УДК 622.271.332:622.834.531

А.Н.Гурин, П.А.Цевелев
ВНИМИ, Санкт-Петербург, Россия

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВЫСОКИХ УСТУПОВ ПРИ КРУТОПАДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОСЛАБЛЕНИЯ МАССИВА

Рассмотрены геомеханические схемы деформирования уступов, расположенных в тектонических зонах.

Geomechanical shemes of high slopes deformations for quarries situated in tectonic zones are regarded.

В современном горном производстве прослеживается явная тенденция к увеличению добычи полезных ископаемых открытым способом. При отработке месторождений, сложенных скальными породами, позволительно формирование уступов в предельном положении с крутыми углами наклона. Увеличение углов наклона бортов влечет за собой опасные геодинамические явления, прежде всего обрушения уступов бортов и вывалы породной массы. В большей своей массе эти деформации связаны с наличием в массиве неблагоприятных естественных поверхностей ослабления: систем тектонических трещин, контактов между слабыми прослойками и т.п. Особая проблема – решение задачи обрушения при наличии двух плоскостей, ориентированных в сторону падения массива, сложенного скальными и полускальными породами. В настоящее время существует ряд расчетных схем по оценке устойчивости, обеспечивающих получение неплохих результатов, но, как правило, они не в полной мере отображают условия равновесия скального массива при вертикальной слоистости. В данной статье рассмотрена новая методика и порядок ее решения на примере условий, сложившихся на одних из крупнейших месторождений якутских алмазов – трубках «Мир» и «Удачная» горнодобывающего предприятия АК «Алроса».

Рассмотрим три геомеханические схемы деформирования уступов в зависимости от ориентировки поверхностей ослабления относительно забоя и склонности пород к выветриванию:

- крутопадающие поверхности ослабления пересекают фронт горных работ под углами δ_1, δ_2;
- в крупноблочном монолитном массиве залегают слои склонных к выветриванию мергелей с наличием слабого слоя в основании;
- заоткоска уступа произведена по системе сплошных трещин, падение которых близко к вертикальному.

1. Часто потеря устойчивости отдельных блоков происходит в виде смещения вдоль полностью оконтуривающих его двух поверхностей ослабления. Схематически деформирующийся блок изображен на рис.1.

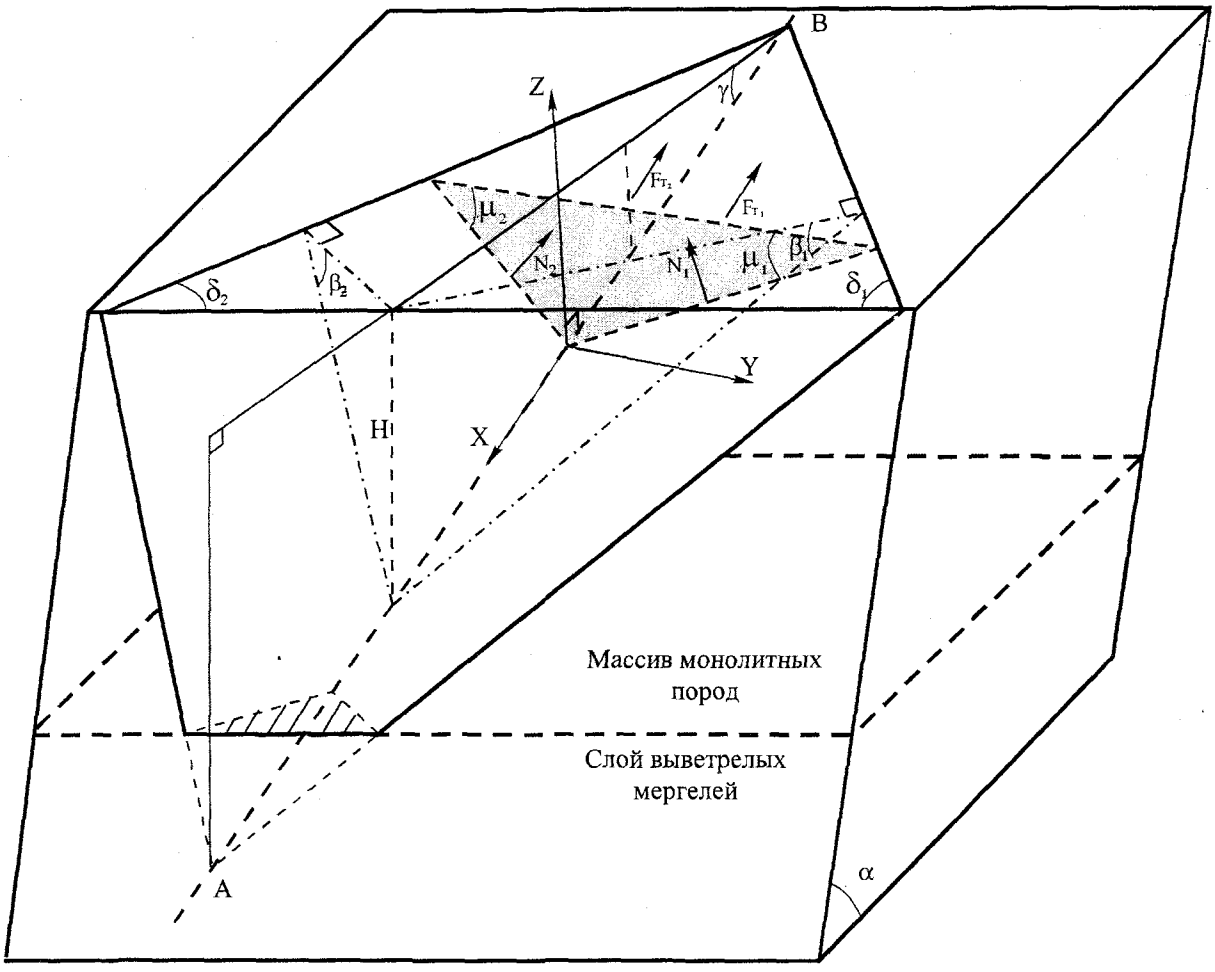


Рис. 1. Схема к определению предельной высоты блока пород, подсеченного трещинами

Основным условием возникновения такого вида локальных деформаций откосов является падение в сторону выработанного пространства, по крайней мере, одной из боковых поверхностей блока. Этот случай деформирования наиболее изучен [1,4]. Критерием устойчивости блока с известными геометрическими параметрами могут быть коэффициент запаса или разность удерживающих и сдвигающих усилий.

Оценка устойчивости блока в рассматриваемом случае основывается на условии, что его смещение происходит вдоль линии пересечения его боковых граней (на рис.1, линия *AB*). В большинстве случаев параметры устойчивого блока определяются из условия предельного равновесия, т.е. равенства удерживающих и сдвигающих усилий, действующих по граням блока в проекции на направление смещения (*OX*) и плоскости, перпендикулярной ему (по оси *OY*, *OZ*):соответственно

$$P\sin\gamma = F_{T_1} + F_{T_2} = N_1\mathrm{tg}\varphi_1 +$$
$$+ N_2\mathrm{tg}\varphi_1 + C_1S_1 + C_2S_2;$$
$$N_1\sin\mu_1 = N_2\sin\mu_2;$$
$$P\cos\gamma = N_1\cos\mu_1 + N_2\cos\mu_2,$$

где P – вес рассматриваемого блока; $F_{T_1} = N_1\mathrm{tg}\varphi_1 + C_1S_1$; $F_{T_2} = N_2\mathrm{tg}\varphi_2 + C_2S_2$ – силы трения по граням блока; N_1, N_2 – нормальные усилия на гранях блока; φ_1, φ_2 – углы трения по граням блока; C_1S_1, C_2S_2 – силы сцепления по граням блока.

Решение приведенной системы уравнений предельного равновесия позволяет определить предельную высоту потенциально опасного блока (H) или коэффициент запаса устойчивости блока определенных габаритов (n).

Из всех факторов, влияющих на устойчивость уступов на карьере трубки «Удачная», где вмещающие породы представлены прочными разностями, наиболее значимыми являются: структурное строение прибортового массива и горнотехнические условия на карьере. В литологическом отношении породы прибортового массива представлены преимущественно известняками различного состава (доломитовыми, глинистыми, алевритистыми, битуминозными и другими) и доломитами с прослоями мергелей, алевролитов. Характерно тонкое переслаивание пород различного состава. Мощность пластов изменяется от 0,5 до 5,7 м. Также отмечается частое переслаивание мергелей в виде прослоев и слоев мощностью от 0,40 до 2,5 м с известняками и доломитами.

На общем фоне горизонтально залегающих осадочных пород вблизи кимберлитовой трубки выделяются участки повышенной трещиноватости и небольших разрывных нарушений. Трубка «Удачная» окружена системой разрывов, образующих подобие кольцевой структуры. Участки вмещающих пород, заключенные между этими кольцевыми зонами разрывных нарушений и контактами рудных тел, нарушены многочисленными трещинами, по которым блоки пород смещены в вертикальном направлении относительно друг друга. В этих условиях на месторождении преимущественно распространены поверхности ослабления с крутыми углами падения (60-90°), которые при взаимном пересечении образуют блоки, по форме близкие к прямоугольным.

По данным комплексных исследований [1], сопротивление сдвигу по трещинам и контактам в известняках характеризуется сцеплениями C'=3÷13 т/м^2 и углами трения φ'=27÷35°. Анализ характера ведения горных работ показал, что как вследствие ведения буровзрывных работ, так и в результате интенсивного выветривания пород в приоткосной зоне естественное сцепление по поверхностям отдельных блоков нарушено. Кроме того, ввиду небольших размеров потенциально опасных блоков (H ~ 1÷10 м) нормальные напряжения на их гранях невелики и, как правило, не превышают 5 т/м^2. В этом диапазоне нормальных напряжений сопротивление сдвигу по трещинам в прочных полускальных и скальных породах характеризуется минимальными значениями сцеплений (менее 1 т/м^2) и высокими углами трения (до 40°). Это объясняется тем, что при сдвиге по трещине происходит ее раскрытие, вызванное смещением по наклонным граням выступов. При таком уровне нормальных напряжений среза отдельных выступов, формирующих сцепление по трещине, практически не происходит.

2. Потеря устойчивости отдельных блоков, происходящая в виде смещения по двум взаимно пересекающимся поверхностям ослабления, может также сопровождаться частичным срезом пород в их основании по напластованию. Наиболее часто такой механизм деформирования реализуется, когда ниже слоя монолитных пород, содержащего неблагоприятно ориентированные поверхности ослабления, залегает слой слабых, склонных к интенсивному выветриванию пород.

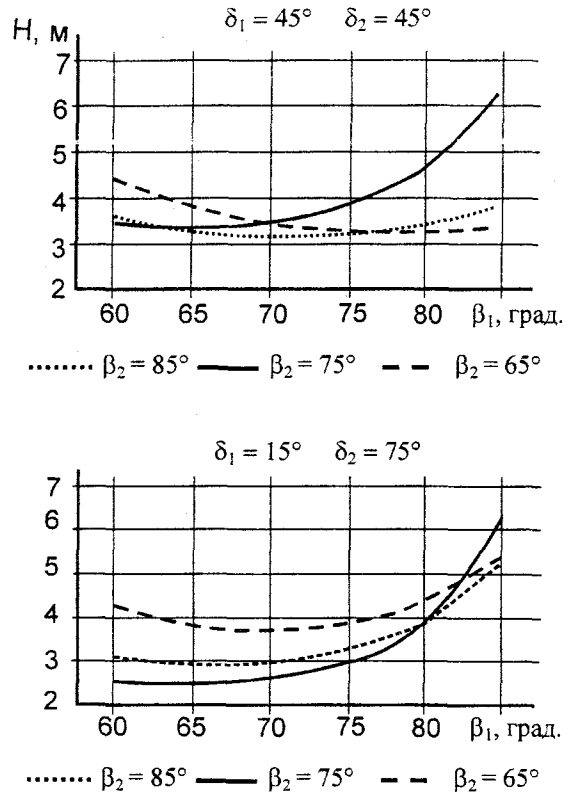


Рис. 2. Графики зависимости высоты обрушающегося блока от ориентировки δ_1, δ_2 и углов падения β_1, β_2 подсекающих его трещин

Таким образом, интенсивное выветривание мергелей может привести к обрушению залегающих выше отдельных блоков известняка и доломита. При мелкоблочном строении известняков и доломитов (до 0,5 м), залегающих над слоем мергелей, процесс их обрушения идет интенсивней.

Как показали расчеты, значительное (~ 10 м^3) по объему обрушение в этих условиях может произойти, когда протяженные крутопадающие поверхности ослабления ($\beta \approx 70 \div 85°$) ориентированы под небольшими ($\delta_2 = 10 \div 30°$) углами к простиранию уступа. Это объясняется тем, что потенциальная зона среза пород в основании блока практически полностью расположена в зоне выветривания (~1 м).

При оценке потенциально опасных, с точки зрения образования вывалов, условий для расчета устойчивости были приняты следующие характеристики: сопротивление сдвигу по трещинам в известняках и доломитах $C' = 0{,}5$ т/м^2, угол трения $\varphi' = 37°$. Результаты расчетов в виде значений предельной высоты блока в зависимости от ориентировки трещин относительно простирания уступа (δ_1, δ_2) и углов их падения (β_1, β_2) приведены на рис.2.

Результаты выполненных расчетов позволяют сделать следующие выводы:

• При данных характеристиках сопротивления сдвигу потенциально более опасными являются поверхности ослабления с углами падения 65-75°. Предельная высота блока в этом случае составляет 2,5-4,0 м. При больших углах падения (> 80°) предельная высота блока увеличивается, достигая 6 м.

• Предельная высота потенциально опасных блоков в значительной степени зависит от сцепления, сформировавшегося в результате смещений от взрывных работ и выветривания по поверхностям ослабления.

• При меньших значениях сцепления по трещинам, чем принято в расчетах ($C' = 0{,}5$ т/м^2), возможно обрушение и более мелких (~1 м) блоков.

3. При определенных инженерно-геологических условиях, например в вертикальных уступах при наличии в массиве крутопадающих протяженных трещин, параллельных забою, обрушение породного блока может происходить не в виде смещения по оконтуривающим его поверхностям ослабления, а в результате опрокидывания [2]. В этом случае уравнениями, определяющими условие равнове-

сия блока, являются не уравнения предельного равновесия, а уравнения равновесия моментов. Проанализируем условие равновесия блока на простейшем примере.

На отдельный блок высотой H, мощностью $\Delta\ell$ с углом падения β со стороны массива горных пород действуют нормальные σ_3 и касательные τ_3 напряжения. Аналогичные напряжения σ_1 и τ_1 действуют по основанию блока. Схематически действующие на выделенный блок напряжения изображены на рис.3.

Распределение нормальных напряжений σ_3 с достаточной точностью можно считать линейным. Распределение нормальных напряжений σ_1 по основанию блока имеет сложный характер и определяется из условия равновесия моментов сил. В состоянии, близком к предельному, происходит концентрация напряжений σ_1 вблизи точки О. В предельном состоянии вследствие концентрации напряжений σ_1 происходит разрушение породы вблизи точки О и опрокидывание всего породного блока.

Учитывая, что прочность породы блока на одноосное сжатие гораздо выше среднего уровня нормальных напряжений в основании блока, можно с достаточной точностью считать, что в предельном состоянии результирующая реакция R со стороны основания блока проходит через точку О. Тогда уравнение равновесия моментов сил в предельном состоянии можно представить в следующем виде:

$$\frac{\gamma_п}{2}(\Delta\ell \sin\beta + H\cos\beta)H\Delta\ell + \tau_3 = \frac{k\,h^3}{6},$$

где $\gamma_п$ – объемный вес породы; τ_3 – результирующие касательные по боковой грани блока; k – коэффициент, характеризирующий распределение нормальных напряжений σ_3 вдоль боковой грани блока; h – зона сжимающих напряжений.

Как видно из приведенного уравнения, при $\beta \le 90°$ только нормальные напряжения σ_3 создают опрокидывающий момент, в то время как вес блока P и касательные τ_3 удерживают его.

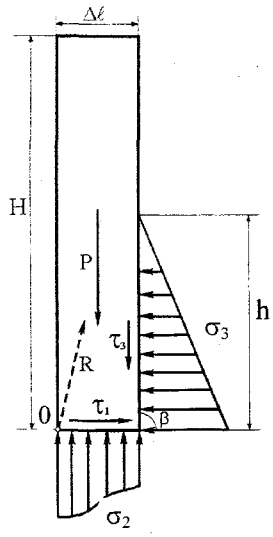


Рис.3. Схема элементарного блока и действующие на него силы

Проанализируем возможную природу сил, создающих опрокидывающий момент. Если нормальные напряжения σ_3 возникают только вследствие бокового отпора со стороны массива горных пород, то деформации блока в виде поворота в выработанное пространство сопровождаются проскальзыванием по боковой грани блока. Тогда касательные усилия τ_3 равны предельному значению сил трения:

$$\tau_3 = \frac{kh^2}{2}\operatorname{tg}\varphi + Ch\,.$$

Следовательно, опрокидывающий момент (при незначительных силах сцепления по грани блока) может возникнуть только тогда, когда

$$h > 3\Delta\ell \operatorname{tg}\varphi\ .$$

Силы бокового отпора по своей природе являются реактивными. Так как при деформации в виде поворота отдельного блока происходит раскрытие трещин, зона возможного действия h сил бокового отпора, особенно в прочных, жестких породах, резко сокращается. Это приводит к

уменьшению опрокидывающего момента и, как следствие, затуханию деформаций блока. Таким образом, маловероятно, что действие только сил бокового отпора вызовет обрушение отдельного блока породы.

Результаты оценочного моделирования напряженно-деформированного состояния вертикального уступа высотой $H = 45$ м методом МКЭ показали, что в верхней части уступа на расстоянии до 10 м от бровки возникают растягивающие напряжения. В то же время напряжений, соответствующих состоянию предельного равновесия в массиве горных пород, которые могли бы привести к обрушению всего уступа или его части, не возникает.

Существование растягивающих напряжений вблизи верхней бровки уступа приводит к раскрытию трещин, падение которых близко к вертикальному, а простирание незначительно отличается от простирания уступа. С течением времени этот процесс развивается вследствие попадания талой воды в образовавшиеся трещины и вызываемого ею гидростатического давления, а также из-за расклинивающего действия льда.

Таким образом, наиболее неблагоприятным для возникновения и дальнейшего раскрытия трещин вблизи верхней бровки массива является такой массив горных пород, в котором существует система параллельных протяженных трещин с падением, близким к вертикальному, и простиранием, близким к простиранию борта.

В таких условиях к обрушению части уступа в виде опрокидывания слоя (блока) породы, отделенного от массива вертикальной трещиной, может привести действие активных сил, к которым в первую очередь относятся силы гидростатического давления воды, попадающей в трещины, и силы динамического воздействия от взрывных работ и движущегося горно-транспортного оборудования.

Динамическое воздействие от взрывных работ приводит к кратковременному знакопеременному колебанию массива горных пород в момент прохождения упругих волн, частота колебаний которых в скальных породах составляет 20-80 Гц. При скорости распространения упругих волн в трещиноватом массиве ~3000-4000 м/с протяженность полуволны упругих колебаний составляет 25-75 м [3]. Это означает, что при оценке динамического влияния взрывных работ на устойчивость уступа или отдельного блока можно использовать возникающие в массиве сейсмические ускорения. Учитывая инерционность, т.е. массу потенциально опасного блока, а также незначительную длительность импульсов сейсмических ускорений можно ожидать, что только динамическое воздействие вряд ли приведет к значительным смещениям и потере устойчивости крупного блока. Такое обрушение возможно только в том случае, если к моменту динамического воздействия блок породы находится в состоянии, близком к предельному, за счет действия иных сил.

Для количественной оценки динамического воздействия на устойчивость отдельных блоков взрывных работ и движущегося горно-транспортного оборудования необходимо проведение дальнейших исследований с целью уточнения геомеханической модели и параметров упругих волн от применяемых на карьере взрывов.

Реальной силой, которая может вызвать обрушение блока в рассматриваемых

условиях, является сила гидростатического давления поверхностных вод, попадающих в раскрытые трещины. Силы гидростатического давления не только создают опрокидывающий момент, но и до определенной глубины снижают до нуля удерживающие касательные напряжения.

Оценим возможность опрокидывания отдельного блока под действием сил гидростатического давления. Уравнение предельного равновесия моментов в этом случае имеет вид

$$\frac{\gamma_п}{2}(\Delta\ell \sin\beta + H\cos\beta)H\Delta\ell = \frac{\gamma_в h^3}{6},$$

где $\gamma_п$ и $\gamma_в$ – объемные веса породы и воды соответственно.

По данным съемки участка обрушения, произошедшего 19.04.2000 г. на Удачнинском карьере, $H = 17$ м, $\Delta\ell = 1{,}8$ м, $\beta = 95°$. В этих условиях уровень воды h в сформировавшейся ранее трещине, достаточный для образования вывала, составляет приблизительно 4,5 м. При учете удерживающих сил по западной боковой границе обрушившегося участка этот уровень увеличивается до 9 м.

Таким образом, выполненный анализ показывает, что попадание поверхностных вод в трещину и создаваемое гидростатическое давление является наиболее вероятной причиной произошедшего вывала.

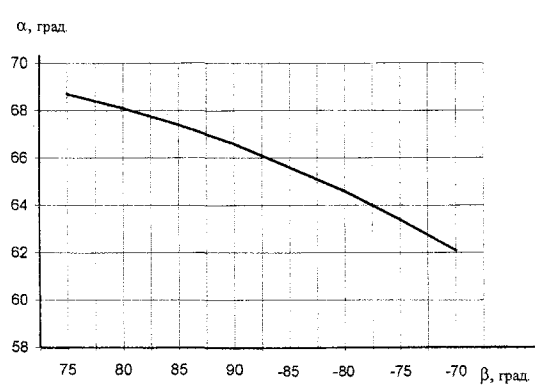


Рис.4. График зависимости рационального угла заоткоски верхней части уступа от угла падения слоев (отрицательные значения углов соответствуют падению поверхностей ослабления в сторону массива)

Основным мероприятием, направленным на предотвращение вывалов, является выполаживание угла откоса всего уступа или его верхней части. Выполаживание угла откоса уступа в верхней части приводит к уменьшению интенсивности выветривания горных пород и изменению баланса сил, действующих на потенциально опасные блоки пород, в результате этого вероятность образования вывала снижается [2].

Оценим угол откоса уступа, при котором в массиве пород с крутопадающими поверхностями ослабления образование вывалов в виде опрокидывания отдельного слоя (блока) породы под действием сил гидростатического давления не произойдет. Уравнения равновесия моментов сил, при условии полного заполнения трещин водой и измененной в результате выполаживания откоса формой потенциально опасного блока, можно представить в следующем виде:

$$\operatorname{ctg}^2\alpha \sin\beta + \left(\sqrt{2}-1\right)\cos\beta\operatorname{ctg}\alpha = \frac{\sqrt{2}}{3}\frac{\gamma_в}{\gamma_п}.$$

Результаты определения рационального по условию образования вывалов угла откоса уступа α в зависимости от угла падения поверхностей ослабления β приведены на рис.4.

Как видно из приведенного графика, рациональный угол заоткоски на участке произошедшего вывала (при $\beta = -85°$) равен приблизительно 65°.

В условиях Удачнинского месторождения, где структурно-тектоническое

строение характеризуется, в основном, наличием крутопадающих протяженных поверхностей ослабления в виде трещин и тектонических нарушений, более вероятным в вертикальных уступах является обрушение породного блока в виде опрокидывания. Причем условия обрушения определяются уравнениями равновесия моментов сил.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Галустьян Э.Л.* Геомеханика открытых горных работ. М.: Недра, 1992. 272 с.

2. *Пустовойтова Т.К.* Обеспечение безопасности работ на бортах глубоких карьеров в сложных горно-геологических условиях / Т.К.Пустовойтова, А.Н.Гурин // Проблемы геодинамической безопасности / ВНИМИ. СПб, 1997. С.72-76.

3. *Фадеев А.Б.* Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах. М.: Недра, 1972. 136 с.

4. Internet . http: // labust.narod.ru/.