

УДК 622.012:624.9-027.45

Д.В. БРОВКО, В.В. ХВОРОСТ, кандидаты техн. наук, доценты  
Криворожский национальный университет

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ВОЗМОЖНЫХ ДЕФЕКТОВ ОБЪЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ ШАХТ В ВИДЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОСМОТРОВ

**Цель.** Создание одного из методов оценки технического состояния элементов конструкций зданий и сооружений поверхности шахт - метода анализа распространения дефектов, позволяющий, в условиях напряженного состояния конструктивного элемента, на стадии проектирования определить будущие работы по обеспечению надежной эксплуатации и установить высокий уровень безопасности объектов поверхности шахт.

**Методика.** Разработана аналитическая модель распространения дефектов в условиях напряженного состояния конструктивного элемента. Данные, по результатам экспериментальных исследований элементов конструкций промышленных объектов шахт, дали возможность определить параметры кинетического уравнения с использованием принципов регрессионного анализа, что в свою очередь позволило получить зависимость, характеризующую промежуток времени до разрушения определенного дефекта при различных значениях, действующих или возникающих нагрузок. Выполненные расчеты позволяют предположить, что выявление дефекта больше зависит от величины начального дефекта, чем от величины нагрузки.

**Результаты.** Получена модель, позволяющая определить надежность элементов эксплуатируемых зданий и сооружений поверхностного комплекса в виде зависимости от конструктивных параметров элемента и параметра распределения начального дефекта, значения которого, имея априорное распределение, после поступления информации приобретают апостериорное распределение, что позволяет обоснованно формировать эксплуатационную надежность всей системы. Предложенная методика определения надежности эксплуатируемых зданий и сооружений поверхности может быть использована на практике для оценки вида технического состояния и безопасного остаточного ресурса.

**Научная новизна.** Научная новизна предложенного в работе метода – адекватное описание оценки и анализа надежности выполнения работ при обследовании и реконструкции промышленных объектов шахт с учетом представления результатов выполнения работ в виде статистических данных с учетом математического моделирования возможных дефектов.

**Практическая значимость.** Создание метода анализа распространения дефектов, который позволяет определять направление работ по обеспечению надежной эксплуатации и установить высокий уровень безопасности объектов поверхности шахт. В результате проведения предложенных мероприятий повышается уровень надежности эксплуатируемого объекта, что влечет за собой сохранение как материальных активов, так и жизни работников предприятия.

**Ключевые слова:** объекты поверхности шахт, надежность, дефект, напряженное состояние.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-32-38

**Постановка проблемы.** Качество выполнения работ реконструкции промышленных объектов шахт – это максимально возможное выявление имеющихся дефектов. Обследование сооружений поверхности – процедура определения их технического состояния. На основе результатов (фактических значений контролируемых параметров) технического обследования здания или иного сооружения можно оценить пригодность объекта для дальнейшей эксплуатации, реконструкции или определить необходимость в восстановлении, усилении, ремонте элементов конструкций. Эта задача огромной важности, так как не выявленные дефекты проявляются в виде аварий конструкций в процессе эксплуатации промышленных объектов шахт.

**Выделение нерешенной проблемы.** Современные научные и производственные представления, на которых базируется большинство методик определения фактического состояния конструктивных элементов объектов поверхности шахт, опираются на стандартных представлениях. При этом разработка и внедрение новых методик, основанных на комплексном определении фактического состояния объектов поверхности, продляет их безопасную эксплуатацию.

**Анализ последних исследований.** Суммируя результаты многочисленных исследований, причинами аварий и аварийных ситуаций могут быть:

ошибки при проектировании и реконструкции (недостаточный учет грунтовых условий, применение различных конструктивных схем в одном здании, изменение расчетной схемы, неверный выбор усиления и т.д.);

ошибки при строительстве и реконструкции (низкое качество строительно-монтажных работ, одновременное возведение частей здания, дефектные материалы, неквалифицированное выполнение проекта производства работ по реконструкции и т.д.);

ошибки при эксплуатации (карстовые образования, подземные выработки, неравномерные воздействия на конструкции, динамическое воздействия и др.);

непредусмотренные внешние воздействия как явления природы (шквальный ветер, сильные осадки, сильное обледенение), так и результат деятельности человека (взрывы, обвалы, удары);

срок службы конструкций или здания выше нормативного без выполнения плановых ремонтно-восстановительных работ.

**Выделение нерешенной ранее части общей проблем.** Оценка технического состояния элементов конструкций зданий и сооружений проводится путем сопоставления предельно допустимых (расчетных или нормативных) и фактических значений критериев, характеризующих прочность, устойчивость, деформативность и эксплуатационные характеристики конструкций. При проектировании объектов поверхности их эксплуатационные характеристики не являются заданными. Не моделируется физический износ конструктивных элементов и объекта в целом. Практически довольно сложно на стадии проектирования определить будущие затраты по обеспечению надежной эксплуатации здания.

**Формулирование цели работы.** Минимизируя функцию параметров технического состояния, можно получить функцию надежности объекта поверхности в целом и предусмотреть эффективную систему анализа распространения дефектов в условиях напряженного состояния конструктивного элемента.

**Изложение основного материала.** Достаточно большой или малый участок, имеющий различную конфигурацию, можно исследовать различными способами: либо целиком, либо разбивая на отдельные участки. Решить эту задачу в общем виде не всегда представляется возможным, однако сравнить два разбиения с точки зрения поставленной задачи можно. Это сравнение выявляет один способ, дающий более высокое качество выполнения работ по исследованию в сравнении с другим. Но чтобы получить параметр надежности испытания в количественной форме потребуется решить ряд достаточно сложных задач. К ним следует отнести прежде всего физическое описание роста дефекта в процессе исследования. Затем перейти к решению задачи представления результатов исследования в виде статистических данных.

Дело в том, что статистические данные по определению фиксируют результаты определения дефектов идентичных статистически независимых объектов. Так называемая схема исследования со случайным цензурованием заключается в том, что исследования проводятся до отказа одного из элементов объекта. Если считать элементом объекта участки длиной равной длине здания или сооружения, то исследования проводятся до первого отказа на каком-то участке. Сложность задачи заключается в том, что такие участки не являются ни идентичными, ни статистически независимыми. Однако путем некоторой перенумерации участков представление испытаний в виде статистических данных возможно. Эта задача решается при помощи теории экстремальных порядковых статистик.

На последнем этапе необходимо сформировать параметр надежности. Предполагается, что функцию распределения начальных дефектов можно описать формулой  $(x/\delta)^m$ . Квантиль  $m_p$  для апостериорного распределения параметра  $m$  вполне годится как показатель надежности элементов конструкций промышленных объектов шахт. Чем больше  $m_p$ , тем степень живучести объекта выше. Очевидно, имея количественное выражение параметра можно сравнивать различные способы исследования надежности.

Рассмотрим механические модели, лежащие в основе теории распространения трещин [1, 2] - процесс разрушения любого твердого тела требует определенного времени и, как правило, разбивается на две основные стадии: стадию развития повреждений и стадию роста трещин, приводящих к нарушению сплошности тела и в дальнейшем к его полному разрушению [3, 4,]. Предположим, что режим нагружения задан в виде  $\sigma(t)$ , где  $(t)$  - время. Зачастую вместо  $(t)$  могут использоваться и другие параметры, например, число циклов нагружения и даже текущая величина деформации. Однако пока это не будет оговорено особо, мы будем считать, что режим нагружения задан как функция времени. Переходя к самим повреждениям, введем их меру  $M$ , которую удобно нормировать  $0 < M < 1$ , причем равенство  $M$  единице является условием раз-

рушения. Мере повреждений иногда удается придать определенный физический или механический смысл, однако при рассматриваемом интуитивном подходе к явлению разрушения — это не обязательно.

Текущая величина  $M$  является в конечном счете функцией  $t$ , а условие разрушения  $M=1$  определяет время разрушения  $t$ . Для нахождения текущего значения  $M(t)$  нужно располагать дифференциальным или интегральным уравнением, устанавливающим зависимость искомой величины от режима нагружения. Такое уравнение принято называть кинетическим уравнением повреждений. Форма этого уравнения задается заранее, а постоянные или функциональные параметры должны подбираться по результатам опытов. Такой метод описания наступления разрушения не единственно возможный, но наиболее простой и универсальный.

Представление результатов исследований элементов конструкций в виде статистических данных. Анализ аварий элементов инженерных конструкций промышленных объектов шахт показывает, что почти все они происходят из-за имеющихся дефектов. Появление дефектов или развитие первоначально имеющихся дефектов происходит в результате разного рода процессов накопления повреждений [5, 6]. Рассмотрение этих процессов приводит к сложным задачам даже в случае одного дефекта. Конструкции промышленных объектов шахт можно отнести к достаточно сложным конструкциям, представляющим собой последовательную систему элементов и соединений. Казалось бы, это обстоятельство должно осложнять задачу. Однако, в связи с тем, что количество элементов велико, появляется возможность применения методов экстремальных порядковых статистик [7].

Последовательная система характеризуется тем, что отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу системы.

Распределение Вейбулла является естественным для времени безотказной работы последовательной системы, к которой можно отнести участок элементов конструкций при исследовании. Задача состоит в том, чтобы найти в каждом конкретном случае параметры распределения.

Распределение Вейбулла содержит два параметра [8]: характерное время жизни ( $c$ ) и параметр формы ( $\alpha$ )

$$W_n(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{c}\right)^\alpha\right]. \quad (1)$$

Если время безотказной работы элемента последовательной системы имеет распределение Вейбулла

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{c}\right)^\alpha\right], \quad (2)$$

то предельное распределение безотказной работы системы имеет распределение Вейбулла, причем в точности, а не асимптотически

$$W_n(t) = 1 - [1 - F(t)]^n = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{c}\right)^\alpha\right]. \quad (3)$$

Отсюда следует, что параметр формы для элемента и системы совпадают, а характерное время для системы равно

$$c_1 = c \cdot n^{-1/\alpha}. \quad (4)$$

Если распределение для элемента не вейбулловское, то к распределению Вейбулла распределение времени безотказной работы системы стремится асимптотически при  $n \rightarrow \infty$ .

Параметр формы  $\alpha$  можно найти из условия

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{F(x \cdot t)}{F(x)} = t^\alpha. \quad (5)$$

При исследовании конструкций предполагаем, что нагрузки на элементы могут быть разными в разных элементах, это, казалось бы, не дает возможности для использования модели последовательной системы, так как элементы системы не находятся в идентичных условиях. Тем не менее, можно поступить следующим образом. Предположим, что в конструкциях (их элементах) нагрузки меняются линейно в зависимости от номера элемента  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )

$$p_i = A + i \cdot B; A = \frac{(n \cdot p_1 - p_n)}{(n-1)};$$

$$B = \frac{(p_n - p_1)}{(n-1)},$$
(6)

где  $p_1$  и  $p_n$  - соответственно, начальная и конечные нагрузки в элементе.

Преобразуем  $m_k = \int_{0,1} x_k \cdot f_h(x_k) dx_k = \frac{k}{(n+1)}$  к виду

$$p_i = A + (n+1)m_i \cdot B,$$
(7)

где  $m_i$  - математическое ожидание  $i$ -ой порядковой статистики для равномерного распределения, определяемого формулой

Рассмотрим теперь совокупность случайных величин  $p(x_{hi})$ , определенных формулой

$$p(x_{hi}) = A + (n+1)x_{hi} \cdot B,$$
(8)

где  $x_{hi}$  - порядковая статистика для равномерного распределения.

Если вернуться от порядковых статистик  $x_{hi}$  к исходной совокупности случайных величин, то можно считать, что отдельный элемент как элемент последовательной системы находится под действием случайной нагрузки

$$p = A + (n+1)X \cdot B,$$
(9)

где  $X$  - случайная величина, равномерно распределенная в интервале  $(0 \div 1)$ .

Порядок нумерации элементов нас не интересует. В общем случае, когда нагрузка нелинейно изменяется от элемента к элементу в соответствии с некоторой зависимостью

$$p = \phi(x),$$
(10)

где аргумент  $x$  меняется от нуля до единицы, вводится процедура перехода от порядковых статистик  $x_{hi}$

$$p_i = \phi(x_{hi}).$$
(11)

Обосновать возможность такого представления можно путем линеаризации функции случайного аргумента. При этом математическое ожидание и дисперсия выражается в виде

$$E[p_i] = E[\phi(x_{hi})] \approx \phi\left[\frac{i}{(n+1)}\right].$$
(12)

Из последней формулы видно, что если функция  $\phi$  достаточно пологая, то разброс случайной величины  $p_i$  около своего математического ожидания будет достаточно мал.

Теперь можно предположить, что элемент последовательной системы, находится под случайной нагрузкой

$$p = \phi(n \cdot x),$$
(13)

где  $x$  - равномерно распределенная в интервале  $(0 \div 1)$  случайная величина.

Асимптотическая формула для функции распределения времени безотказной работы элемента, обобщающая формулу для  $F(t)$  дает закон Вейбулла

$$F(t) = 1 - \exp\left[-m\left(\frac{t}{T}\right)^{\frac{2}{3}}\right],$$
(14)

где  $T = \frac{2\delta}{3A \cdot s}$ ,  $s$  - площадь под кривой напряжения на  $(0 \div 1)$ .

Теперь результаты исследования конструкций представляются как исследование системы из  $n$  элементов, каждый из которых имеет функцию распределения времени безотказной работы  $F(t)$ . Обработку статистических данных будем выполнять с применением Байесовского метода [9,10].

Смысл байесовского подхода заключается в следующем. Считается, что вся неопределенность сосредоточена в параметре  $m$ . Сначала этот параметр имеет априорное распределение  $h(m)$ . После поступления эмпирической информации  $I_s$ , в нашем случае это результаты исследования элементов конструкций, априорное распределение изменяется. Результат изменения - апостериорное распределение, которое мы должны найти. Таким образом, апостериорное распределение параметра, характеризующего величину дефекта, является характеристикой надежности исследований, формирующего надежность инженерных конструкций в эксплуатации.

Этап 1 - составление функции правдоподобия  $R(m/I)$ . Эмпирическая информация - это многократно цензурированная выборка наработок на отказ элементов инженерных конструкций. Порция информации:  $L$  - длина элемента конструкций;  $D$  - площадь сечения;  $\delta$  - толщина элемента;  $n$  - количество элементов, длиной  $\Delta L$ , т.е.  $L=n \cdot \Delta L$ .

Если в процессе эксплуатации (исследования) произошел отказ, то это информация 1-го типа. Время  $t_1$  - момент отказа, времена жизни других элементов цензурируются.

Если отказа не произошло (информация 2-го типа) и технологическая операция окончилась, т.е. ее прекратили, то цензурируются времена жизни всех элементов.

Учитывая вид функции распределения  $F(t)$ , функция правдоподобия для информации типа 1 будет иметь вид

$$R(m/I_1) = \frac{2}{3} m \cdot t_1^{-1/3} \cdot T^{2/3} \exp \left[ -m \cdot n \left( \frac{t_1}{T} \right)^{2/3} \right]; \quad (15)$$

$$T = \frac{2\delta}{3A \cdot s}; \quad s = \int_{0.1} \sigma(n \cdot x) dx.$$

Функция правдоподобия для информации типа 2 будет иметь вид

$$R(m/I_2) = \exp \left[ -m \cdot n \left( \frac{t_2}{T} \right)^{2/3} \right]. \quad (16)$$

При последовательном поступлении информации общая функция правдоподобия есть произведение функций правдоподобия для каждой порции информации.

Этап 2 - нахождение апостериорной плотности  $h_1(m/I_1)$ . Если априорное распределение  $h_1(m)$  есть гамма-распределение и функция правдоподобия  $R(m/I_1)$ , то апостериорное распределение  $h_1(m/I_1)$  также представляет собой гамма-распределение

$$h_1(m/I_1) = e m^{r-1} \cdot v^r \cdot \exp(-v \cdot m) / \Gamma(r). \quad (17)$$

причем, параметры  $r$  и  $v$  пересчитываются по следующим правилам: для информации типа 1

$$\Rightarrow r = g + 1; \quad v = z + n \left( \frac{t_1}{T} \right)^{2/3}, \quad (18)$$

для информации типа 2

$$\Rightarrow r = g; \quad v = z + n \left( \frac{t_2}{T} \right)^{2/3}. \quad (19)$$

Этап 3 - определение точечной оценки  $m_0$ . Точечная оценка  $m_0$  является апостериорным математическим ожиданием

$$m_0 = m_{аном} = \frac{r}{v}; \quad (20)$$

для информации типа 1

$$\Rightarrow m_0 = (g + 1) \cdot \left[ z + n \left( \frac{t_1}{T} \right)^{2/3} \right]^{-1}; \quad (21)$$

для информации типа 2

$$\Rightarrow m_0 = g \cdot \left[ z + n \left( \frac{t_2}{T} \right)^{2/3} \right]^{-1}. \quad (22)$$

Этап 4 - определение верхней  $p$ -доверительной границы параметра  $m$  такой, что

$$P\{m < m_p\} = p. \quad (23)$$

Так как апостериорное распределение  $h_1(m/I_1)$  является гамма-распределением, то в этом случае можно получить формулу для  $m_p$  в явном виде

$$m_p = \frac{\chi_{p,2r}^2}{2v}, \quad (24)$$

где  $\chi_{p,2r}^2$  - квантиль вероятности  $p$  для распределения.

Предполагая, что конструктивный элемент последовательной системы, находится под случайной нагрузкой  $p=\varphi(n-x)$ , где  $n$  - число элементов,  $x$  - равномерно распределенная в интервале  $(0\div 1)$  случайная величина, можно найти асимптотическую формулу для функции распределения времени безотказной работы элемента

$$F(t) = 1 - \exp\left(-mK^{\frac{2}{3}}\right), \quad (25)$$

где  $K$  - коэффициент, зависящий от конструктивных параметров элемента.

Результаты исследования элементов конструкций представляются как исследования системы из  $n$  конструктивных элементов, каждый из которых имеет функцию распределения времени безотказной работы, а обработку статистических данных можно выполнять с применением Байесовского метода: вся неопределенность сосредоточена в параметре  $m$ . Сначала этот параметр имеет априорное распределение. После поступления эмпирической информации, в нашем случае это результаты исследования элементов конструкции промышленного сооружения, априорное распределение изменяется. Результат изменения - апостериорное распределение, которое находится. Таким образом, апостериорное распределение параметра, характеризующего величину дефекта, является характеристикой надежности выполнения работ при реконструкции промышленного сооружения  $m_p$ , формирующей эксплуатационную надежность всей системы.

Величина  $m_p$  является показателем надежности выполнения технологической операции по исследованию элемента на прочность. Чем меньше  $m_p$ , тем хуже совокупность технологических операций по исследованию данного элемента, т.е. увеличение параметра  $m_p$  свидетельствует о формировании более высокого уровня эксплуатационной надежности всей системы элементов. В работе показано как меняется параметр  $m_p$  в зависимости от деления системы на участки исследования.

**Выводы и перспективы развития направления.** Выполнено исследование надежности выполнения работ в процессе проведения технического обследования элементов конструкций: изложена методология оценки и анализа надежности выполнения работ при обследовании и реконструкции промышленных объектов шахт с учетом представления результатов выполнения работ в виде статистических данных с учетом математического моделирования возможных дефектов.

В работе рассмотрена механическая модель распространения дефектов в условиях напряженного состояния конструктивного элемента. Экспериментальные данные по исследованию элементов конструкций промышленных объектов шахт дали возможность определить параметры кинетического уравнения с использованием принципов регрессионного анализа, что в свою очередь позволило получить зависимость, характеризующую промежуток времени до разрушения определенного дефекта при различных значениях, действующих или возникающих нагрузок. Выполненные расчеты позволяют предположить, что выявление дефекта больше зависит от величины начального дефекта, чем от величины нагрузки.

#### Список литературы

1. Бровко Д. В. Вероятностный подход при независимом многоступенчатом поступлении сигналов о дефектах элементов промышленных объектов на поверхности шахт / Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Гірничий вісник ДВНЗ «Криворізький національний університет». – 2015. – №100. – С. 62–67.
2. Brovko, D. V. System analysis of the accident risk of surface mining objects as a basis for their safe operation. / D. V. Brovko, V. V. Khvorost // Computer Science, Information Technology, Automation, 2016. –No4, p.p. 20-24.
3. Andreev, B. M. Prediction and ensuring the reliability of buildings elements and structures of surface complex at reconstruction. / B. M. Andreev, D. V. Brovko, V. V. Khvorost // Metallurgical and Mining Industry, 2016. –No9. pp. 54-57.
4. Brovko, D. V. Dynamics of structures of mining enterprises as one of the components in determining their technical condition. / D. V. Brovko, V. V. Khvorost // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus Special number, 2016.
5. Андрєєв Б. М. Забезпечення надійності поверхневого комплексу методом прогнозування технічного стану елементів будівель і споруд / Б. М. Андрєєв, Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Вісник Криворізького національного університету. – 2016. – №41. – С. 87–92.
6. Globalna aspekty Ekonomii Światowej i Stosunków Międzynarodowych w warunkach niestabilności gospodarczej: monografia Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Praktycznej, Częstochowa, Akademia polonijna, 2016. – 897 s.
7. Бровко Д. В. Дослідження конструкцій металевого арочного кріплення в умовах криворізького залізнично-го басейну. / Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. – 2015. – №123. – С. 99–106.

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 трудовыми затратами 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:

© Несмашный Е.А., Ткаченко Г.И., Болотников А.В., 2018