

УДК 622.235:535.2

*д.т.н., проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)*

УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И БАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Проведен анализ предыстории развития науки о горном давлении и присущих ей недостатков. Предлагается метод оценки устойчивости породного контура горной выработки путем введения локального нормированного критерия устойчивости (ЛНКР) ω . Исследованы законы концентрации напряжений на породном контуре выработки. Рассмотрена оптимальная форма выработки с учетом неоднородности прочностных свойств пород в кровле, почве и боках выработки и влияние наклонного залегания пластов. Сформулировано главное техническое противоречие горной геомеханики, показаны пути его преодоления. Обоснован метод выбора допустимого изменения формы выработки с позиций обеспечения ее устойчивости. Сформулированы и обоснованы фундаментальные закономерности (ФЗ) проявлений горного давления с учетом кинетики его развития, а не как статическое равновесие пород в существующих подходах.

Ключевые слова: горная выработка, проявления горного давления, породный контур, устойчивость пород, оптимальная форма выработки, локальный критерий разрушения, неоднородность, кровля, почва, бока, горная геомеханика, фундаментальные закономерности.

1 Из истории развития науки о горном давлении

Ещё со времён промышленной революции (XVIII–XIX вв.), начало которой было связано с изобретением эффективного парового двигателя Дж. Уаттом в Англии во второй половине XVIII века, горная промышленность из-за резко возросшего объема добычи полезных ископаемых столкнулась с проблемой обеспечения безопасности подземных работ. В первую очередь это было связано с опасными обрушениями пород в горные выработки, которые происходили в массовых масштабах и часто сопровождалась гибелью горняков.

Вот почему горные инженеры и ученые настойчиво пытались создать методы расчета проявлений горного давления (ПГД), прогноза поведения пород и способы предотвращения их обрушения в горных выработках. Как очевидная действенная мера повышения безопасности работы стала горная крепь различных конструкций. Опыт подземных работ и анализ обрушений пород показал, что вокруг выработки образуются зоны разрушенных пород, которые оказывают давление на крепь горных выработок.

Уже в середине XIX в. возобладала точка зрения, что после своего образования контуры зоны обрушения приобретают устойчивую форму, что дало основание называть их сводами естественного равновесия (далее — СЕР).

Различные ученые по-разному пытались предугадать размеры и вес сводов обрушения, чтобы определить возможную нагрузку на крепь со стороны разрушенных пород. Научно обоснованные гипотезы о проявлениях горного давления (ПГД) разной степени достоверности стали появляться в разных странах с середины XIX в.

Вначале, когда глубины ведения горных работ были малыми, полагали, что на крепь выработки давит полный вес столба породы над ней. Шульц (1867) рассматривал пласты породы в кровле выработки как изгибающуюся балку. Греггер (1881) пытался определить давление на крепь по излому установленной крепи.

Затем горные инженеры пришли к выводу, что над выработкой образуется свод естественного равновесия, в пределах которого породы передают свой вес на крепь. В. Риттер (1879) определял уравне-

ние кривой свода оторвавшихся от массива пород, давящего на крепь под собственным весом.

Энгессер (1882) на основе лабораторного моделирования сводообразования в сыпучих телах определил условия образования сводов, считая их форму параболической. Фейоль (1885) провел лабораторные опыты и шахтные наблюдения за изгибом и расслоением пластов на различном удалении от кровли.

Биргбаумер (1992) предполагал, что на крепь выработки давит вес жесткого столба пород над выработкой, который частично удерживается боковыми силами трения. Манцель (1894) показал наличие в породном массиве значительных напряжений, способных разрушить любую крепь.

Янсен (1895) решил дифференциальное уравнение равновесия сыпучего в силосе с учетом боковых распорных напряжений. Коммерель (1912) считал, что своды имеют параболическую форму и их высоту следует определять по прогибу кровли выработки.

Протодяконов М. М. (1908) предложил свою гипотезу и расчетный метод определения высоты параболического свода над выработкой и давления его на крепь [1]. Метод расчета Протодяконова М. М. оказался настолько удачным и доступным, что его использовали более 50 лет, вплоть до появления новых подходов с использованием методов механики сплошной среды.

Однако преимущества упрощенных подходов, оправданные отсутствием должной лабораторной и теоретической базы, не могли компенсировать существенных их ограничений, поскольку в них отсутствовали или устарели представления о физических механизмах развития ПГД, не было содержательной теоретической базы и обоснованной расчетной схемы взаимодействия массива с крепью, а принятые критерии ПГД (например, абсолютное смещение пород контура выработки U , что предлагал еще Шульц в 1867 г.!) не являются инвариантами и отражают одно

из *последствий* ПГД, а не исходную его *причину* и т. д.

Переход на большие глубины освоения подземного пространства и ведение горных работ в сложных горно-геологических условиях (ГГУ) вскрыл несостоятельность существующих подходов и поставил задачу их кардинального изменения.

Если ранее стремились прогнозировать отдельные статические параметры ПГД (ожидаемое смещение пород кровли или почвы, нагрузку на крепь, вес вывала и пр.), то теперь особенно важно установить основные закономерности, которым подчиняются *процессы* деформирования и разрушения пород вокруг выработки. Поэтому в настоящее время следует перейти от статической картины равновесия пород над выработкой к исследованию развития горного давления во времени, т. е. изучению процессов разрушения и деформирования пород вокруг подземного объекта.

Закономерности развития ПГД должны обладать достаточной общностью для охвата всего многообразия ПГД и в то же время информативностью и конкретностью с целью обоснования расчетных схем и области их применения. Основываясь на этих базовых закономерностях, можно, без опасения совершить критическую ошибку, развивать расчетные методы прогнозирования горного давления.

Несмотря на это, в настоящее время в отечественной проектной практике расчета горного давления возобладал упрощенный, главным образом эмпирический подход, типичным представителем которого стал нормативный документ по проектированию подземных горных выработок [2] и его последующие модификации. Он появился в 1980-х гг. и используется в странах СНГ проектными и производственными организациями с некоторыми несущественными коррективами вплоть до настоящего времени.

Основным достоинством этого нормативного документа [2] и его различных вариаций является предельная простота и

доступность использования, отсутствие требований по проведению инструментальных инженерных изысканий для определения свойств и исходного напряженно-деформированного состояния горного массива. Такие методы отличаются минимальной потребностью в исходных данных, низким уровнем требований к квалификации проектировщика.

К числу явных недостатков эмпирических методов прогноза ПГД следует отнести недостаточность или полное отсутствие теоретического обоснования, нечеткость причинно-следственных связей, игнорирование статистического разброса исходных данных и неявное чрезмерное завышение коэффициентов запаса прочности. Последнее ведет к преобладанию ошибок проектирования II рода (преувеличение опасности ПГД). Если такие документы в своей расчетной части в какой-то мере соответствовали началу XX в., то к настоящему времени они явно устарели.

Поэтому до сих пор остается актуальной первая задача горной геомеханики — разработка методов прогноза ПГД, после удовлетворительного решения которой можно более уверенно приступить к решению второй задачи горной геомеханики — разработке способов и средств управления устойчивостью подземных выработок.

Цель исследований — изучение устойчивости горной выработки; **объект** — проявления горного давления в подземных выработках; **предмет** — закономерности разрушения горных пород на породном контуре и базовые законы проявлений горного давления.

Задачи исследований:

– изучить устойчивость породного контура горных выработок с помощью локального нормированного критерия разрушения;

– выявить особенности концентрации напряжений на породном контуре;

– определить условия обеспечения устойчивости выработки за счет оптимальной ее формы;

– выявить технические противоречия горной геомеханики и технологии;

– изучить фундаментальные закономерности развития проявлений горного давления.

2 Устойчивость подземных горных выработок

Чтобы судить об устойчивости горной выработки, следует обосновать исходные положения по описанию поведения пород в окружающем горном массиве и выбрать для этого соответствующие параметры.

Для адекватного представления разрушения пород вокруг выработки нами [3] предложен удобный безразмерный параметр — локальный нормированный критерий разрушения (ЛНКР) ω , позволяющий сопоставлять действующие напряжения с прочностью пород в рассматриваемой точке массива:

$$\omega = F_{\sigma}(\sigma_{ij}) / F_c(\sigma_{ij}, c_{ij}), \quad (1)$$

где $F_{\sigma}(\sigma_{ij})$ — функция действующего тензора напряжений σ_{ij} в данной точке массива, Па;

$F_c(\sigma_{ij}, c_{ij})$ — функция, вычисляемая в соответствии с теорией прочности пород [10], зависит от тензора действующих напряжений σ_{ij} и параметров прочности c_{ij} . Согласно аналитической теории прочности параметрами прочности c_{ij} породы будут когезия отрыва σ_0 , когезия сдвига τ_0 и коэффициент хрупкости α .

Исходное уравнение аналитической теории прочности [4] для однородной породы без трещин имеет вид

$$[\tau_{nt}] = \tau_0 \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0} + 1 \right)^{\alpha}, \quad (2)$$

где $[\tau_{nt}]$ — допустимое напряжение сдвига на площадке nt при действии нормального напряжения σ_n на этой площадке (рис. 1).

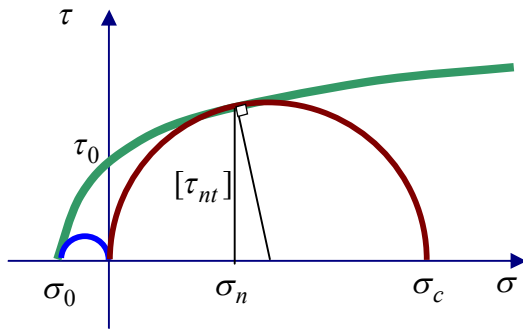


Рисунок 1 Паспорт прочности породы в терминах аналитической теории прочности по уравнению (1)

Для наиболее распространенных случаев одноосного нагружения приконтурного массива горных пород критерий ω принимает более простой вид. Из формулы (1) следует

$$\omega = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_c} > 0, \quad \omega = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_p} < 0, \quad (3)$$

где σ_θ — тангенциальное (окружное) напряжение на контуре выработки;

σ_c, σ_p — показатели прочности породы на одноосное сжатие и растяжение.

Предложенный критерий ЛНКР ω позволяет удобно описать целый ряд важных состояний породы при её нагружении напряжениями различных знаков. Действительно, как будет видно из последующего изложения, устойчивость окружающего породного массива во многом будет зависеть от начала и особенностей развития разрушения породного контура подземной выработки под действием напряжений различных знаков. При этом оказывается, что формы ПГД и этапы их последующего развития отнюдь не единообразны (как считалось ранее), а являются весьма изменчивыми, что заметно влияет на устойчивость подземных выработок и требует разработки различных расчетных схем прогноза ПГД.

В таблице 1 показано, как значения критерия ω определяют особенности поведения и механизмы разрушения пород-

ного контура горной выработки: устойчивость, разрушение от сжатия или растяжения. Но если разрушение под действием растягивающих напряжений всегда вызывается трещинами разрыва, то при сжатии хрупкие породы, у которых прочность на растяжение в разы меньше, чем прочность на сжатие $\sigma_p \ll \sigma_c$, начинают разрушаться внутренними трещинами раскола вдоль направления действия сжимающих напряжений (пинч-эффект [5]), а лишь затем — трещинами сдвига. Именно пинч-эффектом можно объяснить разделение породы трещинами раскола на отдельные слои и их совместное выдавливание в выработку по механизму продольно-поперечного изгиба.

Критерий ω по модулю $|\omega|$ допускает еще одну трактовку: он показывает вероятность разрушения материала при его нагружении. Чем ближе по модулю ω к единице, тем меньше запаса прочности остается у материала, а при $|\omega| \geq 1$ материал (порода) теряет прочность и переходит в разрушенное состояние.

Проанализируем, как можно использовать критерий для суждения о состоянии породного контура горной выработки. Для этого рассмотрим (рис. 2) условную горную выработку эллиптической формы с горизонтальной и вертикальной полуосями в неравномерно нагруженном массиве пород.

Таблица 1
Поведение породы при разных значениях критерия ЛНКР ω

Пределы изменения ЛНКР ω	Особенности разрушения пород
$-1 < \omega < 1$	породный контур устойчив, разрушение отсутствует
$1 \leq \omega$	разрушение от сжатия трещинами раскола (пинч-эффект) вдоль σ_θ , а затем сдвиговыми трещинами под углом $45^\circ \pm \rho/2$
$\omega \leq -1$	разрушение от растяжения бегущими трещинами отрыва, перпендикулярными σ_θ

Пусть вертикальная равномерная нагрузка по оси y равна $\sigma_y = p$, а горизонтальная по оси x равна $\sigma_x = \lambda p$, где $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$ — коэффициент бокового распора массива, равный соотношению действующих в массиве горных пород исходных напряжений.

Воспользуемся решением теории упругости (несколько преобразовав его для удобства дальнейших трактовок) о распределении тангенциальных (окружных) напряжений σ_θ на контуре эллиптической выработки (отверстия). Пусть действуют внешние нагрузки по вертикали $\sigma_y = p$ и по горизонтали $\sigma_x = \lambda p$ (здесь p — вес вышележащей толщи пород). Сразу отметим, что радиальные σ_r и касательные $\tau_{r\theta}$ напряжения на контуре неподкрепленного отверстия всегда равны нулю $\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0$, тогда окружные напряжения можно вычислить по формуле

$$\sigma_\theta = p \left[1 + \lambda - 2 \frac{(b_a - \lambda)(b_a \cdot \operatorname{tg}^2 \theta - 1)}{b_a^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \theta + 1} \right], \quad (4)$$

где $b_a = b/a$ — соотношение вертикальной b и горизонтальной a полуосей эллипса (рис. 2).

Рассмотрим особенности распределения окружных σ_θ напряжений по контуру выработки. Как следует из (4), окружные напряжения σ_θ зависят от соотношения b_a горизонтального и вертикального диаметров эллиптической выработки и коэффициента бокового распора массива λ .

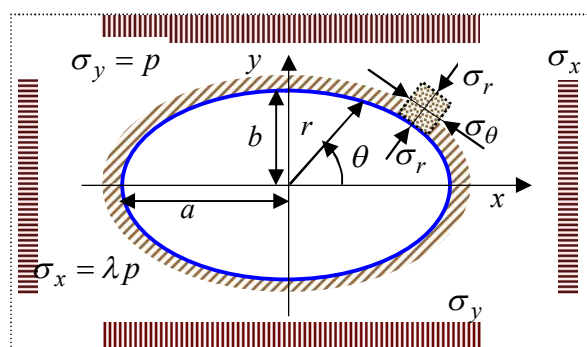


Рисунок 2 Расчетная схема определения напряжений вокруг эллиптической выработки

Ориентируясь на реальный диапазон возможного изменения коэффициента бокового распора λ для условий шахт Донбасса от 0,25 до 2, изучим влияние бокового распора λ на концентрацию напряжений σ_θ / p .

Вначале исследуем изменение σ_θ / p вокруг круглой выработки, у которой $b_a = 1$, при изменении λ (рис. 3). Из всех графиков выделен толщиной линии тот, для которого коэффициент бокового распора $\lambda = 0,5$. Именно это значение λ часто близко к реальному в горных массивах Донбасса.

Как видно из графиков (рис. 3), в круглой выработке максимальное значение σ_θ / p возникает на горизонтальной оси ($\theta = 0, 180^\circ$) и изменяется в пределах от 1,0 (при $\lambda = 2$) до 2,75 (при $\lambda = 0,25$). На вертикальной оси выработки (в кровле и почве $\theta = \pm 90^\circ$) концентрация напряжений σ_θ / p составляет от $-0,5$ (растяжение) при $\lambda = 0,25$ до 6 при $\lambda = 2$.

Построим графики изменения σ_θ / p при фиксированном $\lambda = 0,5$ в зависимости от соотношения a_b горизонтальной a и вертикальной b полуосей эллипса (рис. 4). При этом, ввиду симметричности графиков, будем их отражать лишь на верхней половине эллипса $0 \leq \theta \leq \pi$.

Полученные зависимости показывают строгую последовательность изменения концентрации напряжений: по мере роста ширины выработки $0,25 \rightarrow b_a \rightarrow 2,0$ происходит рост концентрации напряжений σ_θ / p в боках выработки ($\theta = 0, \pi$) от 0,5 до 4 и ее одновременное снижение в кровле и почве $\theta = \pm \pi / 2$ соответственно от 8 до 1. В круглой выработке концентрация по всему контуру постоянна и равна $\sigma_\theta / p = 2,0$.

Анализ полученных результатов (рис. 3, 4) показывает, что при столь высоких концентрациях напряжений $\sigma_\theta / p > 1,5 \dots 2$ уже на средних глубинах разработки породный контур будет разрушен даже в породах средней прочности.

Наибольший интерес представляет изменение концентрации приконтурных на-

пряжений σ_θ/p при разных напряженно-деформированных состояниях (НДС) горного массива $\lambda = \text{var}$, а особенно для наиболее распространенных форм выработки с соотношением ширины a к высоте b $a/b=1,5\dots 2,0$.

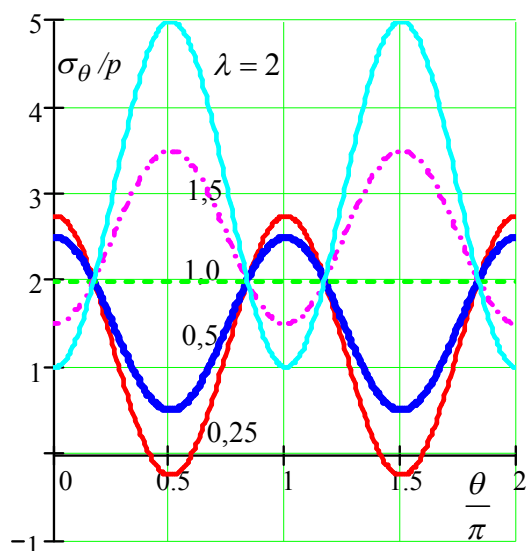


Рисунок 3 Концентрация напряжений σ_θ/p на контуре круглой выработки при изменении коэффициента бокового распора $0,25 < \lambda < 2$

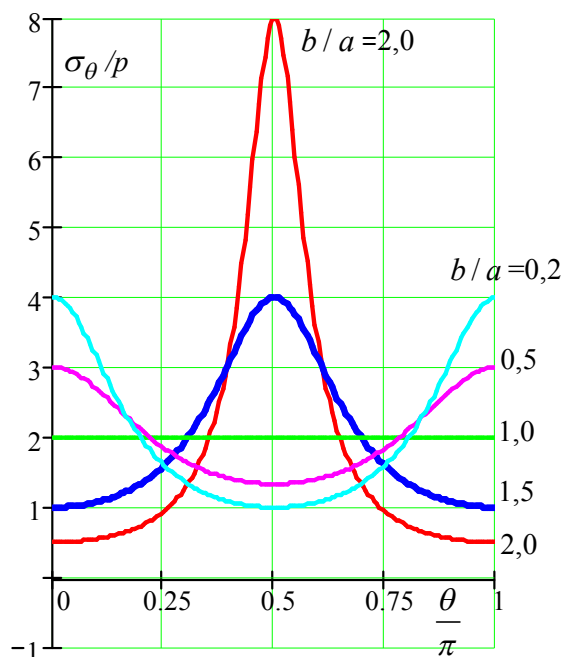


Рисунок 4 Влияние формы эллиптической выработки $0,25 \leq b/a \leq 2,0$ на приконтурную концентрацию напряжений σ_θ/p

На рисунке 5 показаны графики концентрации приконтурных напряжений для эллиптических выработок, у которых $a/b=1,5$ и $2,0$, а коэффициенты бокового распора массива пород изменяются в пределах $\lambda=0,25; 0,5; 0,75$, характерных для средних глубин разработки шахт Донбасса (300...700 м).

3 Оптимальная форма выработки

Вполне закономерен вопрос оптимизации формы горной выработки, т. е. выяснить, при какой форме выработки концентрация напряжений будет наиболее благоприятной для ее устойчивости.

В терминах введенного понятия локального нормированного критерия разрушения (ЛНКР) ω на контуре выработки очевидное и наиболее общее условие оптимальности формы выработки исходит из условия обеспечения равной вероятности устойчивости всех точек ее контура. Отсюда следует, что условие оптимальности формы горной выработки требует, чтобы на всем протяжении контура выработки соблюдалось постоянство критерия ЛНКР $\omega = \text{Const}$.

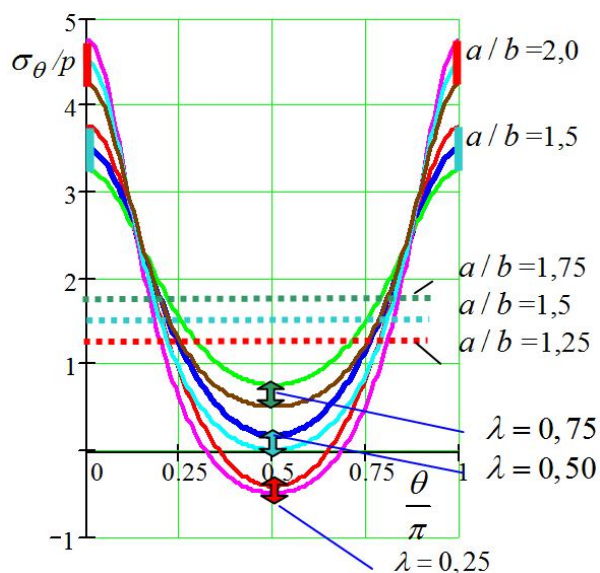


Рисунок 5 Исследование концентрации напряжений σ_θ/p в выработках типовой формы ($a/b=1,5$ и $2,0$) и при разных условиях нагружения массива $\lambda = 0,25; 0,5; 0,75$

Воспользуемся формулой (2) для критерия ω в приконтурной области горной выработки, где породы находятся в плоскодеформированном $\varepsilon_z = 0$ и плосконапряженном $\sigma_r = 0$ состоянии (где z — координата вдоль оси выработки).

Если породы однородны и изотропны, т. е. в них отсутствуют структурные неоднородности и слоистость, то их прочностные свойства будут одинаковы во всех точках контура. Из этого следует, что сформулированный выше критерий оптимальности формы значительно упрощается и сводится к необходимости выполнения равенства

$$\omega = Const \Rightarrow \sigma_\theta = Const. \quad (5)$$

Возвращаясь к формуле (4), можно заключить, что требуемое условие $\sigma_\theta = Const$ возможно лишь при равенстве нулю второго слагаемого в скобках, что обеспечивается равенством нулю множителя в скобках

$$(b_a - \lambda) = 0. \quad (6)$$

Окончательно получаем после подстановки $b_a = b/a$ оптимальное соотношение полуосей эллиптической выработки:

$$\left. \frac{b}{a} \right|_{opt} = \lambda. \quad (7)$$

Оптимальная форма горной выработки в однородных породах — это эллипс со строго заданным соотношением вертикальной b и горизонтальной a полуосей.

Таким образом, исходное напряженное состояние массива, которое удобно задавать с помощью коэффициента бокового распора λ , диктует нам ту форму выработки, при которой она будет наиболее устойчивой.

Во всех точках породного контура эллиптической выработки по всему её периметру тангенциальные напряжения, как следует из формулы (3), одинаковы и равны

$$\sigma_\theta = p(1 + \lambda). \quad (8)$$

Следует подчеркнуть, что условие оптимальности (7) справедливо лишь для выработок эллиптической формы и только при однородных вокруг нее породах. Последнее допущение выполняется редко, поскольку в слоистых неоднородных породах их прочности в кровле $[\sigma_\kappa]$ и боках $[\sigma_\delta]$ существенно различаются. Как правило, даже для породы в одном и том же пласте существует заметная разница (в 2–4 и более раз) прочностей на сжатие перпендикулярно и параллельно напластованию. При пологом залегании пластов в кровле и почве выработки породы будут сжаты параллельно напластованию, а в боках — перпендикулярно, поэтому соотношение прочностей в боках и кровле выработки, как правило, удовлетворяет неравенству $[\sigma_\delta] \gg [\sigma_\kappa]$.

Очевидно, что условие (7) оптимальности формы выработки в этом случае непригодно и его необходимо заменить другим, менее жестким и требующим лишь равенство критериев ЛНКР ω в четырех точках контура на горизонтальной и вертикальной осях эллиптической выработки, т. е.

$$\omega|_{\theta=0} = \omega|_{\theta=\pi/2}, \quad (8)$$

или, раскрывая значения ω с учетом прочности пород в кровле $[\sigma_\kappa]$ и боках $[\sigma_\delta]$ выработки, получим

$$\left. \frac{\sigma_\theta}{[\sigma_\delta]} \right|_{\theta=0} = \left. \frac{\sigma_\theta}{[\sigma_\kappa]} \right|_{\theta=\pi/2}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (4) и решая полученное квадратное уравнение, приходим к следующему выражению:

$$\left. \frac{b}{a} \right|_{opt} = \frac{1}{4\lambda} \left[\sqrt{16S_\delta^K \lambda + F(S_\delta^K, \lambda)^2} + F(S_\delta^K, \lambda) \right], \quad (10)$$

где $F(S_\delta^K, \lambda) = (S_\delta^K + 1)(1 - \lambda)$;

$S_\delta^K = [\sigma_\kappa] / [\sigma_\delta]$ — отношение показателей прочности пород на сжатие в кровле и боках выработки.

Нетрудно убедиться, что в однородных породах, когда $S_{\delta}^k = 1$, уравнение (10) совпадает с ранее полученным выражением (7). Если породы неоднородны и соотношение прочностей $S_{\delta}^k \neq 1$, то в равномерно (гидростатически) нагруженном массиве пород при коэффициенте бокового распора $\lambda = 1$ оптимальное соотношение размеров выработки оказывается равным

$$\left. \frac{b}{a} \right|_{opt} = \sqrt{S_{\delta}^k} = \sqrt{\frac{[\sigma_k]}{[\sigma_{\delta}]}}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что если прочность пород в кровле меньше, чем в боках, то выработке следует придать более «приземистую» форму, и наоборот. Поскольку при пологом залегании пластов, как правило, $[\sigma_k] \ll [\sigma_{\delta}]$, то получает оправдание принятый в практике сооружения выработок выбор их прямоугольной или сводчатой формы, при которой ширина больше высоты $a > b$.

На рисунке 6 показаны графики, позволяющие более обоснованно выбрать общую конфигурацию контура выработки в зависимости от соотношения прочностей в кровле и почве S_{δ}^k и коэффициента бокового распора массива λ .

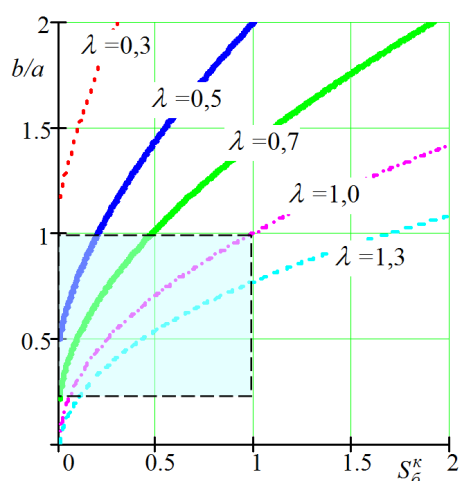


Рисунок 6 Выбор предпочтительной формы выработки b/a в зависимости от соотношения прочностей пород в кровле и боках S_{δ}^k при разных значениях λ

Из графиков рисунка 6 следует, что при пологом падении, когда $[\sigma_k] \ll [\sigma_{\delta}]$ и $\lambda < 1$ предпочтительнее выработки с высокой, меньшей ширины $b < a$. Область с наиболее устойчивыми соотношениями размеров на рисунке 6 выделена цветом.

Сделанные выводы подтверждаются и графиками на рисунке 7, где по заданным соотношениям S_{δ}^k и λ можно выбрать наиболее выгодную форму выработки b/a . При этом оказывается, что далеко не всегда следует придерживаться классической формулы (7).

Из графиков рисунков 6 и 7 можно получить общую закономерность, которая будет определяющей при выборе соотношения размеров выработки b/a : чем меньше прочность пород в кровле (почве) и коэффициент бокового распора λ , тем более «приземистой» должна быть выработка, т. е. $b/a < 1$.

Возможен еще один случай, когда на контуре выработки различаются прочности в кровле и почве выработки $[\sigma_k] \neq [\sigma_n]$, а прочность в боках $[\sigma_{\delta}]$ принимает промежуточное значение. Тогда из условия наиболее равномерного значения ЛНКР по всему контуру выработки получим разные полуоси эллипсов для кровли и почвы. Оптимальная выработка приобретет овальную форму, более вытянутую в сторону меньшей прочности либо вверх (рис. 8), либо вниз.

Наиболее часто встречающееся в Донбассе при пологом залегании пород соотношение прочностей вокруг горной выработки $[\sigma_{\delta}] > [\sigma_k] > [\sigma_n]$ даже при гидростатическом нагружении горного массива, когда коэффициент бокового распора $\lambda = 1$, вызывает необходимость, согласно (10) и (11), существенно изменить форму выработки от круглой 1 до овальной 2 (рис. 8). Именно такая форма сводчатого сечения и была выработана многолетней практикой ведения горных работ на «малых» глубинах разработки, где основным проявлением горного давления являются своды естественного равновесия (СЕР).

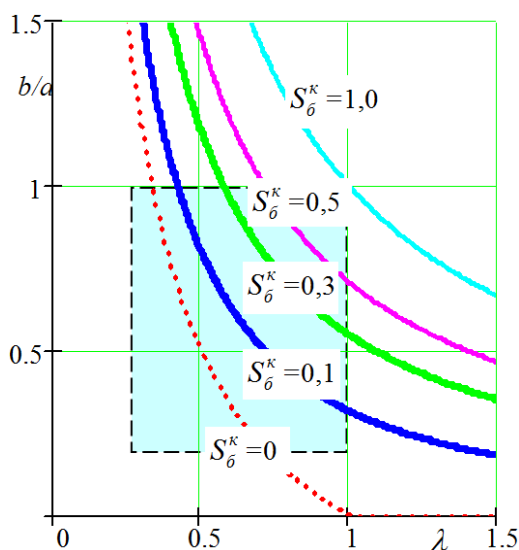


Рисунок 7 Выбор предпочтительной формы выработки b/a в зависимости от соотношения прочности пород в кровле и боках S_{σ}^k при разных значениях $0 \leq \lambda \leq 1,5$

Овальную или арочную (сводчатую) формы выработок, которые оправданы на малых глубинах разработки, повсеместно применяют и в настоящее время при креплении горных выработок. Однако, когда горное давление проявляется в виде зон запредельного разрушения пород («большие» глубины), следует переходить к прямоугольным формам выработки 3 (рис. 8).

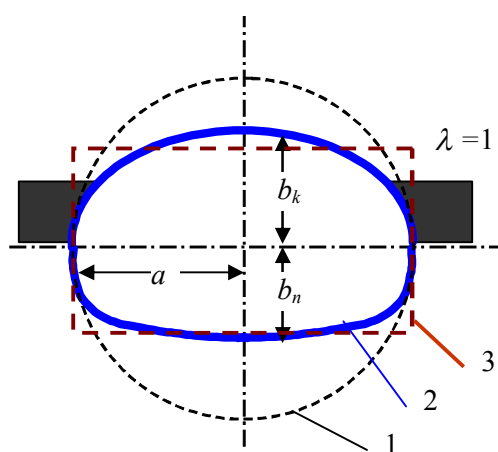


Рисунок 8 Выбор формы выработки при разных соотношениях прочности пород в кровле, почве и боках $[\sigma_{\sigma}] > [\sigma_k] > [\sigma_n]$ при $\lambda = 1$

Прямоугольная форма имеет бесспорные технологические и экономические преимущества перед арочной и является безальтернативной для пологого залегания слоистых пород.

Если залегание пластов наклонное, то ранее вертикальная ось оптимальной формы выработки вследствие прочностной анизотропии будет повернута и ориентирована по нормали к напластованию пород.

4 Техническое противоречие горной геомеханики и технологии

Понятие оптимальной формы горной выработки является определяющим критерием оценки направленности развития проявлений горного давления, который в более простом виде можно сформулировать так: если разрушение пород приводит к тому, что новый контур выработки приближается к оптимальной форме, то следует считать, что устойчивость выработки по мере ее формоизменения повышается, в противном случае устойчивость выработки снижается.

Значение коэффициента бокового распора в большинстве горнопромышленных регионов, в том числе и в Донбассе, чаще всего удовлетворяет неравенству $\lambda < 1$. Тем самым оказывается, что оптимальная форма выработки в однородных породах с позиций теории согласно (7) должна иметь соотношение размеров $b/a = \lambda < 1$. Значит, ширина выработки a должна быть меньше, чем высота b , т. е. $b > a$. Такая выработка должна быть «узкой и высокой». В то же время технологические и функциональные требования, вытекающие из необходимости размещения оборудования и полезного использования сечения, однозначны: выработка должна быть «низкой и широкой», т. е. $b < a$.

ГЛАВНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОТИВОРЕЧИЕ:	требования геомеханики $b > a$
	требования технологии $b < a$

Таким образом, требования теории горной геомеханики и требования технологии, вытекающие из практики использования выработки, являются взаимно исключаящими (антагонистическими). В этом состоит смысл главного технического противоречия горной геомеханики.

Пока горные работы велись на относительно небольших глубинах (до 300...400 м) и в сравнительно благоприятных горно-геологических условиях, интенсивность проявлений горного давления была низкой, и нарушение закона оптимальности формы выработки не приводило к резкому ухудшению ее устойчивости.

Но затем, по мере перехода на большие глубины, положение коренным образом изменилось: устойчивость большинства выработок стала угрожающе низкой, а расходы на их ремонты и укрепления — чрезмерными. Решение этой проблемы оказалось невозможным в рамках старых представлений о ПГД.

Как же и в каких случаях меняется форма выработки при разрушении породного контура, удаляется ли она от оптимальной (7) или приближается?

Основываясь на экспериментальных данных и теоретических исследованиях [5], впервые удалось установить важные законы перераспределения напряжений σ_θ при разрушении и формоизменении контура выработки.

Для этого введем дополнительное понятие о форме выработки, которая «эквивалентна» реальной (рис. 9).

Под эквивалентной выработкой будем понимать условный равновеликий эллипс с той же площадью $A_3 = A$ и тем же соотношением высоты и ширины, т. е.

$$a_3 / b_3 = a / b, \quad (12)$$

при этом, поскольку площадь эллипса

$$A_3 = \pi \cdot a_3 \cdot b_3 = A, \quad (13)$$

можно легко найти размеры полуосей эквивалентного эллипса a_3, b_3 :

$$a_3 = \sqrt{\frac{A \cdot a}{\pi \cdot b}}, \quad b_3 = \sqrt{\frac{A \cdot b}{\pi \cdot a}}, \quad (14)$$

где A, A_3 — площади выработки и эквивалентного ей эллипса сравнения;

a, b, a_3, b_3 — горизонтальная и вертикальная полуоси соответственно реальной выработки и эллипса сравнения.

В работе [5] нами было показано, что тангенциальные напряжения σ_θ на контуре выработки **линейно зависят** от приведенной кривизны χ_i ($i = 1, 2, \dots, 8$) реального контура выработки, которая вычисляется по формуле

$$\chi_i = (R_i^3 / R_i^k)^{2/3}, \quad (15)$$

где $i = 1, 2, \dots, 8$ — характерные точки на контуре горной выработки, где методом [5] определяются тангенциальные напряжения σ_θ ;

R_i^3, R_i^k — радиусы кривизны эллипса сравнения и контура выработки в точках i .

Кривизна эллипса R_i^3 в характерных точках i определяется по известным формулам

$$R_1^3 = R_5^3 = \frac{b_3^2}{a_3}; \quad R_3^3 = R_7^3 = \frac{a_3^2}{b_3}, \quad (16)$$

$$R_3^3 = R_7^3 = R_3^3 = R_7^3 = \frac{1}{a_3 b_3} \left[\frac{a_3^2 + b_3^2}{2} \right]^{\frac{3}{2}},$$

а кривизну породного контура R_i^k в каждой точке определяем из заданного сечения горной выработки.

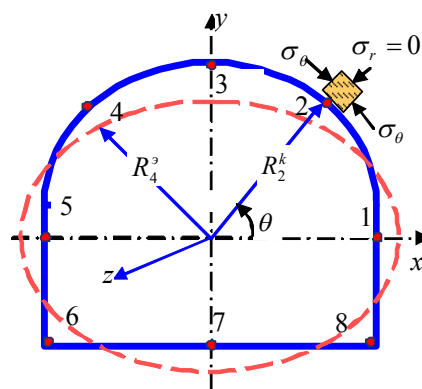


Рисунок 9 Математическая модель [5] определения напряжений на контуре выработки произвольной формы

Практический интерес представляет собой вопрос о допустимом диапазоне выбора формы выработки с гарантированным устойчивым контуром. Для решения этой задачи рассмотрим условия обеспечения устойчивости (т. е. отсутствие разрушений породы) в двух наиболее ответственных направлениях: вертикальном и горизонтальном. Вновь обратимся к уравнению (4), которое позволяет сформулировать соответствующие неравенства с условиями прочности:

а) для точек контура 1, 5 на горизонтальной оси при $\theta_{1,5} = 0, \pi$ (рис. 9):

$$\frac{[\sigma_c]}{p} \geq \frac{\sigma_\theta}{p} = 1 - \lambda + 2b_a; \quad (17);$$

б) для точек контура 3, 7 на вертикальной оси выработки при $\theta_{3,7} = 0, 5\pi; 1, 5\pi$:

$$\frac{[\sigma_p]}{p} \geq \frac{\sigma_\theta}{p} = -1 + \lambda + 2\lambda / b_a, \quad (18)$$

где $[\sigma_c]$, $[\sigma_p]$ — прочность породы в боках на сжатие и в кровле (почве) выработки на растяжение, МПа.

Тогда из неравенств (17) и (18) следуют условия выбора соотношения размеров выработки по вертикали и горизонтали b/a в виде следующих условий:

а) для кровли выработки — отсутствие разрушений от растяжения:

$$\frac{b}{a} \geq 2\lambda \left(\frac{[\sigma_p]}{p} + 1 - \lambda \right)^{-1}; \quad (19)$$

б) для боков выработки — нет разрушения пород на сжатие:

$$\frac{b}{a} \leq \frac{1}{2} \left(\frac{[\sigma_c]}{p} - 1 + \lambda \right). \quad (20)$$

Наглядное представление об этих ограничительных условиях, которым должна удовлетворять форма выработки для сохранения устойчивости, дают графики рисунка 10, построенные согласно уравнениям (19) и (20).

Рассмотрим простой пример: пусть прочность пород на сжатие в боках выработки равна $[\sigma_c] = 1,5p$, а $\lambda = 0,5$. Тогда соотношение размеров выработки для сохранения ее боков должно быть, согласно рисунку 10, для боков $b/a > 0,5$ и для кровли при $[\sigma_r] = 0,5p$ значительно больше $b/a > 1$. Необходимо выбрать для большей устойчивости значение $b/a > 1$.

Отметим, что и для кровли, и для боков увеличение высоты выработки приводит к уменьшению концентрации напряжений, т. е. к повышению устойчивости породного контура. Здесь опять подтверждается главное соотношение геомеханики: устойчивость контура тем выше, чем ближе соотношение его размеров к идеальному (7).

5 Фундаментальные закономерности развития ПГД

При разрушении породного контура происходит изменение приведенной кривизны χ_i в разных его точках i : на одних участках она увеличивается, на других — уменьшается.

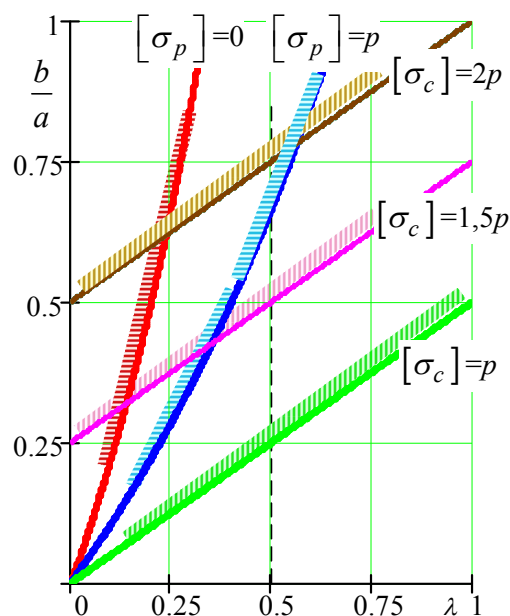


Рисунок 10 Определение областей устойчивости выработки по соотношению ее размеров b/a и коэффициента бокового распора λ

При этом соблюдается важная закономерность: если кривизна χ_i породного контура при разрушении увеличивается, то на этом участке тангенциальные напряжения σ_θ возрастают, а при уменьшении кривизны χ_i — снижаются вплоть до перехода через нуль и появления растягивающих напряжений (с учетом знаков: плюс для сжимающих и минус для растягивающих напряжений). Этот обобщенный закон позволил обосновать фундаментальные закономерности, которым подчиняются все известные формы ПГД [11].

Фундаментальные закономерности (ФЗ) рассматривают не статическое равновесие пород, как это делалось в предложенных ранее различных классификациях горного давления, а развитие (кинетику) процессов разрушения контура, определяющих особенности его формоизменения. ФЗ подтверждены экспериментально и аналитически и допускают достаточно простую и интуитивно понятную формулировку.

I фундаментальная закономерность (ФЗ-I). При разрушении пород вокруг выработки от растягивающих напряжений:

– концентрация напряжений вокруг нее снижается $\sigma_\theta / p \Rightarrow \searrow$;

– критерий ЛНКР $\omega_-^* = \sigma_\theta / [\sigma_p] < 0$ по модулю уменьшается по всему контуру $|\omega_-^*| \Rightarrow \searrow$, а с учетом знака $0 > \omega_-^* \Rightarrow \nearrow$;

– форма выработки в процесс разрушения приближается к оптимальной $a/b \Rightarrow (a/b)_{opt}$;

– скорость движения фронта хрупкого разрушения асимптотически падает до нуля: $V_{\Phi XP} = dr_{\Phi XP} / dt \Rightarrow 0$;

– разрушение останавливается, и окончательный контур разрушенных пород приобретает устойчивую форму в виде свода естественного равновесия (СЕР) $a/b \Rightarrow (a/b)_{СЕР} = Const$ (рис. 11).

Если выработка надлежащим образом закреплена, то в условиях **ФЗ-I** на крепь выработки оказывают давление породы, заключенные в своде естественного равно-

весия (СЕР). Крепь работает в режиме заданных нагрузок, которые не зависят от деформационных показателей крепи (от ее податливости).

Поэтому при СЕР можно использовать крепи самых разнообразных конструкций и режимов работы — нагрузки на них со стороны СЕР будут одинаковы. На рисунке 11 показан общий случай возникновения СЕР в кровле и (или) в почве выработки 1, своды формируются бегущими трещинами разрыва.

II фундаментальная закономерность (ФЗ-II). При разрушении пород вокруг выработки от сжимающих напряжений:

– концентрация напряжений на фронте разрушения повышается $\sigma_\theta / p \Rightarrow \nearrow$;

– критерий ЛНКР $\omega_+^* = \sigma_\theta / [\sigma_c]$ на участке разрушения контура возрастает $\omega_+^* \Rightarrow \nearrow$;

– форма нового контура выработки по мере разрушения пород удаляется от оптимальной $a/b \nrightarrow (a/b)_{opt}$, устойчивость ее снижается;

– по мере разрушения скорость движения фронта хрупкого разрушения растет $dV_{\Phi XP} / dt = d^2 r_{\Phi XP} / dt^2 \Rightarrow \nearrow$;

– выработка без особых мер по ее охране теряет устойчивость (происходит ее «завал») $b/a \Rightarrow 0$;

– при наличии крепи достаточного отпора $q \geq q_{min}$ формируется зона запредельных деформаций (ЗЗД) $(a/b) \nrightarrow (b/a)_{ЗЗД}$.

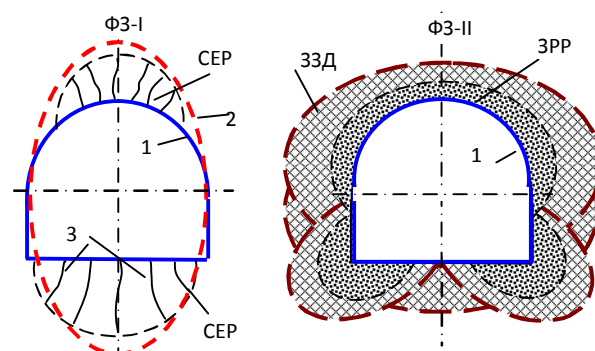


Рисунок 11 Горное давление в условиях I и II фундаментальных закономерностей

В условиях ФЗ-II (рис. 11) вокруг выработки возникает зона запредельных деформаций (ЗЗД), переходящая вблизи контура в зону «руинного» разрушения (ЗРР), нелинейно взаимодействующая с крепью. Нагрузка на крепь здесь существенно зависит от времени и условий её возведения, а также деформационно-силовых характеристик (ДСХ) конструкции.

Исследование и раскрытие этих закономерностей в различных условиях и составляет предмет изучения механики подземных сооружений. Отметим, что определение параметров взаимодействия зон ЗЗД и ЗРР с крепью относится к самым сложным проблемам геомеханики, которые до сих пор не нашли своего удовлетворительного решения.

Выводы

Анализ предыстории развития науки о горном давлении показал, что до настоящего времени доминирует полуэмпирический подход и противоречивые представления о проявлениях горного давления в подземных выработках.

Предлагается теоретический обоснованный метод оценки устойчивости породного контура горной выработки, базирующийся на использовании локального нормированного критерия устойчивости (ЛНКР) ω . Исследованы особенности распределения концентрации напряжений на породном контуре. Используется понятие об оптимальной форме выработки и впервые учтено влияние неоднородности прочностных свойств в кровле, почве и боках выработки, а также влияние наклонного залегания пластов.

Доказана допустимость не только овальной или арочной форм выработки, но и прямоугольной с оптимальным соотношением размеров. Сформулировано главное техническое противоречие горной геомеханики, показаны пути его преодоления. Обоснован метод выбора допустимого изменения формы выработки с позиций обеспечения ее устойчивости.

Сформулированы и обоснованы фундаментальные закономерности (ФЗ) проявлений горного давления в их развитии, а не как статическое равновесие пород в существующих классификациях горного давления.

Библиографический список

1. Протодьяконов, М. М. Давление горных пород и рудничное крепление [Текст] / М. М. Протодьяконов. — М. — Л. : Гостехиздат, 1934. — 104 с.
2. СНиП 3.02.03-84. Подземные горные выработки [Текст] / Госстрой СССР. — М. : ЦИТИ Госстрой СССР, 1985. — 15 с.
3. Литвинский, Г. Г. Расчет устойчивости породной поверхности горных выработок [Текст] / Г. Г. Литвинский // Устойчивость и крепление горных выработок : межвуз. сб. / Ленинград. горн. ин-т. — Л. : ЛГИ. — 1976. — Вып. 2. — С. 35–39.
4. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.
5. Литвинский, Г. Г. Инженерный метод оценки концентрации напряжений на контуре горных выработок различной формы [Текст] / Г. Г. Литвинский // Разработка месторождений полезных ископаемых : респ. межвед. науч.-техн. сб. — К. : Техника, 1974. — Вып. 38: Технология подземной разработки угольных месторождений. — С. 61–69.
6. Литвинский, Г. Г. Фундаментальные закономерности и новая концепция проявлений горного давления [Текст] / Г. Г. Литвинский // Науч. труды Донец. национ. технич. ун-та. Серия: Горно-геологическая. — Донецк, 2009. — Вып. 10 (151). — С. 21–28.
7. Litvinsky, G. Nova koncepcja i podstawowe prawidlowosci przejawow parcia skal [Text] / G. Litvinsky // Internation Mining Forum / Polska Akademia nauk, Akademia Górniczo-Hutnicza AGH. — Krakow, 2000. — S. 43–47.

*Рекомендована к печати зам. директора по науке РАНИМИ ДНР
д.т.н., проф. Дрибаном В. А.,
деканом горного факультета, к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТИ Шульгиным П. Н.*

Статья поступила в редакцию 01.03.2023.

Doctor of Technical Sciences, Prof. Litvinsky G. G. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

STABILITY OF MINING AND BASIC LAWS OF ROCK PRESSURE

The prehistoric analysis of the rock pressure science development and its inherent shortcomings has been carried out. A method is proposed for assessing the stability of the rock contour in a mine working by introducing a local normalized stability criterion (LNSC). The laws of stress concentration on the rock contour of the mine working have been studied. The optimal form of mine working is considered taking into account the heterogeneity of the strength properties of rocks in the roof, soil and sides around mine working and the influence of the inclined bedding. The main technical contradiction of mining geomechanics is formulated, the ways of its overcoming are shown. A method for choosing a permissible change in the form of a mine working is substantiated from the standpoint of ensuring its stability. The fundamental regularities (FR) of rock pressure are formulated and substantiated, considering the kinetics of its development, and not as a static balance of rocks in existing approaches.

Key words: *mining, manifestations of rock pressure, rock contour, rock stability, optimal form of mining, local failure criterion, heterogeneity, roof, soil, sides, mining geomechanics, fundamental regularities.*