant prisms of bulky rocks.

**Originality.** The safety factors (SF) for the slopes of the embankment on cross-section profiles considering physical and mechanical properties of the complex structured filled-up massif, its watering, loads of mining equipment and seismic impacts are calculated. The areas that most exposed to rock mass geomechanical deformations and displacements are identified.

**Practical value.** Based on the simulation results, the landslide measures to ensure the stable operation of the CPT complex and stability of the embankment slopes and the quarry pit walls are developed.

**Key words:** Cyclic and progressive technology (CPT), open pit slope stability, stability of filled-up rock massif, landslide, rock massif watering, seismic impact, safety factor, Mohr-Coulomb failure criterion.

### Благодарность

При выполнении работы были использованы представленные ООО «Южгипроруда» геологические, гидрогеологические и технологические данные. Маркшейдерской службой Первомайского карьера были представлены планы горных работ и строительства.

Автор работы выражает искреннюю благодарность заведующему отделом геомеханических основ технологии открытой разработки Института геотехнической механики им. Н. С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины) профессору М. С. Четверику и старшему научному сотруднику отдела геомеханических основ технологии открытой разработки ИГТМ НАН Украины доценту Е. В. Бабий за научное руководство при выполнении данных исследований.

**Поступила 07.06.2016**



УДК 622.647.2

С. О. Попов /д. т. н./,  
С. И. Малиновская /к. т. н./  
Г. К. Данилина /к. т. н./,  
Ю. А. Малиновский /к. т. н./  
С.Н. Козырев

Производство

Криворожский национальный университет

Криворожский колледж Национального  
авиационного университета  
ПАО НИПИ «Механобрчермет»

## Поперечная механика ходовой части конвейерного поезда при его движении

S. A. Popov /Dr. Sci. (Tech.),  
S. I. Malinowska /Cand. Sci. (Tech.)/  
G. K. Danilin /Cand. Sci. (Tech.)/  
Yu. A. Malinovskii /Cand. Sci. (Tech.)/  
S. N. Kozыrev

Krivis Rig national University

Krivis Rih College National aviation University

ПАО НИПИ «Механобрчермет»

## Transverse mechanics of the chassis kovarnogo trains when it moves

**Цель работы.** Создание алгоритма определения боковых реакций и усилий в сцепках тележек конвейерного поезда для обоснования оптимальных сопротивлений движения и рационального выбора мощности всех приводных станций транспортной системы.

**Методика.** Для установления расчетных зависимостей между усилием толкания поезда, боковых реакций и усилий в сцепках применена расчетная модель конвейерного поезда в виде  $n$ -опорного стержня с  $(n-1)$  промежуточными шарнирами, который находится в равновесии под действием силы толкания и сил сопротивления движению тележек поезда. Из условий равновесия тележек, начиная с первой, определены боковые усилия изделия в сцепках тележек. Кроме того, по известным зависимостям, с учетом вычисленных боковых усилий, определены сопротивления движения каждой вагонетки, находящейся в режиме тяги или толкания для транспортной системы со стабилизирующей системы и без нее.