

УДК 622.51.74

С.Г. Фомичев, В.И. Воротников, В.В. Сенкус

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ В ЗАХОДКАХ ПЛАСТОВ СЛОЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Сформулированы основные принципы построения новой модели процесса гидравлического разрушения угля на пластах со сложной геологической структурой.

Ключевые слова: гидравлическое разрушение, горнотехнические факторы, прочность угольного массива.

Гидравлическое разрушение, как процесс, текущий во времени, характеризуется высокой неравномерностью мгновенной производительности выходящего потока угля. Основная причина большого изменения выходных показателей при струйном резании заключается в неравномерном отделении извлекаемых объемов угольного массива, которое тесно связано со структурной слоистостью пластов по мощности, их неравномерной прочностью и трещиноватостью.

Процесс отделения выступающих частей от поверхности полости в виде угольных негабаритов происходит под влиянием различных горногеологических и горнотехнических факторов.

1. Неровная поверхность извлекаемой полости очистной заходки, которая образуется за счет одновременного действия двух факторов:

- слоистое геологическое строение пластов, включающее произвольное расположение (чередование) *слабых* и *крепких* пачек угля по мощности пласта;

- избирательность процесса струйного резания, производительность которого зависит от прочности уголь-

ных пачек слагающих угольный массив, и параболически возрастает при разрушении *слабых* пачек угля, а так же параболически снижается при разрушении *крепких* пачек угля.

В результате совместного влияния рассмотренных факторов на поверхности извлекаемой полости образуются: *впадины* в *слабых* и *выступы* в *крепких* пачках угля и породы.

2. Отделение выступающих более прочных угольных пачек и породы от поверхности полости в виде негабаритов в процессе гидравлического разрушения угольного массива реализуется по двум схемам.

- *самопроизвольное* отделение выступающих частей массива, которому способствует природная трещиноватость угольных пачек, а также дополнительная трещиноватость возникающая под действием сил горного давления которая: *интенсивно* возрастает в *слабых* и *менее интенсивно* возрастает в *крепких* угольных пачках, при этом трещины располагаются в плоскостях близких к перпендикулярным и к плоскости простирания пласта на определенном расстоянии друг от друга, что способствуют циклическому отделению негабаритов.

- *принудительное* отделение выступающих частей массива, которому способствует специфичность механизмов гидравлического воздействия высоконапорной струи на угольный массив: *нагнетание воды* по системе трещин за счет давления создаваемого в зоне контакта высоконапорной струи с угольной поверхностью;

- *расшатывание* выступов на угольной поверхности, по аналогии с пикой для обorkи забоя, но более мощной по воздействию.

Анализ влияния различных горно-геологических и горнотехнических факторов позволяет сформулировать основные принципы построения новой модели процесса гидравлического разрушения угля на пластах со сложной геологической структурой, в которой:

- гидроразрушение производится последовательным сканированием поверхности забоя от кровли 1 до почвы 2 пласта струей 3 гидромонитора 4 за счет её перемещения со скоростью резания v_p в прямом и обратном направлении по нормали $N - N$ к боковым породам (рис. 1);

- извлечению подвергаются произвольно расположенные по мощности пласта угольные пачки мощностью $m_1, m_2, m_3, \dots, m_i$ имеющие различный условный предел прочности $R_{y1}, R_{y2}, R_{y3}, \dots, R_{yj}$.

Разрушение отдельных угольных пачек и в целом пласта со сложной слоевой структурой производится с учетом следующих условий.

1. Крепкие пачки угля подвергаются частичному гидроразрушению, а не разрушенная часть крепких пачек угля, выступающая на поверхности извлекаемой полости 9, выделяется из массива в виде негабаритов 7, при этом отделение негабаритов от массива происходит под динамическим давлением струи 3 по линии прохо-

дящей через трещины 6. Крепкими считаются отдельные пачки угля, а также часть массива в виде группы крепких пачек, с условным пределом прочности угля большим, чем среднее значение R_y по пласту.

$$R_{yj} > R_y \text{ и } R_{y\max} > R_y; \quad (1)$$

$$R_{y\max} = \frac{\sum_{i=j} R_{yj} m_j}{\sum_{i=j} m_j}, \quad (2)$$

где R_y - среднее значение условного предела прочности угля по пласту; R_{yj} - условный предел прочности угля крепких j -х пачек; m_j - мощность крепких j -х пачек угля; $R_{y\max}$ - среднее значение условного предела прочности части массива состоящего из прочных пачек угля - средней максимальной прочностью.

2. Слабые пачки угля, которыми считаются отдельные пачки угля, а также часть массива, с условным пределом прочности угля меньше, чем среднее значение R_y по пласту, подвергаются полному гидроразрушению.

$$R_{yk} < R_y \text{ и } R_{y\min} < R_y; \quad (3)$$

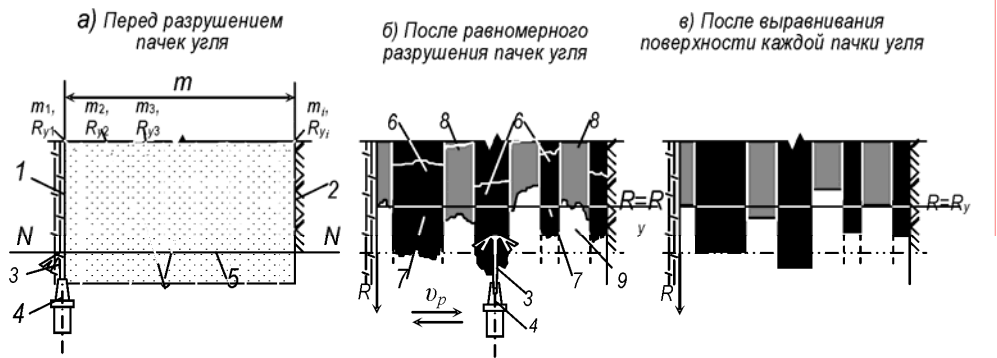
$$R_{y\min} = \frac{\sum_{i=k} R_{yk} m_k}{\sum_{i=k} m_k}, \quad (4)$$

где R_{yk} - условный предел прочности угля в слабых k -ых пачках угля; m_k - мощность слабых k -ых пачек угля; $R_{y\min}$ - среднее значение условного предела прочности части массива состоящей из слабых пачек угля - средней минимальной прочностью.

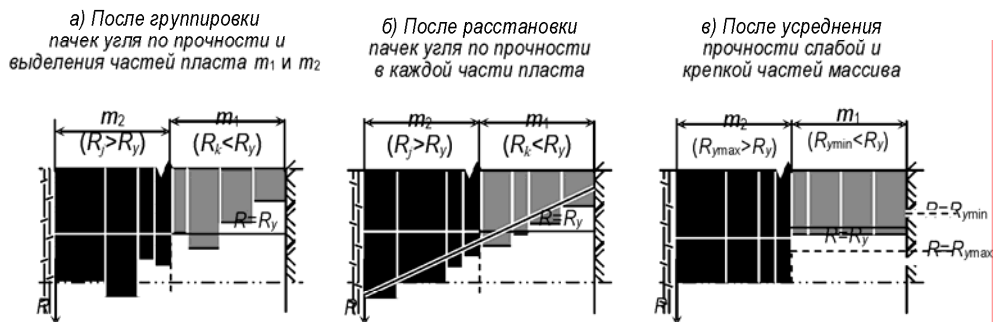
3. Процесс гидроразрушения слабых и крепких пачек угольного массива моделируется при соблюдении следующих условий:

- одинаковом и постоянном расходе и давлении воды P и $Q = const$;

- одинаковых и постоянных горно-геологических и технологических условиях $K_i = const$;



2. Схемы структурного преобразования разрушенной поверхности забоя по мощности пласта



Условные обозначения:

- – Крепкая часть пласта суммарной мощностью пачек угля m_2 прочностью $R_{y\max} > R_y$;
- ▒ – Слабая часть пласта суммарной мощностью пачек угля m_1 ; прочностью $R_{y\min} < R_y$;
- 1 – Кровля пласта; 4 – Гидромонитор; 7 – Крепкие пачки угля, негабариты;
- 2 – Почва пласта; 5 – Поверхность забоя; 8 – Слабые пачки угля;
- 3 – Струя воды; 6 – Трещиноватость; 9 – Извлекаемая полость.

Рис. 1. Схемы положений поверхности извлекаемой полости и её преобразования к расчету гидравлического разрушения угольного массива на пластах сложной слоистой структуры

- исключения из модели коэффициента отжима угля при $k_o=1$.

Производительность гидравлического разрушения пластов, имеющих сложную геологическую структуру, определяется с использованием выражения для двух извлекаемых пачек угольного массива:

- для слабой пачки

$$P_{o1} = \left(\frac{P}{R_{y\min}} \right)^2 Q K_i; \quad (5)$$

- для крепкой пачки

$$P_{o2} = \left(\frac{P}{R_{y\max}} \right)^2 Q K_i, \quad (6)$$

где P_{o1} и P_{o2} - производительность гидравлического разрушения (отбойки) угля слабой и крепкой пачек массива.

Производительность гидравлического разрушения можно выразить через извлекаемые объемы угля и затраченное время в каждой пачке горного массива:

- для *слабой* пачки

$$П_{o1} = \frac{V_{\partial 1}}{t_{o1}}; \quad (7)$$

- для *крепкой* пачки

$$П_{o2} = \frac{V_{\partial 2}}{t_{o2}}, \quad (8)$$

где $V_{\partial 1}$ и $V_{\partial 2}$ - извлекаемые объемы угля за один рез из слабых и крепких пачек горного массива; t_{o1} и t_{o2} - продолжительность выполняемого реза по слабым и крепким пачкам массива.

Продолжительность выполняемых резов по углю выражается через их длину и скорость перемещения струи

- для *слабой* пачки

$$t_{o1} = \frac{m_1}{v_p}; \quad (9)$$

- для *крепкой* пачки

$$t_{o2} = \frac{m_2}{v_p}, \quad (10)$$

где m_1 и m_2 - длина резов соответственно по *слабой* и *крепкой* частям массива; v_p - скорость перемещения струи по угольному массиву.

Извлекаемые объемы угля определяются подстановкой формул (7) и (8), (9) и (10) в выражения (5) и (6) при условии $m_1 = m_2 = m/2$, которое соответствует равномерному распределению прочности пачек угля по мощности отрабатываемого пласта

- для *слабой* части

$$V_{\partial 1} = \left(\frac{P}{R_{y \min}} \right)^2 \frac{m_1}{2v_p} Q K_i; \quad (11)$$

- для *крепкой* части

$$V_{\partial 2} = \left(\frac{P}{R_{y \max}} \right)^2 \frac{m_2}{2v_p} Q K_i. \quad (12)$$

Коэффициент, учитывающий содержание угольных негабаритов в извлекаемом объеме определяется по формуле

$$K_H = \frac{V_H}{V_{об}} = \frac{V_{\partial 1} - V_{\partial 2}}{V_{\partial 1} + V_{\partial 2}}, \quad (13)$$

где V_H - объем негабаритов отделяемых от массива из крепких пачек угля; $V_{об}$ - общий объем извлекаемого угля по мощности пласта.

Окончательное выражение для определения коэффициента, учитывающего содержание негабаритов в извлекаемом угле, определяется после подстановки формул (11) и (12) в выражение (13) при $m_1 = m_2 = m/2$

$$K_H = \frac{m_1 R_{y \max} - m_2 R_{y \min}}{m_1 R_{y \max} + m_2 R_{y \min}} = \frac{R_{y \max} - R_{y \min}}{R_{y \max} + R_{y \min}}. \quad (14)$$

Среднее значение общего условного предела прочности угольного массива R_y по мощности пласта, при известных средних значениях условного предела прочности угля *слабой* и *крепкой* пачек, при $m_1 = m_2 = m/2$ определяется по формуле

$$R_y = \frac{R_{y \min} m_1 + R_{y \max} m_2}{m_1 + m_2} = \frac{R_{y \min} + R_{y \max}}{2}. \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) образуют систему уравнений, выключающую связь между общим и частично условными значениями предела прочности угольного массива, его *слабых* и *крепких* пачек и коэффициент, определяющий содержание негабаритов по отрабатываемому угольному пласту

$$\begin{cases} \frac{R_{y \max} - R_{y \min}}{R_{y \max} + R_{y \min}} = K_H; \\ \frac{R_{y \min} + R_{y \max}}{2} = R_y. \end{cases} \quad (16)$$

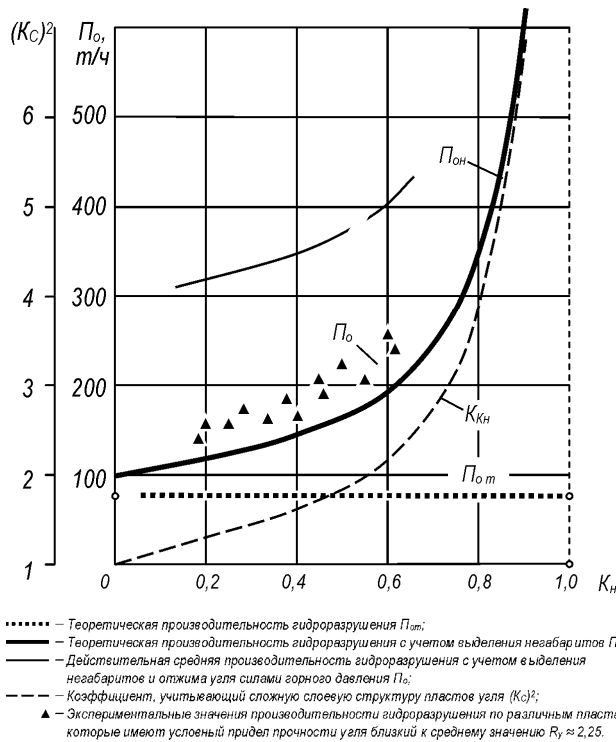


Рис. 2. Зависимость производительности гидравлического разрушения угольного массива Π_o от содержания негабаритов в отбитом угле K_n при обработке пластов со сложной слоевой структурой при давлении воды $P = 12$ МПа и расходе $Q = 280$ м³/ч.

Из системы уравнений (16), преобразуемой в квадратное уравнение, определяется минимальное значение условного предела прочности слабой гидравлически разрушаемой пачки массива угля $R_{y \min}$

$$R_{y \min} = R_y \left(\sqrt{\frac{1 + K_n}{1 - K_n}} - 1 \right) \frac{1 - K_n}{K_n}. \quad (17)$$

Чистое время t_o на гидравлическое разрушение угольного массива определяемое с учетом снижения прочности угля до минимального значения $R_{y \min}$ определяемого по формуле (17) и изменения общей массы угля M_d в очистной заходке за счет её снижения на массу негабаритов M_n не разрушаемых струей гидромонитора

$$t_o = (M_d - M_n) \left(\frac{R_{y \min}}{P} \right)^2 \frac{K_i}{Q}, \quad (18)$$

где M_d - общая масса извлекаемого угля в очистной заходке; M_n - масса негабаритов извлекаемых из очистной заходки в процессе гидравлического разрушения угля в более слабых пачках.

$$M_n = M_d K_n. \quad (19)$$

Подставляя формулу (19) в выражение (18) после преобразования получается выражение, учитывающее повышение производительности и соответствующее снижение продолжительности процесса гидравлического разрушения пласта с не равномерной прочностью угольного массива.

$$t_o = M_d (1 - K_n) \left(\frac{R_{y \min}}{P} \right)^2 \frac{K_i}{Q}. \quad (20)$$

Производительность гидравлического разрушения угольного массива Π_o определяется через отношение массы угля к продолжительности процесса

$$\Pi_o = \frac{M_d}{t_o} (1 - K_n). \quad (21)$$

После подстановки выражения (20) в формулу (21) получается зависимость производительности гидроразрушения от минимальной прочности угля $R_{y \min}$

$$\Pi_o = \left(\frac{P}{R_{y \min}} \right)^2 \frac{Q}{K_i}. \quad (22)$$

После подстановки формулы (17) в выражение (22) и его преобразования

получается зависимость производительности гидравлического разрушения на пластах со сложной не равнопрочной слоевой структурой от содержания негабаритов K_n в отбитом угле

$$\begin{aligned} \Pi_o &= \left(\frac{P}{R_y} \right)^2 \left(\frac{K_n}{\sqrt{1 - K_n^2 + K_n} - 1} \right)^2 \frac{Q}{K_i} = \\ &= \left(\frac{P}{R_y} \times \frac{K_n}{\sqrt{1 - K_n^2 + K_n} - 1} \right)^2 \frac{Q}{K_i}. \end{aligned} \quad (23)$$

Для упрощения выражения (23) полученный множитель обозначается через коэффициент K_C

$$\Pi_o = \left(\frac{PK_C}{R_y} \right)^2 \frac{Q}{K_i} = \left(\frac{P}{R_y} \right)^2 \frac{Q}{K_i} K_C^2, \quad (24)$$

$$K_C = \frac{K_n}{\sqrt{1 - K_n^2 + K_n} - 1}, \quad (25)$$

где K_C - расчетный коэффициент, учитывающий влияние слоевой структуры пластов на производительность гидравлического разрушения.

Коэффициент, учитывающий содержание негабаритов в отбитом угле K_n входящий в выражение (25) определяется по формулам (1) и (2).

В формуле (25) производительность гидроразрушения Π_o имеет параболическую зависимость от содержания негабаритов в отбитом угле K_n .

При увеличении содержания негабаритов в отбитом угле K_n снижается минимальное значение условного предела прочности угольного массива $R_{y \min}$, определяемое по формуле (17). При снижении минимального значения условного предела прочности $R_{y \min}$ увеличивается расчетный коэффициент структуры пластов K_C . По физическому смыслу коэффициент структуры пластов K_C показывает кратность увеличения производительности гидравлического разрушения Π_o

Приведенные экспериментальные данные производительности гидроразрушения угля Π_o на пластах различной мощностью и углом падения имеющих близкие значения условного предела прочности угля, изменяющиеся в диапазоне $R_y = 2,0 - 2,5$ МПа, подтверждают теоретические исследования. На графике теоретическая кривая $\Pi_{от} = 80$ т/ч построена для среднего значения условного предела прочности угля $R_y = 2,25$ МПа.

Наблюдаемое на графике некоторое несоответствие теоретической кривой экспериментальным данным объясняется отсутствием зависимости производительности гидроразрушения угля Π_o от отжима угля по периметру выемочной выработки за счет сил горного давления влияющего на её увеличение. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Фомичев С.Г., Воротников В.И., Сенкус В.В. – Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецкий филиал институт Кемеровского государственного университета, г. Новокузнецк, rector@sibsiu.ru



УДК 622.23.05

В.И. Воротников

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ СЛОЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Проведены исследования влияния выхода негабаритов из общего объема отбитого угля при отработке пластов пологого падения средней мощности и мощных пластов на производительность гидроразрушения.

Ключевые слова: гидроразрушения, гидравлическая выемка угля, горногеологические условия.

Анализ экспериментальных данных, полученных при хронометражных наблюдениях за процессом гидравлической выемки угля при отработке угольных пластов в различных горногеологических условиях, и теоретических показателей полученных с использованием существующих методик расчета показывает наличие значительных отклонений.

Основной причиной возникающих отклонений между теоретическими и экспериментальными данными является:

- использование имперических зависимостей, приближенно отражающих реальный процесс в узком диапазоне изменения горногеологических условий;
- отсутствие физической модели гидравлического разрушения угольного массива на пластах со сложной слоевой структурой.

Реальный процесс гидравлического разрушения угольного массива на пластах со слоевой структурой является комбинированным, который включает ряд дополнительных процессов сопутствующих основному – резанию угля. К дополнительному процессу относится выделение негабаритов угля с поверхности извле-

каемой полости очистной заходки за счет опережающего разрушения более слабых прослойков над более прочными прослойками. В процессе гидроразрушения значительная часть объема угля добываемого из заходок в виде негабаритов не разрушается струей гидромонитора и фактически не участвует в формировании гидравлически разрушаемого объема угля.

Выделение негабаритов сопутствует процессу гидравлическому резанию угольного массива и происходит при отжиме угольного массива силами горного давления за счет разрушения более слабых прослойков.

Процесс образования угольных негабаритов в общем процессе гидравлической выемки в очистных заходках способствует:

- снижению затрат времени на основной рабочий процесс гидравлического разрушения и повышению его производительности;
- увеличению затрат времени на операции процесса забойного пульпоформирования и снижению производительности.

Физический смысл модели теоретической производительности гидравлического разрушения, заложенный в

работе [1], заключается в полном гидравлическом резании угольного массива. Данная модель гидроразрушения характерна для пластов пологого падения с углом залегания $\alpha=8-18^{\circ}$ мощностью $m=1,4-2,5$ м в горногеологических условиях гидрошахты «Юбилейная», где отбитый уголь включает 95–97 % мелкого угля крупностью до $\delta=200-250$ мм и полностью удовлетворяет условиям гидротранспорта.

На пластах имеющих сложную слоевую структуру, к которым относятся мощные пласты крутого падения, при подстановке среднего значения условного предела прочности угля R_y в формулы производительности гидроотбойки происходит 2-3 кратное снижение теоретической производительности процесса гидроразрушения P_o , относительно экспериментально полученных показателей.

Основной причиной является существование параллельных процессов:

- гидравлического резания угля с использованием высоконапорной струи воды;

- выделения угольных негабаритов из массива без их разрушения высоконапорной струей воды.

Экспериментальные исследования, проводимые при отработке мощных пластов крутого падения с использованием большерасходных гидромониторов и с давлением воды до 16 МПа подтверждают полученные результаты.

Снижение теоретической производительности гидроразрушения объясняется не полным гидравлическим резанием угольного массива и выделением гидравлически не разрушаемого объема угольных негабаритов. Показателем оценки выхода негабаритов является коэффициент, учитывающий их содержание в общем объеме отби-

того угля, который используется для определения продолжительности операций процесса забойного пульпоформирования. Коэффициент выделения негабаритов K_n зависит от:

- *горногеологических* условий залегания пластов, а именно от угла падения α и мощности m ;

- *технологического* параметра, диктующего требование к крупности извлекаемого угля, а именно от размеров пульпоотводящего желоба.

Для использования коэффициента выделения негабаритов в качестве дополнительного критерия оценки процесса гидравлического разрушения в принимается стандартная ширина пульпоотводящего желоба $b_{ж}=0,5$ м и максимальная мощность пласта $t_r=20$ м

$$K_n = 1 - K_{\delta} \sqrt{K_{\delta}} (2 - K_{\delta})^2; \quad (1)$$

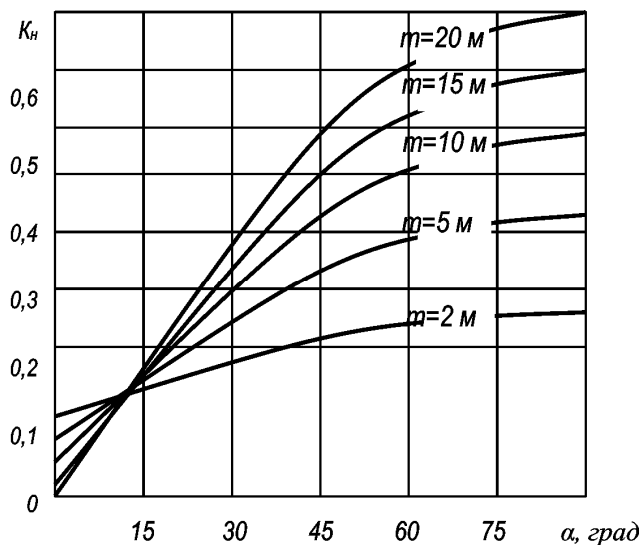
$$K_{\delta} = 0,16 \sqrt[3]{\left(1 + \frac{90^{\circ}}{\alpha}\right) \left(1 + \frac{20}{m}\right)}, \quad (2)$$

где α , t - угол падения и мощность пласта.

График зависимости (рисунок) коэффициента K_b , учитывающего содержание негабаритов в отбитом угле K_n , от горногеологических параметров пласта: мощности m и угла падения α показывает диапазон его изменения в любых горногеологических условиях залегания пластов, а также его значения при отработке пологих пластов средней мощности и мощных пластов крутого падения.

При изменении условий залегания пластов в технологически возможном диапазоне применения гидротехнологии значение коэффициента K_n изменяется в диапазоне

$$K_n = 0,03 \div 0,70, \quad \text{при } \alpha = 6 \div 90^{\circ} \text{ и } m = 1,4 \div 20 \text{ м.} \quad (3)$$



Зависимость коэффициента, учитывающего содержание негабаритов в отбитом угле K_n от горногеологических параметров пласта: мощности m и угла падения α

Если горногеологические условия (3), в которых использовалась гидротехнология, разделить на две части с привязкой по шахтам, то коэффициенты, учитывающие содержание негабаритов в отбитом угле K_n будут иметь следующие диапазоны:

- *пологие* пласты для условий гидрошахты «Юбилейная»
 $K_n = 0,03 \div 0,07$; при $\alpha = 10^0 \div 18^0$ и $m = 1,8 \div 2,5$ м; (4)

- *крутые* пласты для условий гидрошахты «Тырганская»

$K_n = 0,30 \div 0,65$, при $\alpha = 60^0 \div 80^0$ и $m = 4,0 \div 20$ м, (5)

которые позволяют сделать следующие выводы.

1. При отработке пластов пологого падения выход негабаритов из общего объема отбитого угля оценивается значением 3÷7%. Его влияние на производительность гидроразрушения минимальное и находится в пределах допустимой точности теоретических расчетов, которое можно учесть империческим поправочным коэффициентом.

2. При отработке мощных пластов крутого падения выход негабаритов из общего объема отбитого угля оценивается значением 30÷65%, поэтому его влияние на производительность гидроразрушения является определяющим.

Наличие постоянного минимального поправочного коэффициента приводит к многократному снижению теоретической производительности гидроразрушения относительно экспериментальных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гефт Ю.Б. Определение влияния мощности пласта на производительность гидромонитора. // Гидравлическая добыча угля. – Труды ВНИИгидроуголь 1968. – 34 с. **ГИАБ**

Коротко об авторе

Воротников В.И. – Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецкий филиал институт Кемеровского государственного университета, г. Новокузнецк, rector@sibsiu.ru