

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТКИ С  
НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ  
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Виконано огляд літературних даних за умовами використання набрызкбетонного кріплення на шахтах України. Розглянуто області застосування набрызкбетонних кріплень. Розв'язано задачу з визначення коефіцієнта запасу стійкості для набрызкбетонного кріплення при різних значеннях  $\gamma H / R$  і проектної марці набрызкбетону з використанням методу скінченних елементів. Досліджено варіанти для двох ситуацій з різною конструкцією кріплення виробки – з набрызкбетонним кріпленням, а також з набрызкбетонним кріпленням і тампонажем.

**INVESTIGATION OF STABILITY OF WORKING WITH  
SHOTCRETE SUPPORT WITH USE OF NUMERICAL  
SIMULATION OF FINITE ELEMENTS METHOD**

A review of published data on the conditions of use of shotcrete lining in mines in Ukraine is done. The fields of application of sprayed concrete support are considered. The problem of determining the safety factor for the shotcrete lining at various values of  $\gamma H / R$  and design mark of sprayed concrete using finite element method is solved. Variants for two situations with different design lining of working – with sprayed concrete support, as well as sprayed concrete support and backfill are studied.

**Введение.** Обеспечение возможности использования набрызгбетона на больших глубинах является важной научно-практической задачей. Область использования набрызгбетона в значительной степени ограничивается имеющимся опытом ведения набрызгбетонных работ на глубинах до 500 м. Использование набрызгбетонных крепей на более глубоких горизонтах связано с выполнением работ по обоснованию использования набрызгбетона с использованием математических моделей и практических экспериментов.

**Состояние вопроса, выделение нерешенной части проблемы.** Условия применения набрызгбетона в «чистом» виде (без комбинации с усиливающими крепежными элементами) определяются способностью покрытия воспринимать смещение породного контура без разрушения, т.е. его деформативной способностью.

Аналитические решения деформативной способности набрызгбетона [1, 2, 3] показывают, что трещинообразование бетонной крепи начинается при смещениях пород 10...20 мм.

Экспериментальными наблюдениями НИГРИ, Криворожского филиала ВНИИОМШСа установлено, что набрызгбетон и монолитный бетон в крепи арочной формы может воспринимать смещения до 50...90 мм.

Результаты натурных наблюдений позволили оценить допустимые смещения кровли выработки при использовании набрызгбетонной крепи и определить условия ее применения в основных горных выработках Донбасса.

За критерий применимости набрызгбетонной крепи в «чистом» виде в работе [4] используется условие:

$$\frac{U_K}{a} \leq 0,014 \quad , \quad (1)$$

где  $U_K$  – критические смещения породного контура,  $a$  – ширина выработки.

Из работы [1] следует, что условие (1) соответствует значениям критерия устойчивости  $\gamma H/R \leq 0,3$ .

Полученные в результате исследований [1] области применения конструкций набрызгбетонных крепей показаны на рис. 1. и приведены в табл. 1.

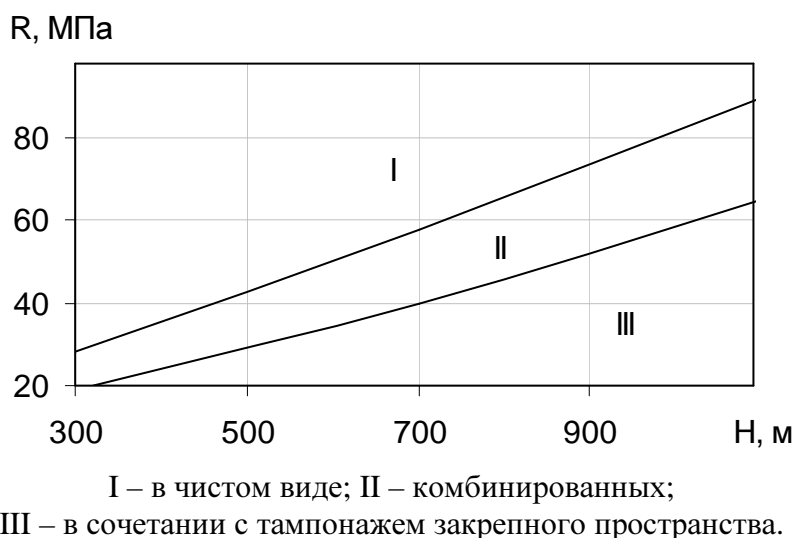


Рис. 1 – Графики для определения области применения набрызгбетонных крепей:

Таблица 1 – Примерные области применения набрызгбетонных крепей [4]

$\gamma H/R$	Рекомендуемая конструкция крепи	
	Толщина набрызгбетона, мм	Элемент усиления крепи
0,25	<50	–
0,25-0,3	50...80	–
0,31-0,4	50...80	Анкеры, анкеры с сеткой
0,41-0,45	80...100	Металлические арки

Как видно из таблицы 1 при показателе  $\gamma H/R \geq 0,4$  применение набрызгбетона целесообразно в сочетании с элементами усиления. Однако, достичь более высоких показателей прочности крепи можно при увеличении толщины набрызгбетонного покрытия и в случае неблагоприятных условий, связанных с наличием значительной области трещиноватых пород, выполнения соответствующего тампонажа пород.

Как правило, наиболее широко набрызгбетон используется в условиях  $\gamma H/R \leq 0,4$ . Для использования в более сложных условиях стараются использовать металлическую крепь, зачастую избегая возможности выполнения более механизированных работ по набрызгу смеси.

В этой связи, значительный интерес представляют исследования, направ-

ленные на расширение области использования набрызгбетона. Увеличение глубины, на которой может быть использован набрызгбетон, возможно на основании результатов математического моделирования.

**Цель работы** – определение коэффициента запаса устойчивости для набрызгбетонной крепи при различных значениях  $\gamma H/R$ , а также проектной марке набрызгбетона с использованием метода конечных элементов.

**Изложение основного материала исследования.**

При увеличении глубины на крепь горной выработки действует нагрузка со стороны породного массива, численно равная значению  $\gamma H$ . Устойчивость крепи в значительной степени зависит от размеров действующей со стороны приконтурного массива нагрузки, а также физико-механических свойств вмещающих пород и материала крепи. Для условий заданной глубины варьируются параметры набрызгбетонного покрытия, а также исследуются случаи возведения собственно набрызгбетонной крепи, а также набрызгбетонной крепи с тампонажем закрепного пространства. Второй случай подразумевает, что предварительно устанавливается анкерная крепь, происходит разгрузка массива с образованием области трещиноватых пород. Осуществляется нанесение набрызгбетонного покрытия и затем производится последующий тампонаж зоны ослабленных пород. Для данного случая моделируются набрызгбетонная крепь и область затампонируемых пород на глубину 1,5 м.

Моделируются условия, характерные для глинистых пород (аргиллитов, алевролитов), породы – однородные изотропные. По периметру модели приложена нагрузка, соответствующая параметру  $\gamma H$ . Основные параметры модели выработки, закрепленной набрызгбетоном, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Физико-механические параметры модели

Наименование материала	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, МПа [6]	Объемный вес, МН / м <sup>3</sup>
Аргиллит	30	0,23	$2,4 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Набрызгбетон	40	0,2	$2,35 \cdot 10^4$ $2,55 \cdot 10^4$ $2,85 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
Тампонаж	15	0,28	$1,6 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-2}$

Решение выполнялось для двух основных ситуаций выработки с набрызгбетонной крепью (ситуация А) и выработки с набрызгбетонной крепью и тампонажем (ситуация Б). Данные ситуации являются наиболее характерными для условий использования набрызгбетона – собственно набрызгбетонная крепь и набрызгбетонная крепь в сочетании с тампонажем закрепного пространства. В ходе выполнения работ по математическому моделированию варьировались основные технологические параметры – глубина расположения выработки и марка используемого набрызгбетона. Всего было исследовано 18 вариантов. Характеристика рассмотренных вариантов дана в таблице 3.

Таблица 3 – Геомеханические ситуации, моделируемые в ходе численных экспериментов

Ситуация		Характеристика	Глубина расположения, м	Марка набрызгбетона
А	1	Выработка с набрызгбетонной крепью	500	300
	2			400
	3			500
	4		600	300
	5			400
	6			500
	7		700	300
	8			400
	9			500
Б	1	Выработка с набрызгбетонной крепью и тампонажем	500	300
	2			400
	3			500
	4		600	300
	5			400
	6			500
	7		700	300
	8			400
	9			500

На рис. 2 и 3 представлены расчетные схемы для проведения математического моделирования соответственно выработок с набрызгбетонной крепью, а также с набрызгбетонной крепью и тампонажем.

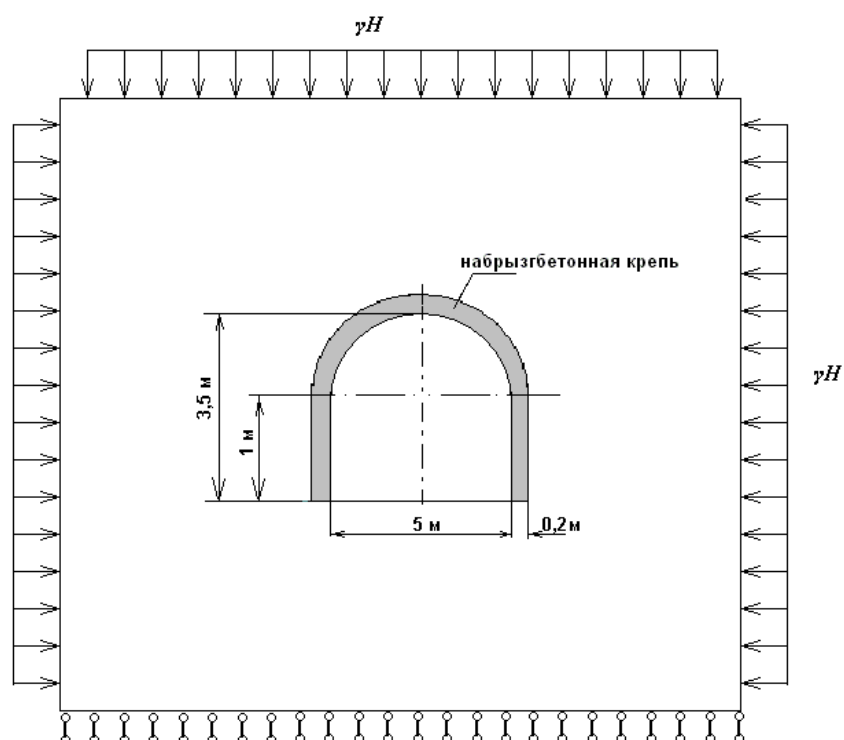


Рис. 2 – Расчетная схема выработки с набрызгбетонной крепью, толщиной 20 см.

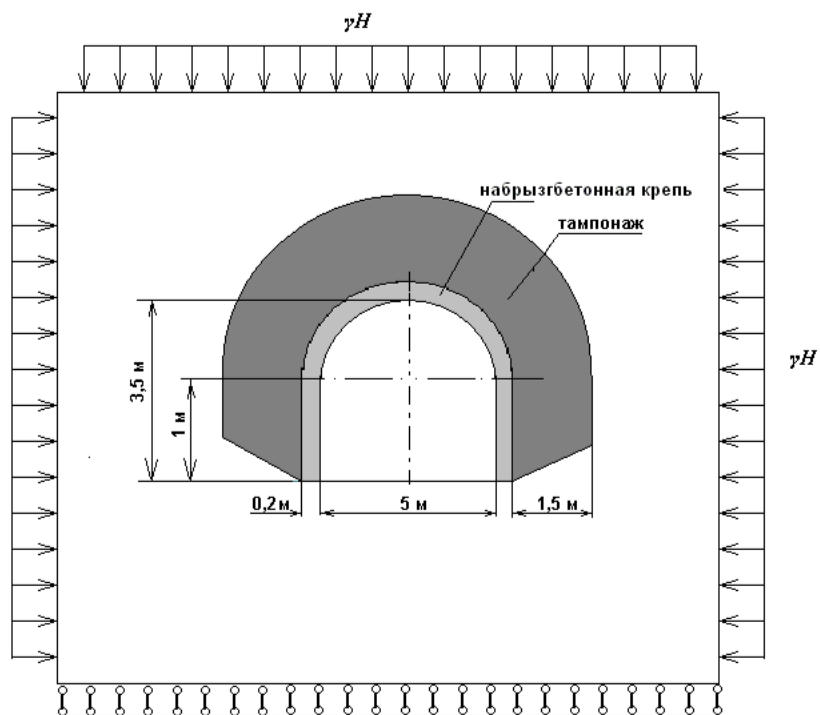


Рис. 3 – Расчетная схема выработки с набрызгбетонной крепью, толщиной 20 см и тампонажем закрепного пространства на глубину 1,5м.

Для проведения численного моделирования использован метод конечных элементов. Построение модели осуществлялось с использованием программы Cosmos/M 2.6.

Эпюры эквивалентных напряжений для ситуаций А-9 и Б-9 представлены на рис. 4, 5.

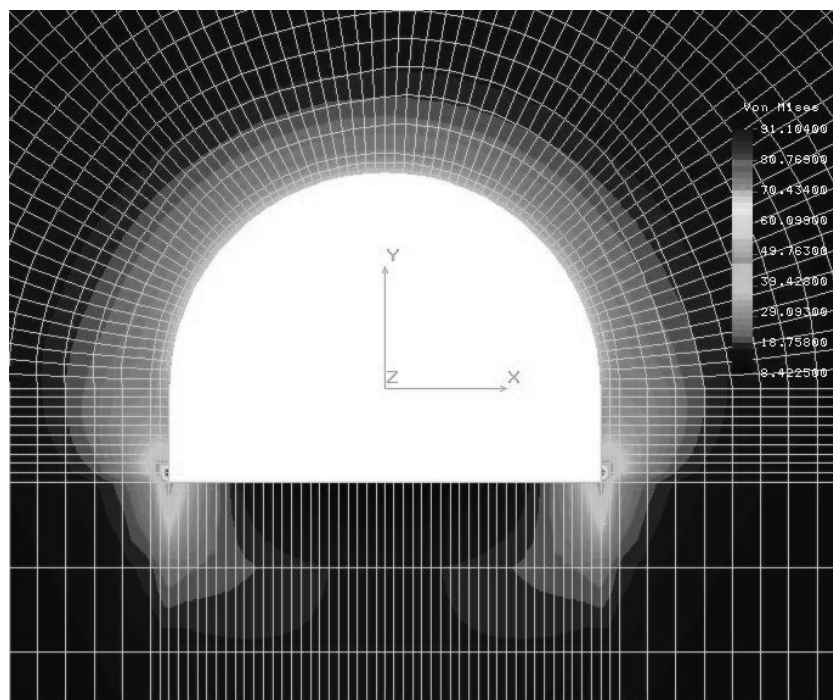


Рис. 4 – Эпюра эквивалентных напряжений для выработки с крепью из набрызгбетона марки М500, расположенной на глубине 700м

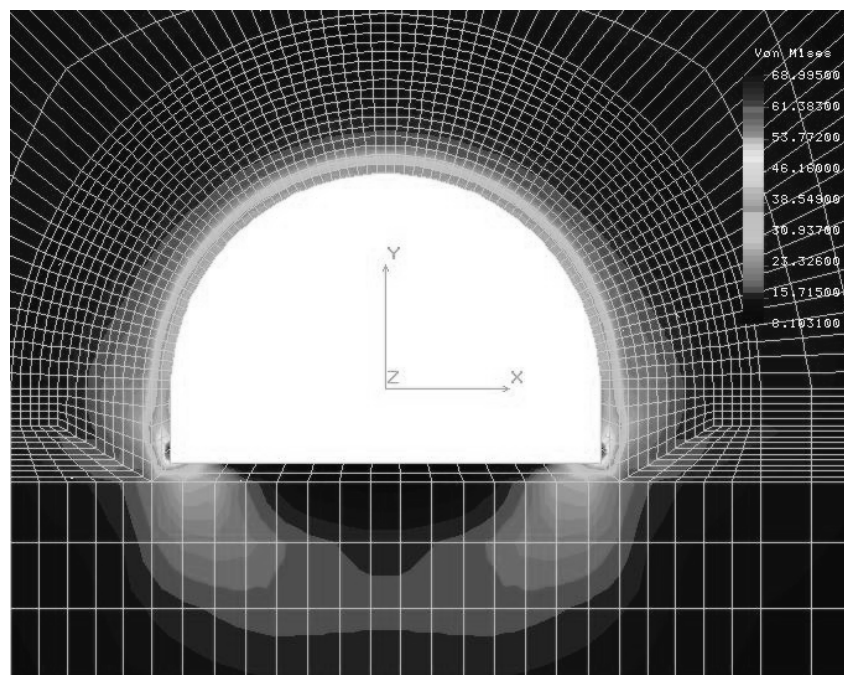


Рис. 5 – Эпюра эквивалентных напряжений для выработки с крепью из набрызгбетона марки М500 и тампонажем, расположенной на глубине 700м

Первоначально была рассмотрена ситуация при которой выработка закреплена только набрызгбетонной крепью. Для данной ситуации с использованием программы Cosmos/M были получены эпюры эквивалентных напряжений. Затем в точках элементов на контуре крепи, в диапазоне от 0 до 90°, брались максимальные значения эквивалентных напряжений и сравнивались с пределом прочности на сжатие. На основе полученных результатов проверялось выполнение критерия устойчивости материала крепи, характеризующего переход набрызгбетонной крепи в состояние потери устойчивости. При выполнении расчетов этот критерий принят в форме коэффициента устойчивости:

$$K_y = \frac{R_{сжс}}{\sigma_{эkv}}, \quad (2)$$

где –  $R_{сжс}$  – предел прочности набрызгбетона на одноосное сжатие,  $\sigma_{эkv}$  – эквивалентные напряжения, возникающие в материале крепи.

Коэффициент устойчивости  $K_y$  характеризовал состояние конструкции крепи. В случае если  $K_y < 1$  – следовательно, конструкция крепи характеризуется состоянием потери устойчивости. И напротив, если  $K_y > 1$  – элементы конструкции не испытывают предельно напряженного состояния и конструкция находится в устойчивом состоянии.

Таким образом, устанавливается зависимость состояния крепи от параметров глубины расположения выработки и марки набрызгбетона.

На рисунках 6, 7 представлены результаты математического моделирования изменения коэффициента устойчивости в зависимости от глубины расположения выработки и марки набрызгбетона.

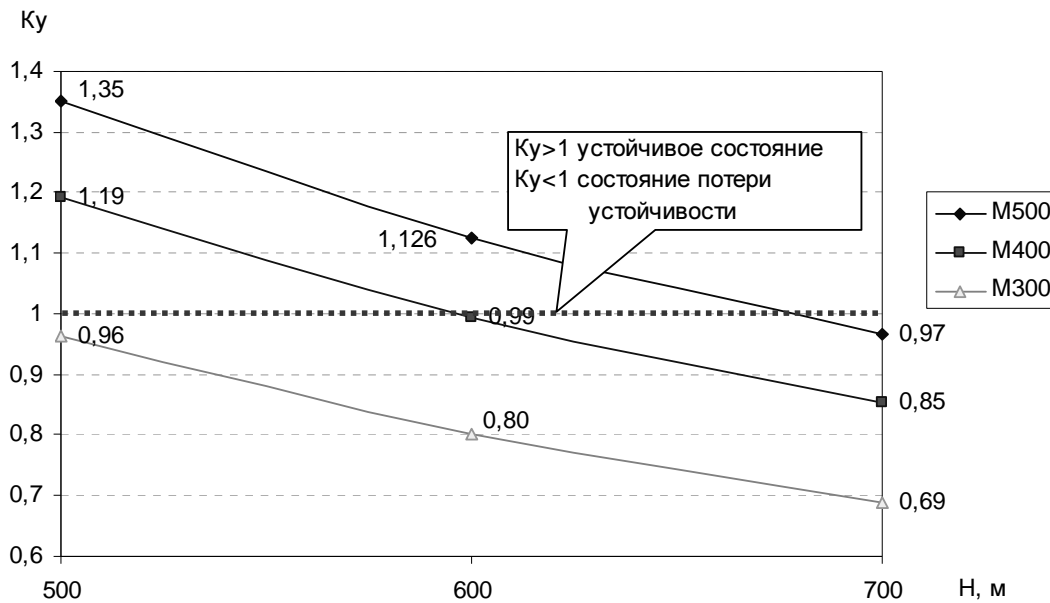


Рис. 6 – Изменение коэффициента устойчивости выработки с набрызгбетонной крепью в зависимости от глубины расположения выработки и марки набрызгбетона

Как видно из рисунка относительно благоприятными можно считать условия поддержания выработки на глубине 500 метров с использованием набрызгбетона марки М 300, в случае последующего увеличения глубины до 600 метров целесообразным является увеличение марки до М 400. При глубине выработки – 700 метров близкое к устойчивому состоянию будет обеспечивать крепь из набрызгбетона М 500. Использование набрызгбетона марок М 400 и М 500 на глубине расположения выработки 500 метров хотя и обеспечивает более высокий коэффициент устойчивости, однако ведет к значительному перерасходу материалов.

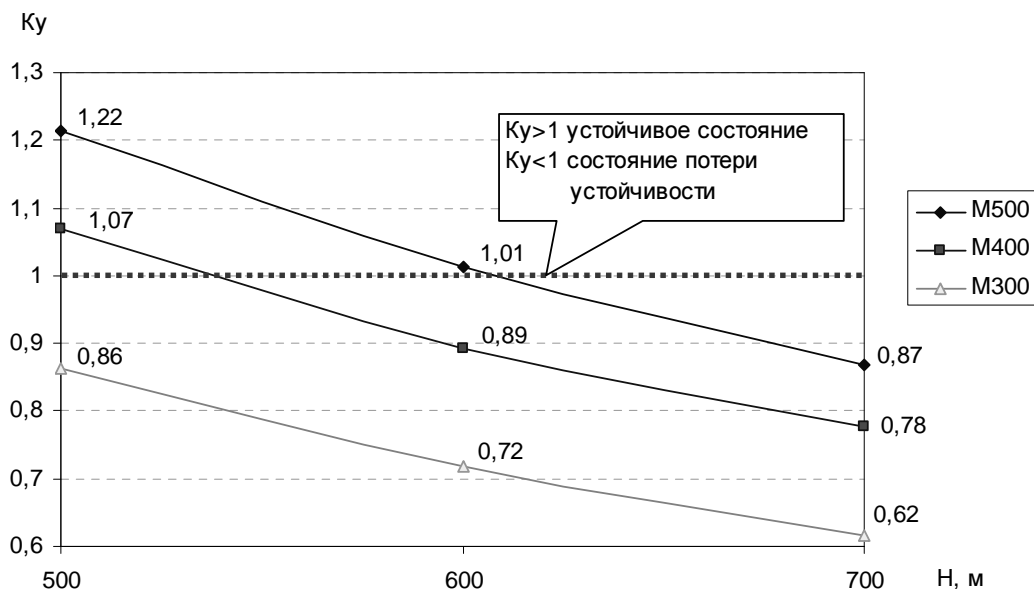


Рис. 7 – Изменение коэффициента устойчивости выработки с набрызгбетонной крепью и тампонажем в зависимости от глубины расположения выработки и марки набрызгбетона

При сравнении графиков на рис. 6 и 7 является очевидным снижение коэффициентов устойчивости выработки в среднем на 11%. Это происходит по причине того, что в первом случае (ситуация А) выработка рассматривается как идеализированная, с ненарушенными вмещающими породами, тогда как второй случай (ситуация Б) рассматривает выработку, ослабленную слоем разрушенных пород в приконтурной зоне, для обеспечения устойчивости которых выполнен тампонаж. Тампонаж закрепного пространства не обеспечивает полного восстановления прочностных параметров пород, а создает новый слой породобетона со свойственными ему физико-механическими параметрами (см. табл. 2).

Из рисунка 7 следует, что с увеличением глубины от 500 до 600 метров для обеспечения устойчивости необходимым является переход на марки набрызгбетона большей прочности (с М 400 на М 500). Последующее увеличение глубины вызывает необходимость использования комбинированной крепи – усиления набрызгбетона фибрами или сеткой.

#### **Выводы.**

1. Использование численного моделирования хотя и имеет определенные ограничения по использованию, однако позволило получить зависимости изменения напряженно-деформированного состояния от глубины расположения выработки и марки используемого набрызгбетона.

2. При креплении выработки набрызгбетоном в условиях ненарушенных вмещающих пород анализом установлено наиболее целесообразное использование набрызгбетона марки М 300 для крепи выработки на глубине 500м, проектной марки М 400 – для выработки на глубине 600м и набрызгбетона марки М 500 – для выработки, расположенной на глубине 700м.

3. При креплении выработки набрызгбетоном и проведении тампонажа с позиций численного моделирования наиболее целесообразно уже на глубине 500 м использование набрызгбетона проектной марки М 400, на глубине 600 м – набрызгбетона марки М 500, а на глубине 700 м проведение дополнительных исследований на возможность использования в качестве элементов усиления различного типа фибр.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Глушко В.Т., Долинина Н.Н., Розовский М.И. Устойчивость горных выработок. Киев, Наукова думка. 1973.
2. Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Шилкин П.И. Конструирование и расчет набрызгбетонной крепи. М., Недра, 1971.
3. Либерман Ю.М. Напряженное состояние монолитной бетонной крепи. – Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1971, №3, с. 119-121.
4. Заславский И.Ю., Быков А.В., Компанец В.Ф. Набрызгбетонная крепь. – М.: Недра, 1986. 198 с.
5. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография. – Д.: Национальный горный университет, 2008. – 224 с.
6. Технологические правила применения набрызгбетона при ремонте и реконструкции инженерных сооружений. Москва: «Транспорт». 1978.