

В.С. Кулинич, В.Г. Перепелица, И.А. Ефремов,
Б.В. Бокий, Л.Д. Шматовский, С.В. Кулинич,
Е.Г. Гирич, Д.П. Гуня, М.С.Зайцев

**РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И НАПРАВЛЕНИЯ
ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ ПЛАСТА l_1
ШАХТЫ ИМ. А.Ф. ЗАСЯДЬКО МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА (ЛГР)**

Викладені результати експериментального визначення чисельних значень і просторового напрямку головних складових діючого поля напружень в вуглепородному масиві пласта l_1 методом ЛГР з використанням шахтного високонапірного обладнання

**RESULTS OF DEFINITION OF SIZE AND DIRECTION OF THE MAIN
PRESSURE IN THE COAL ROCK A FILE OF A LAYER l_1 MINES NAMED
A.F. ZASJADKO A METHOD OF LOCAL HYDRAULIC BREAK (LHB)**

Results of experimental definition of numerical values and spatial orientation of the main components of a working field of pressure in the coal rock a file of a layer to l_1 method LHB with use mine high head the equipment are stated.

Напряженное состояние угленородных массивов, вмещающих газоносные угольные пласты, является одним из основных факторов, обуславливающих эффективность и безопасность ведения подземных работ в сложных горно-геологических условиях глубоких шахт. Выполненными экспериментальными исследованиями установлено [1, 2], что поле действующих в настоящее время напряжений в угленородных массивах шахт разнообразно как по величине главных напряжений, так и по их пространственной ориентации. Доказано [2], что одним из эффективных и технологичных методов оценки напряженного состояния массива горных пород является метод локального гидравлического разрыва (ЛГР). Он позволяет по экспериментально измеренным параметрам ЛГР определить численные значения и направление действия главных напряжений в любом участке угленородного массива, доступного для бурения экспериментальных измерительных скважин. В технологическом плане наиболее существенным недостатком при использовании метода ЛГР в шахтных условиях является низкая производительность применяемого высоконапорного гидравлического оборудования [1, 2].

С целью повышения производительности измерительных работ ИГТМ НАН Украины совместно с руководством и техническими службами шахты им. А.Ф.Засядько принято и осуществлено решение об использовании при выполнении метода ЛГР шахтного высокопроизводительного гидравлического оборудования, применяемого при гидрообработке угленородных массивов [1, 3]. В связи с изложенным выполнена соответствующая корректировка технологии измерительных работ по сравнению с ранее намеченной «Проектом определения главных составляющих поля напряжений и направления их действия в угленородном массиве участка № 10 шахты им. А.Ф.Засядько методом локального гидроразрыва» [4].

Используемое до настоящего времени для определения действующих глав-

ных напряжений в углепородных массивах методом ЛГР высоконапорное оборудование (ручные насосы и распорные герметизаторы) не обеспечивают требуемых темпов измерительных работ в основном из-за низкой производительности высоконапорных ручных насосов [2, 3]. Поэтому принятое техническое решение об использовании шахтного гидравлического оборудования (распорных герметизаторов с клапанным регулированием внутреннего давления рабочей жидкости и подачи ее для ЛГР в нагнетательные камеры при помощи высоконапорной гидравлической установки СНТ-32), рационально не только для повышения производительности измерительных работ, но и для последующей гидрообработки углепородных массивов. Для осуществления данного технического решения авторами выполнены работы по монтажу, стендовой и шахтной проверке нагнетательного комплекса, включающего насосную установку, гибкий высоконапорный трубопровод, регулировочные дроссели и вентили, жесткий высоконапорный трубопровод, контрольные манометры [3]. Стендовые испытания, выполненные в гидроцехе шахты, позволили, наряду с проверкой работоспособности нагнетательного комплекса, установить необходимый распор, обеспечивающий надежную герметизацию нагнетательных камер, и построить тарировочные графики для определения в шахтных условиях параметров ЛГР (см. рис. 1 и 2).

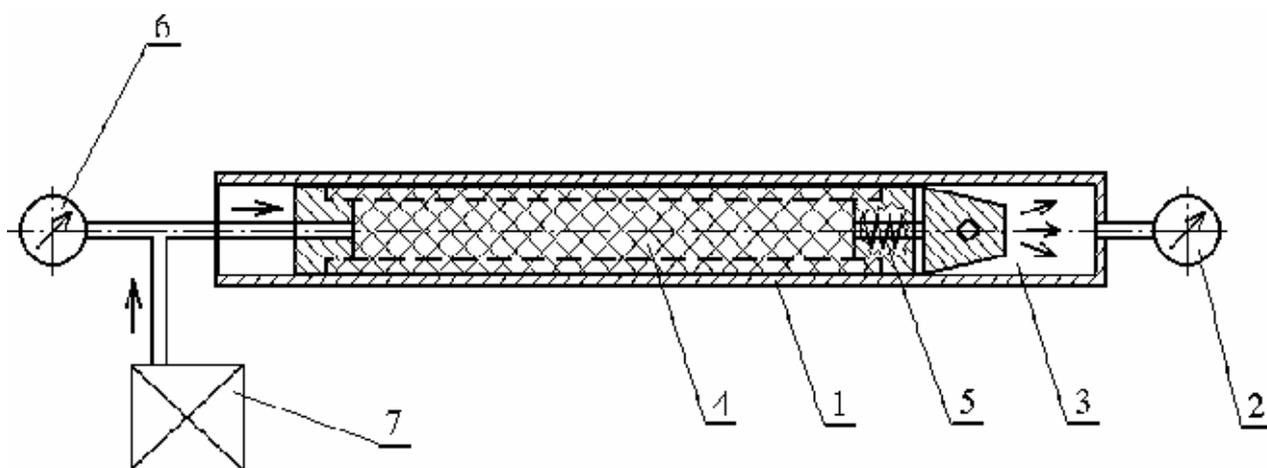


Рис. 1 – Функциональная схема лабораторного стенда для испытания и тарировки распорных герметизаторов

В отличие от ранее применяемых герметизирующих устройств, имеющих отдельную подачу рабочей жидкости в герметизатор и нагнетательную камеру, использование герметизаторов с клапанной регулировкой перепада распорного давления требует проведения специальных стендовых тарировочных испытаний, так как для контроля параметров ЛГР в шахтных условиях имеется один общий манометр, установленный в нагнетательной системе у устья измерительной скважины и фиксирующий суммарное гидравлическое давление (P_{Σ}). Гидравлическое давление в нагнетательной камере (P_k), экстремальная величина которого (P_k^*) приводит к ЛГР, измеряют тоже по этому контрольному манометру, но с учетом предварительно установленного при тарировочных испы-

таниях перепада распорного давления ΔP (см. рис. 2).

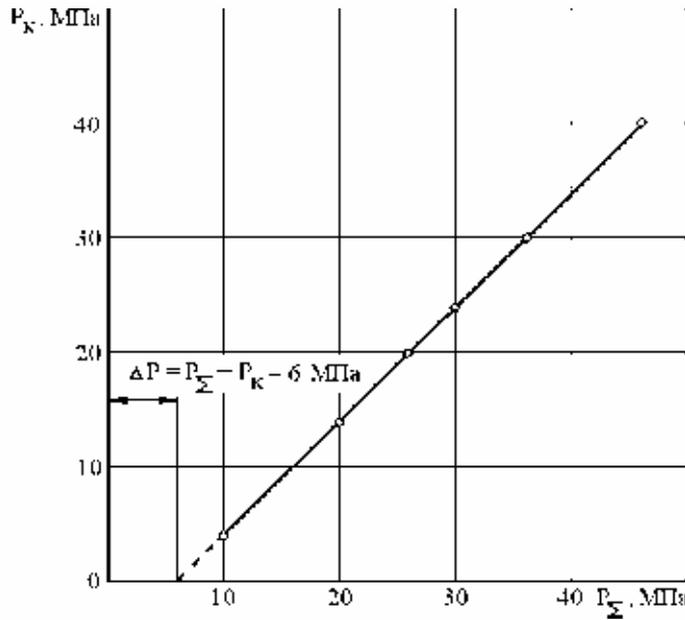


Рис. 2 – Тарировочный график изменения гидравлического давления рабочей жидкости в нагнетательной системе и загерметизированной камере: $P_k = f(P_\Sigma)$

Для определения методом ЛГР численных значений главных напряжений, действующих в плоскости, ортогональной продольной оси измерительной скважины, используют известное критериальное уравнение [1, 2]:

$$P_{эф}^* = \frac{3\sigma_3 - \sigma_1 + p^* - mP_o}{1 + \sigma_p \cdot \sigma_{сж}^{-1}}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где $P_{эф}^*$ - экстремальное эффективное давление рабочей жидкости в нагнетательной камере в момент ЛГР; σ_3 и σ_1 - соответственно меньшая и большая компоненты действующего в массиве поля напряжений; p^* - предел сопротивления породы гидроразрыву при отсутствии внешней нагрузки; m - коэффициент трещинно-поровой структуры разрушаемой среды; P_o - внутрипоровое давление флюидов; σ_p и $\sigma_{сж}$ - пределы сопротивления испытываемой породы одноосному растяжению и сжатию.

Доказано [1, 2], что при герметизации нагнетательной камеры распорным герметизатором, гидроразрыв, как правило, начинается в аномально напряженной зоне у сопряжения нагнетательной камеры с герметизирующей оболочкой под действием результирующего (эффективного) гидростатического давления ($P_{эф}$), критическая величина которого равна:

$$P_{эф}^* = P_k^* + \kappa_1 P_2^* \psi, \quad (2)$$

где P_k^* и P_2^* - соответственно экстремальные значения гидравлического и распорного давлений; κ_1 - коэффициент передачи давления распорного герметиза-

тора на стенки измерительной скважины (экспериментально определено [1], что для резиновых герметизаторов, армированных металлическим кордом $\kappa_1 = 0,6-0,7$); ψ - коэффициент взаимодействия распорного и гидравлического силовых полей, изменяющийся в зависимости от соотношения их численных характеристик от 0 до 1 и в начальный момент гидроразрыва равный:

$$\psi = 1 - P_{\kappa}^* / P_{\sigma}^* . \quad (3)$$

Из анализа критериального уравнения (1) видно, что оно включает два искоемых главных напряжения σ_3 и σ_1 . Меньшее из главных напряжений σ_3 определяют по стабилизированному давлению рабочей жидкости в нагнетательной камере (см. рис. 3) после локального гидроразрыва ($\sigma_3 \cong P_{cm-\kappa}$) [1, 2]. Тогда большую компоненту действующего поля напряжений σ_1 вычисляют по экспериментально полученным данным, входящим в аналитическую зависимость (1), которая после преобразований имеет вид:

$$(1 + \sigma_p / \sigma_{сж}) P_{эф}^* = 3\sigma_3 - \sigma_1 + p^* - mP_o , \quad (4)$$

или

$$\sigma_1 = 3\sigma_3 + p^* - mP_o - (1 + \sigma_p / \sigma_{сж}) P_{эф}^* . \quad (5)$$

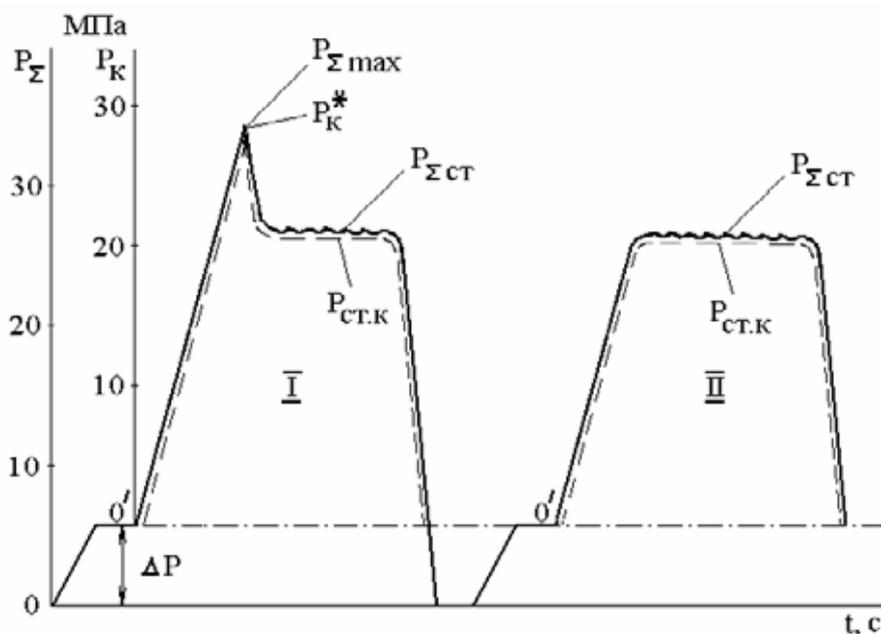
Учитывая, что для большинства горных пород, склонных к хрупкому разрушению, сопротивление растягивающим усилиям не превышает 10 % сопротивления сжатию, можно приближенно принять коэффициент $(1 + \sigma_p / \sigma_{сж}) \cong 1,1$. Подставляя вместо σ_3 стабилизированное давление рабочей жидкости в нагнетательной камере ($P_{cm-\kappa}$) получим удобную для практического применения зависимость:

$$\sigma_1 = 3P_{cm} + p^* - mP_o - 1,1P_{эф}^* , \text{ МПа.} \quad (6)$$

Выше указывалось, что для определения напряжений методом ЛГР при использовании герметизаторов с клапанной регулировкой заданного перепада распорного давления ΔP и наличии в нагнетательной гидравлической системе общего контрольного манометра необходимы предварительные стендовые испытания герметизаторов с построением тарировочного графика (см. рис. 2) зависимости гидравлического давления в нагнетательной камере (P_{κ}) от общего давления в нагнетательной системе (P_{Σ}).

На рис. 1 приведена функциональная схема лабораторного измерительного стенда, изготовленного в гидроцехе шахты им. А.Ф. Засядько, состоящего из стальной толстостенной трубы (1) диаметром 46 мм, контрольного манометра (2), вмонтированного в торцевую часть трубы и фиксирующего изменение гидравлического давления в нагнетательной камере (3), загерметизированной распорным герметизатором (4). Общее гидравлическое давление в нагнета-

тельной системе P_{Σ} при установке заданного перепада распорного давления ΔP регулировочным клапаном (5) и подаче рабочей жидкости через герметизатор контролируют по показаниям манометра (6), подключенного к высоконапорному насосу (7). Темп нагнетания в пределах 1-2 МПа/с регулируют при помощи системы вентилей и дроссельных устройств [3].



$P_{\Sigma \max}$, $P_{\Sigma \text{ст}}$ - общее максимальное и стабилизированное гидравлические давления в нагнетательной системе; P_{κ}^* , $P_{\text{ст.к}}$ - критическое и стабилизированное давления рабочей жидкости в нагнетательной камере; I, II – первоначальный и повторный циклы нагнетания рабочей жидкости.

Рис. 3 – Изменение гидравлического давления рабочей жидкости в нагнетательной системе при ЛГР в вертикальной измерительной скважине (песчаник l_1Sl_2')

На рис. 2 приведен тарировочный график $P_{\kappa} = f(P_{\Sigma})$ при установленном перепаде распорного давления $\Delta P = 6$ МПа, обеспечивающим надежную герметизацию нагнетательной камеры. Как видно из тарировочного графика, практически постоянный перепад ΔP сохраняется вплоть до повышения общего давления P_{Σ} до 46 МПа. При этом избыточное гидравлическое давление в нагнетательной камере, линейно изменяясь, достигает 40 МПа, что обеспечивает реальную величину ЛГР в шахтных условиях. Следует отметить, что для обеспечения заданной величины ΔP в герметизаторе и предохранения от возможного раскручивания его выходной части, выходной наконечник герметизатора необходимо закреплять стопорным винтом.

В шахтных условиях локальный гидроразрыв осуществляют в заранее пробуренных измерительных скважинах, исходя из цели и задач экспериментальных исследований. Для повышения надежности полученных экспериментальных результатов, используя установленную закономерность образования первоначальной трещины ЛГР в локальной области сопряжения нагнетательной камеры с герметизирующей оболочкой распорного герметизатора, осуществ-

ляют поинтервальный гидроразрывной каротаж. Он заключается в последовательном производстве локальных гидроразрывов в направлении от устья измерительной скважины к ее забою. Каждый последующий гидроразрыв выполняют после поступательного передвижения герметизатора на расстояние не менее длины герметизирующей оболочки, обеспечивающее перекрытие трещины предыдущего ЛГР. Это позволяет в одной измерительной скважине получить несколько численных значений параметров ЛГР, что существенно повышает надежность определения величины главных напряжений в углепородном массиве и представляет возможность количественно оценить их изменения на измерительных интервалах.

На рис. 3 приведена диаграмма изменения во времени гидравлического давления рабочей жидкости в нагнетательной системе (насосная установка СНТ-32 – скважинный герметизатор – нагнетательная камера) с заданной установкой перепада распорного давления $\Delta P = 6$ МПа при определении параметров ЛГР исследованного интервала (9,5 м) вертикальной скважины № 1, пробуренной в кровле газоносного пласта l_1 (песчаник l_1Sl_2'). Используя экспериментальные данные гидроразрывных каротажей, выполненных в пяти измерительных скважинах, пробуренных по песчанику l_1Sl_2' с 10-го западного конвейерного штрека пласта l_1 (пикеты 53-61), определены главные напряжения, действующие в углепородном массиве. По измеренным параметрам ЛГР в каждом гидроразрывном интервале определяли величину меньшей горизонтальной компоненты σ_3 по стабилизированным давлениям рабочей жидкости в нагнетательных камерах ($P_{ст.к}$) и величину большей горизонтальной компоненты поля напряжений по экстремальным значениям (P_k^*) согласно расчетной зависимости (6). Вертикальную составляющую действующего поля напряжений (σ_2) рассчитывали по произведению осредненного объемного веса вышележащих пород на глубину измерения от земной поверхности, а также по параметрам ЛГР в горизонтальных скважинах, пробуренных субпараллельно направлению большей горизонтальной компоненты (σ_1).

При определении численных значений главных составляющих действующего поля напряжений по параметрам ЛГР, с использованием герметизаторов с клапанной регулировкой перепада распорного давления ΔP выполняют следующие этапы (см. табл.)

1. В пробуренных измерительных скважинах производят поинтервальные локальные гидроразрывы. Параметры общего гидравлического давления заносят в колонки 3, 4.

2. Гидравлическое давление в нагнетательной камере вычисляют с учетом установленного перепада распорного давления ΔP (см. рис. 2) и заносят в колонки 6, 7.

3. Распорное давление в герметизаторе в момент ЛГР фиксируют по общему контрольному манометру и принимают равным максимальному гидравлическому давлению в нагнетательной системе ($P_z^* = P_{\Sigma \max}$) (колонка 8).

4. Определяют коэффициент взаимодействия распорного герметизатора с рабочей жидкостью ($\psi = 1 - P_k^* / P_z^*$) (колонка 9).

5. Вычисляют экстремальное значение эффективного гидростатического давления, приводящего к ЛГР ($P_{эф}^* = P_k^* + \kappa_1 P_z^* \psi$) (колонка 10).

6. Определяют меньшую горизонтальную компоненту действующего поля напряжений по стабилизированному гидравлическому давлению в нагнетательной камере ($\sigma_3 \cong P_{см-к}$) (колонка 11).

7. Вычисляют большую горизонтальную составляющую поля напряжений по зависимости (6) $\sigma_1 = 3P_{см-к} + p^* - mP_o - 1,1P_{эф}^*$ (колонка 12), при этом учитывают, что произведение величины порового давления флюидов P_o на коэффициент трещинно-поровой структуры породы m отражает понижение предела ее сопротивления локальному гидроразрыву p^* . Это понижение на глубине измерения напряжений около 1000 м при $m = 0,1-0,3$ достигает 1,5-3 МПа [1, 2].

8. Вертикальную составляющую действующего поля напряжений определяют как произведение осредненного объемного веса вышележащих пород на глубину от земной поверхности (колонка 13) или рассчитывают по параметрам ЛГР в горизонтальных измерительных скважинах, пробуренных в направлении действия большей горизонтальной составляющей поля напряжений.

Анализ приведенных в таблице экспериментальных данных показывает, что поле действующих напряжений в углепородном массиве пласта l_1 разнокомпонентно. Больше по величине является одна из главных горизонтальных составляющих поля напряжений σ_1 , изменяющаяся в пределах 44,5-60 МПа, что в 1,6-2,1 раза превышает давление вышележащих пород. Вторая главная горизонтальная компонента σ_3 изменяется от 18 до 21 МПа и в среднем не превышает 0,75 γH на данной глубине измерения. Вертикальная составляющая σ_z - по величине промежуточная, примерно соответствует давлению вышележащих пород.

Результаты оценки направления главных напряжений и степени раскрытия трещин ЛГР, определенные по их пространственной ориентации в гидроразрывных интервалах измерительных скважин при помощи перископического устройства РВП-456 и электромагнитного прибора КИТ-3 показали, что большая компонента σ_1 примерно ориентирована вкрест простирания горных пород (азимут 180-190°). Направление меньшей горизонтальной компоненты субпараллельно линии простирания пород, а вертикальная составляющая σ_z субвертикальна земной поверхности с отклонением от нормали к ней, не превышающим 15°.

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований обоснована целесообразность практического использования шахтного высоконапорного оборудования в режиме гидроразрывного каротажа для определения методом ЛГР главных составляющих действующего поля напряжений.

Определена величина и пространственная ориентация главных напряжений в углепородном массиве пласта l_1 . Полученные результаты будут использованы в качестве исходных данных для разработки рациональных технических решений по повышению устойчивости горных выработок, дегазационных скважин и эффективности их газоотдачи.

Таблица – Определение главных напряжений методом ЛГР в углеородном массиве пл. l_1 в вертикальных скважинах, пробуренных по песчанику l_1/S_2 с 10-го западного конвейерного штрака пл. l_1 (предел сопротивления породы гидроразрыву $p^* = 24 \div 26$ МПа)

№№ пикетов	№№ скв.; инт-ерва Л, м	Общее гидравлическое давление в нагнетательной системе, МПа		Перепад давления в герметизаторе $\Delta P = (P_2 - P_K), \text{МПа}$	Гидравлическое давление в нагнетательной камере, МПа		Распорное давление в герметизаторе при ЛГР $P_2^* = P_{\Sigma \text{max}}$ МПа	Коэффициент взаимодействия герметизатора с рабочей жидкостью, $\psi = 1 - \frac{P_K^*}{P_2^*}$	Эффективное давление при ЛГР $P_{\text{эф}}^* = P_K^* + \kappa_1 P_2^* \psi$, МПа	Главные горизонтальные компоненты поля напряжений, МПа		Вертикальная составляющая $\sigma_z \cong \mathcal{H}$, МПа
		Максимальное $P_{\Sigma \text{max}}$	Стабилизированное $P_{\Sigma \text{ст}}$		Критическое $P_K^* = P_{\Sigma \text{max}} - \Delta P$	стабилизированное $P_{\text{стк}} = P_{\Sigma \text{ст}} - \Delta P$				Меньшая $\sigma_3 \cong P_{\text{стк}}$	Большая $\sigma_1 = 3P_{\text{стк}} + p^* - mP_0 - 1,1P_{\text{эф}}^*$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ПК 53+3	№ 1: 3,0 м	34,0	26,0	6,0	28,0	20,0	34,0	0,2	32,1	20,0	48,7	28,0
	5,0 м	30,0	25,0	6,0	24,0	19,0	30,0	0,2	27,6	19,0	50,6	28,0
	7,8 м	28,0	26,0	6,0	22,0	20,0	28,0	0,2	25,4	20,0	56,2	28,0
	9,5 м	35,0	26,0	6,0	29,0	20,0	35,0	0,2	33,2	20,0	47,5	28,0
ПК 54	№ 3: 3,0 м	30,0	26,0	6,0	24,0	20,0	30,0	0,2	27,6	20,0	53,6	28,0
	5,0 м	33,0	27,0	6,0	27,0	21,0	33,0	0,2	31,0	21,0	52,9	28,0
	8,0 м	34,0	26,0	6,0	28,0	20,0	34,0	0,2	32,1	20,0	48,7	28,0
	10,0 м	30,0	28,0	6,0	24,0	22,0	30,0	0,2	27,6	22,0	60,0	28,0
ПК 56	№ 5: 4,5 м	35,0	25,0	6,0	29,0	19,0	35,0	0,2	33,2	19,0	44,5	28,0
	6,5 м	32,0	25,0	6,0	26,0	19,0	32,0	0,2	29,8	19,0	48,2	28,0
	8,5 м	30,0	26,0	6,0	24,0	20,0	30,0	0,2	27,6	20,0	53,6	28,0
	10,5 м	34,0	27,0	6,0	28,0	21,0	34,0	0,2	32,1	21,0	51,7	28,0
ПК 59	№ 7: 5,5 м	34,0	26,0	6,0	28,0	20,0	34,0	0,2	32,1	20,0	48,7	28,0
	7,5 м	33,0	28,0	6,0	27,0	22,0	33,0	0,2	31,0	22,0	55,9	28,0
	9,5 м	37,0	28,0	6,0	31,0	22,0	37,0	0,2	35,4	22,0	51,0	28,0
ПК 61	№ 9: 3,7 м	30,0	24,0	6,0	24,0	18,0	30,0	0,2	27,6	18,0	47,6	28,0
	5,7 м	32,0	25,0	6,0	26,0	19,0	32,0	0,2	29,8	19,0	48,2	28,0
	7,7 м	37,0	27,0	6,0	31,0	21,0	37,0	0,2	35,4	21,0	48,0	28,0
	9,7 м	35,0	26,0	6,0	29,0	20,0	35,0	0,2	33,2	20,0	47,5	28,0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по определению напряжений в массиве горных пород, методом локального гидравлического разрыва. – Днепропетровск: ИГТМ АН УССР. – 1989. – 34 с.
2. Кулинич В.С., Шевелев Г.А., Егоров С.И. Методы и средства определения параметров геомеханического состояния газоносного породного массива. – Донецк: ЦБНТИ, 1994. – 202 с.
3. Шматовский Л.Д., Гирич Е.Г., Пожитько И.И., Апрельский В.В. Опыт подготовки и использования гидравлического оборудования для оценки напряженного состояния углепородного массива пласта П1. – Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2002. – Вып. 37. – С. 104-109.
4. Проект определения главных составляющих поля напряжений и направления их действия в углепородном массиве участка № 10 шахты им. А.Ф.Засядько методом локального гидроразрыва. – Днепропетровск, ИГТМ НАНУ. – 2002. – 12 с.

УДК 622.016.25: 533

З.Р. Маланчук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГИДРОРАЗМЫВА РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Приведені результати моделювання гідродинамічних процесів гідромоніторного розмиву розсипних родовищ гідромоніторними струменями середнього тиску

MODELING OF HYDROMECHANICAL PROCESSES OF HYDROWASHING OUT PLACER OF DEPOSITS

Brought results of modeling of hydrodynamical processes of hydromonitor washing out placer of deposits of hydromonitor streams of average pressure

При исследовании геотехнологических процессов добычи широко используются методы физического моделирования, позволяющие воспроизвести и изучить в лабораторных условиях отдельные явления и физические механизмы изучаемых процессов [1]. Для переноса полученных зависимостей на реальный объект необходимо использовать теорию подобия. Применение физического моделирования к системам скважинной гидротехнологии осложняется тем, что большинство технологических операций не имеет математического описания. Поэтому при выводе уравнений подобия для систем скважинной гидротехнологии используется теория анализа размерностей [2, 3].

Учитывая, что создание общей модели для систем скважинной гидротехнологии практически невозможно ввиду методологических и технологических трудностей, целесообразно ограничиться исследованием, отдельных технологических операций.

Анализ проблемы гидравлического разрушения пород выявил:

- отсутствие единой теории разрушения;
- множество гипотез, включающих группу факторов, влияющих на процесс разрушения, значение которых и их удельный вес в основном не изучены;
- справедливость расчетов производительности отбойки и удельного расхода воды, которые основаны главным образом на эмпирических зависимостях, полученных для определенных горногеологических и гидрогеологических условий месторождений.