

**ОБОСНОВАНИЕ НА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ ПАРАМЕТРОВ  
СПОСОБА ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК  
С ПУЧАЩЕЙ ПОЧВОЙ**

Представлено результати обґрунтування технологічних параметрів способу забезпечення стійкості підшви підготовчої виробки, проведеної слідом за лавою. Спосіб реалізований у вигляді щілини, механічним способом спорудженої в підшві виробки. Щілина працює як демпфер, що поглинає бічні зсуви порід у підшві, котрі викликають здимання порід.

**SUBSTANTIATION ON NUMERICAL MODELS OF PARAMETERS  
OF PROVIDING STEADINESS METHOD OF MINE WORKING WITH  
ROADWAY FLOOR, WHICH ONE HEAVES UP**

The outcomes of exploration of technological parameters of a method of providing a steadiness of mine working are presented. The mine working is driving after breakage face and in her the floor heaving is discovered. The method is implemented as the mechanically built slot in ground of a mine working. The slot works as the impulse neutralizer immersing lateral displacements of mucks in ground, which call a rock heaving.

С увеличением глубины разработки запасов каменного угля существенно ухудшаются горно-геологические условия ведения работ, что негативно сказывается на устойчивости подготовительных выработок: значительная их часть находится в неудовлетворительном состоянии. При этом одним из наиболее распространенных видов проявлений горного давления является пучение пород почвы. Значительные объемы пучения приводят к потере сечения, и как следствие, к резкому ухудшению условий эксплуатации транспорта и проветривания выработок. Особенно эта проблема актуальна для выработок, находящихся в зоне влияния очистных работ.

На шахте им. Бажанова при отработке выбросоопасных пластов угля для обеспечения сохранности вентиляционных подготовительных выработок практикуется их проходка вслед за лавой. Однако, как показывают исследования, проведенные на контурных реперных станциях в вентиляционном ходе 6-й западной лавы пл. т<sub>3</sub> гор. 1100 м [1], такая практика не спасает от пучения пород: в выработке проводится двойная подрывка на величину порядка 0,8 м на каждом участке. Анализом данных, полученных в ходе этих измерений, установлено, что критическим с точки зрения сохранения эксплуатационного состояния выработки является ее участок, расположенный на расстоянии 20-30 м от лавы, где наблюдается активизация всех геомеханических процессов в приконтурном массиве [2]. По сути, обеспечение эксплуатационного состояния выработки в целом сводится к обеспечению устойчивости этого «критического участка» на время, необходимое для продвижения забоя лавы на 180-200 м.

Для обеспечения устойчивости этого критического участка предложен способ с продольной разгрузочной щелью, сооружаемой механическим способом с применением специально модифицированного проходческого оборудования

[3]: щель прорезается баром, установленным на проходческом комбайне вместо ненужного при данной технологии перегружателя. При этом в ходе исследований установлено [2], что влияние щели направлено не только на перераспределение напряжений в почве выработки, но и на создание демпфера, некоторое время поглощающего возникающие при формировании зоны разрыхления деформации пород в почве выработки. Этот эффект, лежащий в основе предложенного способа, назовем «эффектом закрывающейся щели».

Технологические параметры указанного способа требуют научного обоснования, для чего была проведена серия численных экспериментов с привлечением метода конечных элементов.

Целью настоящей статьи является описание результатов серии численных экспериментов по обоснованию параметров способа обеспечения устойчивости выработки с пучащей почвой, которая проходится вслед за лавой, реализованного в виде щели, сооруженной механическим способом в почве.

Расчетная схема и подход к выполнению численного эксперимента описаны в [4]. Физико-механические свойства пород массива приняты равными свойствам пород в натуре (по данным геологической службы шахты) (табл. 1).

Таблица 1 – Физико-механические характеристики пород, принятые при численных экспериментах

Параметр	Аргиллит	Алевролит	Известняк
Объемный вес, $\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-3}$
Предел прочности на одноосное сжатие, $\sigma_c$ , МПа	36,00	51,00	60,00
Предел прочности на одноосное растяжение, $\sigma_t$ , МПа	3,50	5,50	7,00
Модуль Юнга, $E$ , МПа	$2,40 \cdot 10^4$	$3,40 \cdot 10^4$	$4,00 \cdot 10^4$
Коэффициент Пуассона, $\mu$	0,23	0,21	0,20

Численные исследования были построены с учетом результатов лабораторного моделирования [5] и сосредоточены на обосновании параметров разгрузочной щели.

Моделировалось несколько ситуаций, связанных с развитием пучения в выработке, а именно:

а) без применения дополнительных мероприятий по предупреждению пучения;

б) в почве выработки по центру выполнялась щель шириной 0,15 м и глубиной 0,7 м, 1,4 м, 2,1 м;

в) в почве выработки по центру выполнялась щель шириной 0,3 м и глубиной 0,7 м, 1,4 м, 2,1 м;

г) в почве выработки по центру выполнялась щель шириной 0,3 м и глубиной 2,1 м, заполненная легко деформируемым материалом.

Целью проведенных численных экспериментов являлось сравнение картин напряженно-деформированного состояния для указанных выше ситуаций и выбор наиболее рациональных параметров разгрузочной щели. Анализ получен-

ных результатов показывает следующее.

На рис. 1 представлен график зависимости величины радиуса зоны неупругих деформаций на момент потери устойчивости от глубины щели (включая ситуацию при  $L_{щ}=0$ ). Согласно этому графику, наличие щели в почве выработки приводит к увеличению относительного радиуса зоны неупругих деформаций. Однако потеря устойчивости почвы (переход ко второму этапу решения в соответствии с принятым расчетным алгоритмом [4]) наступает только после полного закрытия щели, поскольку дополнительные перемещения реализуются не в вертикальном направлении, а в горизонтальном, и направлены на закрытие щели.

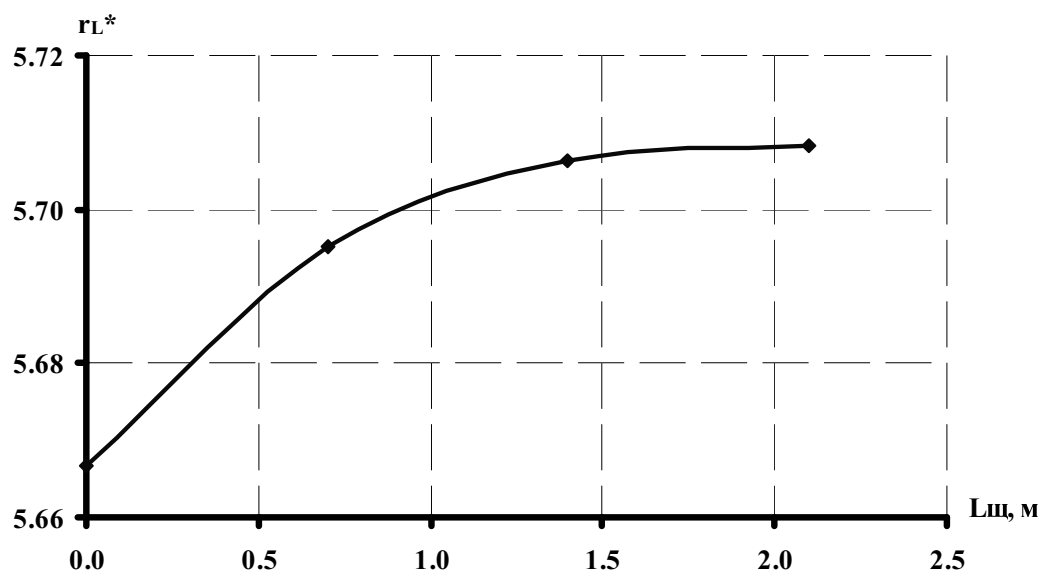


Рис. 1 – Величина радиуса неупругих деформаций  $r_L^*$ , достигнутая на момент потери устойчивости почвы, при различной глубине разгрузочной щели

Сказанное подтверждают рис. 2 и 3, иллюстрирующие зависимости вертикальных  $U_v^*$  и горизонтальных  $U_g^*$  перемещений на момент потери устойчивости почвы, при различной глубине разгрузочной щели. Из графиков видно, что с увеличением глубины щели величина вертикальных смещений контура почвы уменьшается в 2,06 раза (рис. 2), тогда как горизонтальные смещения увеличиваются в 2,33 раза (рис. 3).

Кривые на рис. 4 указывают на то, что при достижении нагрузки, равной  $\gamma H$  ( $P=30,1$  МПа), сближение стенок щели практически заканчивается, т.е. щель практически закрыта. При этом пучение (потеря устойчивости почвы) наступает спустя некоторое время после закрытия щели, так как в этот период за счет взаимного давления друг на друга стенок щели происходит перераспределение напряжений в ее окрестности, что сопровождается деформационными процессами внутри зоны разрыхления.

Данный вывод указывает на то, что использование разгрузочной щели шириной 0,15 м в качестве демпфера, «поглощающего» деформации приконтурного массива в окрестности выработки, который бы работал достаточно длитель-

ное время, необходимое для поддержания критического участка вентиляционного ходка (см. [2]), нецелесообразно – запас смещений до полного закрытия щели оказывается недостаточным.

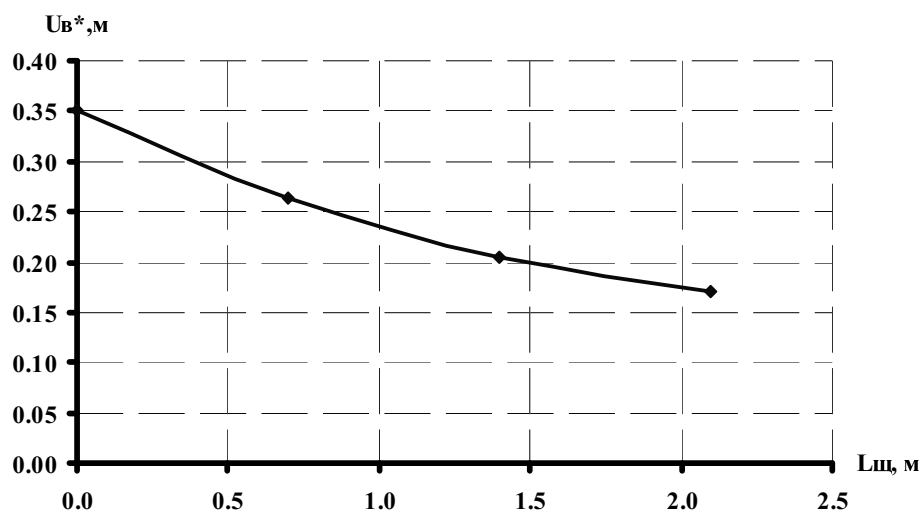


Рис. 2 – Вертикальные перемещения  $U_{в}^*$  на контуре выработки на момент потери устойчивости почвы, при различной глубине разгрузочной щели

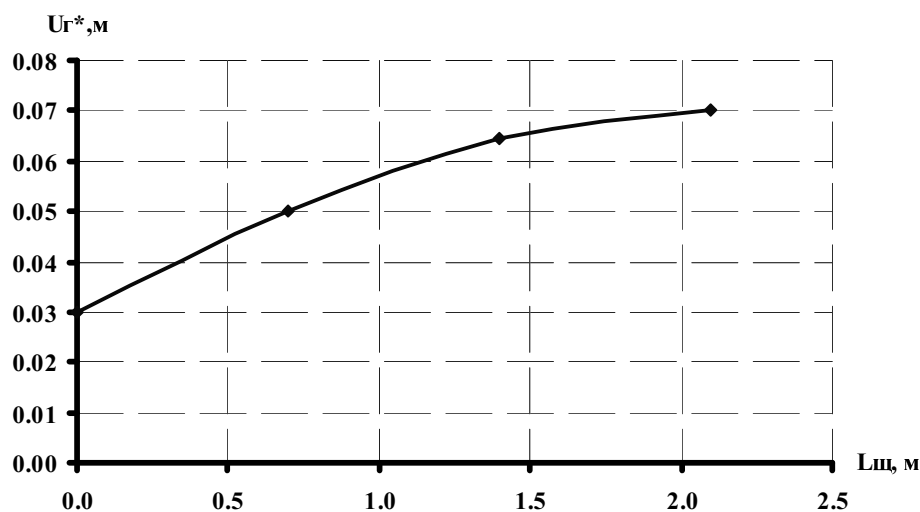


Рис. 3 – Горизонтальные перемещения  $U_{г}^*$  на контуре выработки на момент потери устойчивости почвы, при различной глубине разгрузочной щели

В связи с этим были проведены исследования со щелью большей ширины, равной 0,3 м.

Анализ результатов (рис. 5) показывает следующее. В отличие от случая со щелью шириной 0,15 м, при щели 0,3 м величина смещений стенок возросла в 1,3 раза, а скорость нарастания смещений (в среднем по глубине щели) – на 25%. При этом, при достижении нагрузкой величины, равной  $\gamma H$  ( $P=30,1$  МПа), сближение стенок щели еще не закончено и составляет (в среднем по глубине

щели) 0,19 м, т.е. менее 40,0% от ширины щели. Как и в случае со щелью шириной 0,15 м, вспучивание возникало спустя некоторое время после полного закрытия щели.

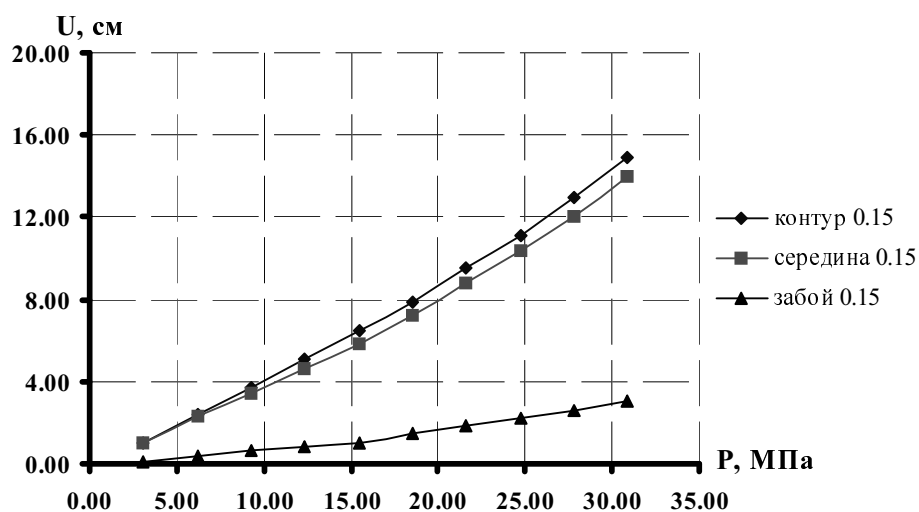


Рис. 4 – Величина сближения стенок разгрузочной щели (ширина щели 0,15 м) на различных участках по глубине щели

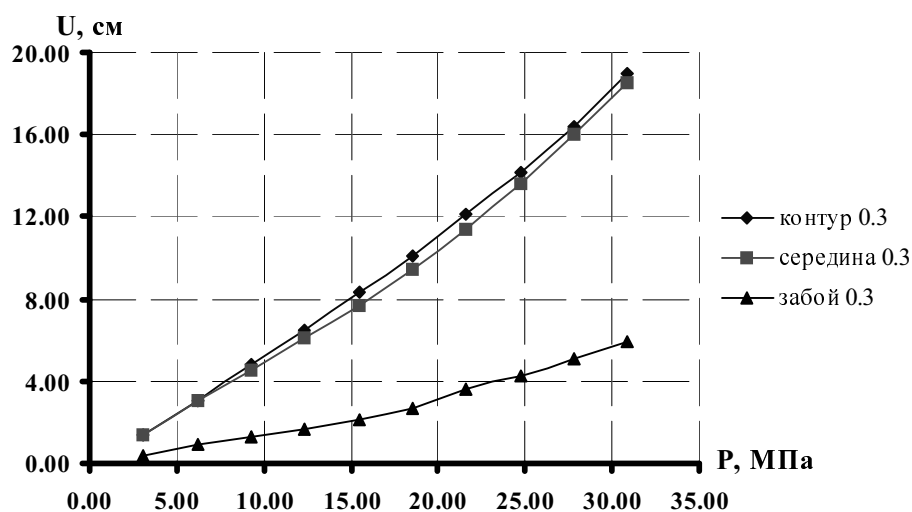


Рис. 5 – Величина сближения стенок разгрузочной щели (ширина щели 0,30 м) на различных участках по глубине щели

Анализ данных таблицы 2 указывает на положительное влияние щели на напряженное состояние приконтурного массива – независимо от ширины щели общий уровень напряжений на контуре выработки снизился в среднем на 18,8-19,0% (или в 1,23 раза). В кровле выработки величины компонент напряжений практически не изменились от величин, полученных при отсутствии щели (и при ширине 0,15 м, и при ширине 0,3 м отличие не превышает 2,0%). В почве ситуация существенно иная: величины горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  при

ширине щели 0,15 м и 0,3 м соответственно уменьшились в 1,8 и 1,9 раза; вертикальные напряжения снизились, но менее, чем на 10% (7,0% и 8,0% соответственно); касательные напряжения поменяли знак и по абсолютной величине уменьшились в 10,8 и 8,1 раз соответственно. То есть, основное влияние разгрузочная щель оказывает на горизонтальную и сдвиговую компоненты напряжений массива в почве выработки. При этом, между собой напряженное состояние при щелях шириной 0,15 м и 0,3 м не имеет существенных различий, тогда как в части деформационных процессов (рис. 4 и 5) наличие в выработке щели шириной 0,3 м оказывается предпочтительным.

Таблица 2 – Компоненты напряжений на контуре выработки при различной ширине разгрузочной щели

	Ширина щели, $b_{щ}$ , м	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\tau_{xy}$ , МПа
Кровля	0,00	-21,05	-16,83	2,75
	0,15	-16,60	-17,00	2,68
	0,30	-16,67	-17,07	2,68
Почва	0,00	-28,06	-17,30	0,65
	0,15	-15,62	-16,11	-0,06
	0,30	-14,52	-15,88	-0,08

Таким образом, разгрузочная щель шириной 0,3 м и глубиной 2,0 м обладает запасом смещений стенок, который позволяет использовать ее в качестве демпфера, «поглощающего» деформации приконтурного массива в окрестности выработки в период поддержания критического участка вентиляционного ходка.

Технологически такая щель может быть сооружена путем повторного прогона проходческого комбайна с баром вдоль участка выработки, на котором сооружается щель. Конструкция такого комбайна защищена патентом Украины и описана в [3]. В ходе выполнения этой операции возможно частичное заполнение полученной щели породой от второго прохода бара. Во втором варианте, если щель проводится с оставлением небольшого (не более ширины бара) целика между щелями от первого и второго прохода бара, не исключено разрушение этого целика, так как его местоположение в выработке находится в зоне активных технологических действий, а, следовательно, он может испытывать достаточно интенсивные вибрационные и механические нагрузки от применяемого в выработке оборудования и выполняемых в ней работ. При этом порода от разрушившегося целика также будет заполнять сооруженную щель. Породы, частично заполнившая в этих случаях щель, будет достаточно разрыхленной, что обуславливает ее высокие деформационные характеристики, т.е. она будет легко деформироваться при закрытии щели, постепенно уплотняясь.

С целью установления характера влияния легко деформирующегося заполнителя на закрытие разгрузочной щели шириной 0,3 м, проведены дополнительные исследования. Для решения численной задачи о напряженно-деформированном состоянии массива в почве выработки, содержащей одиночную осевую разгрузочную щель шириной 0,3 м и глубиной 2,1 м, заполненную

на 2/3 легко деформирующимся материалом, была применена та же расчетная схема, что и в предыдущей серии задач. Физико-механические свойства материала-заполнителя щели приняты соответствующими свойствам обрушенных пород. Анализ результатов (рис. 6, табл. 3) показал следующее.

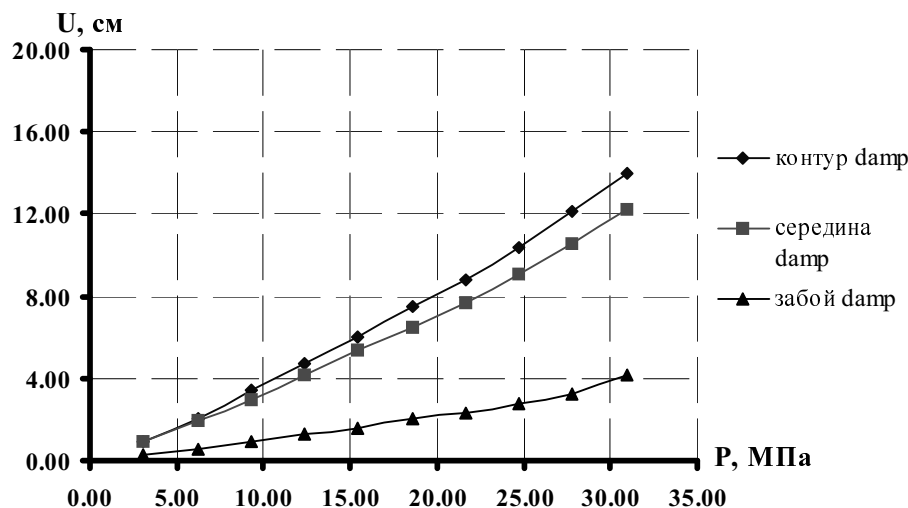


Рис. 6 – Величина сближения стенок разгрузочной щели (ширина щели 0,30 м + легко деформируемый заполнитель)

Таблица 3 – Компоненты напряжений на контуре выработки при наличии в разгрузочной щели легко деформируемого заполнителя

	Ширина щели, $b_{щ}$ , м	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\tau_{xy}$ , МПа
Кровля	0,30+заполнитель	-20,30	-25,93	3,81
Почва	0,30+заполнитель	-17,99	-28,25	-0,78

Напряженное состояние (табл. 3) в окрестности выработки ухудшилось по сравнению со щелью без заполнителя и в части напряжений  $\sigma_x$  по кровле приблизилось к ситуации без щели. Та же компонента напряжений ( $\sigma_x$ ) по почве в ситуации «щель 0,3 м с заполнителем» оказывается в 1,24 раза большей, чем при той же щели без заполнителя. Компоненты  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  в рассматриваемой ситуации оказываются не только значительно больше, чем при щели без заполнителя, но даже превышают значения тех же компонент при ситуации отсутствия щели. Такую картину напряжений можно объяснить процессами уплотнения деформирующегося заполнителя стенками щели. При этом основная нагрузка приходится именно на стенки щели, что и вызывает повышение значений напряжений.

Картина смещений стенок щели (рис. 6) показывает, что при величине нагрузки, равной  $\mathcal{H}$  ( $P=30,1$  МПа), сближение стенок щели с заполнителем не достигают и половины ширины щели, а интенсивность этих смещений в среднем по глубине на 30,6% ниже, чем в случае той же щели без наполнителя.

Таким образом, присутствие легко деформирующегося заполнителя в раз-

грузочной щели не препятствует ее работе в качестве демпфера, поглощающего деформации приконтурного массива.

Совокупный анализ результатов серии численных экспериментов показывает, что наличие разгрузочной щели в почве выработки снижает общий уровень напряжений в приконтурном массиве, тем самым улучшая ее общее состояние. При параметрах щели: ширина – 0,3 м и глубина – до 2,0 м, наблюдается «эффект закрывающейся щели», т.е. она имеет запас смещений, который позволяет ее рассматривать не только как мероприятие по разгрузке почвы выработки от напряжений, но и в качестве демпфера, поглощающего смещения приконтурного массива. Причем работа демпфера продолжается в период, когда рассматриваемый участок выработки со щелью является «критическим участком», т.е. находится на расстоянии от забоя лавы от 20-30 м до 200 м.

Натурный эксперимент, проведенный в шахтных условиях для проверки результатов численного моделирования [6], подтвердил правильность выводов, полученных в ходе обоснования параметров щели на численных моделях. Проведенный натурный эксперимент показал, что дополнительные мероприятия по обеспечению устойчивости выработок, сооруженных и поддерживаемых за очистным забоем в шахтах, использующие «эффект закрывающейся щели», оказывают положительное влияние на состояние защищаемой выработки. При параметрах щели: глубина 2,0 м и ширина 0,3 м – величина пучения снижается в 2,7 раза, щель-демпфер продолжает работать требуемое время, т.е. пока забой лавы не отойдет на расстояние более 200 м. В этом случае «критический участок» выработки, на котором сосредоточены основные работы по ее поддержанию, оказывается защищенным действием щели-демпфера, что ведет к снижению объемов ремонтных работ в выработке и обеспечивает ее эксплуатационное состояние.

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что наличие щели в почве выработки приводит к увеличению относительного радиуса зоны неупругих деформаций. При этом потеря устойчивости почвы (пучение) наступает только после полного закрытия щели.

2. С увеличением глубины щели величина вертикальных смещений контура почвы уменьшается в 2,06 раза, тогда как горизонтальные смещения увеличиваются в 2,33 раза.

3. При достижении нагрузки величины, равной  $\gamma H$  ( $P=30,1$  МПа), сближение стенок щели шириной 0,15 м практически заканчивается, т.е. щель практически закрыта, что не позволяет использовать такую щель в качестве демпфера, поглощающего смещения массива на «критическом участке» выработки.

4. При ширине щели 0,3 м величина смещений стенок возросла в 1,3 раза, а скорость нарастания смещений (в среднем по глубине щели) – на 25%. При этом, при достижении нагрузки величины, равной  $\gamma H$  ( $P=30,1$  МПа), сближение стенок щели еще не закончено и составляет (в среднем по глубине щели) 0,19 м, т.е. менее 40,0% от ширины щели.

5. Независимо от ширины щели общий уровень напряжений на контуре выработки снизился в среднем на 18,8-19,0% (или в 1,23 раза). При этом наиболь-



ший эффект от щели наблюдается в почве: величины горизонтальных напряжений уменьшились в 1,8 и 1,9 раза (при ширине щели 0,15 м и 0,3 м соответственно), касательные напряжения поменяли знак и по абсолютной величине уменьшились в 10,8 и 8,1 раз соответственно. При этом в части деформационных процессов наличие в выработке щели шириной 0,3 м оказывается более предпочтительным.

6. При параметрах щели: ширина – 0,3 м и глубина – до 2,0 м, наблюдается «эффект закрывающейся щели», т.е. щель имеет запас смещений, который позволяет рассматривать ее не только как мероприятие по разгрузке почвы выработки от напряжений, но и в качестве демпфера, поглощающего смещения приконтурного массива. Причем работа демпфера продолжается в период, когда рассматриваемый участок выработки со щелью находится на расстоянии от забоя лавы от 20-30 м до 200 м.

7. Присутствие легко деформирующегося заполнителя в разгрузочной щели не препятствует ее работе в качестве демпфера.

8. Натурный эксперимент, проведенный в шахтных условиях для проверки результатов численного моделирования, подтвердил правильность выводов, полученных в ходе обоснования параметров щели на численных моделях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скобенко А.В., Мякенький В.В., Мартовицкий А.В. Экспериментальные исследования проявлений горного давления в капитальных и подготовительных выработках шахты им. В.М. Бажанова // Современные проблемы шахтного и подземного строительства: Материалы междунар. науч.-практич. симпоз.– Донецк: «Норд-пресс», 2004.– С. 188-193.
2. Шашенко А.Н., Гапеев С.Н., Мартовицкий А.В. Комплексное исследование способа обеспечения устойчивости протяженной выработки с пучащей почвой, расположенной в зоне влияния лавы // Науковий вісник НГУ.– Дніпропетровськ: НГУ, 2005.– №7.– С. 52-55.
3. Мартовицкий А.В., Панченко В.В. Модернизация проходческого комбайна для прорезания разгрузочной щели в пучащей почве подготавливающих выработок в зоне влияния очистных работ // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: Материалы междунар. науч.-техн. конф.– Донецк: «Норд-пресс», 2005.– С. 45.
4. Мартовицкий А.В. Подход к численному исследованию развития пучения пород почвы протяженной выработки // Науковий вісник НГУ.– 2005.– №1.– С. 46-49.
5. Мартовицкий А.В. Исследование способа повышения устойчивости выработки в зоне влияния очистных работ на моделях из эквивалентных материалов // Науковий вісник НГУ.– 2005.– №2.– С. 29-31.
6. Мартовицкий А.В. Результаты натурной экспериментальной проверки способа обеспечения устойчивости подготовительных выработок, поддерживаемых за лавой // Форум гірників-2005: Матеріали міжнародної конференції.– Дніпропетровськ: НГУ, 2005.– Т.3.– С. 132-136.