

УДК 622.271

А.А. Твердов, Б.В. Несмеянов

**К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ЗАПАСА ПРИ РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ
КАРЬЕРНЫХ ОТКОСОВ**

Семинар № 2

Одной из основных составляющих проблемы обеспечения устойчивости карьерных откосов, является задача выбора рациональной величины коэффициента запаса устойчивости (КЗУ).

Важность этой задачи переоценить трудно, так как от точности ее решения напрямую зависят и безопасность, и эффективность ведения горных работ, и полнота извлечения запасов из недр. Ее решению в разное время были посвящены исследования Скемптона, Бернатовского, Г.Л. Фисенко, С.И. Попова, М.А. Ревазова, В.Н. Попова, В.М. Гудкова, М.Е. Певзнера, Ю.И. Туринцева Э.Л. Галустьяна, А.И. Арсеннтьева, Н.К. Звонарева, Д.Н. Кима, Ю.И. Малярова, В.И. Зобнина, Л.Е. Радионова, М.А. Резникова, С.Г. Христова и др.

Анализируя выполненные исследования можно отметить, что найденные решения в большинстве своем не имеют единого подхода, но в их развитии во времени прослеживается определенная эволюция - от рекомендаций применять общую регламентированную величину КЗУ, ранее определенную на основе анализа различных горно-геологических и горно-технических факторов, с сопоставлением данных по конструктивным параметрам бортов карьеров со статистикой обрушений, до решений задачи вероятностными методами.

Однако, несмотря на столь пристальное внимание, адресованное решению означенной задачи, ряд вопросов касающихся, как отдельных ее составляющих, так и

решения в целом, еще требуют своей доработки и совершенствования.

Так можно констатировать, что исходя из объективных обстоятельств, определяемых уникальностью каждого месторождения и особенностями технологии ведения горных работ, единые рекомендации по величине КЗУ, которые можно было бы спроецировать на абсолютно все горнодобывающие предприятия, совершенно неприемлемы. Результат, полученный таким образом, имел бы необоснованные отклонения от действительных значений, характеризую «среднюю температуру в госпитале».

До недавнего времени, оценивая устойчивость бортов карьеров, именно так и поступали, обычно ограничиваясь анализом основных силовых воздействий на прибортовой массив, тогда как иные силовые воздействия, как правило, меньшие по величине, но более разнообразные по причинам проявления, игнорировались.

Следует отметить, что данный подход не только приводит к искажению «истинного» соотношения удерживающих и сдвигающих составляющих сил, со всеми вытекающими негативными последствиями, но имеет и дополнительные минусы, а именно приводит к появлению систематических погрешностей, что при вероятностной оценке устойчивости откосов крайне нежелательно. По тем же самым причинам неоправданно, в выборе величины КЗУ, руководствоваться анализом ограниченного числа факторов, учет которых по-

казал удовлетворительные результаты на других горнодобывающих предприятиях.

Если прежде подобный подход и имел оправдание в значительном осложнении расчетной части работы, при расширении числа факторов подлежащих анализу при оценке устойчивости карьерных откосов, то с повсеместным внедрением программных и аппаратных средств автоматизации вычислений, начавшимся в 90-е годы прошедшего столетия, сознательное упрощение картины напряженного состояния прибортового массива ничем неоправдано.

Поэтому на настоящем этапе развития науки одним из основных направлений повышения точности определения конструктивных параметров бортов карьеров, можно считать более детальный учет имеющих место различных силовых воздействий на прибортовой массив, с чем согласны и многие другие исследователи устойчивости бортов карьеров. Учитывая многообразие возможных факторов, которые могут иметь место на конкретном карьере, рассмотрим те из них, которые на данный момент не только выявлены, но и хотя бы частично могут быть учтены.

Ранее нами были разработаны и предложены варианты учета различных «малых силовых воздействий» на прибортовой массив обусловленных: динамическими нагрузками от горно-транс-портного оборудования; сейсмичностью, как природной, так и техногенной; климатическими и иными природными особенностями местности и прибортового массива; особенностями гравитационного поля географического места; гравитацией внешних объектов (луну) и т. д.

Анализ этих воздействий показал, что отдельные «малые силовые воздействия» имеют вполне существенную величину и являются «малыми» только по отношению к основным сдвигающим и удерживающим силам, действующим на прибортовой массив. Другие же дополнительные силовые воздействия напротив не столь значимы по своей абсолютной величине. Одна-

ко и их учет значительно повышает степень соответствия отображаемой в расчетах устойчивости карьерных откосов картины напряженного состояния прибортового массива ее действительному значению, освобождая эти расчеты от систематических погрешностей и как уже было отмечено выше, не сопряжен со сколь ни будь значимым осложнением этих расчетов.

С недоучетом отдельных силовых составляющих тесно связанна и проблема соответствия определяемых в лабораторных условиях показателей прочности пород свойствам прибортового массива.

Здесь следует заметить, несмотря на то, что на настоящий момент времени известно несколько направлений решения означенной проблемы, все они имеют свои недостатки и требуют отдельного рассмотрения.

Поэтому лишь отметим, что характер отклонений свойств пород вызванный разницей напряженно-деформационного состояния лабораторного образца и прибортового массива, по своим свойствам близок к систематическим погрешностям. Так отклонения всегда носят характер изменения баланса сил призмы возможного обрушения в одну сторону, а именно в сторону сдвигающих сил и более того обусловлены вполне конкретными причинами, пусть и не всегда однозначно подлежащими оценке. Это же относится и к отклонениям обусловленным сроком службы бортов карьера. Что, также, подтверждается работой В.А. Падукова, предложившего для оценки влияния временного фактора использовать законы термодинамики, рассматривая борт как термодинамически изолированную систему, характеризующуюся нарастанием энтропии с увеличением времени срока его службы.

Но даже если мы самым тщательным образом учтем все силы и факторы, характеризующие устойчивое состояние борта карьера, полученная величина его конструктивных параметров не будет стопроцентно надежной. Это обусловлено тем

обстоятельством, что сами переменные уравнения равновесия призмы возможного обрушения, получены с определенной долей погрешности возникающей, как на этапе разведки полезных ископаемых, так и на этапе лабораторных испытаний по определению физико-механических свойств пород, а также вследствие невозможности получить точные данные по свойствам пород для каждой точки массива. Кроме того, погрешности возникают и в ходе расчета и графических построений, являющихся составной частью того или иного расчетного метода.

В общем случае известное уравнение для определения КЗУ имеет вид

$$n = \frac{\sum S_i \gamma_i \cdot \cos \varphi_i \cdot tg \rho_i + \sum C_i l_i + \sum F_{доп.у.и.}}{\sum S_i \gamma_i \cdot \sin \phi_i + \sum F_{доп.с.и.}} \geq 1, \quad (1)$$

где S_i – площадь элементарного блока, т; γ_i – плотность пород, слагающих элементарный блок, т/м³; φ_i – угол между направлением силы действия блока и нормальной составляющей в данной точке элементарного блока, градус; ρ_i – угол внутреннего трения пород, слагающих элементарный блок, градус; C_i – сцепление пород, слагающих элементарный блок, МПа; l_i – длина поверхности скольжения, на участке элементарного блока, м; $F_{доп.у.и.}$, $F_{доп.с.и.}$ – дополнительные удерживающие и сдвигающие силы, кН.

Любое незначительное изменение данного соотношения в сторону сдвигающих сил, вследствие погрешности определения переменных уравнения равновесия, инициирует деформационные процессы. Отсюда становится очевидным, что даже при самом тщательном учете силовых воздействий на прибортовой массив, стопроцентной гарантии устойчивости борта карьера получить нельзя. Но, вполне возможно минимизировать негативное про-

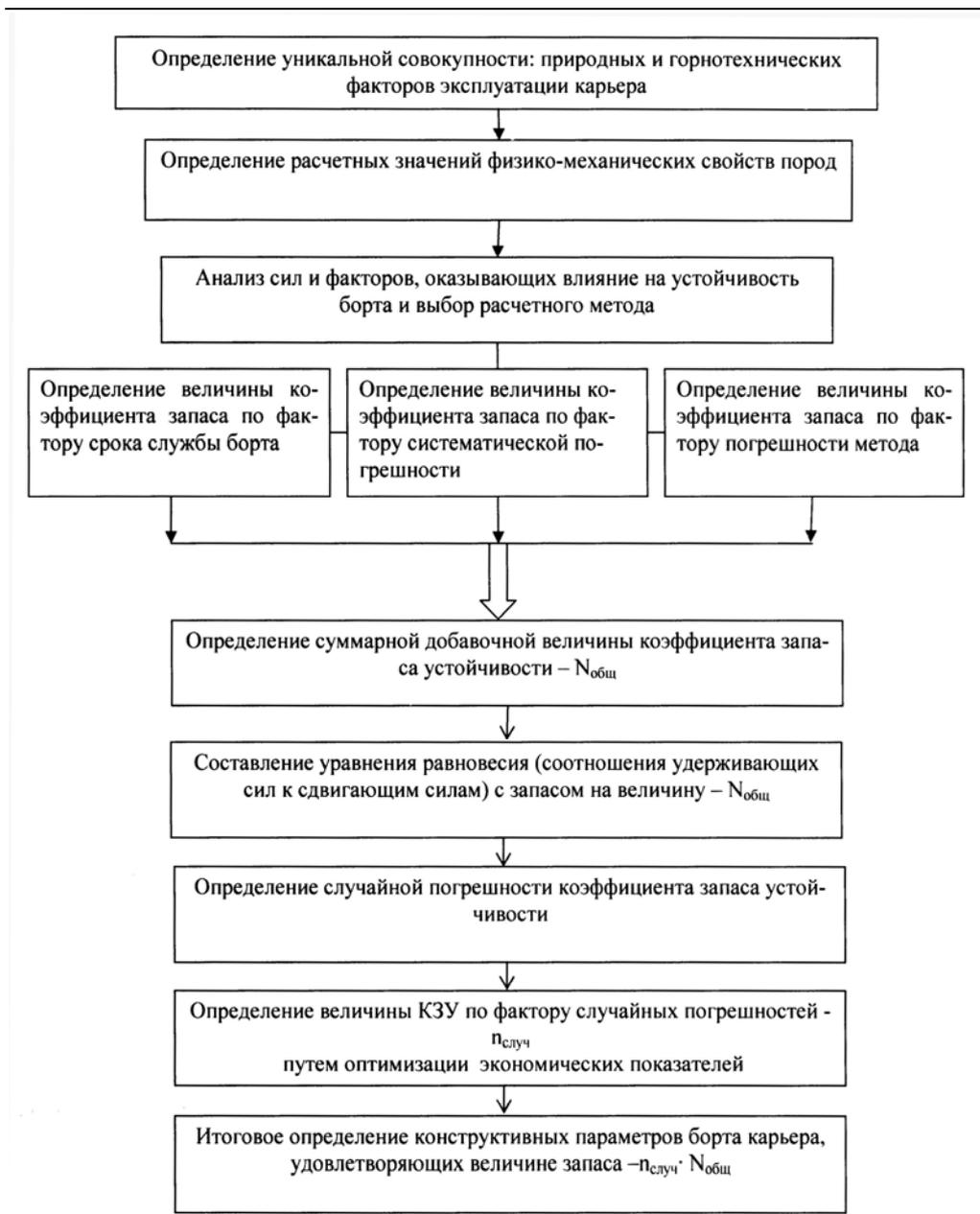
явление различного рода погрешностей, правильным образом учтя их в общей величине запаса прочности.

Грубые ошибки, точно также как и систематические могут и должны быть исключены должной организацией, как сбора геологической информации, так и лабораторных испытаний образцов пород полученных в ходе геологических изысканий, а также расчетных процессов.

О таких возможных причинах появления систематической погрешности как недоучет отдельного силового фактора, уже было сказано и они также устранимы. Искажения по фактору срока службы борта и несоответствия расчетных характеристик действительным близки по своим свойствам систематическим погрешностям и теоретически могут быть минимизированы. Случайные же погрешности, возникающие как на этапе сбора геологической информации, так и лабораторных определений, а также в ходе непосредственного расчета величины КЗУ полностью неустраняемы даже теоретически. Они могут быть лишь учтены в общей величине КЗ

Случайные погрешности КЗУ, дифференцированно по геомеханическим условиям прибортового массива, предлагается определять по формулам, приведенным в таблице.

Следует однако отметить, что погрешности переменных уравнения равновесия, являющиеся основой для расчета погрешности самого КЗУ, формируются целым комплексом причин и в каждом конкретном случае как факторы, определяющие их величины, так и их абсолютные значения будут иметь самую широкую вариацию. Поэтому предпочтительней определять их абсолютные значения индивидуально для



Примечание. Под $N_{общ}$ понимается КЗУ по факторам: погрешности метода расчета; срока службы борта; случайных погрешностей ($N_{общ} = n_{метода} \cdot n_{в.сист}$).

Алгоритм определения рациональной величины коэффициента запаса при расчетах устойчивости карьерных откосов

№ п/п	Условия применения формул	Формула определения КЗУ	Формулы отыскания случайной погрешности КЗУ	Погрешности переменных формул
1	<ul style="list-style-type: none"> - элементарный столбец - дополнительные сдвигающие и удерживающие силы отсутствуют 	$n_1 = \frac{S_1 \cdot \gamma_1 \cdot \cos \varphi \cdot \text{igr} + C_1 \cdot I_1}{S_1 \cdot \gamma_1 \cdot \sin \phi}$	$m_n = \frac{1}{N} \sqrt{m_{s,1}^2 + m_{c,1}^2 + m_{i,1}^2 + m_{\gamma,1}^2}$ $m_{s,1} = \frac{m_{s,1} \cdot C_1 \cdot I_1}{M_1 \cdot \sin \varphi}; \quad m_{c,1} = \frac{I_1}{M_1 \cdot \sin \varphi}; \quad m_{i,1} = \frac{C_1}{M_1 \cdot \sin \varphi} \cdot m_i$ $m_{\gamma,1} = \left(\frac{M_1 \cdot \text{igr} + C_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi}{M_1 \cdot \sin^2 \varphi} \right) \cdot \frac{m_{\gamma,1} \cdot 3600}{206265}; \quad m_{\gamma,1} = \text{igr} \cdot \frac{m_{\gamma,1} \cdot 3600}{206265}$	
2	<ul style="list-style-type: none"> - элементарный столбец - присутствуют дополнительные сдвигающие и удерживающие силы 	$n_1 = \frac{S_1 \cdot \gamma_1 \cdot \cos \varphi \cdot \text{igr} + C_1 \cdot I_1 + A_1}{S_1 \cdot \gamma_1 \cdot \sin \phi + B_1}$	$m_{s,1} = \frac{1}{N} \sqrt{m_{s,1}^2 + m_{c,1}^2 + m_{i,1}^2 + m_{\gamma,1}^2 + m_{B,1}^2}$ $m_{s,1} = \left(\frac{B_1 \cdot \cos \varphi \cdot \text{igr} - (C_1 \cdot I_1 + A_1) \cdot \sin \varphi}{(M_1 \cdot \sin \varphi + B_1)} \right) \cdot m_{s,1}; \quad m_{c,1} = \left(\frac{M_1 \cdot \text{igr} + B_1 \cdot \sin \varphi + (C_1 \cdot I_1 + A_1) \cdot \cos \varphi}{(M_1 \cdot \sin \varphi + B_1)} \right) \cdot \frac{m_{c,1} \cdot 3600}{206265}$ $m_{i,1} = \frac{C_1}{(M_1 \cdot \sin \varphi + B_1)} \cdot m_{i,1}; \quad m_{\gamma,1} = \left(\frac{M_1 \cdot \sin \varphi + B_1}{M_1 \cdot \sin \varphi} \right) \cdot m_{\gamma,1};$ $m_{B,1} = \frac{M_1 \cdot \cos \varphi}{(M_1 \cdot \sin \varphi + B_1)} \cdot \frac{3600}{206265}; \quad m_{B,1} = \frac{M_1 \cdot \cos \varphi \cdot \text{igr} + (C_1 \cdot I_1 + A_1)}{(M_1 \cdot \sin \varphi + B_1)} \cdot m_{B,1}$	$m_{s,1} = \sqrt{m_{S_1}^2 \cdot \gamma_1^2 + m_{\gamma_1}^2 \cdot S_1^2}$ $m_{S_1}, m_{\gamma_1}, m_{\text{igr}}, m_{C_1}, m_{I_1}, m_{A_1}, m_{B_1}, m_{A_1}, m_{B_1}$ <p>определяются с учетом антропогенной массы и особенностей графо-аналитической обработки материала</p>
3	<ul style="list-style-type: none"> - средневзвешенное значение погрешности элементарных столбцов 	$n = n_1 \cdot \frac{F_{s,1} + n_{s,1} \cdot \sum_{i=1}^n F_{s,i}}{\sum_{i=1}^n F_{s,i}}$	$m_n = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_{s,i}} \cdot \sum_{i=1}^n (m_{n,i} \cdot F_{s,i})$	
4	<ul style="list-style-type: none"> - призма обрушения - дополнительные сдвигающие и удерживающие силы отсутствуют - n=1 	$n = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \gamma_i \cdot \cos \varphi \cdot \text{igr} + \sum_{i=1}^n C_i \cdot I_i}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \gamma_i \cdot \sin \phi} = 1$	$m_n = \frac{1}{N} \sqrt{m_{s,M}^2 + m_{s,C}^2 + m_{s,B}^2 + m_{s,\gamma}^2}$ $m_{s,C} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_{s,i}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i \cdot m_{C,i})^2}; \quad m_{s,B} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_{s,i}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i \cdot m_{I,i})^2};$ $m_{s,\gamma} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_{s,i}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{m_{\gamma,i} \cdot 3600}{206265} \cdot (\sin \varphi \cdot \text{igr} + N \cdot \cos \varphi) \right]^2}$ $m_{s,M} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_{s,i}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{M_i \cdot \cos \varphi \cdot m_{\gamma,i} \cdot 3600}{\cos^2 \varphi \cdot 206265} \right]^2}; \quad m_{s,M} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_{s,i}} \sqrt{\sum_{i=1}^n [\cos \varphi \cdot \text{igr} - N \cdot \sin \varphi] \cdot m_{I,i}^2}$	
5	<ul style="list-style-type: none"> - призма обрушения - присутствуют дополнительные сдвигающие и удерживающие силы - n=1 	$n = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \gamma_i \cdot \cos \varphi \cdot \text{igr} + \sum_{i=1}^n C_i \cdot I_i + \sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \gamma_i \cdot \sin \phi + \sum_{i=1}^n B_i} = 1$	$m_n = \frac{1}{N} \sqrt{m_{s,M}^2 + m_{s,C}^2 + m_{s,B}^2 + m_{s,\gamma}^2 + m_{s,A}^2}$ $m_{s,A} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_{s,i}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (m_{A,i})^2}; \quad m_{s,B} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_{s,i}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (m_{B,i})^2}$ $m_{s,M}, m_{s,C}, m_{s,B}, m_{s,\gamma}, m_{s,A}, m_{s,B} - \text{находятся аналогично пункту 4}$	
6	<ul style="list-style-type: none"> - площадь элементарного блока; - вес пород, слагающих элементарный блок; - угол между направлениями силы тяжести блока и нормальной составляющей в данной точке элементарного блока; - угол внутреннего трения пород, слагающих элементарный блок; - сцепление пород, слагающих элементарный блок; - длина поверхности скольжения, на участке элементарного блока; - дополнительные удерживающие силы на участке элементарного блока; - дополнительные сдвигающие силы на участке элементарного блока; - дополнительный КЗУ; - дополнительные силы призма обрушения; 	$m_{S_1}, m_{\gamma_1}, m_{C_1}, m_{I_1}, m_{A_1}, m_{B_1} - \text{средневзвешенные погрешности определения переменных формулы S, \gamma, \varphi, C, I, A, B,}$	<p>Условные обозначения:</p>	

каждого случая или, по крайней мере, относительно конкретных условий сбора и обработки первичной информации. При этом не стоит ограничиваться исключительно анализом точности определения угла внутреннего трения и сцепления. Хотя погрешности указанных величин наиболее существенны в балансе удерживающих идвигающих составляющих сил, но иные переменные уравнения равновесия также имеют свою степень точности, учет которой повысит и точность определения случайной погрешности КЗУ.

С учетом случайной погрешности КЗУ имеются и дополнительные сложности. Так из всех составляющих устойчивости бортов карьера, только случайные погрешности имеют строго вероятностный характер, что, в свою очередь, предопределяет вероятностный характер самой величины КЗУ. Это создает определенную проблему по их учету в общей величине КЗУ.

Так, если систематические погрешности КЗУ можно непосредственно учесть исправлением на их величину, как переменных уравнения равновесия, так и самой величины КЗУ. То простое увеличение КЗУ на величину случайной погрешности не будет самым лучшим результатом оптимизации.

Для корректного учета случайной погрешности необходимо привлечь к оценке устойчивости теорию вероятностей и законы математической статистики, сопоставив риск обрушения при текущих затратах на формирование борта, с гипотетическими потерями при обрушении. При этом объективности оценки экономической эффективности принимаемого решения, будет способствовать максимально подробный учет составляющих затрат на формирование борта и гипотетических потерь при его обрушении

включая социально-экономические последствия.

В целом следует отметить, что к оценке устойчивости бортов карьеров и определению КЗУ нужно подходить системно, поэтапно оценивая природные и горнотехнические факторы, характеризующие конкретные условия ведения горных работ. Так, оценку случайных погрешностей КЗУ целесообразно проводить после предварительного учета систематических погрешностей, а оценку экономической эффективности реализации принимаемого решения, следует отнести к заключительному этапу решения задачи определения рациональной величины КЗУ.

Общий алгоритм решения задачи определения рациональной величины КЗУ, можно представить схемой изображенной на рисунке.

Системный и комплексный подход к оценке устойчивости откосов карьеров основанный на последовательном анализе вклада каждого из факторов определяющих общую величину КЗУ, с учетом их весовой составляющей, позволит получить конструктивные параметры борта карьера, если и не стопроцентно гарантирующие его устойчивость, то по крайней мере наиболее адекватно отвечающие природным и горнотехническим условиям разработки карьера и характеризующиеся приемлемым производственно-технологическим риском.

В заключение можно сказать, что если абсолютно универсальной «формулы» для определения объективной величины КЗУ нельзя получить в принципе, то выработка единого алгоритма, позволяющего наиболее адекватно оценивать степень участия каждой из составляющих формирующих устойчивость борта карьера, вполне возможна.

Коротко об авторах

Твердов А.А. – аспирант,
Несмеянов Б.В. – профессор, доктор технических наук,
Московский государственный горный университет.