

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОРЫХЛЕНИЯ ВОДНЫМ РАСТВОРОМ ПАВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ И ВЫДАВЛИВАНИЙ (ОТЖИМОВ) УГЛЯ

к.т.н. Стариков Г.П. (ИФГП НАН Украины), инж. Пастернак З.Г. (ГП «Угольная компания «Краснолиманская»), инж. Волошина Н.И., инж. Чистоклетов В.И. (ГГТИ, г. Макеевка), инж. Мельников Д.В.

Встановлені фізично-механічні умови формування раптових видавлювань (віджимів) вугілля в підготовчих виробках. Розроблений метод змінювання частоти та інтенсивності видавлювання вугілля, який оснований на гідрорихленні вугільного масиву водними розчинами поверхнево – активних речовин (ПАР).

THE EXAMINATION OF INFLUENCE OF HYDROLOOSENING BY A WATER SOLUTION IS SURFACE OF ACTIVE SUBSTANCES ON INTENSITY OF SUDDEN OUTBURSTS AND EXTRUSIONS (FACE SLIP) OF COAL

Starikov G.P., Pasternak Z.G., Voloshina N.I., Tshistokletov V.N., Melnikov D.V.

The physical – mechanical conditions of formation sudden face slip in preparatory working are established. The method of change of frequency and intensity face slip is developed, based on hydroloosening of a coal massive by water solutions is surface of active substances.

Исходя из анализа геомеханических процессов, определяющих внезапные выбросы и выдавливание угля в подготовительных выработках, следует, что они связаны с особенностями нагружения призабойной части пласта и физико-механическими свойствами угля и окружающих пород. Естественно, что в случае, если максимальная величина горного давления пропорциональная физико-механическим свойствам угля и геометрии выработки превышает предельную его прочность, происходит потеря устойчивости призабойной части пласта, что приводит к внезапному выдавливанию. Применяемые способы предотвращения внезапных выбросов угля и газа (кроме обработки защитных пластов) для борьбы с выдавливанием угля являются малоэффективными, поскольку не провоцируют, а подготавливают условия их проявления. Одним из направлений, которое могло бы значительно снизить интенсивность и частоту выдавливаний угля, является снижение прочностных и упругих свойств угля, определяющих предельные напряжения в пласте и его прочность за счет повышения в нем физически связанной влаги [1]. Этот эффект можно получить добавками ПАВ к воде при использовании гидрорыхления угольного массива, как наиболее эффективного способа борьбы с внезапными выбросами угля и газа.

Исходя из поставленной задачи исследования влияния увлажнения на снижение частоты и интенсивности выдавливания угля из боковых частей подготовительной выработки оценим параметры зоны опорного давления – месторасположение (a) и величину максимального напряжения (σ_y) и вид напряженного и деформационного состояния угля в зависимости от количества физически связанной влаги в поровой структуре угля. Все результаты нижеприведенных исследований получены применительно к подготовительным выработкам, проведенным по пласту l_1 – гор.1070 м, склонного к внезапным выбросам и выдавливаниям (отжимам) угля в условиях шахты им. А.Ф.Засядько.

Анализ статистических данных по внезапным выдавливаниям угля, происшедшим в 9 западном конвейерном ходке, проводимым проходческим комбайном, где в качестве противовыбросных мероприятий применялся способ гидрорыхления водой призабойной части показывает, что между ПК 23,1-72,5 и 142,0-172,3 произошло 29 внезапных выдавливания со средними размерами полости – по простиранию 5,4 м и по восстанию 2,73 м и средней влажности 0,83%. Между пикетами 72,5-142,0 выработка проводилась в режиме сотрясательного взрывания, выдавливание угля не фиксировалось. Средняя частота выдавливания угля на метр выработки составила 0,036. Практически все интенсивные выдавливания угля произошли с левой стороны (по восстанию) по ходу прохождения выработки в момент работы проходческого комбайна. В интервале ПК 174,8-220,0 при гидрообработке пласта водным раствором ПАВ (0,1% сульфонола) произошло 10 выдавливания при средней влажности угля 1,6%, при этом площадь полостей уменьшилась в среднем в 3,84 раза, а средний размер по простиранию составил 3,1 м, а по восстанию 1,24 м, частота выдавливания угля в среднем уменьшилась на 60%. Из представленного анализа следует, что глубина полости выдавливания угля при содержании влаги (W) в пределах $W = 0,5-0,8\%$ составляет $a = 2,93$ м, а при $W = 1,6-1,8\%$ $a = 1,24$ м и фактически характеризует размер зоны опорного давления.

Для оценки степени влияния влаги в угле на устойчивость угольного массива определим параметры зоны опорного давления в боках подготовительной выработки, взяв в качестве реперных фактические данные и оценим вид напряженного и деформационного состояния, характеризующего механизм разрушения угля.

Применительно к подготовительным выработкам будем использовать метод коэффициентов интенсивности, учитывающий одновременно прочностные свойства горных пород, глубину залегания и геометрию выработки. В целом расстояние от обнажения (a) до точки максимума опорного давления и максимального сжимающего напряжения в этой точке (σ_y) определяется зависимостями [2]

$$a = 0,96 \cdot \left(\frac{m}{2,6 \cdot \sigma_{сж} \cdot f(W)} \cdot / K_1 / \right)^{2/3} f(P), \text{ м}$$

$$\sigma_y = 0,96 \cdot \left(\frac{2,6 \cdot \sigma_{сж} \cdot f(W)}{m} \cdot / K_1 / \right)^{2/3} d(P), \text{ м}$$

где m – мощность пласта;

$\sigma_{сж}f(W)$ – прочность угля с учетом содержания физически связанной влаги (применительно к углю пласта l_1 – $\sigma_{сж}f(W) = 17,9e^{-0,7W} + 3,1$);

K_1 – коэффициент интенсивности вертикальных напряжений для разреза, имеющую ту же геометрию в пласте и условия нагружения, что и рассматриваемая подготовительная выработка

$$K_1 = \left(\frac{K}{0,96} \right)^{3/2} \left(\frac{2,6\sigma_{сж}f(W)X_0}{\gamma H \cdot m} \right)^{-1/4} \left(\frac{0,38F_p \cdot m}{\sigma_{сж}f(W)} \right)^{-3/4} \frac{0,65\sigma_{сж}f(W)}{m};$$

$2X_0$ – ширина выработки;

m – мощность пласта;

F_p – суммарная нагрузка на пласт ($F_p = 1,1\gamma H X_0$) в боковых частях выработки;

P – параметр, характеризующий условия нагружения

$$\left(f(P) = \left(\frac{1}{\sqrt[3]{4}} \sqrt[3]{\sqrt{1+P} + 1} - \sqrt[3]{\sqrt{1+P} - 1} \right)^2 ; d(P) = f(P) + 1,26\sqrt{P} \right)$$

Все исходные значения и результаты расчетов приведены в табл. 1 и на рис. 1, 2.

Таблица 1 Исходные данные и результаты расчета параметров зон опорного давления.

№ п.п.	W, %	X_0 , м	$\sigma\gamma H$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	F_p , МПа·м	$f(P)$	$d(P)$	K_1 , МПа \sqrt{m}	a , м	σ_y , МПа
1	0,6	2,5	27,5	14,3	68,8	0,69	0,89	79,7	1,75	43,4
2	1,6	2,5	27,5	8,8	68,8	0,74	0,85	73,5	2,6	30,9
3	2,1	2,5	27,5	6,7	68,8	0,76	0,88	66,7	3,55	27,6

Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что с увеличением содержания физически связанной влаги в угле нагрузка на угольный массив в боковых частях выработки снижается в среднем в 1,4 раза, достигая при $W > 2\%$ значений равных величине горного давления в нетронутым массиве, а пик опорного давления перемещается вглубь пласта от поверхности забоя до 3,0-3,5 м против 1,5-1,7 м при $W = 0,5-0,7\%$.

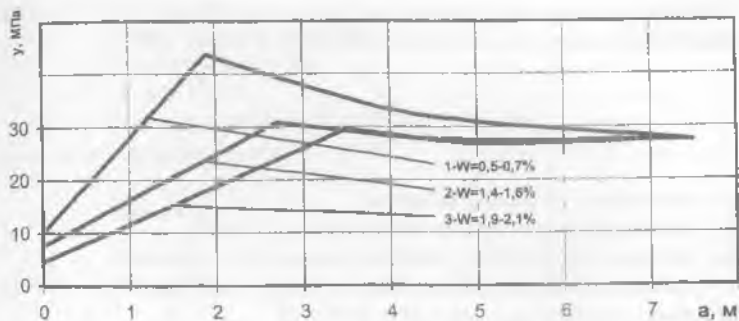


Рис.1. Изменение параметров зоны опорного давления в боковых частях подготовительной выработки при увеличении содержания в угле физически связанной влаги.

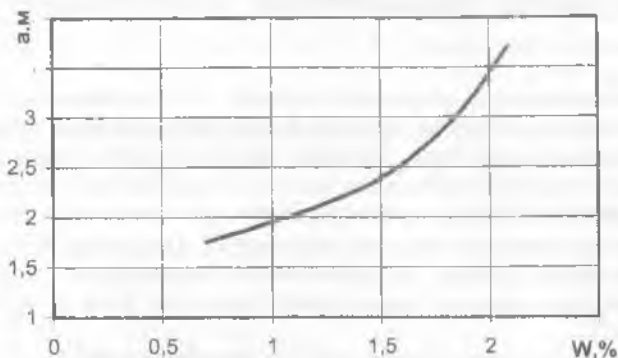


Рис.2. Зависимость $a = f(W)$, характеризующая изменение расстояния от поверхности забоя до точки максимума напряжений.

Для оценки устойчивости зоны угольного массива, примыкающего к боковым стенкам выработки, кроме определения максимальных напряжений на кромке угольного пласта необходимо знать предельную прочность угля - $\sigma_{пр}$ в условиях объемного нагружения ($\sigma_1 > \sigma_2, \sigma_3 = 0$).

Для экспериментальных исследований на установке трехосного сжатия использован метод физического моделирования с сохранением физической природы и геометрического подобия элементарных объемов угля, выделенных внутри пласта. В этом случае моделирования воспроизводятся все основные характеристики, закономерности и эффекты, связанные с явлениями в натуральных условиях. Главный фактор, определяющий различие физико-механических свойств угля в модели (образце) и в натуре - это масштабный эффект.

Влияние масштабного эффекта на прочность горных пород в условиях плоского напряженного состояния учитывается формулой [3]

$$\sigma_m = \sigma_{пр} \left(\frac{S_y}{S_0} \right)^{-n},$$

где σ_m — прочность угольного массива;

S_y — площадь поперечного сечения пласта ($S_y = m^2$);

S_0 — площадь поперечного сечения исследуемого образца;

n — показатель степени масштабного эффекта, зависящий от степени метаморфизма угля ($n = 0,21$ для угля пласта I_1).

Исследования проводились на установке УНТС, разработанной ИФГП НАНУ [4], обеспечивающей независимое нагружение по трем осям.

Для определения предельной прочности и механизма разрушения образец помещался в рабочую камеру, где равномерно нагружался сжимающими усилиями, соответствующими глубине залегания пласта:

$$\sigma_1 = \gamma H, \quad \sigma_2 = \frac{v}{1-v} \gamma H, \quad \sigma_3 = 0.$$

Затем непрерывно повышали величину σ_1 с интервалом 2,5 МПа, фиксируя при этом величину давления и смещение граней по манометрам и индикаторам часового типа. Величина промежуточного главного напряжения σ_2 формируется самопроизвольно за счет деформирования образца.

Разрушение образца, характеризующего его предельную прочность, отмечалось по прекращению роста давления σ_1 . При дальнейшем деформировании образца уровень σ_1 снижается и стабилизируется. Полученная зависимость характеризует запредельное состояние угля и остаточную прочность.

Используя вышеописанную методологию, были испытаны угольные образцы с различным содержанием в них физически связанной влаги. Влагонасыщение образцов производилось водным раствором ПАВ в течение 12 - 96 часов. Количество физической влаги в угле определялось по спектрам ядерного магнитного резонанса [5]. Все результаты исследований приведены на рис. 3 и 4. Анализ представленных результатов показывает, что при увеличении физически связанной влаги до 2% прочность на одноосное сжатие уменьшается в среднем в 2 раза, а объемная прочность в 1,6 раза. Следует отметить, что учет масштабного фактора приводит к снижению предельной прочности в 1,15-1,25 раза. Кроме этого, как следует из работы [1], при содержании в угле метана более 15 м³/т прочность его может снизиться еще на 35-40%. Реальную оценку остаточного содержания метана (Q) в приконтурной зоне пласта можно определить по разработанной авторами методике [6, 7]:

$$Q_p = \frac{VP_m}{\rho P_a} + \frac{P_m}{P_a} \xi + \frac{v(1-v)P_m}{\rho_c P_a},$$

где ρ - плотность угля;
 P_m - величина горного давления;
 P_a - атмосферное давление;
 V - объем пор в угле;
 ξ - полное число сорбционных ячеек;
 v - растворимость метана в угле.

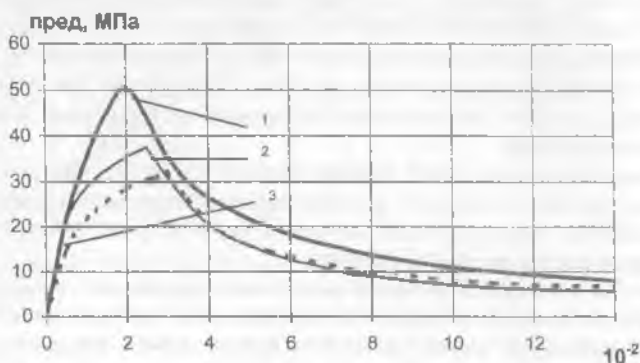


Рис.3. Полные диаграммы деформирования угольных образцов:
 1 - $\sigma f(\epsilon)$ при $W=0,5-0,7\%$; 2 - $\sigma f(\epsilon)$ при $W=1,4-1,6\%$; 3 - $\sigma f(\epsilon)$ при $W=1,9-2,1\%$.

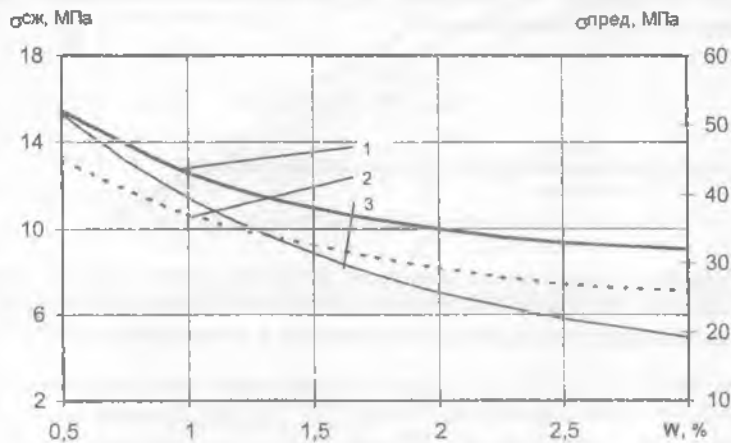


Рис.4. Влияние физически связанной влаги на предельную прочность угля:
 1 - объемное напряжение - $\sigma_{np} f(W) = 36,4 e^{-1,1W} + 30,5$; 2 - объемное нагружение (массив с учетом масштабного фактора) - $\sigma_m f(W) = 33,4 e^{-0,9W} + 23,8$;
 3 - одноосное нагружение - $\sigma_{np} f(W) = 179 e^{0,7W} + 31$

Учитывая реальное снижение горного давления в призабойной зоне до 30% и исходные свойства угля и метана: $V = 0,108$; $\nu = 10^{-2}$; $\xi = 6^{-3} \text{ м}^3/\text{т}$; $\rho = 1,33 \text{ т/м}^3$, получим, что остаточная метаноемкость угольного пласта составляет не менее $14 \text{ м}^3/\text{т}$.

Таким образом, из сравнения результатов, приведенных в табл. 1 и на рис.4 следует, что при влажности угля $W = 0,5-0,7\%$ величина опорного давления может превысить предельную прочность угля в массиве более чем в 1,5 раза и обеспечить потерю его устойчивости. С ростом влажности угля величина опорного давления практически становится равной его предельной прочности, а если учесть при этом, что газовый фактор минимизируется ($Q_{ост} < 9 \text{ м}^3/\text{т}$), то реализация внезапного выдавливания угля становится маловероятной.

В подтверждение этого вывода рассмотрим результаты исследований, представленных на рис. 5; 6, характеризующие механизм разрушения угля в условиях моделирующих состояние приконтурной зоны угольного массива в подготовительной выработке.

Наиболее полное объяснение механизма разрушения горных пород и выбор количественных критериев его оценки могут быть осуществлены на основе объединенной теории прочности Давиденкова – Фридмана, основные положения которой отображены в диаграмме механического состояния материалов, предложенной Я.Б.Фридманом [8] в виде зависимости $\tau_{max} = f(\sigma_{max})$. Эта диаграмма учитывает как вид напряженного состояния, так и свойства материалов. На диаграмме по оси ординат откладывается наибольшее касательное напряжение

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2),$$

а по оси абсцисс – наибольшее приведенное напряжение

$$\sigma_{max} = \sigma_1 - (\sigma_2 + \sigma_3)$$

Характер напряженного состояния материала в этом случае может быть объяснен на основе отношения наибольшего касательного напряжения к наибольшему приведенному напряжению в данной точке тела

$$\psi = \frac{\tau_{max}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2(\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3))}$$

Вследствие этого прямые, проведенные из начала координат диаграммы под определенным углом к оси абсцисс, тангенс которого определяется значением ψ , характеризуют напряженное состояние однородной изотропной среды: при $\psi = 0$ среда испытывает всестороннее растяжение (луч ψ совпадает в этом случае с осью ординат); при $\psi = \infty$ среда

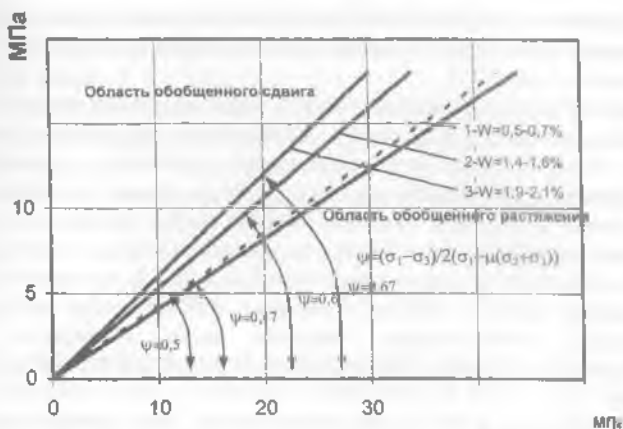


Рис.5. Диаграмма геомеханического состояния моделируемого угольного массива.

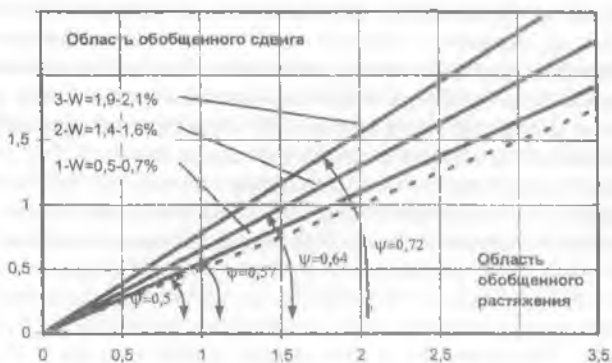


Рис.6. Диаграмма деформационного состояния моделируемого угольного массива.

испытывает состояние всестороннего сжатия (луч ψ в этом случае совпадает с осью абсцисс); при $\psi = 0,5$ – осевое растяжение; при $\psi = 1/(1+\mu)$ – кручение и срез, здесь $\sigma_{max} = 2\tau_{max}$; при $\psi = 1/2\mu$, когда $\sigma_{max} = 2\tau_{max}$ – осевое сжатие.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при содержании физически связанной влаги в угле $W = 0,5-0,7\%$ он находится в условиях осевого растяжения, следствием которого является механизм разрушения отрывом, а при $W = 1,9-2,1\%$ в угольном массиве формируются условия обобщенного сдвига и соответственно механизм разрушения –

сдвиг. Естественно, что механизм разрушения сдвигом более предпочтителен, поскольку происходит пластическое деформирование угля и медленный рост зоны отжима.

Таким образом, как следует из результатов исследований наиболее приемлемым способом управления механизмом разрушения угольного массива в боковых частях подготовительной выработки, примыкающей к ее забою, является повышение влажности угля до уровня 1,9-2,0%.

Учитывая результаты аналитических и лабораторных исследований по влиянию водных растворов ПАВ, ускоряющих процесс адсорбции воды угольным веществом и изменяющих геомеханические процессы нагружения и деформирования угольного массива, исключающих возможность формирования динамических явлений были проведены горно-экспериментальные работы при проведении подготовительной выработки на пласте l_r .

В соответствии с [9] для предотвращения ГДЯ применялся способ гидрорыхления. Контроль эффективности обработки угольного пласта водным раствором ПАВ велся по содержанию в угле физически связанной влаги по пробам угля, отбираемых из контрольных скважин и анализируемых методом ЯМР.

Основными параметрами, определяющими эффективность гидрорыхления [10, 6], являются: глубина герметизации нагнетательных скважин; глубина фильтрующей части; расстояние между скважинами; объем нагнетаемого водного раствора ПАВ; тит и концентрация ПАВ; содержание физически связанной влаги в угле – W . Схема расположения нагнетательных скважин и параметры скважин приведены на рис. 7.

Глубину герметизации нагнетательных скважин (l_r) для подготовительной выработки определяют в зависимости от средней величины зоны разгрузки призабойной части пласта (l_p), которая должна составить [11]:

$$l_r = 1,5l_p.$$

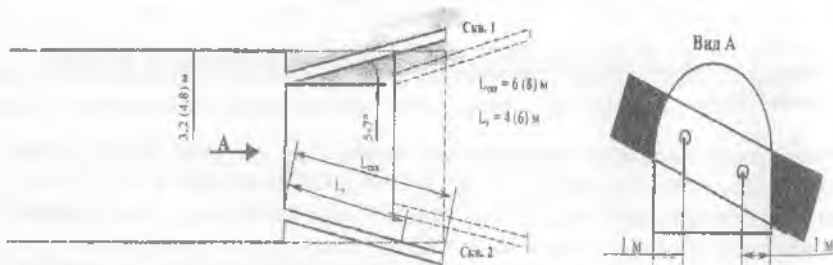


Рис. 7. Схема расположения нагнетательных скважин.

При глубине фильтрующей части скважины (l_{ϕ}) принимают: $l_{\phi} = 1$ м, если $l_r = 3$ м и $l_{\phi} = 2$ м; если $l_r > 3,0$ м, а общая длина нагнетательной скважины будет равна - $l_c = l_r + l_{\phi}$.

Давление нагнетания рассчитывают по формуле - $P_n = (0,75 \dots 1,0) \gamma H$, удельный расход q принимается 20 л/м^3 угля, диаметр скважины составляет 43-45 мм.

Количество воды, нагнетаемой в одну скважину, определяется по формуле

$$Q = \frac{2R_{\text{эф}} q m \gamma_{\text{у}}}{1000} (l_r + l_{\text{н.о.}}),$$

где $R_{\text{эф}}$ - эффективный радиус увлажнения ($R_{\text{эф}} = 0,8l_r$);

$l_{\text{н.о.}}$ - неснижаемое опережение обработанной части забоя ($l_{\text{н.о.}} = 4,0$ м);

$\gamma_{\text{у}}$ - плотность угля.

Тип и концентрация ПАВ принимается в соответствии с 4.2.1 НАОП 1.1.30-5.06. Для исключения внезапного выдавливания содержание влаги в угле после гидрорыхления должно составлять не менее 2%. Нагнетание воды в пласт при гидрорыхлении осуществляется установкой УГН-2, оборудованной манометрами и расходомерами. Ввод добавки ПАВ осуществляется с помощью дозатора ДСУ-4.

Работы по оценке исследования влияния водных растворов ПАВ на частоту и интенсивность внезапных выдавливаний угля из боковых частей подготовительной выработки были проведены на пласте l_1 , гор.1070 м шахты им.А.Ф.Засядько при проведении 9 западного конвейерного ходка в интервале ПК 140-170 при гидрорыхлении угольного пласта водой и ПК 170-220 при гидрорыхлении водным раствором ПАВ. В соответствии с рис.7 бурились две скважины глубиной 6-8 м и в них последовательно, сначала в скважину №1, расположенную справа по ходу проведения забоя производилось нагнетание воды при давлении 27,5-32,0 МПа в количестве 7,5-10 л/т. При снижении давления на 30% нагнетание в эту скважину прекращалось и производилось нагнетание в скважину №2. При бурении скважин витой сталью из них с интервалом 1 м отбираются пробы угля объемом до 50 г для определения содержания влаги в угле в зоне обработки и вне зоны обработки. Дополнительно с интервалом 5 м на глубину 4 м бурились скважины диаметром 42 мм по углу в левую боковую стенку выработки и из них с тем же интервалом отбирались пробы угля. Пробы помещались в герметические металлические пробирки и доставлялись в лабораторию. Время между отбором проб и их анализом не превышало 8 часов.

В лаборатории пробы угля помещали в высокочастотный контур установки ЯМР и записывали спектр, по которому рассчитывали содержание физически связанной влаги в угле. В качестве дополнительного контроля за содержанием влаги применяли гравиметрический метод в соответствии с ГОСТ 11014-81.

Результаты определения содержания физически связанной влаги в угле при гидрорыхлении угольного массива водой и водным раствором ПАВ приведены на рис. 8.

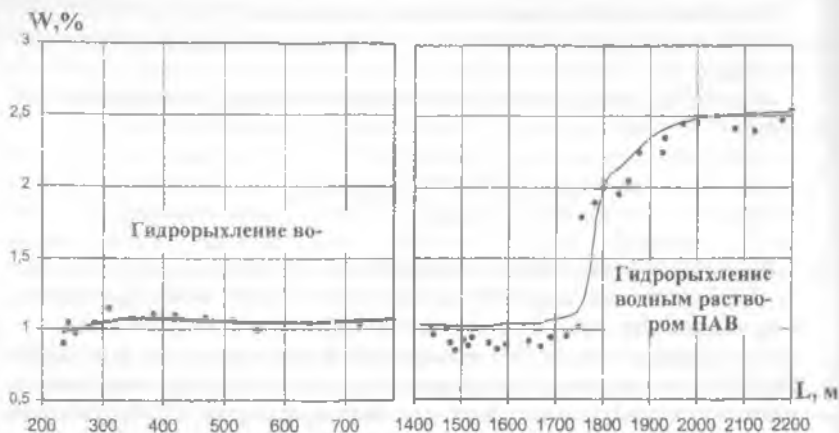


Рис.8. Распределение физически связанной влаги в боковых частях 9 западного хода на глубине 3,0-3,5 м.

Из анализа полученных данных ЯМР – H^1 установлено, что естественная влажность угля составляет $W = 0,8-0,9\%$. После гидрорыхления водой она возрастает в среднем на 30%, а при гидрорыхлении водным раствором ПАВ содержание влаги возрастает в 2,25-2,47 раза и достигает уровня 1,9-2,1%, что должно обеспечивать снижение частоты и интенсивности внезапных выдавливаний угля. Результаты анализа распределения внезапных выдавливаний и степени влияния физически связанной влаги на площадь очагов ГДЯ (интенсивности) и их частоту приведены на рис. 9, 10 и показывают, что при содержании физически связанной влаги в пределах 1,5-1,7% частота (N) внезапных выдавливаний уменьшается в среднем в 2 раза, а интенсивность (S) в среднем в 4 раза, а при влажности угля более 2% внезапные выдавливания фактически отсутствуют.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают обоснованность выбранного направления по предотвращению внезапных выдавливаний угля, как одного из разновидностей ГДЯ, связанного с переводом призабойной части пласта из условия обобщенного растяжения в условие обобщенного сдвига.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Установлены предельные значения содержания физически связанной влаги, предотвращающие ГДЯ.
2. Впервые установлено, что гидрорыхление водным раствором ПАВ обеспечивает снижение интенсивности и частоты внезапных выдавливаний угля.

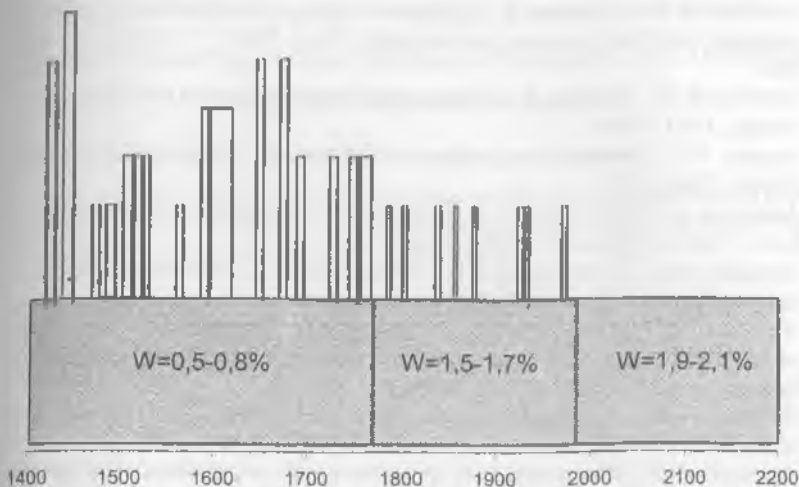


Рис.9. Диаграмма распределения внезапных выдавливания угля по длине выработки.

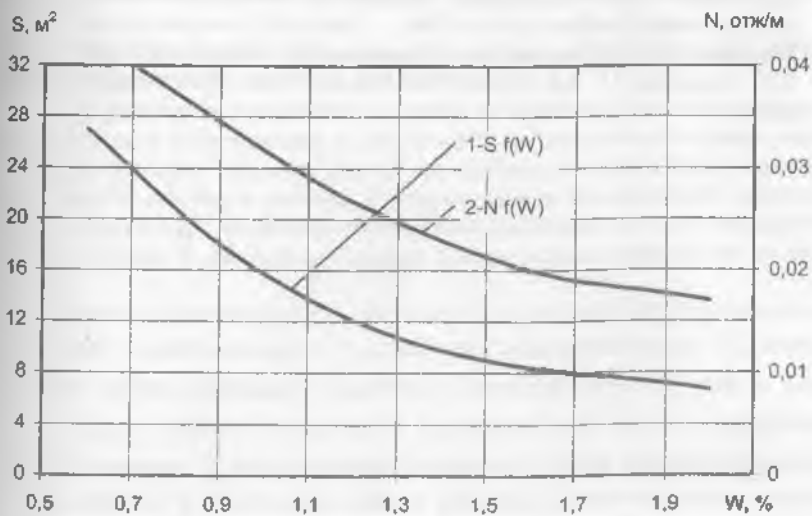


Рис. 10. Зависимость $S, N = f(W)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.Д., Стариков Г.П. Малюга М.Ф. и др. Обработка выбросоопасных пластов водными растворами ПАВ. Киев: "Техника", 1988.- 86с.
2. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. - М.: Недра, 1983.-280с.
3. Чирков С.Е. Влияние масштабного эффекта на прочность углей.-М.: Наука.-1964 -113с.
4. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В. Предельное состояние горных пород. - Киев: "Наукова думка".- 1982- 200с.
5. Алексеев А.Д., Синолицкий В.В., Зайденварг В.Е. Радиоспектроскопия в угольной промышленности.
6. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Фельдман Э.П., Пастернак З.Г. Расчет количества метана в угле в различных состояниях. -М.: МГТУ, Горный информационный аналитический бюллетень №6.-2002.
7. Алексеев А.Д., Коврига Н.Н., Пастернак З.Г., Стариков Г.П., Ульянова Е.В. Связанный метан в природных углях. В сб. ФТПГТ, №6.-2003.
8. Фридман Я.Б. Объединенная теория прочности материалов и диаграмма механического состояния. ЖТФ.-Т.ХІІІ.- вып.9-10.-1940.-С.502-519.
9. НАОП 1.1.30-5.06-89.
10. Агафонов А.В. Способы и средства обеспечения безопасности проведения подготовительных выработок по выбросоопасным пластам. Донецк: Донбасс.-1998.-238с.
11. Брюханов А.М., Рубинский А.А., Тимофеев Е.И., Чурадзе М.В., Мхотвари Т.Я., Пастернак З.Г. КД 101.00174088.003-2003 (утв. Минтопэнерго Украины).