

УДК 622.267.32:268.6

*к.т.н. Кизияров О. Л.,
к.т.н. Заев В. В.,
к.т.н., д.э.н. Бизянов Е. Е.*

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, radioalex@bk.ru, vzaev@mail.ru, bpeelects@gmail.com)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННОЙ РАЗГРУЗКИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ГЛУБОКИХ ШАХТ

Приведены результаты исследования влияния параметров технологии скважинной разгрузки на напряжённо-деформированное состояние массива горных пород вокруг скважин. Получены эмпирические зависимости для прогноза смещений кровли и почвы выработки в зависимости от параметров скважинной разгрузки.

Ключевые слова: горное давление, напряжённо-деформированное состояние, разгрузочная скважина, метод конечных элементов.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Основным фактором, осложняющим разработку пластов на больших глубинах, является горное давление, воздействие которого приводит к значительным деформациям и сдвигению боковых пород, что, в свою очередь, затрудняет сохранение устойчивости контура и необходимого сечения выработки. Это приводит к тому, что эксплуатационные затраты становятся соизмеримыми со стоимостью проведения выработок, а в ряде случаев даже превосходят их.

Наиболее интенсивному воздействию негативного влияния очистных работ подвержены выработки, примыкающие к очистным забоям. В свою очередь, устойчивость пластовых выработок определяет условия отработки выемочного участка.

В условиях глубоких шахт традиционные способы охраны (целики угля, искусственные сооружения: бутовые полосы, тумбы БЖБТ, блоки БДБ, костры, органическая крепь и др.) не дают требуемого результата. Так, на контуре горных выработок опорное давление у кромки угольного пласта может превышать исходное гидростатическое в несколько раз [1]. В связи с чем на протяжении многих десятилетий ведётся интенсивный поиск решений, позволяющих как минимум снизить затраты на поддержание горных выработок.

Перспективным является направление на создание разгрузочных зон вокруг пластовой выработки в комплексе с традиционными способами охраны как наиболее рациональное для сложных горно-геологических условий, характеризующихся слабыми вмещающими породами и большими глубинами разработки.

Сущность способа создания разгрузочных зон (предварительной и последующей разгрузки) заключается в искусственном снижении напряжённого состояния пород, как до, так и после проведения пластовой горной выработки, путём выбуривания полостей в угольном пласте [2–5].

Рассмотренный опыт применения скважинной разгрузки позволяет сделать вывод о достаточно высокой её эффективности для различных горно-геологических условий. Однако, на наш взгляд, технологические параметры разгрузочных скважин обоснованы не в полной мере, без учёта свойств вмещающих пород и условий отработки. Это подтверждает и тот факт, что за последние два-три десятилетия нет данных об использовании скважинной разгрузки при проведении горных выработок, несмотря на её эффективность.

Постановка задачи. Основными параметрами технологии скважинной разгрузки массива являются: диаметр, длина и шаг бурения скважин.

Рекомендуемые авторами [2–5] параметры данной технологии существенно разнятся и колеблются в следующих пределах: длина 3...12 м, диаметр 200...300 мм и шаг между осями скважин 100...800 мм. Также следует отметить, что в большинстве работ параметры скважинной разгрузки применялись без учёта горно-геологических и горнотехнических факторов.

В связи с этим **целью** настоящей работы является обоснование рациональных параметров скважинной разгрузки с комплексным учётом горно-геологических и горнотехнических факторов для обеспечения устойчивости подготовительных выработок.

Объект исследования — напряжённо-деформированное состояние (НДС) углепородного массива вокруг выемочной выработки, разгруженного скважинами.

Предмет исследования — параметры технологии скважинной разгрузки углепородного массива.

Задачи исследования:

– разработка параметрической модели, включающей в себя очистной забой с выемочными выработками, позволяющей изменять исследуемые факторы в широком диапазоне;

– исследование влияния параметров разгрузочных скважин на напряжённо-деформированное состояние пород вокруг подготовительной выработки;

– установление закономерностей смещений кровли и почвы в выемочной выработке при различных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Методика исследования. Для исследований НДС углепородного массива разработана конечно-элементная параметрическая модель с применением программного комплекса Ansys. Фрагмент расчётной схемы представлен на рисунке 1. Расшифровка представленных на схеме факторов, а также диапазоны их варьирования представлены в таблице 1. Размеры модели, а также граничные условия заданы в соответствии с [6].

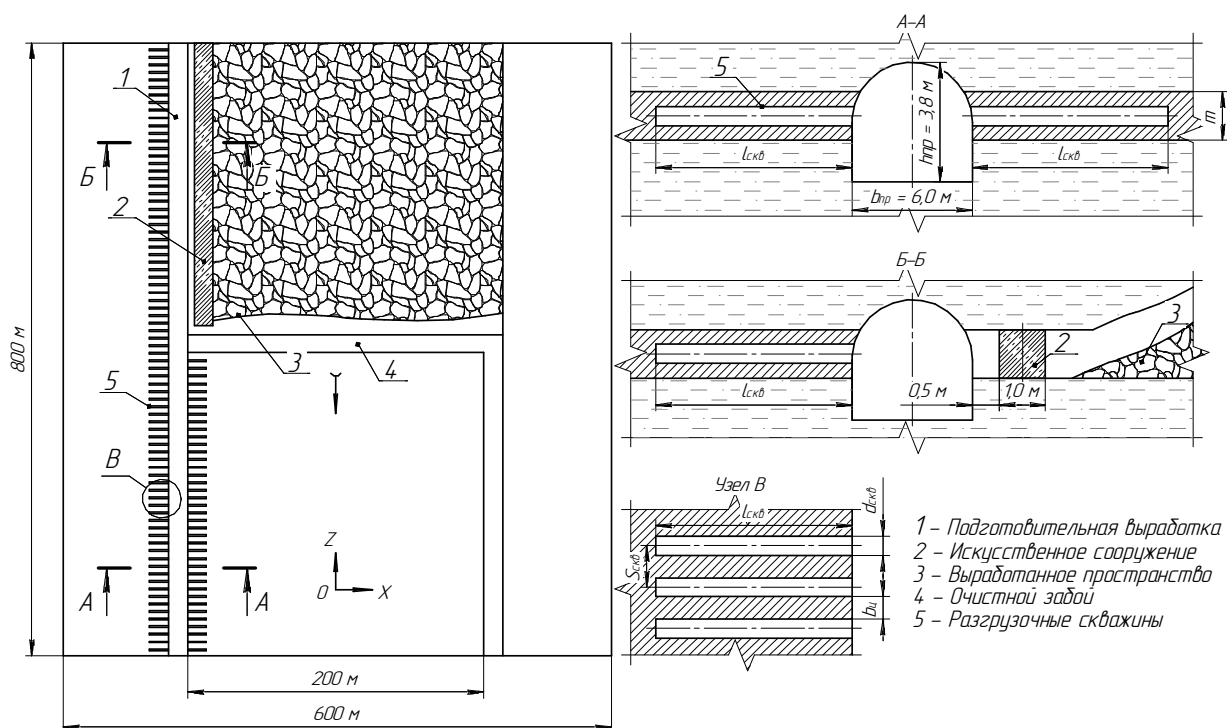


Рисунок 1 Фрагмент расчётной схемы скважинной разгрузки подготовительной выработки

Таблица 1

Диапазоны варьирования исследуемых факторов

Исследуемый фактор	Условное обозначение	Единицы измерения	Значение фактора		
			мин.	сред.	макс.
Диаметр скважин	$d_{\text{скв}}$	м	0,2	0,25	0,3
Расстояние между осями скважин	$S_{\text{скв}}$	м	0,3	0,6	0,9
Длина скважин	$l_{\text{скв}}$	м	0*	5	10
Мощность угольного пласта	m	м	0,6	1,2	1,8
Предел прочности угля на сжатие	$\sigma_{\text{сж.у}}$	МПа	15	20	25
Глубина разработки	H	м	600	900	1200
Предел прочности боковых пород на сжатие	$\sigma_{\text{сж.бп}}$	МПа	40	60	80

* — нулевое значение соответствует случаю, когда разгрузка массива скважинами не осуществляется.

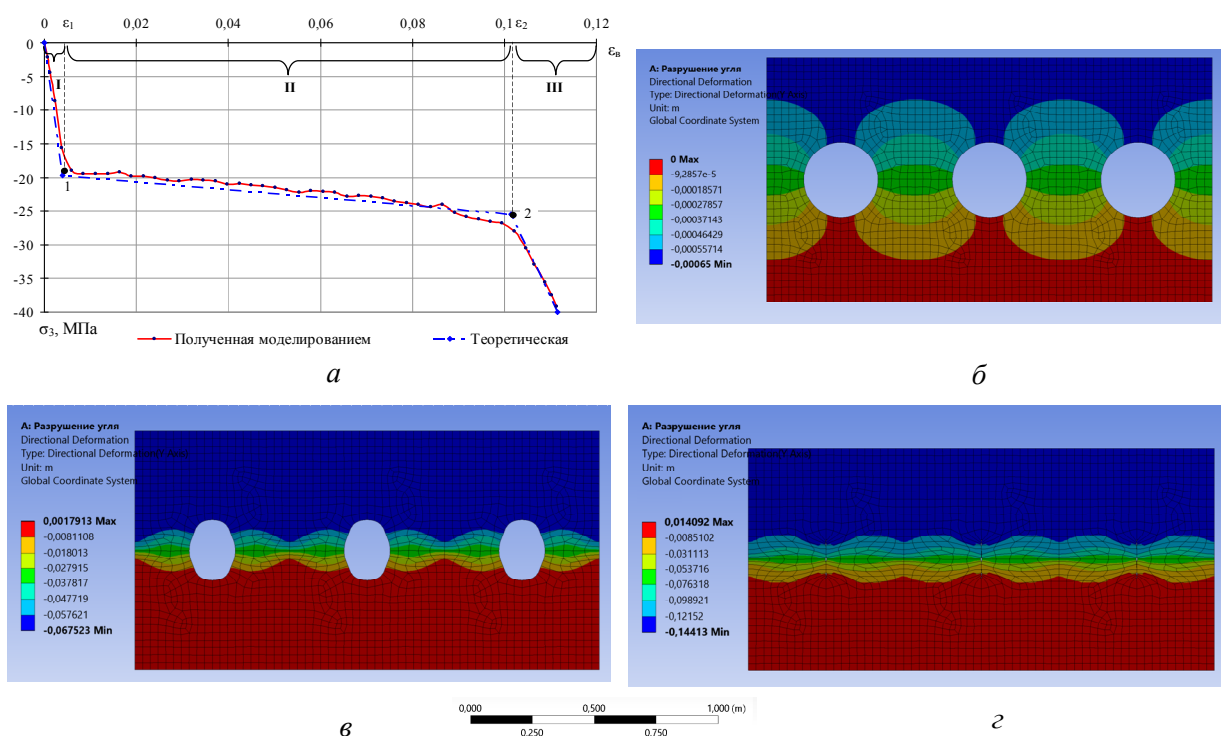
Решалась объёмная задача в физически и геометрически нелинейной постановке. Ширина межскважинного целика $b_{\text{ц}}$ определялась как разность между осями скважин $S_{\text{скв}}$ и их диаметром $d_{\text{скв}}$. Выработка охраняется двумя рядами тумб БЖБТ. Вынимаемая мощность пласта m в исследованиях принята равной 1,2 м. Геометрические параметры выработки (ширина $b_{\text{пр}}$ и высота $h_{\text{пр}}$ в проходке) приняты для типового сечения $15,5 \text{ м}^2$. Реакция крепи подготовительной выработки задавалась по поверхности контакта рам с боковыми породами как равномерно распределённая нагрузка при плотности установки 1,0 рам/м. Все задачи решались в несколько этапов: нагружение углепородного массива собственным весом, удаление пород в пределах контура выработки и задание реакции крепи (моделирование проведения выработки), формирование зон разгрузки, выемка угля.

Изложение материала и его результаты. В связи с тем, что задача решается в объёмной постановке, а наличие скважин требует применения детальной конечно-элементной сетки вокруг них, что приводит к существенным затратам вычислительных ресурсов ЭВМ и, как следствие, увеличению

времени расчёта, в работе принят следующий подход. Первоначально исследовано влияние основных технологических параметров на напряжённо-деформационные характеристики разгруженного угольного пласта. Затем полученные аппроксимированные кривые деформирования закладываются в жёсткостные свойства элементов, моделирующих зону разгрузки пласта.

Для учёта нелинейных свойств массива принята модель Менгери – Вилама [7]. Закон пластического течения — неассоциированный, с учётом дилатансии. Взаимодействие фракций разрушенного угля между собой, а также с массивом осуществляется путём задания самоконтакта на боковые поверхности скважин с коэффициентом трения, равным 0,15. Нагружение разгруженного скважинами пласта осуществлялось в режиме заданных вертикальных деформаций.

На рисунке 2, а представлен график зависимости главных напряжений σ_3 в межскважинных целиках от относительной величины сближения кровли с почвой пласта $\varepsilon_{\text{в}}$, а на рисунках 2, б–г — характер выдавливания разрушенного материала в полости разгрузочных скважин для следующих условий: $\sigma_{\text{сж.у}} = 20 \text{ МПа}$; $d_{\text{скв}} = 0,3 \text{ м}$; $S_{\text{скв}} = 0,6 \text{ м}$; $\sigma_{\text{сж.бп}} = 60 \text{ МПа}$.



a — график зависимости σ_3 в межскважинных целиках от относительной величины сближения кровли с почвой пласта ϵ_B ; *б*, *в*, *г* — схемы разрушения целиков при величине сближения кровли с почвой пласта, равной 0,01; 0,09 и 0,15 м соответственно

Рисунок 2 График деформирования угольного пласта и схема поэтапного разрушения межскважинных целиков

Напряжения σ_3 минимальны по знаку, но максимальны по абсолютному значению. Знак « \leftarrow » указывает на их сжимающий характер.

Как видно из рисунка 2, *a*, кривая деформирования разбита на три участка:

I — характеризуется упругим поведением угля (рис. 2, *б*); на этом участке наблюдается рост напряжений σ_3 до величины предела прочности угля $\sigma_{сж.у}$;

II — характеризуется пластическим (податливым) поведением за счёт разрушения межскважинных целиков (рис. 2, *в*); разрушенный материал при этом заполняет полость скважин; кривая деформирования более пологая, чем на предыдущем участке;

III — характеризуется полным заполнением полостей скважин разрушенным материалом (рис. 2, *г*), переходящим в объёмно-напряжённое состояние; наблюдает-

ся дальнейший рост напряжений σ_3 по мере вертикального сжатия пласта.

Для задания конечным элементам полилинейной деформационной характеристики необходимы значения ϵ_1 (предел упругости) и ϵ_2 (предел пластичности).

Относительные вертикальные деформации ϵ_1 определяются по формуле

$$\epsilon_1 = \sigma_{сж.у} / E_y, \quad (1)$$

где E_y — модуль упругости угля; для условий Донбасса в среднем $E_y = 7,8$ ГПа [6].

Относительные вертикальные деформации ϵ_2 определим из условия полного заполнения полости скважин разрушенным материалом, при этом

$$S_{сКВ} d_{сКВ} - \frac{\pi d_{сКВ}^2}{4} = k_3 S_{сКВ} (d_{сКВ} - \Delta m), \text{ м}^2, \quad (2)$$

где Δm — изменение мощности пласта в период раздавливания межскважинного целика, м; $k_3 = 0,85 \dots 0,9$ — коэффициент заполнения полости скважины разрушенным материалом;

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta m}{m}. \quad (3)$$

После преобразования зависимости (2) и подстановки в (3) получим

$$\varepsilon_2 = k_{\Pi} = \frac{0,1d_{\text{СКВ}} \cdot S_{\text{СКВ}} + 0,71d_{\text{СКВ}}^2}{S_{\text{СКВ}} \cdot m}. \quad (4)$$

Относительные вертикальные деформации угольного пласта ε_2 характеризуют его податливый режим работы за счёт разрушения межскважинных целиков. Обозначим выражение (4) как коэффициент податливости k_{Π} . При варьировании исследуемыми факторами в рассматриваемых диапазонах (табл. 1) значение k_{Π} изменяется в пределах от 0,01 до 0,38.

Полученные в зависимостях (1) и (4) относительные деформации задавались в виде полилинейной зависимости для конечных элементов, моделирующих разгруженную зону угольного пласта. Ширина зоны разгрузки принималась равной длине скважин $l_{\text{СКВ}}$.

Анализ расчётов показал, что при отношении $S_{\text{СКВ}}/d_{\text{СКВ}} < 3$ межскважинные целики разрушаются до подхода лавы при любых значениях предела прочности угля на одноосное сжатие $\sigma_{\text{сж.у}}$. В то же время при отношении $S_{\text{СКВ}}/d_{\text{СКВ}} = 3 \dots 4$ и $\sigma_{\text{сж.у}} = 25$ МПа (высокометаморфизированные угли) разрушение межскважинных целиков наблюдалось уже только в зоне влияния очистных работ. При дальнейшем увеличении значения отношения $S_{\text{СКВ}}/d_{\text{СКВ}} > 4$ разрушение межскважинных целиков не наблюдалось либо происходило за проходом очистного забоя. При этом целики, работая в жёстком режиме, являлись концен-

траторами напряжений, что приводило к увеличению максимальных сжимающих напряжений вокруг выработки и, как следствие, снижению эффективности технологии скважинной разгрузки.

Ниже приведены графики зависимости величин смещений кровли и почвы выработки от длины разгрузочных скважин при различном коэффициенте k_{Π} и средних значениях прочих факторов вне зоны влияния (рис. 3, а) и в зоне влияния (рис. 3, б) очистных работ.

Как видно из рисунка 3, а, наличие разгрузочных скважин приводит к росту смещений как кровли, так и почвы выработки, находящейся вне зоны влияния лавы. Это можно объяснить следующим. Первоначально углепородный массив вокруг выработки находится в зоне влияния опорного давления. После бурения скважин происходит раздавливание целиков с одновременным смещением кровли и почвы выработки, при этом снижаются напряжения с образованием разгруженной зоны.

Зависимость смещений от длины скважины носит затухающий характер. В качестве функции, описывающей данную зависимость, принята экспонента. Общий рост смещений кровли и почвы в одиночной выработке не превышает 40...60 мм.

После прохода очистного забоя (сечение Б–Б, рис. 1) наблюдалось незначительное продолжение роста смещений кровли, однако смещения почвы при этом существенно снижались и сильно зависели от коэффициента k_{Π} . Следует отметить, что наибольший эффект от применения разгрузочных скважин получается при их длине 3...6 м.

В целом, несмотря на рост смещений в разгруженной одиночной выработке, общие смещения после прохода лавы на 10...26 % меньше, чем в случае без применения скважинной разгрузки.

На основании проведённых исследований, после статистической обработки результатов расчёта, получены эмпирические зависимости для прогноза смещений

кровли и почвы выемочной выработки с учётом технологических параметров скважинной разгрузки:

– вне зоны влияния очистных работ:

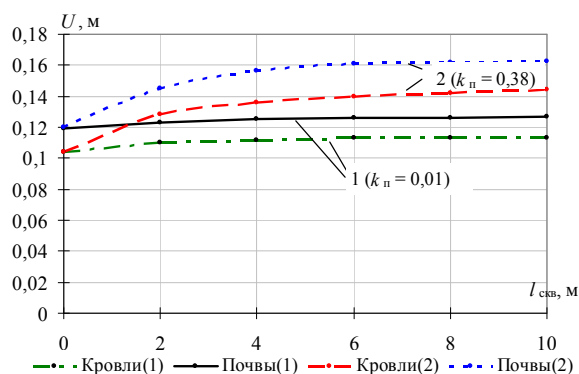
$$U_{к1} = \frac{H}{149\sigma_{сж.бп}} \cdot \left[1 + k_{п} \left(1 - \frac{1}{\exp(l_{скв})} \right) \right], \text{ м, (5)}$$

$$U_{п1} = \frac{H}{129\sigma_{сж.бп}} \cdot \left[1 + k_{п} \left(1 - \frac{1}{\exp(l_{скв})} \right) \right], \text{ м, (6)}$$

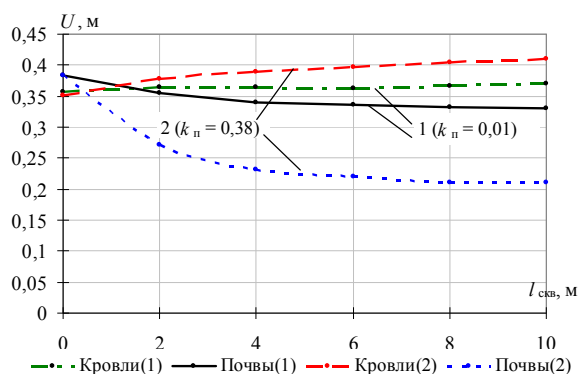
– в зоне влияния очистных работ:

$$U_{к2} = \frac{H}{53\sigma_{сж.бп}} \cdot \left[1 + k_{п} \left(1 - \frac{1}{\exp(l_{скв})} \right) \right], \text{ м, (7)}$$

$$U_{п2} = \frac{H}{33\sigma_{сж.бп}} \cdot \left[1 - k_{п} \left(1 - \frac{1}{\exp(l_{скв})} \right) \right], \text{ м. (8)}$$



а



б

Рисунок 3 Графики зависимости величин смещений кровли и почвы выработки от длины разгрузочных скважин (а — вне зоны влияния; б — в зоне влияния очистных работ)

Следует отметить, что полученные зависимости (5)–(8) характеризуются удовлетворительными показателями адекватности: $R^2 = 0,89 \dots 0,96$; показатель средней ошибки аппроксимации $\varepsilon = 12 \dots 19 \%$.

Учёт влияния площади поперечного сечения выработки осуществлён по аналогии с действующим нормативным документом [8] путём применения коэффициента K_S , определяемого по формуле

$$K_S = 0,2(b_{пр} - 1). \quad (9)$$

В случае, когда в кровле и почве выработки залегают разнородные по прочностным свойствам породы, согласно [8] необходимо скорректировать полученные смещения кровли и почвы путём ввода соответствующих коэффициентов $K_{кр}$ и $K_{п}$, определяемых по формулам:

$$K_{кр} = \sigma_{п} / (\sigma_{п} + \sigma_{к}), \quad (10)$$

$$K_{п} = 1 - K_{кр}, \quad (11)$$

где $\sigma_{к}$, $\sigma_{п}$ — соответственно предел прочности пород кровли и почвы на одноосное сжатие, МПа.

Поскольку в проведённых исследованиях $\sigma_{п} = \sigma_{к}$ и, следовательно, $K_{кр} = K_{п} = 0,5$, то значения коэффициентов, определяемых по формулам (10) и (11), необходимо разделить на 0,5 либо умножить на 2.

После соответствующих подстановок зависимости (5)–(8) для прогноза смещений примут вид:

– вне зоны влияния очистных работ:

$$U_{к} = 2 \cdot U_{к1} \cdot K_S \cdot K_{кр}, \text{ м, (12)}$$

$$U_{п} = 2 \cdot U_{п1} \cdot K_S \cdot K_{п}, \text{ м, (13)}$$

– в зоне влияния очистных работ:

$$U'_{к} = 2 \cdot U_{к2} \cdot K_S \cdot K_{кр}, \text{ м, (14)}$$

$$U'_{п} = 2 \cdot U_{п2} \cdot K_S \cdot K_{п}, \text{ м. (15)}$$

С учётом проведённых исследований предложен следующий алгоритм определения параметров технологии скважинной разгрузки:

1) в зависимости от применяемого типа крепи, вида транспорта в подготовительной выработке и других влияющих факторов определяются допустимые смещения кровли и почвы, как вне зоны влияния ($U_{к.доп}$, $U_{п.доп}$), так и в зоне влияния очистных работ ($U'_{к.доп}$, $U'_{п.доп}$);

2) по формуле (4) рассчитывается значение коэффициента $k_{п}$, при этом диаметр скважин $d_{скв}$ принимается максимальным, исходя из наличия на шахте бурового оборудования и его технических характеристик; расстояние между осями разгрузочных скважин принимается равным $S_{скв} = (1,5...2)d_{скв}$;

3) по формулам (12)–(15) рассчитываются прогнозные смещения при подстановке $l_{скв} = 0$ м, т. е. без применения разгрузки; при различающихся прочностных свойствах кровли и почвы, а также для учёта фактической площади поперечного сечения выработки предварительно рассчитываются поправочные коэффициенты $K_{кр}$, $K_{п}$ и K_S по формулам (10), (11) и (9) соответственно. Если полученные значения смещений меньше допустимых, то необходимость в бурении скважин отпадает;

4) по формулам (12)–(15) рассчитываются прогнозные смещения U_i , U' при подстановке $l_{скв} = 4...6$ м и сравниваются с допустимыми $U_{i.доп}$, U'_i . Выполнение условия $U_i > U_{i.доп}$ означает, что применение скважинной разгрузки не обеспечит безремонтного поддержания и данная технология малоэффективна;

5) с целью снижения трудоёмкости выполнения работ, а также себестоимости разгрузки 1 м выработки принятые параметры технологии $S_{скв}$, $d_{скв}$, $l_{скв}$ могут быть скорректированы при соблюдении условий $U_i \leq U_{i.доп}$, а также $S_{скв} / d_{скв} < 4$.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Разгрузка массива скважинами одиночной выработки приводит к незначительному росту смещений кровли и почвы, однако после прохода очистного забоя смещения почвы существенно ниже, чем в случае без применения разгрузки. Для снижения смещений в одиночной выработке разгрузочные скважины необходимо бурить до начала её проведения (технология бурения скважин параллельно продольной оси выработки из магистральных штреков).

2. Применение скважинной разгрузки неэффективно при условии $S_{скв} / d_{скв} > 4$.

3. В целом технология скважинной разгрузки подготовительных выработок глубоких шахт позволяет на 10...26 % снизить общие вертикальные смещения, тем самым повысить её устойчивость и снизить затраты на поддержание.

4. На основании численного моделирования получены эмпирические зависимости для прогноза смещений кровли и почвы подготовительной выработки в зависимости от параметров скважинной разгрузки массива при различных условиях отработки пласта.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методики прогноза смещений кровли и почвы разгруженной скважинами подготовительной выработки с учётом фактора времени.

Библиографический список

1. Катков, Г. А. Изменение напряжённо-деформированного состояния краевой части угольного пласта с увеличением глубины разработки [Текст] / Г. А. Катков, Р. И. Хаимова-Малькова // ФТПРПИ. — Новосибирск, 1995. — № 6.

2. Симанович, А. М. Охрана выработок на глубоких горизонтах [Текст] / А. М. Симанович, М. А. Сребный. — М. : Недра, 1976. — 144 с.

3. Штанько, Л. А. Исследование состояния выемочных выработок в зоне влияния очистных работ [Текст] : науч. изд. / Л. А. Штанько, А. В. Ремизов. — Луганск : Промпечать, 2011. — 88 с.

4. Мельник, В. В. Варианты технологии отработки мощных пологих пластов с выпуском подкровельной толщи на основе скважинной разгрузки [Текст] / В. В. Мельник, И. С. Кириченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М., 2011. — № 4. — С. 33–36.

5. Литвинский, Г. Г. Повышение устойчивости выработок разгрузкой горного массива от напряжений целлями [Текст] / Г. Г. Литвинский, Г. В. Бабиюк // Экспресс-информ ЦНИЭИуголь, ЦБНТИ Минуглепрома УССР. — М., 1979. — 26 с.

6. Комисаров, С. Н. Управление массивом горных пород вокруг очистных выработок [Текст] / С. Н. Комисаров. — М. : Недра, 1983. — 237 с.

7. Menétrey, P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures [Text] / Philippe Gérald Menétrey // Diss. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. — Lausanne, 1994. — 179 с.

8. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони [Текст] // Мін-во вугільної промисловості України ; ДонВУГІ, УкрНДІпроект. — К. : Мінуглепром України, 2007. — 116 с.

© Кизияров О. Л.

© Заев В. В.

© Бизянов Е. Е.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А., к.т.н., доц. СУНИГОТ ЛНУ им. В. Даля Штанько Л. А.

Статья поступила в редакцию 25.11.19.

к.т.н. Кизияров О. Л., к.т.н. Заев В. В., к.т.н., д.е.н. Бизянов Е. Е. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, radioalex@bk.ru, vzaev@mail.ru, bpeelecs@gmail.com)

ГЕОМЕХАНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СВЕРДЛОВИННОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК ГЛИБОКИХ ШАХТ

Наведено результати дослідження впливу параметрів технології свердловинного розвантаження на напружено-деформований стан масиву гірських порід навколо свердловин. Отримано емпіричні залежності для прогнозу зсувів покрівлі і підосви виробки в залежності від параметрів свердловинного розвантаження.

Ключові слова: гірський тиск, напружено-деформований стан, розвантажувальна свердловина, метод скінченних елементів.

PhD in Engineering Kiziyarov O. L., PhD in Engineering Zayev V. V., PhD in Engineering, Doctor of Economics Bizianov E. E. (DonSTU, Alchevsk, LPR, radioalex@bk.ru, vzaev@mail.ru, bpeelecs@gmail.com)

GEOMECHANICAL SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF WELL RELIEVING THE PRELIMINARY DEVELOPMENT IN DEEP MINES

The research findings of influence of the parameters of well relieving technology on the stress-strain state of the rock mass around the wells are presented. There have been obtained the empirical dependences for the prediction of roof and sill displacements depending on the parameters of well relieving.

Key words: rock pressure, stress-strain state, relief well, finite-element method.