

Код МРНТИ 52.13.04

*Б.А. Орынбаев¹, С.Б. Алиев², С.С. Мырзахметов¹
¹Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),
²Институт проблем комплексного освоения недр
 им. академика Н.В. Мельникова РАН (г. Москва, Россия)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ В ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ численных методов и методов предельного равновесия для анализа устойчивости уступов и бортов карьеров. Для решения поставленных задач были определены коэффициенты запаса устойчивости для случайного набора параметров уступа (высоты уступа, угла откоса уступа) и физико-механических свойств пород (объемный вес, угол внутреннего трения, сцепления), слагающих откос в программном обеспечении K-MINE. Полученные результаты определения коэффициентов запаса устойчивости откоса методом конечных элементов показывают близкие значения с методами, регламентированными нормативно-правовыми актами Украины. Определен ряд недостатков методов предельного равновесия, базирующихся на предельной поверхности скольжения, определяемой по методике проф. Г.Л. Фисенко.

Ключевые слова: устойчивость борта карьера, метод конечных элементов, методы предельного равновесия, напряженно-деформированное состояние, коэффициент запаса устойчивости откосов.

ИЗОТРОПТЫ ОРТАДАҒЫ БЕТКЕЙЛЕРДІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ ӘДІСТЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Аннотация. Мақалада карьерлердің жиектері мен бүйірлерінің тұрақтылығын және шекті тепе-теңдік әдістерін талдаудың сандық әдістеріне салыстырмалы талдау жасалды. Қойылған міндеттерді шешу үшін K-MINE бағдарламалық қамтамасыз етуіндегі еңісті құрайтын тау жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттерін (көлемді салмақ, ішкі үйкеліс бұрышы, ілінісу) және жиек параметрлерінің кездейсоқ жиынтығы үшін тұрақтылық қорының коэффициенттерін анықтау сериясы жүргізілді. Соңғы элементтердің метомымен көлбеу тұрақтылық қорының коэффициенттерін анықтаудың нәтижелері Украинаның нормативтік құқықтық актілерімен реттелетін әдістермен жақын мәндерді көрсетеді. Проф. Г.Л. Фисенко әдістемесімен анықталған сырғанаудың шекті бетіне негізделген шекті тепе-теңдік әдістерінің бірқатар кемшіліктері анықталды.

Түйінді сөздер: карьер бортының тұрақтылығы, ақырлы элементтер әдісі, шекті тепе-теңдік әдістері, кернеулі деформацияланған күй, көлбеу тұрақтылық қорының коэффициенті.

Comparative analysis of methods for assessing slope stability in an isotropic environment

Abstract. The article provides a comparative analysis of quantitative methods for analyzing the stability of the edges and sides of quarries and methods of marginal equilibrium. To solve the tasks set, a series of determination of the physical and mechanical properties of the rocks that make up the slope in the K-MINE software (volumetric weight, internal friction angle, clutch) and stability reserve coefficients for a random set of edge parameters was carried out. The results of determining the coefficients of the slope stability fund with the method of the last elements show close values by methods regulated by the regulatory legal acts of Ukraine. Prof. a number of shortcomings of marginal equilibrium methods based on the marginal surface of the slip, determined by the methodology of G.L. Fisenko, are identified.

Key words: stability of the quarry side, finite element method, methods of limit equilibrium, stress-strain state, coefficient of slope stability margin.

Введение

Устойчивость бортов карьеров и отвалов имеет большое значение для обеспечения безопасных условий работы при проектировании и разработке полезных ископаемых открытым способом. Наиболее показательной единицей, показывающей соотношения удерживающих и сдвигающих сил, действующих на борт, является коэффициент запаса устойчивости откоса. Существует множество способов его определения, самыми распространенными на сегодня являются методы: предельного равновесия, численного анализа (метод конечных элементов), вероятностного анализа [1].

Сравнения и поиск различий при использовании различных методов определения устойчивости бортов имеет большое значение, так как влияет на безопасное ведение открытых горных работ. Определенные коэффициенты в теории могут перечить друг другу, так как используются различные подходы к дискретизации расчетной области. Так например, для методов предельного равновесия принято использовать круглоцилиндрическую или ломаную поверхности скольжения, и коэффициент запаса устойчивости определяется относительно поверхности скольжения, которая в некоторых случаях не может полноценно описать реальную поверхность скольжения [2]; метод конечных элементов разделяет всю расчетную область на конечные элементы и использует метод снижения прочности для всех элементов массива, что, в свою очередь, подразумевает необходимость оптимального выбора размера конечных элементов [3].

Анализ методов расчета

Метод конечных элементов относится к методам численного анализа, на сегодняшний день получил широкое распространение для решения многих инженерных и научных задач [4].

Суть метода конечных элементов (МКЭ) сводится к дискретизации пространства на множество конечных элементов (КЭ) (рис. 1), которые представляют собой топологически известные геометрические фигуры (в K-MINE пространство разбивается на треугольники). Треугольники между собой сочленяются (соединяются) в узлах (точках, вершинах), формируя таким образом непрерывность перемещений по всей расчетной области. Каждый треугольник имеет конечное число степеней свободы (степени свободы представляют собой компоненты векторов определяемых перемещений). Поскольку считается, что КЭ сочлены друг с другом в узлах, то поля перемещений считаются непрерывными, а поля деформаций и напряжений могут изменяться [5].

Для нахождения напряженно-деформированного состояния необходимо ввести границы модели (в точках на границах модели перемещения вдоль осей степеней свободы равны 0) на удалении от откоса, чтобы они не влияли на расчет состояния откоса. Матрица жесткости в КЭ строится, исходя из принципов минимизации потенциальной энергии Лагранжа, и предназначена для связывания узловых сил и перемещений. Формирование глобальной матрицы жесткости системы производится путем наложения матриц жесткости КЭ друг на друга [6].

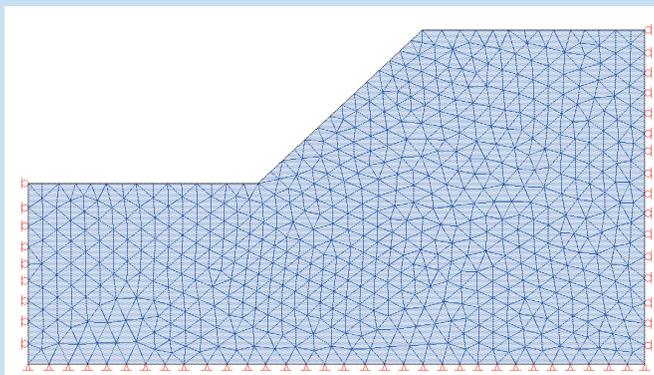


Рис. 1. Пример построения сети конечных элементов, выполненного в программном обеспечении K-MINE.

Сурет 1. K-MINE бағдарламалық жасақтамасында орындалған соңғы элементтер желісін құрудың мысалы.
Figure 1. An example of building a finite element network executed in the K-MINE software.

Уравнения, связывающие перемещения узлов и узловые силы, известны из теории упругости. Эти уравнения формируют общую неразрывную систему уравнений, которая выражает равновесия системы и непрерывность перемещений в узлах КЭ [7].

Как известно, в теории упругости используются три группы определяющих уравнений:

- закон равновесия в форме дифференциальных соотношений частных производных внутренних напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} + X &= 0 \\ \frac{d\tau_{zx}}{dx} + \frac{d\sigma_z}{dz} + Z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где σ_x и σ_z – нормальные напряжения вдоль осей X и Z соответственно;

τ_{xz} и τ_{zx} – касательное напряжение;

X и Z – компоненты объёмных сил в направлении осей X и Z .

- линейные геометрические соотношения Коши связи между перемещениями и деформациями, выражающие непрерывность и относительную малость перемещений:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx}; \quad \varepsilon_z = \frac{dv}{dz}; \quad \gamma_{xz} = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dz} \quad (2)$$

где ε_x , ε_z – относительное изменение длины в направлении оси X и Z соответственно;

γ_{xz} – сдвиговая деформация, отражающая изменение формы элемента в плоскости XZ .

- линейные физические уравнения (закон Гука) связи между напряжениями и относительными деформациями:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

где $\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{pmatrix}$ – вектор напряжений; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона.

Суть расчетов сводится к формированию и решению системы линейных уравнений, неизвестным в которых являются перемещения:

$$\{F\} = [K]\{U\}, \quad (4)$$

где F – вектор-столбец перемещений;

K – матрица жесткости системы;

U – вектор-столбец перемещений.

Поиск коэффициента запаса производится «методом снижения прочности на сдвиг», суть которого состоит в постепенном уменьшении сдвиговых характеристик сцепления c и угла внутреннего трения φ_f пород, слагаемых откос, до момента получения неустойчивого состояния [8]:

$$c_f = \frac{c}{k_{3y}}, \quad (5)$$

$$\varphi_f = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{k_{3y}}\right) \quad (6)$$

где k_{3y} – коэффициент запаса устойчивости.

В K-MINE реализованы методы предельного равновесия (метод многоугольника сил, метод алгебраического сложения сил), суть которых сводится к определению такого коэффициента запаса деления, на который приводит откос в предельное равновесие.

Метод многоугольника сил базируется на предположении о том, что откос находится в равновесии, то есть сдвигающие и удерживающие силы равны между собой. В этом методе к сдвигающим силам относятся (рис. 2): реакция опоры по подошве блока; реакции со стороны смежных блоков; силы гидростатического давления по границам блоков. К удерживающим относятся: силы сцепления, которые действуют по боковым граням блоков; сила, действующая по подошве блока (направленная в противоположную сторону предполагаемому движению), реакции со стороны ниже лежащих блоков [9].

В состоянии предельного равновесия многоугольник сил должен замкнуться. Если многоугольник не замкнут, существует невязка сил ΔF , то принятый коэффициент запаса устойчивости не соответствует устойчивости откоса. В этом случае повторяют расчет с другим коэффициентом запаса (снижая или увеличивая его), после чего необходимо определить невязку сил, и, в случае $\Delta F \neq 0$, необходимо определить фактический коэффициент запаса по зависимости невязки от коэффициента запаса (рис. 2) [10].

На рис. 3 показан пример расчета методом многоугольника сил в программном обеспечении K-MINE.

Метод алгебраического сложения сил основан на нахождении соотношения сдвигающих T_i , D_i и удерживающих сил N_i . Стоит отметить, что метод алгебраического сложения сил дает наиболее достоверные значения для невысоких откосов до 100 м и углах внутреннего трения меньше 20°.

На рис. 4 показан пример расчета методом конечных элементов в программном обеспечении K-MINE.

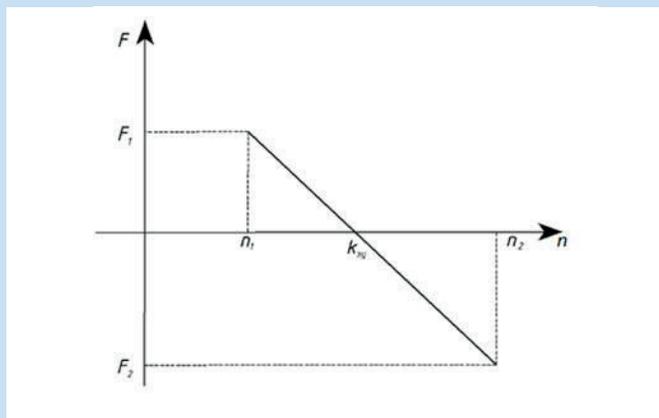


Рис. 2. График к определению фактического коэффициента запаса устойчивости.

Сурет 2. Тұрақтылық қорының нақты коэффициентін анықтау кестесі.

Figure 2. The graph for determining the actual coefficient of stability margin.

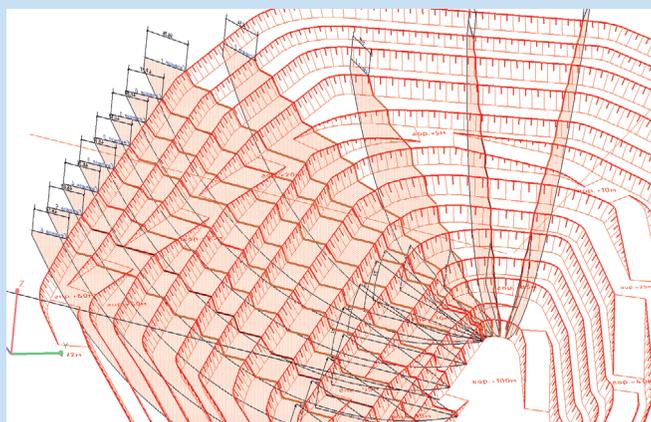


Рис. 3. Пример расчета коэффициента запаса методами предельного равновесия в программном обеспечении K-MINE.

Сурет 3. K-MINE бағдарламалық жасақтамасындағы шекті тепе-теңдік әдістерімен қор коэффициентін есептеу мысалы.

Figure 3. An example of calculating the reserve coefficient using limit equilibrium methods in the K-MINE software.

Постановка задачи

Целью этого исследования является сравнение и анализ методов определения коэффициента запаса устойчивости откосов, реализованных в программном обеспечении K-MINE.

Методика исследования

Для сравнения методов между собой были определены откосы с различными углами наклона и высотами, физико-механическими свойствами, определены коэффициенты запаса устойчивости для этих откосов (табл. 1-2).

Для анализа и сравнения методов расчетов было использовано программное обеспечение K-MINE ввиду

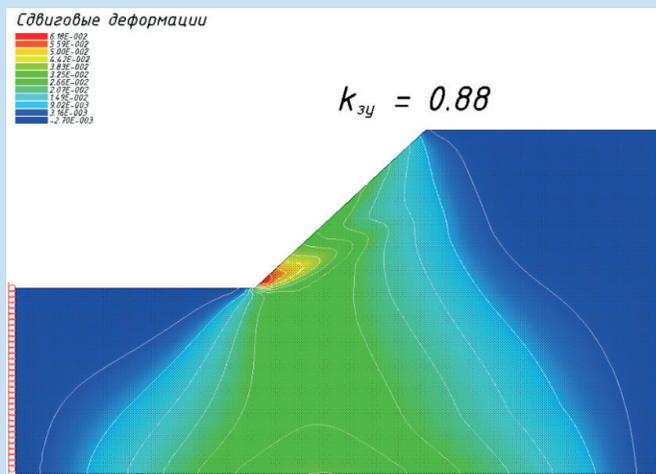


Рис. 4. Пример расчета коэффициента запаса методом МКЭ в программном обеспечении K-MINE.

Сурет 4. K-MINE бағдарламалық жасақтамасындағы мкэ әдісімен қор коэффициентін есептеу мысалы.

Figure 4. An example of calculating the reserve coefficient by the FEM method in the K-MINE software.

наличия вспомогательных модулей, которые упрощают работу инженера-геомеханика. К таким модулям можно отнести модули *Геология, Проектирование, Маркшейдерия*.

Исходные параметры (угол откоса, высота откоса, объемный вес, угол внутреннего трения, сцепления) для получения анализируемых данных определялись случайным образом.

Результаты исследования

Как видно из табл. 1, разница в определении коэффициента запаса не превышает 0,1, среднее значение разницы по 19 расчетам составило 0,04, среднее квадратичное отклонение 0,009.

В табл. 2 приведено сравнение результатов расчета коэффициента запаса методом алгебраического сложения сил и методом конечных элементов. Проведено 15 расчетов, максимальная разница составила – 0,11, среднее значение – 0,05, среднее квадратичное отклонение – 0,0142.

На рис. 5-6 приведены диаграммы сравнения полученных коэффициентов запаса

При проведении анализа был обнаружен ряд преимуществ МКЭ по сравнению с методами предельного равновесия регламентированными нормативно-правовыми актами Украины:

Для метода конечных элементов нет необходимости определять заранее тип поверхности скольжения.

Метод конечных элементов может быть использован для расчета неоднородного откоса, не прибегая к усредненному взвешиванию физико-механических свойств пород, слагающих уступ (ярус отвала) или борт карьера.

В программном обеспечении K-Mine реализован метод построения поверхности скольжения по методике проф. Г.Л. Фисенко, что позволяет получить единственно воз-

Таблица 1

Сравнение результатов расчета методом многоугольника сил и методом конечных элементов

Кесте 1

Күштер көпбұрышы әдісімен және ақырлы элементтер әдісімен есептеу нәтижелерін салыстыру

Table 1

Comparison of the calculation results by the force polygon method and the finite element method

Угол откоса, град.	Высота откоса, м	Плотность, т/м ³	Угол внутреннего трения, град.	Уд. сцепление, кг/см ²	k_{zy} (МС)	k_{zy} (МКЭ)	Δk_{zy}
52	25	1,98	24	1,65	2,64	2,59	0,05
35	25	1,8	32	0,17	1,14	1,2	0,06
40	16	1,75	33,5	0,15	1,46	1,39	0,07
40	26	1,9	25	0,3	1,25	1,28	0,03
60	30	1,96	14	0,8	1,03	1,07	0,04
45	75	2,04	35	0,1	0,93	0,9	0,03
67	43	2,06	38	0,52	0,99	1,04	0,05
59	79	2,36	21	0,15	0,38	0,38	0
44	55	2,05	25	0,27	0,86	0,8	0,06
60	20	2,09	31	0,46	1,28	1,32	0,04
49	98	2,07	24	0,98	0,94	0,87	0,07
45	47	1,83	19	0,92	1,27	1,32	0,05
59	31	1,7	23	0,34	0,87	0,91	0,04
42	46	1,86	28	0,2	0,98	0,96	0,02
31	12	1,94	41	0,09	1,98	1,93	0,05
46	95	2,11	41	0,67	1,31	1,33	0,02
50	41	1,8	15	0,16	0,51	0,51	0
46	21	1,98	37	0,96	2,58	2,58	0

МС – метод многоугольника сил, МКЭ – метод конечных элементов

Таблица 2

Сравнение результатов расчета методом алгебраического сложения сил и методом конечных элементов

Кесте 2

Есептеу нәтижелерін алгебралық күш қосу әдісімен және ақырлы элементтер әдісімен салыстыру

Table 2

Comparison of the calculation results by the algebraic addition of forces and the finite element method

Угол откоса, град.	Высота откоса, м	Плотность, т/м ³	Угол внутреннего трения, град.	Уд. сцепление, кг/см ²	k_{zy} (АСС)	k_{zy} (МКЭ)	Δk_{zy}
35	25	1,8	32	0,17	1,11	1,2	0,09
40	26	1,9	25	0,3	1,21	1,28	0,07
60	30	1,96	14	0,8	1,01	1,07	0,06
22	45	2,04	35	0,1	1,46	1,47	0,01
38	84	1,9	25	0,3	0,88	0,83	0,05
59	68	1,94	22	0,73	0,99	0,88	0,11
67	43	2,06	38	0,52	0,96	1,04	0,08
59	79	2,36	21	0,15	0,41	0,38	0,03
44	55	2,05	25	0,27	0,81	0,8	0,01
60	20	2,09	31	0,46	1,35	1,32	0,03
49	98	2,07	24	0,98	0,89	0,87	0,02
45	47	1,83	19	0,92	1,26	1,32	0,06
59	31	1,7	23	0,34	0,83	0,91	0,08
42	46	1,86	28	0,2	0,92	0,96	0,04
50	41	1,8	15	0,16	0,5	0,51	0,01

АСС – метод алгебраического сложения сил, МКЭ – метод конечных элементов



Рис. 5. Диаграмма сравнения коэффициентов запаса устойчивости откосов, полученных методом многоугольника сил и методом конечных элементов.

Сурет 5. Күштер көпбұрышы әдісімен және ақырлы элементтер әдісімен алынған беткейлердің тұрақтылық қорының коэффициенттерін салыстыру диаграммасы.

Figure 5. A diagram comparing the coefficients of the slope stability margin obtained by the force polygon method and the finite element method.

можную поверхность скольжения, но этот метод не универсален по сравнению с методами итерационного поиска поверхности скольжения и методом конечных элементов.

Выводы

Использование метода конечных элементов для расчета устойчивости бортов карьера (ярусов отвала) дает результаты, практически не отличающиеся от показателей методов предельного равновесия. Зафиксированное

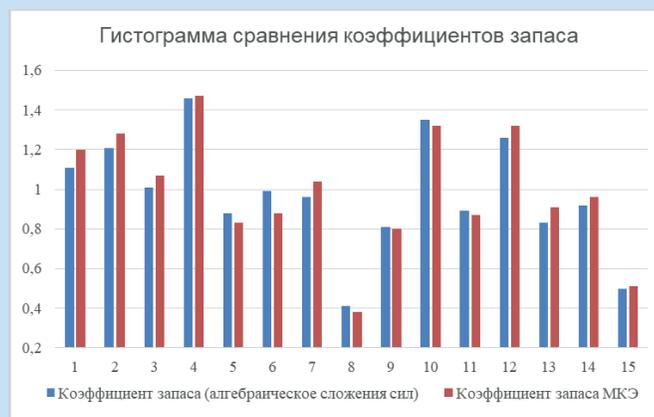


Рис. 6. Диаграмма сравнения коэффициентов запаса устойчивости откосов, полученных методом алгебраического сложения сил и методом конечных элементов.

Сурет 6. Күштерді алгебралық қосу әдісімен және ақырлы элементтер әдісімен алынған көлбеу тұрақтылық қорының коэффициенттерін салыстыру диаграммасы.

Figure 6. Diagram of the comparison of the coefficients of the slope stability margin obtained by the algebraic addition of forces and the finite element method.

отклонение коэффициента запаса устойчивости, рассчитанное МКЭ, от регламентированных нормативно-правовыми актами методов составляет в среднем 0.04 (при среднеквадратическом отклонении 0.024). С другой стороны, использование МКЭ выявило ряд его преимуществ по сравнению с другими методами. Это позволяет рекомендовать исследователям и проектировщикам использовать МКЭ в расчете и проектировании уступов и бортов карьеров и отвалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов: М.: Стройиздат, 1988, С. 6 (на русском языке)
2. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов: М.: Недра, 1965, С. 7-17 (на русском языке)
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: М.: Мир, 1975, С. 27-34 (на русском языке)
4. Бачурин Л.Л. Решение плоской задачи механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов в пакете Mathcad. // Математика в приложениях. 2003. №3 (3). С. 28-33 (на русском языке)
5. Попов В.Н., Шпаков П. С., Юнаков Ю.Л. Управление устойчивостью карьерных откосов: М.: Издательство Московского горного университета, 2008, С. 75-83 (на русском языке)
6. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ: М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003, С. 47-57 (на русском языке)
7. Griffiths D.V. Анализ устойчивости откосов с помощью конечных элементов: достижения и направления на будущее. / Griffiths D.V., Lane P.A. // Письма по геотехнике. 2019. №9 (2). С. 68-79 (на английском языке)
8. Sun W. Численное моделирование устойчивости склона с использованием метода конечных элементов и метода предельного равновесия. / Sun W., Sun Q. // Международный журнал геомеханики. 2017. №17 (6). С. 44-52 (на английском языке)
9. Li D. Анализ устойчивости склонов в условиях сейсмической нагрузки. / Li D., Zhang W. // Динамика грунтов и сейсмотехника. 2018. №111. С. 1-11 (на английском языке)

10. Коробов В.Г., Шапиро Д.М. Современные подходы к расчету устойчивости откосов. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2016, С. 82-84 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Хуан Я.Х. Жер беткейлерінің тұрақтылығы: М.: Құрылыс баспасы, 1988, Б. 6 (орыс тілінде)
2. Фисенко Г.Л. Карьерлер мен үйінділердің тұрақтылығы: М.: Жер қойнауы, 1965, Б. 7-17 (орыс тілінде)
3. Зенкевич О. Техникадағы ақырлы элементтер әдісі: М.: Әлем, 1975, Б. 27-34 (орыс тілінде)
4. Бачурин Л.Л. Mathcad пакетіндегі соңғы элементтер әдісімен деформацияланатын қатты дене механикасының жалпақ мәселесін шешу. // Қосымшалардағы математика. 2003. №3 (3). Б. 28-33 (орыс тілінде)
5. Попов В.Н., Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л. Карьер беткейлерінің тұрақтылығын басқару: М.: Мәскеу тау-кен университетінің баспасы, 2008, Б. 75-83 (орыс тілінде)
6. Галперин А.М. Ашық тау-кен жұмыстарының геомеханикасы: М.: Мәскеу мемлекеттік тау-кен университетінің баспасы, 2003, Б. 47-57 (орыс тілінде)
7. Griffiths D.V. Соңғы элементтер арқылы беткейлердің тұрақтылығын талдау: жетістіктер мен болашаққа бағыттар. / Griffiths D.V., Lane P.A. // Геотехника хаттары. 2019. №9 (2). Б. 68-79 (ағылшын тілінде)
8. Sun W. Ақырлы элементтер әдісі мен шекті тепе-теңдік әдісін қолдана отырып, көлбеу тұрақтылықты сандық модельдеу. / Sun W., Sun Q. // Халықаралық геомеханика журналы. 2017. №17 (6). Б. 44-52 (ағылшын тілінде)
9. Li D. Сейсмикалық жүктеме жағдайында беткейлердің тұрақтылығын талдау. / Li D., Zhang, W. // Топырақ динамикасы және сейсмотехника. 2018. №111. Б. 1-11 (ағылшын тілінде)
10. Коробов В.Г., Шапиро Д.М. Беткейлердің тұрақтылығын есептеудің заманауи тәсілдері: Воронеж: Воронеж ГАСУ, 2016, Б. 82-84 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Khuan Ya.Kh. Ustoichivost' zemlyanykh otkosov: M.: Stroiizdat, 1988, S. 6 [Huang Y.H. Stability of earthen slopes: M.: Stroyizdat, 1988, P. 6] (in Russian)
2. Fisenko G.L. Ustoichivost' bortov kar'erov i otvalov: M.: Nedra, 1965, S. 7-17 [Fisenko G.L. Stability of quarries and dumps: M.: Subsoil, 1965, P. 7-17] (in Russian)
3. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike: M.: Mir, 1975, S. 27-34 [Zenkevich O. The method of finite elements in the technique: M.: World, 1975, P. 27-34] (in Russian)
4. Bachurin L.L. Reshenie ploskoi zadachi mekhaniki deformiruемого tverdogo tela metodom konechnykh elementov v pakete Mathcad. // Matematika v prilozheniyakh. 2003. №3 (3). S. 28-33 [Bachurin L.L. Solution of the flat problem of Deformable solid body mechanics by the method of final elements in the Mathcad package. // Mathematics In Applications. 2003. №3 (3). P. 28-33] (in Russian)
5. Popov V.N., Shpakov P. S., Yunakov Yu.L. Upravlenie ustoichivost'yu kar'ernykh otkosov: M.: Izdatel'stvo Moskovskogo gornogo universiteta, 2008, S. 75-83 [Popov V.N., Shpakov P.S., Yunakov Yu.L. Management of the stability of Quarry slopes: M.: Moscow mining University Press, 2008, P. 75-83] (in Russian)
6. Gal'perin A.M. Geomekhanika otkrytykh gornykh rabot: M.: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2003, S. 47-57 [Galperin A.M. Geomechanics of open-pit mining: M.: Moscow State Mining University Press, 2003, P. 47-57] (in Russian)
7. Griffiths D.V. Analysis of slope stability through the latest elements: achievements and directions for the future. / Griffiths D. V., Lane P.A. // Geotechnics letters. 2019. №9 (2). P. 68-79 (in English)
8. Sun W. Numerical modeling of slope stability using the finite element method and the limit equilibrium method. / Sun W., Sun Q. // International Journal of Geomechanics. 2017. №17 (6). P. 44-52 (in English)
9. Li D. Analysis of slope stability under seismic load conditions. / Li D., Zhang W. // Soil dynamics and seismic engineering. 2018. №111. P. 1-11 (in English)
10. Korobov V.G., Shapiro D.M. Sovremennye podkhody k raschetu ustoichivosti otkosov. Voronezh: Voronezhskii GASU, 2016, S. 82-84 [Korobov V.G., Shapiro D.M. Modern approaches to calculating slope stability: Voronezh: Voronezh GASU, 2016, P. 82-84] (in Russian)

Сведения об авторах:

Орынбаев Б.А., докторант, кафедра «Горное дело», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), baurgud@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4963-7737>

Алиев С.Б., старший научный сотрудник, профессор, доктор технических наук, академик НАН РК, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН (г. Москва, Россия), alsamat@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3699-8322>

Мырзахметов С.С., кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Горное дело», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), s.myrzakhmetov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-3233-2515>

Авторлар туралы мәліметтер:

Орынбаев Б.А., докторант, «Тау-кен ісі» кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Әлиев С.Б., аға ғылыми қызметкер, профессор, техника ғылымдарының докторы, ҚР ҰҒА академигі, жер қойнауын кешенді игеру мәселелері институты академик Н.В. Мельников РҒА (Мәскеу қ., Ресей)

Мырзахметов С.С., техника ғылымдарының кандидаты, «Тау-кен ісі» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Orynbaev B.A., doctoral student, Department of Mining, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Aliyev S.B., Senior Researcher, Professor, Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Academician N.V. Melnikov Institute of Integrated Subsoil Development, RAS (Moscow, Russia)

Myrzakhmetov S.S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

СПТО КРАНЫ

СПЕЦТЕХНИКА И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

18-20 марта 2025 г.
УВК Тимирязев центр

СПТО КРАНЫ

WWW.CRANE-EXPO.RU

