

The solution of differential equalization, describing the forced transversal vibrations of ropes of load-transporting devices bearing the mobile distributed and concentrated inertial load has been found. Formulas have been got for determination of amplitudes of the forced transversal vibrations of ropes depending on the velocity of movement and correlation between own and forced frequency of vibrations. The forms of the forced and forced “accompany-

ing” vibrations have been built at the different velocities of movement of ropes and different values of frequency of forcing influence.

Keywords: *forced vibrations, mobile inertia loading, concentrated load, two-wave character of processes, amplitude of vibrations, resonance area*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук А.Н. Шашенком. Дата надходження рукопису 02.02.11

УДК [622.271.33:624.131.537].001.57

**А.Н. Шашенко, д-р. техн. наук, проф.,
А.С. Ковров**

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“ г. Днепропетровск, Украина, e-mail: kovrov@rambler.ru

ВЛИЯНИЕ СЛОЖНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ОБВОДНЕНИЯ МАССИВА ПОРОД НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ КАРЬЕРОВ

**A.N. Shashenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
A.S. Kovrov**

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: kovrov@rambler.ru

IMPACT OF COMPLEX GEOLOGICAL STRUCTURE AND ROCK MASSIF WATERING ON OPEN-CAST SLOPE STABILITY

Выполнено моделирование устойчивости борта карьера №7 „Север“ Вольногорского горно-металлургического комбината с учетом сложной геологической структуры и обводнения массива вмещающих пород. Определены коэффициенты запаса устойчивости борта карьера в зависимости от физико-механических характеристик пород. Выведена общая зависимость устойчивости прибортового массива от влажности вмещающих пород.

Ключевые слова: *устойчивость откосов карьеров, обводнение массива пород, коэффициент снижения прочности на сдвиг, коэффициент запаса устойчивости, критерий прочности Кулона-Мора*

Актуальность работы. Управление природными и техногенными массивами при открытой разработке месторождений полезных ископаемых заключается в совокупности мероприятий по поддержанию уступов, бортов карьеров и отвалов в устойчивом состоянии путем изменения в процессе разработки геометрических параметров откосов, обеспечивающих экономичное и безопасное ведение горных работ [1]. При этом учитываются изменяющиеся в пространстве физико-механические свойства и структурные особенности массива пород, гидрогеологические и техногенные факторы.

Критерием оценки состояния как природных, так и техногенных массивов, в общем случае, является коэффициент запаса устойчивости (КЗУ). В наиболее общем виде, применительно к оценке устойчивости открытых горных выработок, величину КЗУ можно представить как отношение интегралов удерживающих и сдвигающих сил по предполагаемой линии (поверхности) скольжения.

Обоснование уменьшения коэффициента запаса устойчивости бортов карьера только на 5% , в конечном итоге, может позволить уменьшить объем извлекаемой горной массы и площадь карьера от 1,5 до 20 % в зависимости от горно-геологических условий разработки

(при сохранении объемов извлекаемого полезного ископаемого) [2]. Также известно, что на карьерах с глубиной до 300 м увеличение результирующего угла наклона борта на 3–4° позволяет сократить объем вскрыши до 10–11 млн м³ на 1 км фронта работ, что повышает общую эффективность открытой системы разработки [3].

Особую важность проблема устойчивости откосов и бортов карьеров приобретает при отработке массивов мягких вскрышных пород. Так, например, разработка россыпных месторождений титано-циркониевых руд, являющихся ценным стратегическим сырьем Украины, осложняется комплексом геологических, гидрогеологических и техногенных факторов, влияющих на режим ведения горных работ. Наиболее мощное россыпное комплексное рutil-циркон-ильменитовое Малышевское месторождение разрабатывает Вольногорский горно-металлургический комбинат (г. Вольногорск, Украина). Технологической особенностью данного месторождения является сложный и изменчивый характер горно-геологических условий разработки, а с учетом гидрогеологических условий возникает опасность образования сдвигов пород вскрыши.

Целью данной работы является оценка устойчивости откосов борта карьера №7 „Север“ для условий Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения в программе конечно-элементного анализа *Phase 2*. Для ее выполнения поставлены следующие задачи:

1. Определить коэффициент запаса устойчивости борта карьера с учетом сложной структуры массива пород по критерию Кулона-Мора.

2. Оценить влияние гидрогеологических показателей на устойчивость откосов.

Вскрышные породы месторождения представлены пестрыми сарматскими зеленовато-серыми глинами и четвертичными красно-бурыми глинами, красно-бурыми и лессовидными суглинками. Характеристика вскрышных пород карьера № 7 „Север“ месторождения представлена в табл. 1.

Значения пределов прочности на одноосное сжатие и растяжение определены для каждой литологической разности по формулам

$$\sigma_p = 2C \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

$$\sigma_{сж} = 2C \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right),$$

где C – сцепление пород в массиве, МПа; φ – угол внутреннего трения, град [3].

Глины месторождения являются водоупором и повышают влажность вышележащих красно-бурых суглинков, что способствует возникновению зон ослабления с последующим развитием деформаций уступов и бортов карьера.

Рудный пласт имеет мощность 2,0...24,0 м, сложен мелкими и тонкозернистыми песками и в водонасыщенном состоянии может обладать плавунными свойствами [5].

Средняя мощность вскрышных пород составляет 45 м. Передовой вскрышной уступ, мощностью 22 м, обрабатывается вскрышным комплексом ТК-2 в составе роторного экскаватора КУ-800, двух забойных, магистрального и отвального конвейеров, перегружателя PVZ-6600, отвалообразователя ZP-6600 с отсыпкой вскрыши в выработанное пространство. Ниже расположены три вскрышных уступа, мощностью по 8 м, которые обрабатываются экскаваторами ЭКГ-8(10)И по транспортной системе с погрузкой в автосамосвалы БелАЗ-7548 и вывозкой породы во внутренний отвал [4].

Таблица 1

Физико-механические характеристики вскрышных пород [4]

Наименование вскрышных пород	Мощность слоя (средняя по месторождению), h_i , м	Плотность γ , кг/м ³	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , град	Предел прочности на сжатие / растяжение $\sigma_{сж} / \sigma_p$, МПа
Суглинки буровато-серые	0-5 (3)	1,680	0,0110	14	<u>0,028</u> 0,017
Суглинки палевые, местами бурые	0-12 (8)	1,870	0,0090	19	<u>0,025</u> 0,013
Суглинки желто-бурые	0-14 (8)	1,955	0,0175	21	<u>0,051</u> 0,024
Суглинки красно-бурые	0-7 (6)	1,890	0,0290	14	<u>0,074</u> 0,045
Глины красно-бурые	0-20 (10)	1,895	0,0730	10,5	<u>0,176</u> 0,121
Глины серовато-бурые	0-10 (5)	1,790	0,0590	15	<u>0,154</u> 0,091
Глины зелено-серые	0-5 (5)	2,200	0,0975	31	<u>0,345</u> 0,110
Пески: рудные	0-78	1,580	0,0150	32	<u>0,054</u>
нерудные	-	1,720	0,0050	30	0,017

Для рассматриваемого участка месторождения определены следующие величины устойчивых углов откосов рабочих уступов: откоса рабочего уступа в обводнённом состоянии – не более 25°, после выполнения дренажных работ – не более 37°; откоса верхнего вскрышного уступа – не более 20°, нижнего вскрышного уступа – не более 31°; погашение нерабочих бортов в торцах карьера – не более 24°. Однако, для физико-механических свойств пород имеет место значительный разброс значений даже в пределах одного карьера. Поэтому, достоверность исходных данных является ключевым фактором при определении устойчивого состояния откосов и бортов карьера. Учитывая исходные технологические данные, оценка устойчивости откосов с использованием методов численного моделирования представляет практический интерес для оптимизации технологии разработки.

Для оценки устойчивых параметров откосов на карьере №7 „Север“ в программе конечно-элементного анализа *Phase2* были заданы геометрические параметры борта (рис. 1). Используя рекомендации, принимаем максимальные углы откосов 37° для необводненного массива.

Разбиваем область геометрической модели откоса на конечные элементы и задаем физико-механические характеристики сложноструктурного массива пород, используя данные табл. 1. Принимаем следующие параметры эластичности пород: модуль Юнга – 20 МПа; коэффициент Пуассона – 0,35 для суглинков и 0,43 – для четвертичных глин. В качестве критерия прочности был выбран критерий Кулона-Мора, наиболее часто используемый для оценки прочности грунтов и мягких пород. Результаты моделирования устойчивости откосов необводненного сложноструктурного массива представлены на рис. 2.

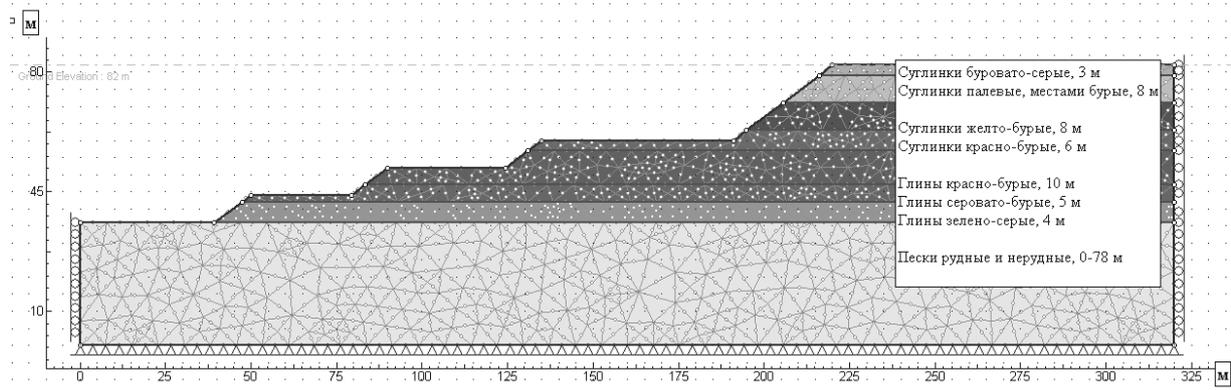


Рис. 1. Профиль борта карьера №7 „Север“

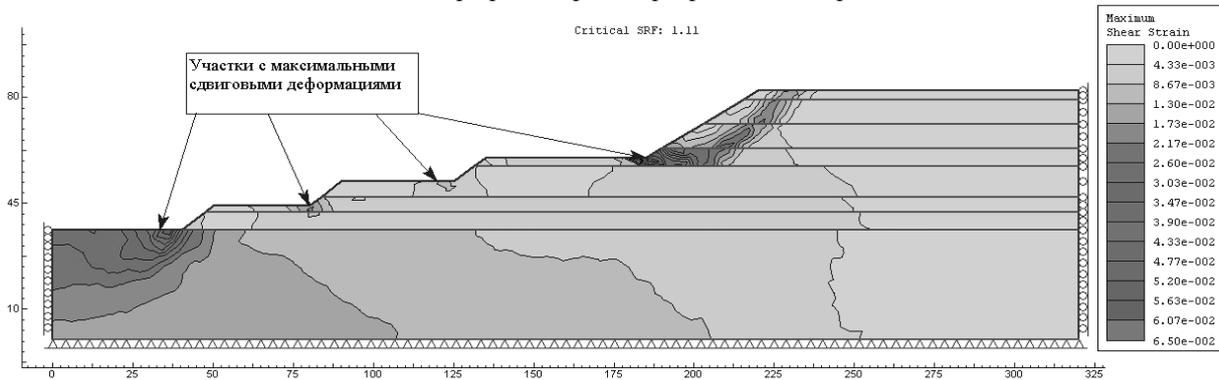


Рис. 2. Картина максимальных сдвиговых деформаций откосов (КЗУ=1,11)

В Phase2 анализ устойчивости откосов методом конечных элементов осуществляется поэтапным снижением предела прочности на сдвиг (*Shear Strength Reduction Method*), что позволяет через серию итерационных вычислений определить критический коэффициент снижения прочности (*Strength Reduction Factor, SRF*). По своему смыслу коэффициент снижения прочности эквивалентен коэффициенту запаса устойчивости откоса.

Как видно из рис. 2, откос верхнего вскрышного уступа находится в относительно устойчивом состоянии (КЗУ=1,11), однако полученного значения КЗУ может оказаться недостаточно для обеспечения устойчивости откоса, если учитывать в условиях моделирования влияние таких факторов, как гидрогеологические характеристики месторождения или внешние нагрузки оборудования на уступах. Совместное действие этих факторов вместе с геологическими особенностями массива может существенно снижать сопротивление пород сдвигу. Поэтому, для бортов, сложенных мягкими породами, рекомендуемые значения КЗУ варьируют в диапазоне 1,1...1,3.

Верхние четыре слоя четвертичных суглинков при заданных условиях моделирования наиболее подвержены сдвиговым деформациям. Нижележащие слои глин, как более плотные, в меньшей степени подвержены геомеханическим нарушениям. Наибольшие деформации наблюдаются на уровне нижней бровки верхнего вскрышного уступа в слое красно-бурых суглинков ($\epsilon_{max}=6,2 \cdot 10^{-2}$), а также на расстоянии 4,3 м от подошвы

самого нижнего уступа ($\epsilon_{max}=5,6 \cdot 10^{-2}$), на границе зелено-серых глин с рудными песками. Аналогичным участкам прибортового массива соответствуют зоны максимальных горизонтальных и вертикальных смещений пород (рис. 3). В верхнем вскрышном уступе максимальные смещения ($d_{max}=0,36$ м) возникают в верхних слоях палевых и желто-бурых суглинков. В самом нижнем добычном уступе участок максимальных смещений ($d_{max}=0,3$ м) находится на уровне нижней бровки.

Поскольку гидрогеологические условия месторождения являются наиболее значимым фактором устойчивости откосов, задачей второго этапа моделирования является определение КЗУ бортов с учетом гидрогеологических показателей массива.

Гидрогеологические условия месторождения характеризуются наличием двух водоносных горизонтов. Верхний приурочен к лессовидным суглинкам, имеет мощность 5...13 м, характеризуется низкими значениями коэффициента фильтрации (до 0,2...0,3 м³/сут), малой водообильностью. Нижний водоносный горизонт приурочен к тонкозернистым пескам полтавского горизонта. Абсолютные отметки кровли и подошвы рудных песков полтавской серии в пределах добычных участков находятся, в основном, ниже статического уровня водоносного горизонта, почти полностью обводнены и отработка их представляет большие трудности, что предопределяет возможность применения только гидромеханического способа выемки рудных песков.

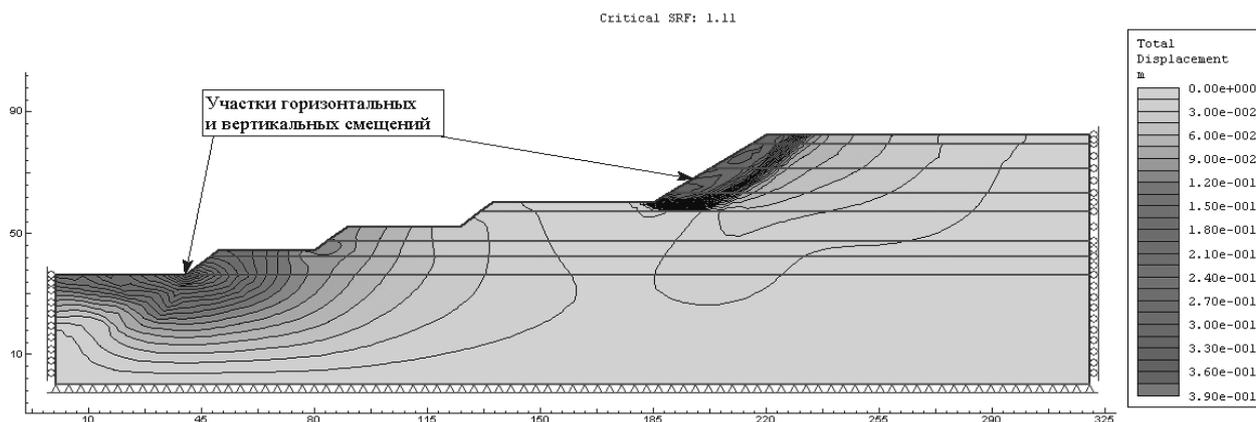


Рис. 3. Графическая картина смещений в необходимом массиве пород (K3V=1,11)

Используя результаты зависимостей физико-механических характеристик суглинков от степени их влажности [6], можно определить коэффициент запаса устойчивости откосов с учетом обводненности горного массива. Так зависимость угла внутреннего трения от влажности суглинков описывается уравнением

$$\varphi = -0,06W_0^2 + 0,12W_0 + 39,86,$$

где φ – угол внутреннего трения, град.; W_0 – влажность, %.

Зависимость сцепления пород в массиве от влажности описывается уравнением

$$C = 0,07W_0^2 - 3,87W_0 + 58,78,$$

где C – сцепление, кПа.

Расчетные физико-механические характеристики суглинков в обводненном массиве приведены в табл. 2.

Согласно вышеприведенным зависимостям рассчитываем физико-механические свойства суглинков по слоям (табл. 3).

Таблица 2

Физико-механические характеристики суглинков в обводненном массиве

Влажность W_0 , %	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , град	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочности на растяжение σ_p , МПа	Коэффициент хрупкости, $\psi = \sigma_p / \sigma_{сж}$
10	0,027	35,06	0,104	0,028	0,27
12	0,022	32,66	0,082	0,025	0,30
14	0,018	29,78	0,064	0,021	0,34
16	0,015	26,42	0,048	0,018	0,38
18	0,012	22,58	0,035	0,016	0,45
20	0,0094	18,26	0,026	0,014	0,52

Таблица 3

Расчетные значения прочностных характеристик суглинков по литологическим разностям

Наименование вскрышных пород	Влажность W_0 , %	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , град	Предел прочности на сжатие / растяжение $\sigma_{сж} / \sigma_p$, МПа
Суглинки буровато-серые	21,0	0,008	15,9	<u>0,021</u> 0,012
Суглинки палевые, местами бурые	18,5	0,011	21,0	<u>0,032</u> 0,015
Суглинки желто-бурые	17,7	0,012	23,2	<u>0,036</u> 0,016
Суглинки красно-бурые	21,5	0,008	15,0	<u>0,021</u> 0,012

Полученные значения принимаем в качестве исходных данных для моделирования устойчивости обводненного массива.

По результатам моделирования КЗУ для обводненного массива равен 0,9. На рис. 4 показаны максимальные смещения в обводненном массиве ($d_{max} = 0,3$ м), а также контуры призмы обрушения.

В нижнем добычном уступе картина смещений и деформаций практически не меняется, так как на

втором этапе моделирования изменялись только прочностные характеристики суглинков вследствие повышения влажности вскрышных пород.

На основании имеющихся и полученных закономерностей устойчивости обводненных откосов получена общая зависимость устойчивости прибортового массива от влажности вмещающих пород (суглинков), изображенная на рис. 5.

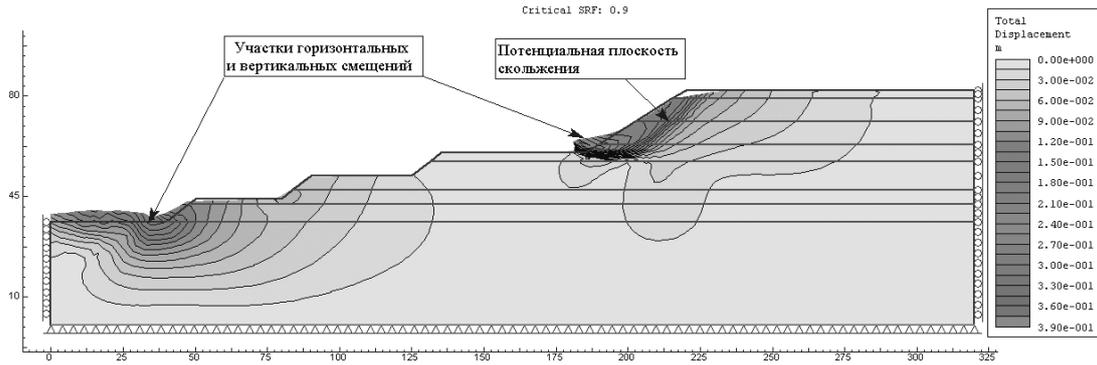


Рис. 4. Графическая картина смещений в обводненном массиве пород (K3U=0,9)

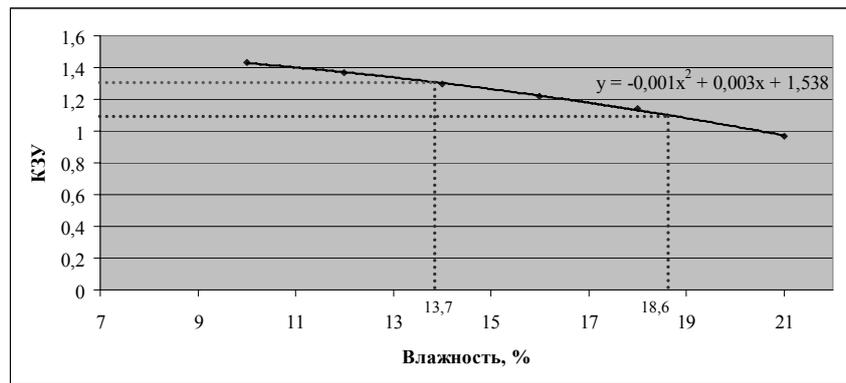


Рис. 5. Зависимость K3U от влажности вмещающих пород (суглинков)

Зависимость имеет следующий вид

$$K3U = -0,003W_0^2 + 0,035W_0 + 1,334,$$

где W_0 – влажность пород, %.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для обеспечения устойчивости откосов верхних вскрышных уступов рассматриваемого карьера, сложенных суглинками, влажность пород не должна превышать 14...18%. При этом обеспечивается K3U в диапазоне 1,1...1,3.

По данным табл. 1 и 3 рассчитаем средневзвешенное значение предела прочности на одноосное сжатие $\bar{\sigma}_{сж}$ по формуле

$$\bar{\sigma}_{сж} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{сж}^i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

где $\sigma_{сж}^i$ – предел прочности на одноосное сжатие отдельных литологических разностей, МПа; m_i – мощность слоя пород, м; $i=1...n$ – количество слоев.

Для верхнего слоя вскрышных пород мощностью 25 м, состоящего из суглинков, средневзвешенное значение $\bar{\sigma}_{сж}=0,029$ МПа. Это значение соответствует K3U=1,08 (рис. 6).

Для четвертичных глин корректировка прочностных характеристик, связанная с обводненностью массива, не выполнялась.

Выводы:

1. Для достоверной оценки устойчивости откосов и бортов карьеров, оперирование достоверными данными о геологической структуре месторождения, физико-механических свойствах массива пород и гидрогеологических условиях определяют точность инженерных расчетов. В работе определены коэффициенты запаса устойчивости для борта карьера №7 „Север“ Вольногорского горно-металлургического комбината с учетом сложной структуры массива пород и влияния гидрогеологических факторов.

2. Откос верхнего вскрышного уступа, сложенный четвертичными суглинками, находится в относительно устойчивом состоянии (K3U=1,11), однако полученного значения K3U может оказаться недостаточно. Для обеспечения долговременной устойчивости откосов необходимо учитывать влияние гидрогеологических характеристик и обводненность массива. Совместное действие всех этих факторов вместе с геологическими особенностями может существенно снижать сопротивление пород сдвигу. По результатам моделирования для обводненного массива K3U=0,9, что свидетельствует о необходимости проведения дренажных мероприятий.

3. На основании имеющихся и полученных закономерностей устойчивости откосов получена общая зависимость устойчивости прибортового массива от влажности вмещающих пород.

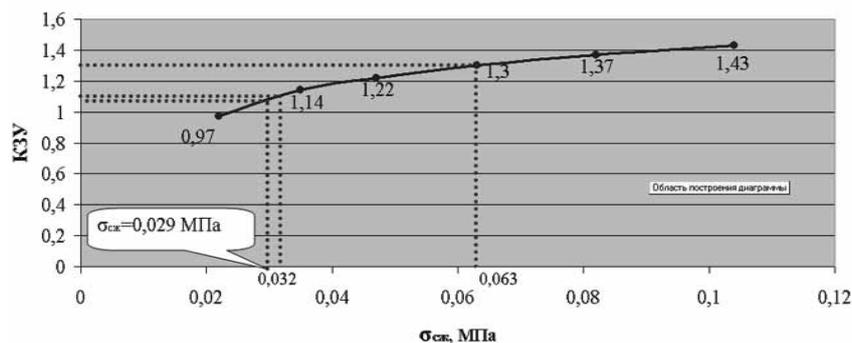


Рис. 6. Зависимость КЗУ от влажности вмещающих пород (суглинков)

Список литературы / References

1. Астафьев Ю.П. Управление состоянием массива горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых / Астафьев Ю.П., Попов Р.В., Николашин Ю. М. – Киев; Донецк: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 272 с.

Astafyev Yu.P. Rock massif state control in the environment of open-cast mine / Astafyev Yu.P., Popov R.V., Nikolashyn Yu.M. – Kiev; Donetsk: Vyshcha shkola. Golovnoe izdatelstvo, 1986. – 272 p.

2. Прогноз устойчивости и оптимизация параметров бортов глубоких карьеров / [Полищук С.З., Лашко В.Т., Кучерский Н.И. и др.]; под общ. ред. д.т.н. С.З. Полищука. – Днепропетровск: Изд-во „Полиграфист“, 2001. – 370 с.

Prognosis of stability and optimization of parameters of sides of deep open casts / [Polishchuk S.Z., Lashko V.T., Kucherskiy V.I. et al.]; edited by S.Z. Polishchuk. – Dnepropetrovsk: “Poligrafist”, 2001. – 370 p.

3. Шапарь А.Г. Механика горных пород и устойчивость бортов карьеров / Шапарь А.Г. – Киев: Вища школа, 1973. – 120 с.

Shapar A.G. Mechanics of rocks and open cast's sides stability / Shapar A.G. – Kiev: Vyshcha shkola, 1973. – 120 p.

4. Собко Б.Е. Усовершенствование технологии открытой разработки рассыпных титано-циркониевых руд: Монография / Собко Б.Е. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2008. – 167 с.

Sobko B.Ye. Improvement of open-cast technology of titanium-zirconium ore placers mining: Monograph / Sobko B.Ye. – Dnepropetrovsk: NGU, 2008. – 167 p.

5. Гамалинский А.И. Выбор и обоснование технологических схем вскрытия и разработки Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения в сложных горно-геологических условиях / А.И. Гамалинский, И.А. Гамалинский, В.В. Терещенко // Науковий вісник НГУ. – 2009. – №12. – С. 36–42.

Gamalinskiy A.I. Selection and substantiation of technological schemes of development of Motronovsko-

Annovskiy section of Malyshevskoye deposit in difficult mining and geological conditions / A.I. Gamalinskiy, I.A. Gamalinskiy, V.V. Tereshchenko // Naukovyi visnyk NGU. – 2009. – No.12. – P. 36–42.

6. География, геоэкология, геология: опыт научных исследований: Материалы VII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под ред. проф. Л.И. Зеленской. – Днепропетровск: ІМА-прес, 2010. – Вып. 7. – С. 72–74.

Geography, geoecology, geology: scientific research experience: Materials of VII International scientific conference, of students, postgraduate students and young scientists / edited by L.I. Zelenskoy. – Dnepropetrovsk: ІМА-pres, 2010. – Vol. 7. – P.72–74.

Виконано моделювання стійкості борта кар'єру №7 „Північ“ Вільногірського гірничо-металургійного комбінату з урахуванням складної геологічної структури та обводнення масиву гірських порід. Визначено коефіцієнти запасу стійкості борта кар'єру залежно від фізико-механічних характеристик порід. Виведено загальну залежність стійкості прибортового масиву від вологості порід.

Ключові слова: стійкість укосів кар'єрів, обводнення масиву порід, коефіцієнт зниження міцності на зсув, коефіцієнт запасу стійкості, критерій міцності Кулона-Мора

Modelling of the slope stability for the open-cast №7 “Sever” at the Vilnohirsk Mining and Metallurgical Plant subjected to complex geological structure and watering rock massif is carried out. The safety factors for slope stability depending on physical and mechanical characteristics of rocks have been defined. General dependence of slope stability on rock humidity is deduced.

Keywords: open-cast slope stability, watering rock massif, shear strength reduction factor, safety factor, Mohr-Coulomb failure criterion

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.О. Сдвижковою. Дата надходження рукопису 11.02.11