

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ СТВОЛА НА ШАХТЕ ИМ. А.Г. СТАХАНОВА

В статье приведены результаты компьютерного моделирования в упруго - пластической постановке и способ оценки напряженно деформированного состояния пород в окрестности сопряжения ствола с выработкой.

У статті приведені результати комп'ютерного моделювання в пружно - пластичній постановці і спосіб оцінки напружено деформованого стану порід в околиці сполучення ствола з виробкою.

The results of numerical modeling in elastic-plastic statement is shown and the estimation method of rock stress-strain state around bore and working conjunction is described of interface of a trunk with development.

**Введение.** Задача гарантированного обеспечения Украины углем – главного энергоносителя, требует строительства новых и реконструкции действующих угольных шахт. Ключевой и наиболее сложной задачей при этом является сооружение вертикальных стволов, от эксплуатационной надежности которых зависит ритмичность и экономичность работы шахт. В комплексе горных выработок современной шахты на долю стволов приходится 25...30 % стоимости и 35...50 % общего времени строительства.

Особое место в комплексе строительства вертикальных стволов шахт занимает сооружение сопряжений. Одним из перспективных направлений крепления вертикальных стволов шахт является применение комбинированных крепей с использованием анкеров, которые усиливают эффект принудительного сцепления основной крепи с массивом пород. В связи с этим, научное обоснование таких охранных конструкций, обоснование технологических параметров способов усиления крепей сопряжений, представляет актуальную научно-техническую задачу.

На шахте им. А.Г. Стаханова длительное время имеет место проблема обеспечения устойчивости сопряжений вентиляционного ствола №8 с выработками околоствольного двора пересекаемых глубоких (свыше 800 м) горизонтов.

В связи с этим **целью настоящей статьи** является освещение результатов оценки напряженно-деформированного состояния пород в окрестности сопряжения ствола на шахте им. А.Г. Стаханова.

**Основная часть.** Объект исследований – вентиляционный ствол № 8 диаметром в свету 7,0 м, пройденый в 1983-86 гг. до глубины 1277,6 м.

Для оценки напряженно-деформированного состояния сопряжения ствола №8 с выработками руддворов горизонтов 986 м и 1136 м была проведена серия численных экспериментов.

В ходе решение задачи, была проведена серия численных экспериментов.

Для расчетов выбирался случай с наиболее тяжелыми условиями, характеризующиеся объективными условиями эксплуатации выработок сопряжений. В качестве оценочных критериев принимались результаты обследования фактического состояния крепи сопряжений и примыкающих к ним участков ствола, а также величина показателя условий разработки, определяемого по формуле

$$\theta = \frac{R_c k_c}{\gamma H}, \quad (1)$$

где  $R_c$  – предел прочности пород на одноосное сжатие;  $k_c$  – коэффициент структурно-механического ослабления;  $\gamma$  – объемный вес пород;  $H$  – глубина от поверхности.

Численные исследования проводились в два этапа.

На первом этапе исследовалось общее напряженно-деформированное состояние объекта с максимальным учетом конструктивных параметров сопряжения. Моделирование такого геометрически сложного объекта в комплексе возможно только с применением объемной численной модели, что и было выполнено с применением стандартного решателя МКЭ.

Модель представляла собой вырезанную из массива область, содержащую комплекс выработок «ствол-сопряжение» (рис. 1). Среда полагалась упругой, весомой.

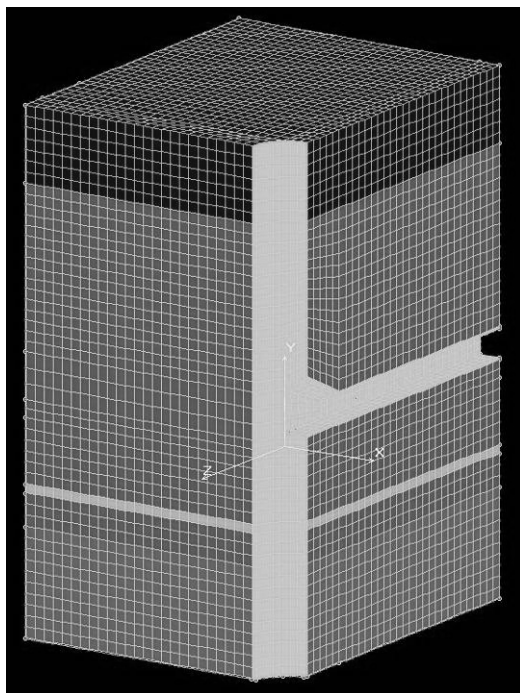


Рис. 1. Общий вид объемной модели системы «ствол-сопряжение»

Условия на межслоевых контактах не учитывались (сплошная модель со слоями, обладающими различными свойствами).

Учитывая двухосевую симметрию принятой расчетной схемы, в рассмотрении участвовала четверть вырезанной области с соблюдением всех необходимых граничных условий осесимметричной задачи.

Вся совокупность элементов была разбита на группы по физико-механическим свойствам. Всего использовалось пять групп: 4 – горные породы, и 1 – крепь выработок.

Физико-механические свойства моделируемых слоев представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства моделируемых слоев горных пород

Показатель	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4
	Песчаник крепкий	Толща сланцевых пород (алевролит, аргиллит)	Песчаник трещиноватый	Песчаник средней крепости
Модуль Юнга, МПа	$2,5 \cdot 10^4$	$8,0 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$
Коэф. Пуассона	0,25	0,23	0,25	0,25
Модуль сдвига, МПа	$1,67 \cdot 10^4$	$5,19 \cdot 10^3$	$1,67 \cdot 10^4$	$1,67 \cdot 10^4$
Прочность на сжатие, МПа	80,0	25,0	40,0	70,0
Прочность на растяжение, МПа	8,0	2,5	4,0	7,0
Объемный вес, МН/м <sup>3</sup>	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$

Целью *первого этапа исследований* являлась общая оценка НДС породного массива, включающего комплекс сопряжения.

Результатами расчетов явились картины распределения компонентов напряжений и деформаций, развивающихся под действием нагрузки в модели.

Полученные числовые данные затем подвергались дополнительной обработке с целью оценки конфигурации и размеров зоны неупругих деформаций (ЗНД), развивающейся в породном массиве в районе сопряжения.

Формирование группы элементов, представляющих ЗНД, производилось из тех из них, которые удовлетворяют критерию

$$\sigma_e \geq R_c k_c, \quad (2)$$

где  $\sigma_e$  – величина так называемых эквивалентных напряжений, приводящих объемное напряженное состояние, в котором находится исследуемое тело, к эквивалентному одноосному состоянию. Это необходимо, поскольку мерой прочности является величина предела прочности на одноосное сжатие.

Величина эквивалентных напряжений может быть рассчитана на основании различных достаточно обоснованных теорий прочности. В данном случае для объемной задачи использован критерий П.П. Баландина [1, 2]:

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{2\psi} + \frac{\sqrt{(\psi - 1)^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 4\psi[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}}{2\psi}. \quad (3)$$

В формуле (3):  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – компоненты главных напряжений;  $\psi = \frac{R_p}{R_c}$  –

коэффициент хрупкости;  $R_p, R_c$  – пределы прочности на одноосное растяжение и сжатие соответственно.

Поскольку размер объемных элементов не позволял получать детальную картину НДС, потребовался *второй этап исследований*, целью которого являлся детальный анализ конфигурации ЗНД, степени разрушения элементов по ее площади и оценка величины перемещений разупрочняющихся пород.

Второй этап выполнялся на плоских моделях с применением специального алгоритма, учитывающего нелинейные эффекты разрыхления и разупрочнения в пределах ЗНД [1]. При этом величина эквивалентных напряжений определялась по формуле, выведенной из хорошо обоснованного критерия прочности Парчевского-Шашенко [4]:

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(\psi - 1)^2 (\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi}. \quad (4)$$

**Анализ полученных результатов численного моделирования.** Анализ результатов решения по первому этапу (объемная задача) (рис. 2-3) показывает следующее.

Распределение напряжений в крепи ствола и прилегающей выработки рудного двора весьма неоднородно. Максимумы упругих напряжений (свыше 500 МПа) имеют место в крепи ствола, в непосредственной близости от сопряжения и распространяются вверх от сопряжения на высоту до 15 м. Вниз от сопряжения зона повышенной напряженности крепи ствола распространяется на расстояние до 12 м.

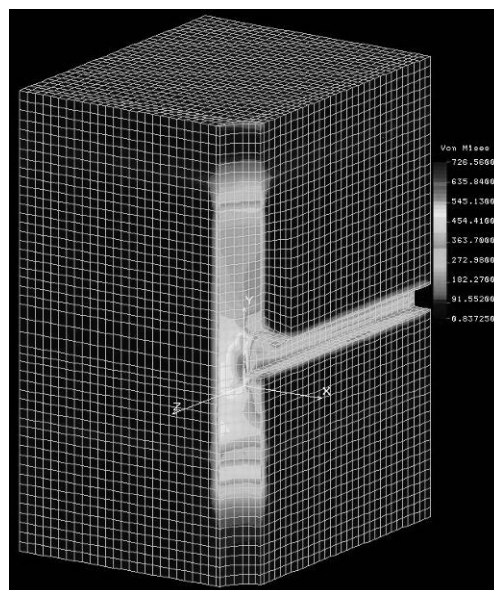


Рис. 2. Картина распределения эквивалентных напряжений по исследуемой области (первый этап).

Деформации массива в окрестности выработки сопряжения локализованы в основном в ее кровле и почве.

Таким образом, реализация мероприятий по усилению крепи на сопряжении должна производиться вверх, вниз и вдоль выработки руддвора на расстоянии 12-15 м.

На рис. 3 представлена форма и размеры ЗНД, полученные после анализа результатов объемной модели. Видно, что наличие такой сложной системы, как сопряжение вертикального ствола с горизонтом, приводит к формированию ЗНД больших размеров именно в зоне влияния сопряжения.

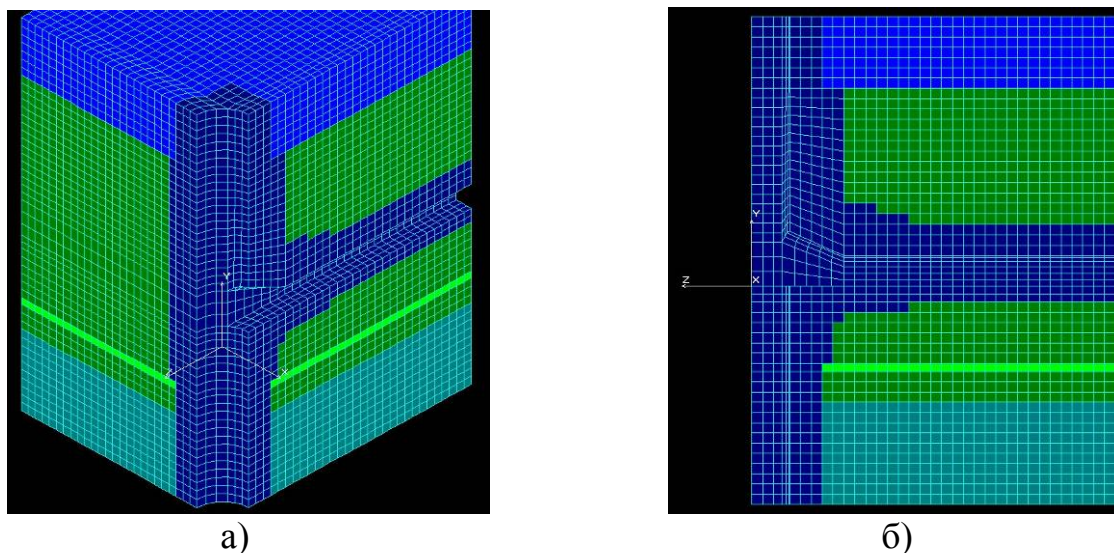


Рис. 3. Форма ЗНД, полученная при анализе результатов решения на объемной модели (первый этап): а) общий вид; б) вид со стороны оси симметрии

Результаты численного моделирования достаточно хорошо соотносятся с наблюдаемыми в шахте явлениями деформации крепи ствола и сопряжений горизонтов.

Оценка перемещений породного контура производилась на втором этапе на плоских моделях. Они вырезались из объемной модели в пределах установленной выше зоны влияния. Учет влияния сопрягающихся выработок при переходе от объемной к плоской задаче выполнен введением коэффициента концентрации напряжений. Он принимался равным двум [1, 2].

На рис. 4 представлены размеры ЗНД по результатам второго этапа решения. Различный цвет элементов, входящих в ЗНД, обусловлен разной степенью их разрушения.

Анализ представленных результатов показывает следующее. Размеры ЗНД как для ствола, так и для примыкающей выработки руддвора, полученные в объемной модели и в плоских моделях, достаточно хорошо соотносятся (табл. 2) – отклонение не превышает 10%, что для задач механики горных пород является достаточной точностью.

Величины относительного радиуса ЗНД  $r_L$ , отнесенного к радиусу выработки, представленные в табл. 2, имеют значения, превышающие так называемый критический радиус  $r_L^* \approx 3,0$  [3]. Из этого следует, что в выработках может иметь место пучение пород, что и наблюдается в действительности.

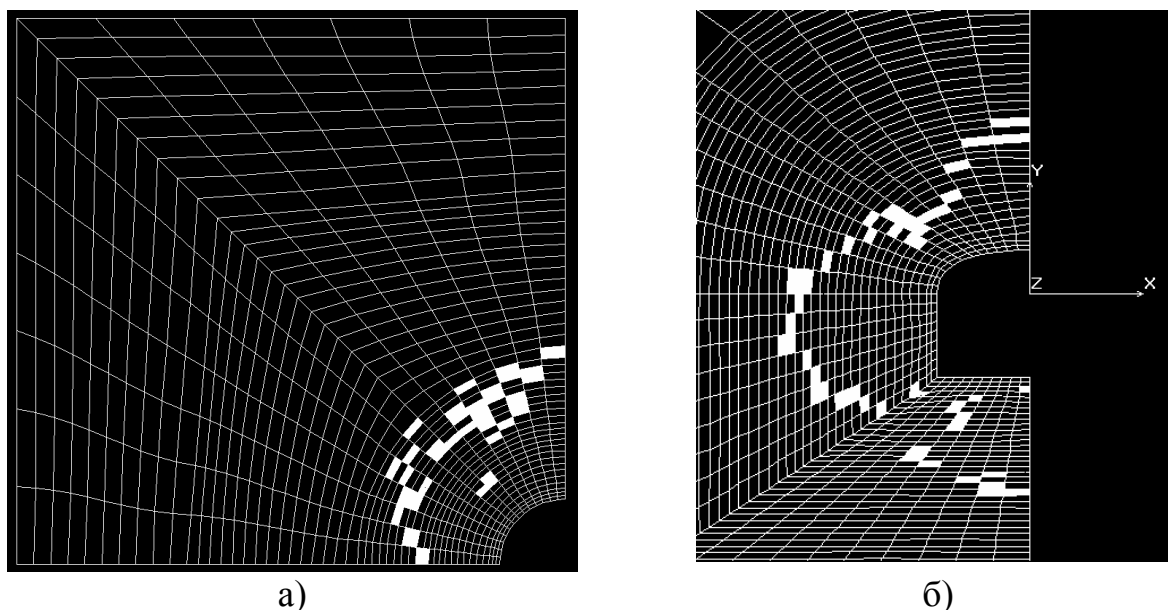


Рис. 4. Форма и размеры ЗНД, полученные при анализе результатов решения на плоских моделях (второй этап): а) в окрестности участка ствола; б) в окрестности участка выработки руддвора

Таблица 2

Сравнение относительных радиусов ЗНД ( $r_L$ ) на объемной и плоских моделях

Положение в пространстве	Объемная модель	Плоская модель
Участок ствола:		
Со стороны сопряжения	3,65	3,34
С поворотом на -90° от предыдущего положения	2,53	2,30
Примыкающая выработка руддвора:		
В кровле	2,41	2,30
В боку	3,25	2,95
В почве	2,20	2,10

Анализ полученных расчетом МКЭ смещений показывает, что их величина на контуре выработки (внешнем контуре крепи) достигает для участка ствола – 0,09-0,1 м вдоль всего контура, и для примыкающей выработки – 0,09-0,1 м для кровли, 0,07-0,09 м для боков, 0,04-0,01 м для почвы.

Данные величины представляют собой, как указывалось ранее, значения перемещений, не учитывающих дополнительные деформации контура от объемного разрыхления пород. На рис. 5 представлены эпюры смещений, рассчитанных с учетом объемного разрыхления в области руинного разрушения ЗНД.

Полученные результаты указывают, что большие размеры ЗНД, значительные нагрузки на жесткую крепь исследуемого объекта превышают несущую способность существующей крепи, поэтому следует включать в работу прилегающий массив. Это можно сделать, применяя такие высокотехнологичные элементы, как анкерные системы. Именно они и должны лечь в основу конструкции крепи усиления сопряжений вертикального ствола и горизонтов для рассматриваемых в работе условий.

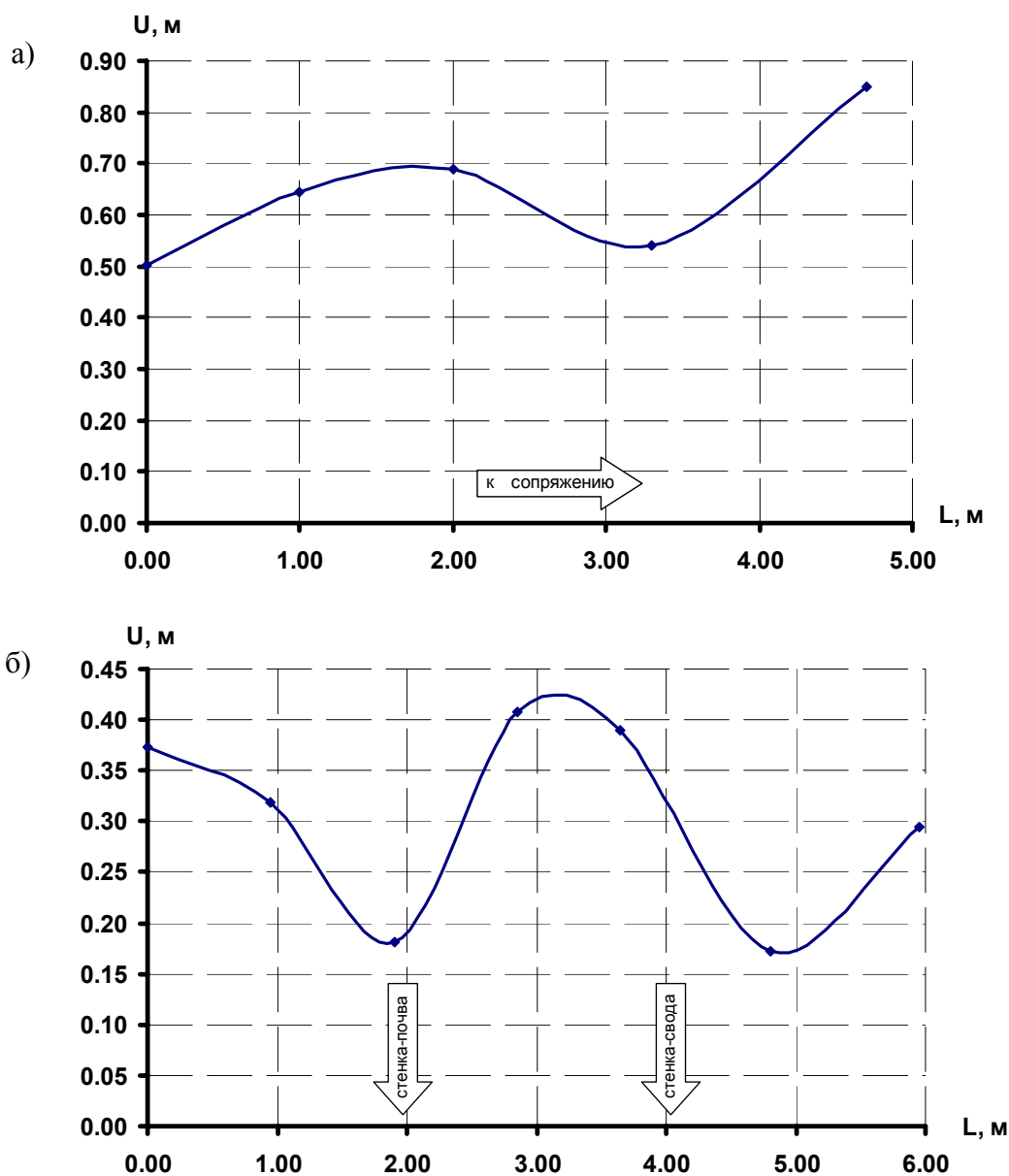


Рис. 5. Расчетные величины перемещений породного контура, полученные с учетом объемного разрыхления (развертка): а) участок ствола; б) примыкающая выработка руддвора («0» – почвы выработки)

### Выводы.

1. Реализация мероприятий по усилению крепи на сопряжении должна производиться вверх, вниз и вдоль выработки руддвора на расстоянии 12-15 м.

2. Усиление крепи должно выполняться не по пути увеличения его несущей способности за счет материалоемкости, а по пути введения усиливающих элементов, работающих на иных принципах, например, анкерных систем.

3. Установленные основные параметры напряженно-деформированного состояния исследуемой геомеханической системы позволяют разрабатывать параметры средств усиления существующей крепи и обеспечения эксплуатационного состояния системы «ствол-сопряжение-массив».

#### Список литературы

1. Друккер Д.О единственности решений в теории пластичности // Механика. Период сб. пер. иностр. статей.– 1957.– №4. – С. 72-80.
2. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород.– Днепропетровск: НГУ, 2008. – 224 с.
3. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики.– К.: Універ. вид-во «Пульсари», 2002.– 304с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Шашенком О.М.  
Надійшла до редакції 24.03.10*

УДК 622.281

© Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, Я.О. Шуляк

### **ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАВЛЕНИЯ, ОТ СТЕНОК ШПУРА, СОДЕРЖАЩЕГО НЕВЗРЫВЧАТЫЙ РАЗРУШАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ, ВГЛУБЬ ПОРОДНОГО МАССИВА**

Приведены результаты лабораторных исследований особенностей невзрывного нагружения пород, а также результаты математического моделирования процесса передачи напряжений от стенок шпура вглубь массива.

Наведені результати лабораторних досліджень особливостей невибухового навантаження порід, а також результати математичного моделювання процесу передачі напружень від стінок шпура вглиб масиву .

The results of laboratory researches of features of non-explosive lading of rocks, and also results of mathematical design of process of transmission of tensions, are resulted from the walls of mining hole deep into array.

Анализ состояния современных горных выработок показывает, что потеря площади поперечного сечения для подготовительных выработок вне зоны влияния очистных работ превышает 30-40%, а на сопряжениях с очистным забоем – достигают 50-70%, что приводит к необходимости их перекрепления и ремонта. Применение более металлоемких конструкций крепей не позволяет решить указанную проблему. Это объясняется сложностью предотвращения и сдерживания развития вокруг выработок на современных глубинах зоны разрушенных пород (ЗРП).

Для сохранения устойчивости пород в пределах ЗРП был предложен способ, основанный на сжатии разрушенных горных пород при помощи саморасширяющихся составов [1]. Основным параметром предлагаемого способа обеспечения устойчивости выработок является расстояние между шпурами с распорными элементами. В качестве средства создания распора предлагается использовать невзрывчатый разрушающий материал НРВ-80, лабораторные исследования свойств которого [2, 3], позволяют определить давление, развиваемое данным составом при различных объемных деформациях.

В данной статье с целью определения зоны влияния одного распорного элемента ставится задача изучения закономерностей передачи давления от стенок шпура содержащего саморасширяющийся материал вглубь породного массива.