

Академик НАН Украины,
д-р техн. наук, проф. А.Ф. Булат,
канд. техн. наук С.Ю. Макеев,
науч. сотр. В.Я. Осенний,
канд. техн. наук С.Ю. Андреев
(ИГТМ НАН Украины)

РАЗВИТИЕ ГИПОТЕЗЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОПЛАЗМЕННЫХ РАЗРЯДОВ В ПОДЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

Приведено развитие гипотезы зарождения газодинамических явлений в шахтах, предполагающее, что их неотъемлемой частью являются микроплазменные эффекты при возникновении стохастических электрических полей от образования трещин в результате деформационных процессов в горном массиве. Один из путей предупреждения подобных явлений – смягчение динамики роста трещин благодаря использованию физико-химического воздействия.

DEVELOPMENT OF HYPOTHESIS ABOUT ORIGIN OF THE GAS- DYNAMIC PHENOMENA AS A RESULT FORMING OF MICROPLASMA DISCHARGES IN UNDERGROUND TERMS

A development of hypothesis about features of the gas-dynamic phenomena origin in mines is brought, supposing, that their inalienable part are microplasma effects in case of the stochastic electric fields occurring from formation of cracks as a result of deformation processes in a mountain range. One of ways for warning of the similar phenomena is softening of cracks height dynamics due to the use of physical and chemical influence.

При проведении горных работ на больших глубинах одной из главных проблем относится возникновение таких негативных динамических явлений, как выбросы угля, породы и газа. Считается общепризнанным [1, 2], что вероятность выбросов горных пород определяется появлением критических величин трещиноватости, газонасыщенности, напряженного состояния пласта, скорости проведения выработок, а также характеристик, определяющих структуру и состав горных пород. Как показано в [2], наличие этих факторов является необходимым, но недостаточным условием перехода потенциальной энергии массива в кинетическую.

Переход сложнонапряженного горного массива в подвижное состояние осуществляется лишь в том случае, когда скорости протекающих внутренних процессов, связанных с изменением энтропии, значительно превалируют над скоростями внешнего воздействия на массив. При этом система из равновесного состояния переходит в подвижное по законам нелинейной термодинамики необратимых процессов.

Рассмотрим уравнение состояния элемента горного массива в тензорном виде для лагранжевых координат ξ [3, 4, 5]:

$$\frac{d_{\xi}u}{d\tau} = T \frac{d_{\xi}u}{d\tau} + \frac{1}{\rho} \sigma^T : \frac{d_{\xi}\gamma}{d\tau} + \frac{1}{\rho} \tau^T : \frac{d_{\xi}\chi}{d\tau} + \sum_{k=1}^{N-1} \mu^{(k)} : \frac{d_{\xi}C^{(k)}}{d\tau}, \quad (1)$$

где T – температура; u – внутренняя энергия элемента массива; $\sigma^T : \frac{d_{\xi}\gamma}{d\tau}$ и $\tau^T : \frac{d_{\xi}\chi}{d\tau}$ – двукратное внутреннее произведение тензоров напряжений и моментных напряжений на тензоры деформации γ и χ , которые выражаются через векторы перемещения и поворота: $\gamma = \nabla u + g \times w$, $\chi = \nabla w$; ρ – плотность; $\mu^{(k)}$ – потенциал Гиббса; $C^{(k)}$ – концентрация вещества; g, w – векторы базиса.

Внутренняя энергия u как функция своих характеристических переменных $S, \gamma, \chi, C^{(k)}$, включая и энтропию S , является потенциалом, а частные производные:

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{\partial u}{\partial S} \right)_{\gamma, \chi, C^{(k)}} & \sigma &= \rho \left(\frac{\partial u}{\partial S} \right)_{S, \chi, C^{(k)}} \\ \tau &= \rho \left(\frac{\partial u}{\partial \chi} \right)_{S, \gamma, C^{(k)}} & \mu^{(k)} &= \left(\frac{\partial u}{\partial C^{(k)}} \right)_{S, \gamma, \chi} \end{aligned}$$

– суть уравнения состояния.

Исключим из (1) дифференциалы $\frac{d_{\xi}u}{d\tau}$ и $\frac{d_{\xi}C^{(k)}}{d\tau}$ с помощью балансовых уравнений [3, 4], учитывая наличие источников мощностью $\rho\theta^{(k)}$:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \sigma^T : (\nabla u + g \times w) + \tau^T : \nabla w - \nabla J^{(q)} \\ \rho \frac{d_{\xi}C^{(k)}}{d\tau} + \nabla J^{(k)} &= \rho\theta^{(k)}. \end{aligned}$$

Получим уравнение для изменения энтропии S :

$$T\rho \frac{d_{\xi}S}{d\tau} = -\nabla J^{(q)} + \sum_{k=1}^{N-1} \mu^{(k)} : (\nabla J^{(k)}), \quad (2)$$

где ∇ – набла оператор, $J^{(q)}, J^{(k)}$ – термодинамические потоки.

Как видно из (2) возникновение энтропии полностью контролируется термодинамическими потоками $J^{(q)}, J^{(k)}$ и силами, характеризующими причины их возникновения и интенсивность протекания термодинамических процессов.

В общем случае, отыскание в явном виде указанных потоков и сил является сложной задачей и не решается в рамках термодинамики необратимых процессов. Введение в уравнение (2) дополнительных сил и потоков (например, электростатических сил) накладывает на кинетический потенциал основное требование инвариантности для уравнения процесса. При этом, как показано в [3], кинетический потенциал может связывать термодинамические силы и потоки различной тензорной валентности.

С другой стороны, исходя из симметрии матрицы кинетических коэффициентов (соотношения взаимности Онсангера), можно записать общее уравнение для локального прироста энтропии в единицу времени [5, 6] с учетом тепловых и электрических потоков:

$$\frac{d\xi S}{d\tau} = \frac{1}{T} \left\{ (J, -\frac{1}{T} \text{grad } T) + (j, E + T \text{grad } \frac{\xi}{T \cdot e}) \right\}, \quad (3)$$

где J – тепловой поток; j – плотность тока; E – напряженность электрического поля; $\xi = \mu/N_A$ – химический потенциал; N_A – постоянная Авогадро; e – внутренняя энергия.

Таким образом, из (2) и (3) видно, что прирост энтропии элемента горного массива определяется не только его механическими свойствами, но так же зависит от протекания в нем термоэлектрических явлений.

Введение в общее уравнение Гиббса термодинамических потоков, связанных с термоэлектрическими явлениями, обосновывается тем фактом, что в большинстве выбросоопасных горных пород сосредоточено 50-70 % зерен кварца [2, 7], для которых характерно наличие существования прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта под действием внешнего давления [8, 9].

Представим трещину, заполненную углеводородным газом (например, метаном) как конденсатор с изолированными "берегами", т.е. при возникновении поляризации заряд не может стекать по стенке трещины. Тогда напряженность поля и деформацию можно оценить по формулам:

$$E = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \sigma_m \quad \text{и} \quad \xi = \left(\frac{1}{M} - \frac{q^2}{\varepsilon \varepsilon_0} \right) \sigma_m. \quad (4)$$

где E – напряженность электрического поля; ξ – деформация кристаллов кварца; q – пьезоэлектрическая постоянная; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{12}$ Ф/м; σ_m – напряжение сжатия или растяжения; M – модуль Юнга кварца.

Оценка величины электрического поля (при $M = 7,85 \cdot 10^{10}$ Н/м², $q = 2,1 \cdot 10^{12}$ А·с/Н, $\sigma_m \sim 20-30$ МПа, $\varepsilon = 13$ для кварца) показала, что в зависимости от нагрузки (величины горного давления) напряженность поля лежит в диапазоне величин 10^5-10^6 В/м, то есть под действием механических напряжений в 0,1 МПа возникает разность потенциалов ~ 60 В. Кварц по своей природе водонерастворим (его твердость по Моосу ~ 7), устойчив к действию ряда кислот, плавится при 1700 °С (при 573 °С испытывает фазовый переход, оставаясь пьезоэлектриком с симметрией 622), обладает малым тепловым расширением, низкой электропроводностью ($\sim 10^{-11}-10^{-15}$ Ом⁻¹·см⁻¹) и при полях 10^5-10^6 В/м может, в свою очередь, деформироваться на величину (20-60) мкм, что в элементах горного массива порождает обратный пьезоэффект.

В свою очередь наличие блуждающих стохастических электрических полей, обусловленных деформациями кварца, в элементах напряженного массива, охватывающего вмещающими горными породами и уголь, порождает вероятность с одной стороны – пробоя углеводородного газа (метана), а с другой – возникновение сдвига и кручения кристаллов друг относительно друга. Это способствует появлению дополнительного потока тепла в результате трения между кристаллами.

Пробой углеводородных газов в трещинах и порах напряженного горного массива обусловлен лавинным механизмом переноса заряда электронами и положительными ионами. Следует отметить, что при малых межэлектродных расстояниях (диаметрах трещин ~ 1 мм) и больших напряженностях электрического поля $\sim 10^6$ В/м прикатодный слой заполняет практически все пространство между электродами и ток переносится исключительно ионами [10]. Величину тока между электродами, можно оценить по формуле Томпсона:

$$i = 3 \cdot 10^{-3} \sqrt{k_0^{1/2} V (\alpha \cdot N^2)^{3/2}}, \quad (5)$$

где V – напряжение между электродами; k_0 – подвижность положительных ионов; α – коэффициент рекомбинации; N – концентрация положительных ионов; $\alpha \cdot N^2$ – скорость ионизации.

Оценка плотности тока для трещин ~ 1 мм, заполненных метаном (при $k_0 = 10^8$, $\alpha \sim 10^{-10}$, $N = 10^{11} - 10^{12}$ см $^{-3}$, $V \sim 3-4$ В) [11], показала, что она может лежать в диапазоне величин $\sim 10^3 - 10^4$ А/см 2 .

При таких плотностях тока за счет джоулевского тепла реализуется минимальная энергия зажигания метана (~ 4 МДж) и дальнейшее его фильтрационное горение. Запасенного тепла достаточно для испарения жидкости в порах и трещинах массива. Расчеты показывают, что величины давлений при микродетонациях и испарении жидкости в напряженном массиве достигают значений, превышающих на порядок внешнее давление.

Кроме того, от джоулевского тепла и тепла, полученного в экзотермических реакциях (протекающих при пробое в метане), происходит нагрев газа порового пространства, который, интенсивно расширяясь в объеме, стремится выйти наружу по порам и трещинам. В результате высокого давления газы по трещинам и порам перемещаются с большими скоростями, осуществляя при этом перенос углепородного вещества.

При этом одни поры увеличиваются в размерах (если возникающее напряжение превышает предел прочности горной породы), другие поры, соединяясь между собой, образуют разветвленную сеть трещин, что приводит к возрастанию степени микронарушенности среды. Ее рост связан, исходя из формул (1) и (2), с потоками массопереноса и тепла.

Если стадия разрушения опережает стадию сращивания трещин в угольно-породной среде, то меняющие своё взаиморасположение берега трещин в крошащемся материале представляют собой потенциальные полюса для проскальзывания между ними микроплазменных разрядов, соединяющихся в один лавинообразный поток [12-14].

Таким образом, электрофизические процессы, связанные с возникновением стохастических электрических полей приводят к формированию в горных породах указанных микроплазменных образований, которые в свою очередь создают разветвленные зоны повышенной силовой напряженности, так называемые перколяционные кластеры. Их интенсивность, время создания и геометрические размеры определяют величину вероятности выхода газа на свободную

поверхность горного массива, который сопровождается появлением и распространением ударных волн, как в рудничной атмосфере, так и в твердой фазе.

Оценим величину потока газа, которая будет пропорциональна количеству плазменных кластеров, образующихся под действием электрических полей в элементах горного массива. Рост уровня количества трещин $N(t)$ ограничивается некоторым максимальным значением величины $b = N_{\max}$ при $\rho \rightarrow 0$ (где N_{\max} – максимально возможная величина $N(t)$).

Выберем в качестве закона относительную скорость роста концентрации трещины в единице объема $n(t) = N(t)/V$ (где V – объем), как

$$\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt} = k(b - n). \quad (6)$$

В этом случае относительная скорость будет не постоянной величиной, а линейной функцией от $n(t)$. Разделим переменные и возьмем интегралы от обеих частей уравнения (6),

$$\int \frac{dn}{n(b-n)} = \frac{1}{b} \int \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{b-n} \right) dn = \frac{1}{b} \ln \frac{n}{b-n}. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) запишется в виде:

$$\frac{1}{b} \ln \frac{n}{b-n} + \frac{1}{b} \ln a = kt, \quad (8)$$

где постоянная $C = -\frac{1}{b} \ln a$ (a – величина, характеризующая некоторый начальный уровень развития трещин, и определяется из начальных условий при $t = 0$, $a = n_0$).

В результате преобразований (8) получим окончательную формулу для определения $n(t)$:

$$n(t) = \frac{n_{\max}}{1 + n_0 e^{-n_{\max} kt}}. \quad (9)$$

Линия, определяемая уравнением (9) есть логистическая кривая. В начальный момент времени развития трещин, когда $n(t) \ll n_{\max}$, она практически совпадает с экспонентой $n(t) = n_0 e^{n_{\max} kt}$. Прямые $n = b$ и $n = 0$ служат асимптотами логистической кривой.

Как видно, образование перколяционных кластеров существенно зависит от темпа формирования трещин и функции их распределения по размерам.

Электростатический механизм формирования микроплазменных образований, инициирующих выбросы угля и пород, можно вкратце представить следующим образом. Перемещение пород под действием внешних сил формирует

электростатические и тепловые поля за счет прямого и обратного пьезоэффекта и внутреннего трения в массиве. Возникновение пробоя в метане и его фильтрационное горение приводит к созданию неравновесных напряженных зон (перколяционных кластеров), интенсивность образования которых и являются ответственными за распространения микроударных волн, что, в свою очередь, инициирует выброс.

Естественно, противовыбросные мероприятия должны быть менее динамичными по своей технологии, чтобы не вызвать ответной динамики массива. Одним из таких воздействий на угольно-породную среду может служить ее физико-химическая обработка (ФХО) [15]. ФХО пластифицирующими и гелеобразующими растворами увеличивает критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K . А поскольку последний линейно зависит от внешних нагрузок, то ФХО пласта при прочих равных условиях приводит к возрастанию безопасной величины критических напряжений, которые способны действовать в массиве и вызывать его бурные разрушения в виде отдельного горного удара или горного удара с последующим выбросом угля, породы и газа.

Еще более эффективным вариантом ФХО представляется использование полимерных композиций, вносящее свои особенности в рассматриваемый вопрос. Если раньше однозначно предполагалось, что при нагнетании полимер оттесняет метан вглубь массива и, затвердевая, блокирует его в трещиновато-пористой системе пласта, то дополнительные исследования позволяют интерпретировать данный процесс в несколько ином плане. Несмотря на большую вязкость полимера, чем воды, он способен стремительнее продвигаться по поровому пространству горной породы и быстрее вбирать в себя газ [16, 17]. Этому вопросу не всегда уделялось должное внимание. Даже при концентрациях органических веществ, характерных для природных вод, можно увеличивать проходимость газовых пузырьков и изменять их адсорбцию на твердой поверхности [18]. Уменьшение концентрации сорбционного метана становится слабым звеном, прерывающим цепочку развязывания внезапных выбросов.

Влияние фильтрационных характеристик также можно оценить, используя понятие масштаба времени разрушения, зависящего от поверхностной энергии, давления, вязкости и газопроницаемости [19]. ФХО уменьшает эффективную поверхностную энергию до 2 раз, давление и вязкость не изменяются, газопроницаемость (по данным измерения скорости газовой выделенности) уменьшается в 10-50 раз [20]. Таким образом, суммарное влияние ФХО выражается в увеличении масштаба времени разрушения максимум на порядок. Следовательно, на стадии подготовки выброса снижение газопроницаемости угля после ФХО приводит к уменьшению величины пустотности пласта за счет подавления роста трещин, происходящего вследствие фильтрационной подпитки. Тем самым выбросоопасность должна уменьшаться.

На стадии выброса, если разрушение протекает по механизму роста фильтрационно-подпитываемых трещин, масштаб скорости разрушения уменьшается до 30 раз [15]. Снижение фильтрационных характеристик приводит к умень-

шению мощности выбросов и количества выделившегося газа, что является безусловно положительным фактором.

Таким образом, в развитие гипотезы зарождения газодинамических явлений в шахтах предполагается, что их неотъемлемой частью являются микроплазменные эффекты при возникновении стохастических электрических полей от образования трещин в результате деформационных процессов в горном массиве. Один из путей предупреждения подобных явлений – смягчение динамики роста трещин, благодаря использованию ФХО. На стадии подготовки и развязывания выброса повышение сдерживающего потенциального барьера может достигаться применением физико-химического воздействия, которое снижает фильтрационные характеристики массива и препятствует дальнейшему протеканию выброса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забигаило В.Е. Выбросоопасность горных пород Донбасса / В.Е. Забигаило, В.В. Лукинов, А.З. Широков. – Киев: Наук. думка, 1983. – 186 с.
2. Зорин А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / А.Н. Зорин, Ю.М. Халимендик, В.Г. Колесников. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 413 с.
3. Подстригач Я.С. Введение в механику поверхностных явлений в деформируемых твердых телах / Я.С. Подстригач, Ю.З. Повстенко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 200 с.
4. Боголюбов И.Н. Введение в аналитический аппарат статистической механики / И.Н. Боголюбов, А.И. Ермилов, А.М. Курбатов. – Киев: Наук. думка, 1988. – 176 с.
5. Петров Н. Современные проблемы термодинамики / Н. Петров, И. Бранков. – М.: Мир, 1986. – 288 с.
6. Глансдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивость в флуктуации / П. Глансдорф, И. Пригожин. – М.: Мир, 1973. – 300 с.
7. Влияние различного рода воздействий на свойства и состояние газонасыщенного углепородного массива / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, В.Я. Осенний [и др.] // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т. – 2007. – С. 52-56.
8. Мирдель Г. Электрофизика / Г. Мирдель. – М.: Мир, 1972. – 608 с.
9. Желудев И.С. Физика кристаллов и симметрия / И.С. Желудев. – М.: Наука, 1987. – 192 с.
10. MacDonald A.D. Microwave Breakdown in Rages / A.D. MacDonald. – New York - London - Sydney. - 1966. – 205 p.
11. Dutton I. A survey of electron Swarm Data / I. Dutton // I. Rhys and Ehem. Ret. – 1975. – Vol 4, №3. – 856 p.
12. Булат А.Ф. Механоэлектрические эффекты пород угольных формаций и их роль в механизме газодинамических явлений / А.Ф. Булат, С.И. Скипочка, Б.М. Усаченко // Доповіді НАН України. – 1998. – № 1. – С. 153-159.
13. Особенности процесса трещинообразования в массиве при управлении его газодинамикой / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, С.Ю. Андреев и др. // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 94. – С. 24-30.
14. Феноменологическая модель генезиса динамических явлений в шахтах / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, С.Ю. Андреев, Г.А. Рыжов // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: Матеріали II міжнародної конференції (18 травня 2011 р.). – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 11-16.
15. Репка В.В. Физико-химическая механика и способы управления свойствами и состоянием углепородных массивов: дис... д-ра техн. наук: 05.15.11 / Репка Валерий Васильевич; Ин-т геотех. механики АН Украины. – Днепропетровск, 1991. – 495 с.
16. Gilman J.R. Improved interpretation of the inaccessible pore-volume phenomenon / J.R. Gilman, D.J. Macmillan // 8th SPE Symp. Reservoir Simul., Dallas, Tex., Febr. 10-13, 1985. – P. 31-40.
17. Jonson A.B. Gas-rise velocities during kicks / A.B. Jonson ect // SPE Drill. Eng. – 1991. - 6, № 4. – P.257-263.
18. Вэнь Байхун Физическое моделирование перемещения пузырьков газа в пористых системах и влияние органических веществ на этот процесс / Байхун Вэнь, О.Ф. Путиков // Сб. тр. мол. ученых СПГГИ. – 1998. – № 2. – С.5-10.
19. Петросян А.Э. Теория внезапных выбросов / А.Э. Петросян, Б.М. Иванов, В.Г. Крупеня. – М.: Наука, 1983. – 152 с.
20. Воробьев Е.А. Физико-химическая обработка нижней части панели при щитовой выемке / Е.А. Воробьев, В.В. Репка, С.Ю. Андреев // Уголь Украины. – 1990. – № 5. – С. 10.

Канд. техн. наук П.Е. Филимонов
(АП «Шахта им. А.Ф.Засядько»),
доктора техн. наук Ю.И. Кияшко,
В.Г. Шевченко
(ИГТМ НАН Украины)

ОСОБЕННОСТИ ОТРАБОТКИ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ ЛАВАМИ В УСЛОВИЯХ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Представлено результати узагальнення досліджень і досвіду роботи лав в умовах газонасичених масивів гірських порід.

FEATURES LONGWALL MINING EXCAVATION SITES IN GAS-SATURATED ROCK MASSES

The results of the generalization of research and work experience in a lava gas-saturated rock masses.

За последние 15 лет суточные нагрузки на комплексно-механизированные лавы выросли с 500-700 до 1500-2000, а иногда превышают 6000 т. Увеличились габариты выемочных участков. Длины лав выросли со 180-220 до 250-350 м. Там, где позволяют условия шахтёры увеличили протяженность выемочных столбов. Если раньше их длины составляли 900-1200 м, то в настоящее время они выросли до 1,5-2 км и продолжают тенденционно увеличиваться. По мере отработки пластов и в силу иных причин усреднённая глубина ведения горных работ ежегодно увеличивается на 10-15 м. Всё чаще включают в отработку нижележащие пласты, вскрывая выходы газа из вмещающих пород. Таким образом ежегодно не уменьшаются объёмы и интенсивность процессов деформации и разрушения массивов горных пород, вмещающих лавы и примыкающие к ним выработки. Как следствие на многих шахтах растут высвобождающиеся из массивов горных пород объёмы газов, потенциально способных выйти и выходящих в рабочие пространства выработок.

Мощности пластов, ежегодно вынимаемых очистными комплексами в шахтах Украины, как правило, находятся в диапазоне значений от 1 до 2 м. Ещё 20-25 лет назад при нагрузках 500-700 т/сут и длинах лав 180-220 м их подвигания были от 1,25 до 3,0 м/сут при вынимаемых мощностях пластов, соответственно, 2 и 1 м. Таким образом отход лавы, например, на расстояние A^* , равное ее длине L , при скоростях подвигания 1,25 и 3 м/сут в среднем осуществлялся за 5 и 2,5 месяца. Известно, что при $A=L$ лава формирует в кровле и почве так называемый «квадрат посадки» и при этом происходит, как правило, первое после отхода от разреза обрушение пород основной кровли и повышенное поднятие пород почвы. В настоящее время скорости подвигания многих лав существенно выросли – $3,3\div 9$, а иногда и более м/сут, поэтому первое обрушение пород основной кровли может произойти в течение от 3 до 1 месяца работы лавы, в среднем 1,5-2 месяца. В работе [1] и других показано, что общая мощность подвижных слоёв кровли (ПСК) над лавой, например в условиях шахты им. А.Ф. Засядько, достигает в большинстве случаев $40\div 60$ вынимаемых мощностей пла-