

8. Бровко Д. В. Визначення надійності шахтних будівель та споруд в умовах обмеженої інформації / Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Щомісячний науковий журнал «Smart and Young». – 2016. – №3. – С. 152-157
9. Бровко Д. В. Оценка риска надежности конструкций эксплуатируемых объектов горнопромышленного предприятия / Б. Н. Андреев, Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Сборник научных трудов: БНТУ. – Минск, 2013. – т.1. – С. 180–190.
10. Андреев Б. М. Визначення надійності та обґрунтування параметрів об'єктів на поверхні шахт з урахуванням переходу на полегшені огорожувальні конструкції / Б. М. Андреев, Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – Днепропетровск, 2015. – №12. – С. 378–382.
11. Brovko D. V. Qualimetric assessment in calculation of the survivability level of the mine surface objects. / D. V. Brovko, V. V. Khvorost, V. Yu. Tyshchenko //Scientific Bulletin of the National Mining University. - Dnipro, 2018 - No. 4, p.p. 66-71. doi: 10.29202/nvngu/2018-4/14
12. Holicky M. Risk and reliability acceptance criteria for civil engineering structures. / M. Holicky, D. Diamantidis, M. Sykora /In: Structural Reliability and Modelling in Mechanics, At Ostrava, Czech Republic, 2016
13. Holicky M. Determination of target safety for structures. / M. Holicky, D. Diamantidis, M. Sykora // In: Haukaas, T. (Ed.). Proceedings of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Vancouver, Canada, 2015.
14. Holicky M. On standardization of the reliability basis of structural design. In: Haukaas, T. (Ed.) / M. Holicky, D. Diamantidis, V. Retief Johan, V. Celeste // Proceedings of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12), Vancouver, Canada, July 12-15, 2015
15. Holicky M. 2013. Probabilistic Assessment Of Industrial Heritage Structures: Framework And Case Study. / M. Holicky, M. Sykora // In: WIT Press, Ashurst Lodge, Southampton, UK. - Volume 131. - p. 171 - 182. 2013.

Рукопись поступила в редакцию 05.04.2018

УДК 622.271.4.012.3

Е.А. НЕСМАШНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Г.И. ТКАЧЕНКО, канд.техн.наук, доц.
Криворожский национальный университет
А.В. БОЛОТНИКОВ, канд. техн. наук, Академия горных наук Украины

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУПП УСТУПОВ И БОРТОВ КАРЬЕРА № 3 ЧАО «ЦГОК»

Цель. Целью данной работы является решение актуальной научно-технической задачи, позволяющей оперативно, с минимальными трудозатратами и достаточной точностью оценить степень устойчивости бортов и уступов железорудных карьеров.

Методы исследования. Авторы использовали основные теоретические и вычислительные особенности реализации метода конечных элементов применительно к задаче расчета устойчивости бортов карьера. Для решения этих задач предлагается использовать метод конечных элементов, реализованный в пакете прикладных программ PLAXIS 8.2. Для расчета устойчивости породных откосов с применением PLAXIS 8.2, был использован режим Phi-c reduction (расчет безопасности). В основу данного режима положен расчет устойчивости путем пошагового снижения прочностных характеристик (угол внутреннего трения и коэффициент молекулярного сцепления) породного массива вплоть до момента его разрушения.

Значение коэффициента запаса устойчивости борта карьера и групп уступов определялась как отношение заданных параметров прочности и параметров прочности, соответствующих моменту разрушения породного откоса. Для построения геомеханической схемы расчета, в качестве базовой, использована математическая модель Кулона-Мора, описывающая зависимость касательных напряжений от величины приложенных нормальных напряжений в горной породе обладающей конкретными физико-механическими свойствами. Особое внимание при выполнении геомеханических расчетов уделялось вопросу моделирования слабого обводненного слоя, расположенного в основании группы уступов сооруженных в песчано-глинистых массивах.

Научная новизна. Расширены границы и получили дальнейшее развитие автоматизированные методы расчета устойчивости.

Практическое значение. Расчет степени устойчивости бортов карьера № 3 ЧАО «ЦГОК» выполнен с учетом реального положения горных работ на 01.01.2019г.

Результаты. Результаты расчетов показали, что текущее состояние исследованных участков, можно считать устойчивым. Расчетные значения коэффициента запаса устойчивости находятся в пределах 1,19–1,90, что практически соответствует нормативным требованиям. Установлены наиболее опасные участки: группа уступов на гор. +80...+155 м юго-западного борта; группа уступов на гор. +122...+144 м северного борта карьера и даны практические рекомендации с целью повышения безопасности и эффективности выполнения горных работ на карьере.

Ключевые слова: метод конечных элементов, борт карьера, геомеханическая схема расчета, коэффициент запаса устойчивости.

doi: [10.31721/2306-5451-2018-1-47-38-44](https://doi.org/10.31721/2306-5451-2018-1-47-38-44)

Проблема и ее связь с практическими задачами. Развитие открытых горных работ на Криворожских карьерах, в современных условиях, характеризуется целым рядом неблагоприятных факторов. Это и значительное увеличение глубины добычных работ, нестабильное финансово-экономическое положение на мировых рынках железорудного сырья, непостоянная законодательная база в сфере налогообложения и финансов.

В этих условиях особенно актуальной становится задача оперативной, с минимальными трудовыми затратами, оценки степени устойчивости открытых горных выработок геометрические параметры которых практически ежегодно корректируются. Для решения этих задач предлагается использовать метод конечных элементов, реализованный в пакете прикладных программ PLAXIS 8.2.

Анализ исследований и публикаций. Создание в середине прошлого века метода конечных элементов (МКЭ) было обусловлено необходимостью решения задач по определению прочности космических летательных аппаратов и, по-видимому, первой опубликованной работой, в которой был использован МКЭ, была статья [2]. Эта работа вызвала целую серию работ, в которых МКЭ использовался, в основном, для решения задач строительной механики и механики сплошных сред [3]. При этом решение задач с помощью МКЭ сводилось к минимизации некоторого функционала, связанного с рассматриваемыми объектами через их важнейшие физико-механические параметры. В строительной механике в качестве такого функционала используется потенциальная энергия, минимизация которой позволяет свести задачу к системе линейных алгебраических уравнений равновесия. Позднее метод начали применять к задачам, аналитическое решение которых возможно в рамках математической физики (уравнения Лапласа и Пуассона). Одной из первых задач, решенными таким способом, явилась задача распространения тепла в различных средах. Затем метод был применен к разнообразным задачам гидромеханики, электростатики, электродинамики и т.д. Область применения метода конечных элементов расширялась. Было доказано, что возникающие в МКЭ уравнения могут быть получены с помощью частных случаев метода Галеркина или метода наименьших квадратов [4, 5].

Установление этого факта сыграло важную роль в теоретическом обосновании МКЭ, что позволило превратить метод конечных элементов из процедуры специального решения задач строительной механики в общий метод численного решения произвольных дифференциальных уравнений, без необходимости строить для решения задач соответствующие функционалы. Этот прогресс был достигнут за короткий промежуток времени благодаря совершенствованию и развитию компьютерной техники.

Сегодня возможности использования МКЭ очень широки, простираясь от анализа напряжений в простых стержнях, стержневых конструкциях самолетов и автомобилей до расчета таких сложных систем, как атомная электростанция или космические летательные аппараты.

Краткое описание МКЭ. Суть метода следует из его названия. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает её решение.

Если говорить в матричных терминах, то при использовании МКЭ собираются так называемые матрицы жёсткости (или матрица Дирихле) и матрицы масс. Далее на эти матрицы накладываются граничные условия (в условиях Неймана в матрицах не меняется ничего, в условиях Дирихле из матриц вычёркиваются строки и столбцы, соответствующие граничным узлам, так как в силу данных условий эти строки и столбцы обнуляются). Далее составляется система матричных уравнений и решается одним из известных методов. С точки зрения вычислительной

математики идея МКЭ заключается в том, что минимизация функционала вариационной задачи осуществляется по совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти.

В настоящее время существует достаточно обширный набор программного обеспечения для математических расчетов с использованием МКЭ. Нами для определения значений и закономерностей изменения степени устойчивости групп уступов и бортов карьера №3 ЧАО «ЦГОК» использован программный комплекс PLAXIS 8.2. При этом для решения задач геомеханики, в качестве базовой, использована математическая модель Кулона-Мора, описывающая зависимость касательных напряжений от величины приложенных нормальных напряжений в горной породе обладающей конкретными физико-механическими свойствами.



Рис. 1. Расположение расчетных разрезов на плане карьера № 3 ЧАО «ЦГОК»

Краткая горнотехническая характеристика карьера №3 ЧАО «ЦГОК». Разработка Петровского месторождения производится послойно – уступами сверху вниз с использованием одноковшовых экскаваторов ЕКГ-10 и комбинированного автомобильно-железнодорожного транспорта для транспортирования руды на обогатительную фабрику и вскрыши на внешние отвалы. Вскрыша на горизонтах +105 - +75 м грузится экскаваторами непосредственно в думпкары. Погрузка взорванной скальной горной массы производится экскаваторами ЕКГ-10 в автосамосвалы.

Высота уступов при разработке верхних песчано-глинистых пород (гор. +75...+105 м) принята равной 10 м. Высота уступов по скальным породам (гор. +60 м и ниже) - 15 м, что отвечает рабочим параметрам применяемых экскаваторов ЕКГ-10. Углы откоса на предельном контуре для песчано-глинистых пород приняты равными 35° , для скальных пород – $60-70^{\circ}$. В рабочем положении углы откосов не должны превышать для мягких и скальных пород соответственно 45° и 80° .

При постановке борта в граничное положение допускается отработка спаренных скальных уступов высотой 30м. Бурение и отбойка производится спаренными уступами, а отработка взорванной горной массы производится послойно при высоте уступа 15м. Для повышения устойчивости уступов и групп уступов на граничном контуре или временно нерабочих участках рабочего борта предусмотрена заоткоска уступов методом контурного взрывания наклонных скважин, бурение которых осуществляется станками СБШ-250.

Исходные данные. С геологической точки зрения Петровское железорудное месторождение представлено кристаллическими породами Украинского щита, которые вмещают в себе метаморфические образования железисто-кремнистых формаций докембрия и континентальные отложения, которые почти сплошным, мощностью до 30 м, горизонтальным чехлом перекрывают породы кристаллического фундамента. Практически вся толща этих отложений представлена суглинками и лессовидными суглинками от красно - бурого до палевого цветов, а также глинистыми песками светло-серого, зеленовато-серого, зеленовато-желтого и желтого цветов.

Песчано-глинистые породы верхних горизонтов обводнены. Водоносный горизонт расположен преимущественно на водоразделах и приурочен к низинам лессовидных суглинков, а также к линзам и прослойкам глинистых песков, мощность которых составляет от 1 до 5 м. Питание водоносного горизонта происходит за счет атмосферных осадков, характер и величина которых меняются в зависимости от времени года.

С геомеханической точки зрения все горные породы Петровского железорудного месторождения можно разделить на две основные группы:

слабые породы, представленные в верхней части месторождения (выше отметки +80 м), в состав которых входят суглинки, глины, пески, каолины и т.д.;

скальные породы (ниже отметки +80 м.) в состав которых входят мигматиты, железистые кварциты, гнейсы.

Проанализировав опубликованные данные о прочностных и деформационных свойствах горных пород Петровского месторождения [8, 9] были установлены и приведены в табл. 1 расчетные значения основных физико-механических свойств вскрышных пород данного месторождения, которые и были использованы при геомеханических расчетах с использованием МКЭ.

Изложение выполненных работ. В основу расчета устойчивости уступов, групп уступов и бортов карьера №3 ЧАО «ЦГОК» положено проектное состояние горных работ на карьере, предоставленное ГП «ГПИ «КРИВБАССПРОЕКТ».

Для решения поставленной задачи нами использовались:

вертикальные разрезы на плане карьера № 3, который соответствует положению горных работ на 01.01.2019 г. (см. рис. 1);

геологические схемы залегания горных пород;

физико-механические свойства пород, которые находятся в районе призмы возможного сдвижения (см. табл. 1).

Выбор расположения расчетных разрезов обусловлен необходимостью охватить расчетами все рабочие борта карьера № 3 с одной стороны и разумной достаточностью их объема, с другой.

Для расчета устойчивости породных откосов с применением PLAXIS 8.2, был использован режим Phi-c reduction (расчет безопасности). В основу данного режима положен расчет устойчивости путем пошагового снижения прочностных характеристик (φ – угол внутреннего трения; C – коэффициент молекулярного сцепления) породного массива вплоть до момента разрушения породного откоса. Отношение заданных параметров прочности и параметры прочности, соответствующие моменту разрушения породного откоса и определяли величину коэффициента запаса устойчивости. Сопоставление расчетных значений коэффициента запаса устойчивости с его нормативными значениями позволяло судить о соответствии существующих геометрических параметров открытых горных выработок требованиям правил безопасности [10, 11, 14].

Таблица 1

Основные физико-механические свойства вскрышных пород карьера №3 ЧАО «ЦГОК»

Название	Объёмный вес, Н/м ³	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона, доли. ед.	Сцепление кПа	Угол внутреннего трения, град.
Отвалы	24000	$1 \cdot 10^7$	0,2	36	16
Наносы	18000	$2,5 \cdot 10^7$	0,2	50	18
Скала	26000	$4 \cdot 10^7$	0,3	350	23
Кварциты	32000	$10 \cdot 10^7$	0,3	350	32
Слабый слой 1	18000	$1 \cdot 10^7$	0,1	10	10
Слабый слой 2	18000	$1 \cdot 10^7$	0,1	14	12

Полученные результаты. При выполнении вычислений сначала составлялась расчетная схема данного разреза борта карьера или группы уступов с учетом геологического строения породного массива и геометрических параметров данной открытой горной выработки, по состоянию на 01.01.2019 г, с нанесенными на этой схеме узловыми точками (см. рис. 2 а). Визуально, как иллюстрация, результаты выполненных с помощью метода конечных элементов расчетов, реализованных в пакете прикладных программ PLAXIS 8.2, приведены на рис. 2 б.

Особое внимание при выполнении геомеханических расчетов уделялось вопросу моделирования слабого обводненного слоя, расположенного в основании группы уступов сооруженных в песчано-глинистых массивах (см. рис. 3). При этом моделировались ситуации когда вследствие обводнения, вызванного сезонными атмосферными осадками, прочность песчано-глинистых пород снижается до следующих величин:

1 вариант: угол внутреннего трения – 10^0 , молекулярное сцепление 10 кПа;

2 вариант: угол внутреннего трения – 12^0 , молекулярное сцепление 14 кПа.

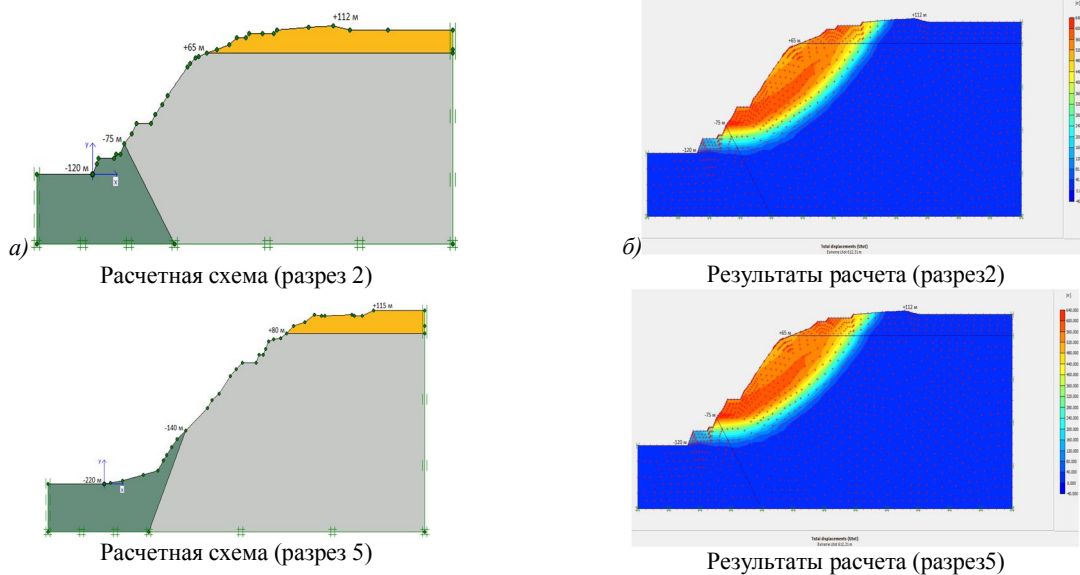


Рис. 2. Применение МКЭ для расчета степени устойчивости бортов карьера №3

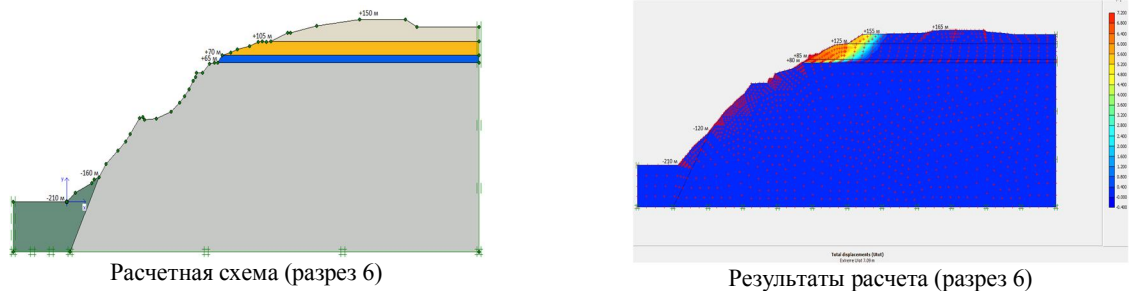


Рис. 3. Применение МКЭ при моделировании слабого обводненного слоя

В обобщенном виде результаты геомеханических расчетов, выполненных с помощью пакета прикладных программ PLAXIS 8.2, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов устойчивости групп уступов и бортов, карьера №3 ЧАО «ЦГОК»
(по состоянию на 01.01.2019 г.)

№ разреза	Горизонт, м		Высота, м	Угол наклона, град.	КЗУ, доли. ед.
	От	До			
1	От +142	До +122	20	63	1,19
2	От +110	До -120	230	28	1,85
3	От +110	До -120	230	26	1,88
4	От +155	До -210	365	30	1,50
5	От +105	До -195	300	38	1,42
6	От +150	До -210	360	26	1,55
7	От +145	До -135	280	23	1,90
Моделирование слабого обводненного слоя (угол внутреннего трения – 10^0 , сцепление 10 кПа)					
1	От +90	До +70	20	27	0,98
3	От +75	До +65	10	32	1,47
4	От +95	До +80	15	26	0,97
6	От +90	До +65	25	28	0,95
7	От +105	До +85	20	21	1,52
Моделирование слабого обводненного слоя (угол внутреннего трения – 12^0 , сцепление 14 кПа)					
1	От +142	До +122	20	63	1,16
4	От +155	До +80	75	21	1,22
6	От +90	До +60	30	23	1,26

Выводы и направления дальнейших исследований. Применение МКЭ, в частности программного комплекса PLAXIS 8.2, для определения степени устойчивости открытых горных

выработок позволяет значительно уменьшить трудозатраты на проведение такого рода расчетов, а их результаты при определении коэффициента запаса устойчивости практически не отличаются от результатов, которые получены при использовании метода алгебраического суммирования сил по криволинейной поверхности сдвижения.

Результаты выполненных геомеханических расчетов, с помощью МКЭ, показали, что текущее состояние степени устойчивости групп уступов и бортов карьера №3 ЧАО «ЦГОК», можно охарактеризовать как удовлетворительное, т.к. полученные значения коэффициентов запаса устойчивости вышеуказанных горных выработок находятся в пределах 1,19 – 1,90, что соответствует нормативным требованиям.

Наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости ($n_3 = 1,19$) получено для групп уступов северного борта карьера сооруженных в глинистой толще, а именно сдвоенного уступа в горизонтах +122 +144м. При этом необходимо иметь в виду, что степень устойчивости данного объекта может значительно снизиться вследствие дальнейшего обводнения песчано-глинистых пород.

Математическое моделирование процесса обводнения песчано-глинистых пород на верхних горизонтах карьера №3 ЧАО «ЦГОК» и снижение их прочностных характеристик (до уровня: *угол внутреннего трения* – $10-12^{\circ}$; *сцепление* $10-14$ кПа) показывает, что в этом случае будет значительное снижение коэффициента запаса устойчивости уступов и групп уступов. В дальнейшем, как следствие, возможно развитие значительных деформационных процессов на этих горизонтах. Наиболее опасный из рассматриваемых участков – группа уступов на горизонтах +80...+155 м юго-западного борта (см. разрез 4 на рис. 1).

Принимая во внимания выше изложенное, было рекомендовано:

проводить систематические визуальные осмотры верхних уступов, сложенных песчано-глинистыми породами, южного, юго-западного и северного бортов карьера №3) на предмет выявления видимых признаков выхода грунтовых вод, оплывин, оползней и т.п;

обеспечить постоянный и эффективный дренаж водопритоков на указанных участках.

Список литературы

1. **Несмашний Е.А. и др.** Обоснование оптимальных параметров открытых горных выработок на Криворожских карьерах. - Кривой Рог, Изд-во «Дионис», - 2012, -398 с.: ил.
2. Turner M.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J., Stiffness and Deflection Analysis Complex Structures. J. Aeronaut Sci. 23, 805-824, 1956.
3. **Melosh R.J.** Basis for Derivation of Matrices for the Direct Stiffness Method. J.Am.Inst. for Aeronautics and Astronautics, 1, 1631-1637, 1965.
4. Szabo B.H., Lee G.C. **Derivation of Stiffness Matrices for Problems in Plane Elasticity by Galerkin's Method.** Intern. J. of Numerical Methods in Engineering, 1, 301-310, 1969
5. **Zienkiewicz O.C.** Finite Elements in the Solution of Field Problems. The Engineer, 507-570, 1971.
6. **Зенкевич О., Чанг И.** Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред.- М.: Недра, 1974,- 240с.
7. **Цыбенко А.С., Ващенко Н.Г., Кришук Н.Г.** Алгоритмы и программы автоматической подготовки и обработки информации в методике конечных элементов.- Киев: КПИ, 1983.
8. **Ткаченко Г. И.** Совершенствование методики оценки устойчивости откосов на карьерах // II Всеукраїнська науково-практична конференція „Україна наукова 2002” (10 – 24 травня 2002 року): – Дніпропетровськ, 2002. - Т.13. - С.33.
9. Прогноз устойчивости и оптимизация параметров бортов глубоких карьеров / **С.З. Полищук, В.Т. Лашко, В.Н. Кучерский и др.** - Днепропетровск: Поліграфіст, 2001. - 371 с.
10. Методичні вказівки з визначення оптимальних кутів нахилу бортів, укосів уступів і відвалів залізрудних та флюсових кар'єрів // Під ред. проф. **А.Г.Шапаря** // -К: - 2009. – 201с.
11. **Несмашний С.О., Болотніков А.В., Ткаченко Г.І.** Расчет устойчивости участка восточного борта карьера ПАО «ИнГок» в песчано-глинистой толще. Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг: КНУ. - 2016.- № 41.- С. 64-69.
12. Исследование устойчивости бортов карьеров (№ 1,2,3) ЦГОКа до глубины отработки 300-500 м и разработка рекомендаций по уточнению параметров откосов с учетом динамического воздействия взрывов // **Отчет по НИР** // КО ВИОГЕМ, Кривой Рог, 1978.
13. ЧАО «ЦГОК» Разработка и вскрытие глубоких горизонтов карьера № 3 (III очередь углубки карьера № 3). Проект Пояснительная записка 1001-9200-ПЗ. Том 1. ДП «ДП «Кривбаспроект» 2011 г.
14. **Фадеев А.Б.** Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987, - 221 с..
15. Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин. – Київ, МПТУ, 2008. -702 с.
16. **Несмашний Е.А.** Оптимизация геометрических параметров открытых горных выработок. Кривой Рог, Минерал. 1999. -120 с.

17. Neshmashnyi E. Calculating and rationalising the relativity norms for determining the slopes of quarry flanks. Soviet mining journal. -1987. -vol. 1, num. 3, -Oxonian Press, India. -p. 32-38.

18. Neshmashnij E.A., Tkachenko G.I. Stability evaluation of jsc "YUGOK" eastern pit wall taking into account seismic mass blasting effect. Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. - Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», - 2017. - № 44.- С.27-32.

19. Fanti D., Luzi G., Tarchi D., Landslides monitoring by using ground-based SAR interferometer //Eng.Geology.– 2003.-Vol.68,№1-2.-P.15- 30.

Рукопись поступила в редакцию 09.04.2018

УДК 66-03

О. А. ЖУЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., А. П. КОРОТИНСЬКИЙ, аспірант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗРІДЖЕННЯ НА ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ НА ЕТАПІ КАМЕРА «ПІД ВОГНЕМ»

Мета. Відомо, що якість кінцевої продукції випалювання вуглецевих виробів залежить від багатьох факторів, найважливішим з них є температурний режим. Дослідження зв'язку температурного поля печі в залежності від технологічних параметрів, та їх раціональне використання дозволяє досягти меншого виходу бракованої продукції. Тому є важливим моделювання цих процесів з врахуванням максимальної кількості факторів впливу, яке дозволить мінімізувати час та вартість виробництва готової продукції. Саме тому, дослідження температурних полів, а відповідно особливостей температурних режимів заготовок при впливі розрідження на температурний режим роботи камери печі випалювання вуглецевих виробів на етапі «під вогнем», що дозволить мінімізувати перепад температур по заготовкам та є важливим етапом розробки системи керування даним процесом, яка повинна забезпечувати вихід готової продукції відповідної якості.

Методи. У якості методу дослідження застосовувався метод математичного моделювання на базі моделі, що побудована на основі осереднених за Рейнольдсом рівняннях Нав'є-Стокса (RANS). На основі чисельного моделювання проведено дослідження впливу розрідження на температурний режим роботи камери печі випалювання вуглецевих виробів на етапі «під вогнем». Дослідження впливу розрідження проводиться шляхом порівняння температурних режимів камери печі при різних режимах роботи печі, а саме при розрідженні 50 Па та 100 Па.

Наукова новизна. Виявлено закономірності зміни середнього значення перепаду температур по заготовкам при різних режимах роботи печі. Основну увагу дослідження було приділено питанням однорідності температурного поля заготовок, що суттєво впливає на їх якість.

Практична значимість. Отримані результати зміни максимальних та мінімальних температур по кожній із заготовок можуть бути використані при розробці вдосконаленого регламенту ведення кампанії випалювання. Проведене дослідження спрямоване на підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів.

Результати. Результати проведеного чисельного моделювання засвідчили суттєвий вплив розрідження на температурний режим процесу випалювання на етапі «під вогнем». Збільшення розрідження призводить до зменшення абсолютних значень температур по всьому об'єму печі та одночасно призводить до зменшення величин перепадів температур у заготовках, які випалюються.

Ключові слова: випалювання, вуглецеві вироби, моделювання, розрідження, температурні поля, камера «під вогнем».

doi:

Випалювання у вуглекімії – процес, в якому вуглисті зв'язуючі матеріали, зазвичай кам'яновугільний смоляний пек або нафтовий пек, як частина сформованої вугільної суміші, перетворюється у вуглець, даючи при повільному нагріванні тверде вуглецеве тіло [1]. На сьогоднішній день вуглецеві вироби, такі як графітовані електроди, ніпелі, вуглецеві блоки, знаходять широке застосування у різних галузях промисловості - металургійній, хімічній, металообробній, машинобудівній, нафтохімічній та інших. Одним з основних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів є процес їх випалювання, що проводиться у печах камерного типу.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. З технології виробництва вуглеграфітових виробів відомо, що кількість повітря, яке подається на горіння палива, визначається в основному, розрідженням у печі, а також, що розрідження повинно бути таким, щоб газу, які протягуються через піч, могли досягти потрібної швидкості для подолання сили