

УДК 622.282 (06)

С. В. Борщевский<sup>1</sup>, В. Ф. Формос<sup>1</sup>, А. С. Бабичева<sup>1</sup>, В. А. Дмитриенко<sup>2</sup>,  
М. А. Бауэр<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина  
<sup>2</sup> Шахтинский институт(ф) ЮГРТУ (НПИ), Шахты, Россия

## Разработка технологии и параметров крепления с использованием высокопрочных композиционных материалов для строительства подземных сооружений в малоустойчивых горных породах

В работе приводятся результаты исследований свойств модифицированных составов бетонов в ранние сроки твердения, для подземного строительства. Разработаны узлы соединения секций опалубки обеспечивающие минимум затрат на монтаж и демонтаж щитов металлической сборной опалубки.

Ключевые слова: крепь, модифицированный бетон, срок твердения.

Актуальность приводимых в данном исследовании данных связана с наличием вмещающих пород, не способных сохранять проектные размеры и форму строящегося сооружения предопределяет невозможность производить заходку на глубину (1 м и более), обычную для строительства в устойчивых горных породах и невозможность оставлять обнажения без крепления даже на короткий промежуток времени. Кроме того, невозможно оставлять обнажения без крепления даже на короткий промежуток времени. Для обеспечения устойчивости массива, предотвращения обрушений и вывалов в этих случаях производить заходку возможно лишь на глубину 0,25–0,50 м. Поэтому, разработка технологии обеспечивающей, нормативные темпы проведения выработок в неустойчивых породах, при минимальных затратах труда, финансовых средств и без применения специальных способов, является весьма актуальной.

Для сокращения продолжительности цикла по прохождению и креплению необходима модификация состава бетона с целью увеличения его кинетики структурообразования. Кинетика роста прочности бетона должна соответствовать изменению величины нагрузок, передаваемых на крепь от массива пород, по мере удаления от забоя. Данная задача решена тщательным подбором компонентов бетона и добавок. Получены зависимости набора прочности бетоном в ранние сроки твердения.

Для исследований разработаны методики, позволяющие определять характеристики бетонной смеси, на стадии перехода ее из пластичного состояния в твердое. Весь комплекс исследований проводился на образцах отформованных из одного замеса цементно-песчаного раствора расчетного состава нормальной консистенции. Предел текучести бетона будет учитываться коэффициентом изменения предела его текучести при сдвиге при введении крупного заполнителя, с учетом крупности, влажности и качества, который сейчас уточняется (1,15 – 1,21). Скорость гидратации оценивалась по росту пластической прочности раствора нормальной консистенции.

Поскольку необходимо исследовать постоянно изменяющиеся во времени характеристики смеси, то сложность и объем измерений возрастают многократно, поэтому производилась оценка точности полученных данных. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Целью исследований является подбор такого состава бетонной смеси, при котором выполнялись бы следующие условия: максимальная скорость роста пластической прочности при сохранении жизнеспособности смеси не менее 40 минут после затворения и минимальные потери прочности бетона в марочном возрасте. По исследованию кинетики структурообразования следующих составов: на основе Старооскольского портландцемента (без добавок, с добавкой УП-5, с добавкой Д-5); и на основе Новомихайловского портландцемента (без добавок, с добавкой

УП-5 и карбамидом, с добавкой Д-5) (рис. 1) установлено, что лучшие характеристики имеет состав с добавкой Д-5 и он был исследован более детально. Составы (с УП-5+К (1)) и (с УП-5+К (2)) различаются временем перемешивания, второй состав перемешивался дополнительно 20 минут и в результате произошло замедление роста пластической прочности во времени и особенно в начальный период.

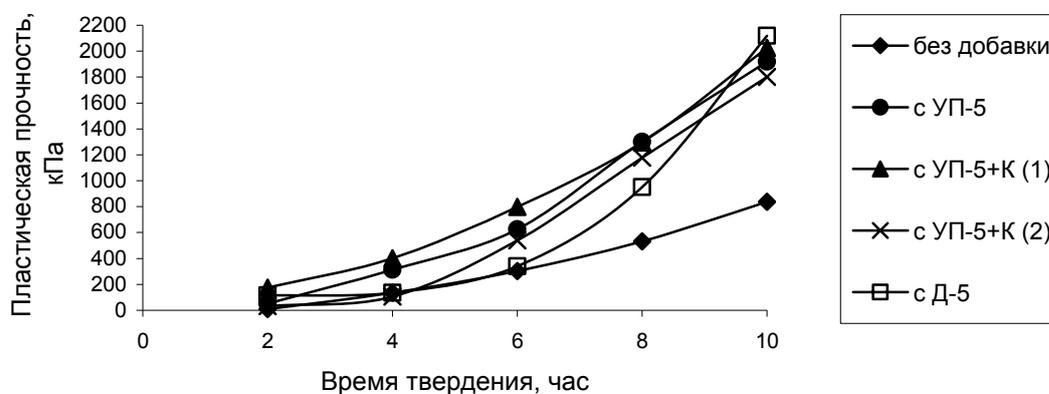


Рис.1. Кинетика роста пластической прочности

Поскольку устойчивость столба твердеющей смеси определяется ее пределом текучести при сдвиге, а величина пластической прочности лишь косвенно характеризует этот показатель, то следующий этап экспериментов был посвящен исследованию изменения предела текучести при сдвиге в процессе твердения состава, и установлению его зависимости от пластической прочности структуры раствора. За основу был принят метод испытания горных пород на срез со сжатием. Испытание проводилось путем одиночного среза со сжатием, когда на образец в плоскости среза действует не только сдвигающие, но и нормальные сжимающие напряжения. Испытания по определению пластической прочности и предела текучести при сдвиге производились через 2; 4; 6; 8 и 10 часов. Произведенные испытания позволили установить рост предела текучести при сдвиге состава во времени (рис. 2) и зависимость предела текучести при сдвиге от величины пластической прочности структуры (рис. 3).

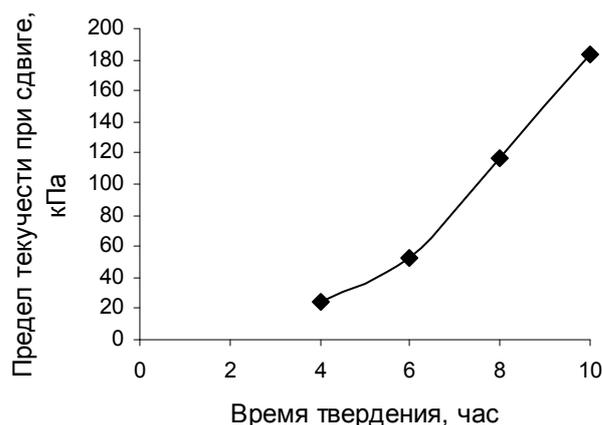


Рис.2. Изменение предела текучести при сдвиге во времени

Это позволит при наблюдении за контрольными образцами, установить в любой момент времени предел текучести при сдвиге состава, что и является решением поставленной задачи, определения с высокой точностью момента времени, в который можно снимать герметизатор, не опасаясь разрушения крепи под действием собственного веса, не затвердевшего бетона. Однако интенсивность роста предела текучести при сдвиге не вполне удовлетворяет условиям

предлагаемой технологии, то есть в ряде случаев необходимо большее сокращение этого времени, для обеспечения нормативной скорости строительства, что требует модифицирования самой добавки. Для интенсификации набора бетоном прочности в сверхнормативные сроки (до 6 часов) предлагается дополнительно вводить в состав добавки Д-5 силикат натрия.

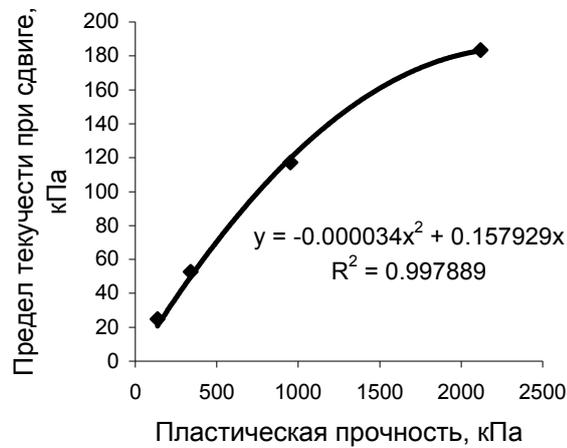


Рис.3. Зависимость предела текучести при сдвиге от пластической прочности

Темпы строительства подземных сооружений по предлагаемой технологии главным образом будут зависеть от максимально возможной величины заходки, при которой не будет происходить обрушение массива. Для этого необходимо знать величину максимальных напряжений, возникающих в массиве по которым определяются параметры крепи. Существующие аналитические методы расчета крепи подземных сооружений с учетом ее взаимодействия с массивом пород требуют выполнения 47 операций [1] с учетом множества условий, причем расчет производится для конкретных характеристик материала крепи. Если учитывать изменяющиеся во времени характеристики бетона, то сложность и трудоемкость расчета возрастает многократно. Для этих целей использовано компьютерное моделирование массива пород методом конечных элементов. На основе полученных параметров кинетики структурообразования бетона выполнено моделирование системы «крепь-массив», с учетом набора прочности бетоном каждой заходки. Для этого разработана методика моделирования бетонной крепи с изменяющейся во времени несущей способностью в условиях влияния неравномерно распределенных нагрузок и смещений породных обнажений.

Ввиду большого количества влияющих факторов целесообразно планирование эксперимента, которое позволяет сделать выборку наиболее значительных сочетаний факторов и существенно сокращает количество моделей. Согласно данным предварительных исследований выявлены следующие влияющие факторы: величина давления на крепь  $P$ ; величина заходки  $l$ ; толщина крепи  $h$ ; ширина сооружения  $B$ ; модуль упругости грунта  $E_r$ ; изменяющийся во времени модуль упругости бетона  $E_b$ . Планирование эксперимента производилось методом латинских квадратов по методике проф. М. М. Протоdjяконова [2] по пяти уровням варьирования. Однако в ходе исследования выяснилось, что фактор ширины сооружения является зависимым, а наибольшее влияние на параметр оптимизации – НДС крепи оказывает фактор величины заходки, а не величины давления. В связи с этим составлен новый план эксперимента по методу Брандона [2]. Интервалы варьирования выбраны, на основе результатов предварительных исследований и представлены в таблице 1.

Числовые значения различных комбинаций факторов приведены в таблице 2.

Дальнейший этап - разработка математической регрессионной модели, путем составления уравнения регрессии на основе расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «крепь-массив» методом конечных элементов для различных сочетаний уровней факторов. После выборки значений максимальных главных напряжений, рассчитанных при одинаковых значениях каждой из переменных, получен ряд частных зависимостей, по которым строятся точечные графики.

Табл. 1.

Факторы	Обозначение	Единица измерения	Уровни				
			-2	-1	0	1	2
Величина заходки	X <sub>1</sub>	м	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Величина давления на крепь	X <sub>2</sub>	МПа	0,2	0,35	0,5	0,65	0,8
Толщина крепи	X <sub>3</sub>	м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Модуль упругости грунта	X <sub>4</sub>	МПа	0,2	0,35	0,5	0,65	0,8
Функция набора прочности бетоном	X <sub>5</sub>	МПа	14,4	20,8	27,4	34,1	40,8

Табл. 2.

№ Расчета	Факторы				
	X <sub>1</sub> , м	X <sub>2</sub> , МПа	X <sub>3</sub> , м	X <sub>4</sub> , МПа	X <sub>5</sub> , МПа
1	0,3	0,8	0,2	0,35	27,4
2	0,3	0,2	0,3	0,5	34,1
3	0,3	0,35	0,4	0,65	40,8
4	0,3	0,5	0,5	0,8	14,4
5	0,3	0,65	0,6	0,2	20,8
6	0,5	0,2	0,4	0,8	34,1
7	0,5	0,5	0,3	0,65	14,4
8	0,5	0,35	0,6	0,2	27,4
9	0,5	0,8	0,5	0,5	20,8
10	0,5	0,65	0,2	0,35	40,8
11	0,4	0,2	0,3	0,5	40,8
12	0,4	0,5	0,6	0,35	34,1
13	0,4	0,35	0,5	0,8	14,4
14	0,4	0,8	0,2	0,65	27,4
15	0,4	0,65	0,4	0,2	20,8
16	0,7	0,2	0,6	0,5	34,1
17	0,7	0,5	0,5	0,35	14,4
18	0,7	0,35	0,4	0,2	40,8
19	0,7	0,8	0,3	0,65	27,4
20	0,7	0,65	0,2	0,8	20,8
21	0,6	0,2	0,5	0,35	27,4
22	0,6	0,5	0,2	0,8	20,8
23	0,6	0,35	0,4	0,65	40,8
24	0,6	0,8	0,3	0,2	34,1
25	0,6	0,65	0,6	0,5	14,4

Уравнения регрессии от пяти факторов подбирались с использованием программы Microsoft Excel 2000 (рисунок 4.).

По методу Брандона [3] путем перемножения уравнений описывающих каждую из пяти зависимостей получаем уравнение множественной регрессии при максимальных напряжениях в крепи в возрасте 3 суток:

$$Y = (-4.2314x_1^2 + 5.2978x_1 - 0.2162) * (-1.0615x_2 + 1.5308) * (1.3925x_3 + 0.3037) * (0.0084x_4 + 0.7694) * (-0.7197x_5 + 1.2803)$$

учитывающее все влияющие факторы и позволяющее рассчитывать максимальные напряжения в крепи подземных сооружений и соответственно определять параметры крепления выработок в сложных горногеологических условиях монолитным модифицированным бетоном без применения метода конечных элементов. Таким же образом были найдены уравнения множественной регрессии, описывающие величину напряжений бетонной крепи в возрасте 6 часов и 1 сутки.

Разработанную методику применяем на наклонном стволе шахты «Кадамовская» (Ростовская область). Данное подземное сооружение имеет протяженность 128м, угол наклона  $13^{\circ}$ , форма сечения - арочная с обратным сводом. По проекту принята монолитная бетонная крепь, толщиной 0,5м. В настоящее время ствол законсервирован из-за произошедшего на 40 метре сооружения обрушения пород, так как строительство велось в неустойчивых горных породах, обычным способом с величиной заходки 1м.

По разработанной методике рассчитаем напряжения в крепи ствола, изменяя ее толщину и величину заходки, с целью выявления наиболее эффективного сочетания параметров строительства и крепления таблица 3.

Табл. 3.

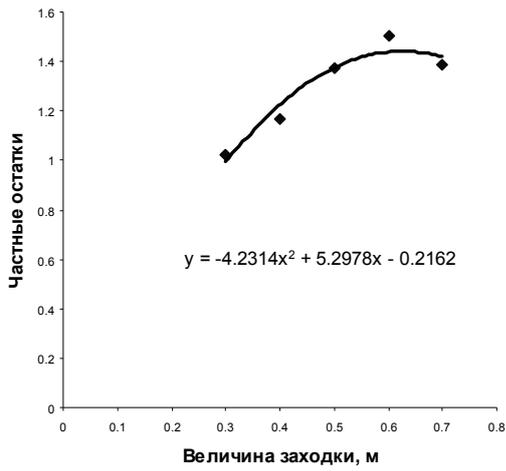
	Бетон с добавкой Д-5 (4%)						Бетон с добавкой Д-5 (2%)					
	0,3	0,7	0,3	0,7	0,5	0,6	0,3	0,7	0,3	0,7	0,5	0,6
Величина заходки, м	0,3	0,7	0,3	0,7	0,5	0,6	0,3	0,7	0,3	0,7	0,5	0,6
Давление, МПа	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Толщина крепи, м	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Модуль упругости грунта, МПа	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Прочность бетона 6 часов, МПа	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Прочность бетона 1 сутки, МПа	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
Прочность бетона 3 суток, МПа	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4
<b>Напряжения 6 часов, МПа</b>	0,09	0,15	0,1	0,16	0,06	0,11	0,1	0,15	0,1	0,16	0,07	0,11
<b>Напряжения 1 сутки, МПа</b>	0,41	0,66	0,55	0,89	0,82	0,88	0,42	0,68	0,57	0,93	0,84	0,91
<b>Напряжения 3 суток, МПа</b>	-0,4	-0,57	-0,53	-0,8	-0,7	-0,75	-0,32	-0,5	-0,43	-0,61	-0,59	-0,6

По полученным значениям напряжений можно сделать вывод, что напряжения по предлагаемой технологии строительства короткими заходками обычный бетон применяться не может, модифицированный бетон, с содержанием добавки 2% обеспечивает величину заходки 0,5 м, а с содержанием добавки 4% 0,6м, кроме того, модифицирование бетонов позволяет уменьшить толщину крепи до 0,25 м.

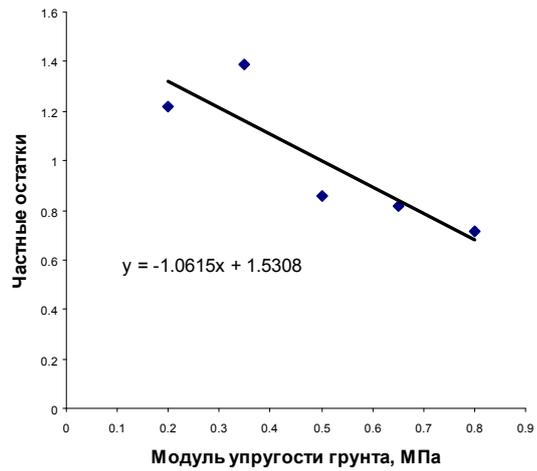
Для снижения трудовых и финансовых затрат по креплению монолитным бетоном короткими заходками, разработаны узлы соединения секций опалубки обеспечивающие минимум затрат на монтаж и демонтаж щитов металлической сборной опалубки. Опалубка представляет собой два комплекта универсальных сегментов и один замковый. Каждый сегмент состоит из продольных и поперечных элементов уголкового профиля, образующих после соединения сваркой рамку, на которую крепится щит опалубки. Соединение сегментов между собой осуществляется с помощью клинораспорных элементов, представляющих собой планку из полосовой стали с прорезью и клин. Планки привариваются в прорезь полки уголков рамки сегмента в нижней и одной боковой грани сегмента.

Для предотвращения вытекания бетона в сторону забоя, между щитами опалубки и стенкой массива устанавливается пневмоэлемент, высотой, равной сегменту опалубки, что позволяет осуществлять бетонирование послойно с вибрированием и таким образом существенно повысить качество и прочностные характеристики крепи.

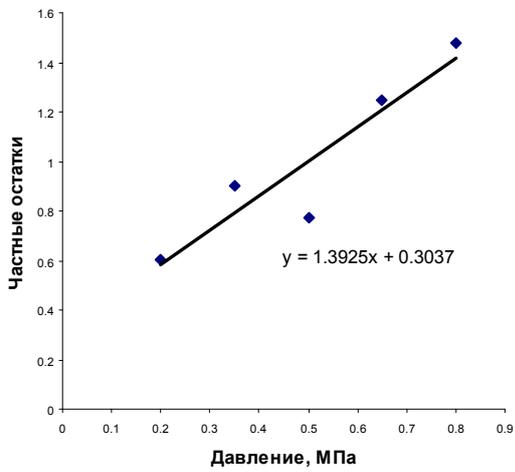
Пневмоэлемент представляет собой часть тороида с гантелеобразным поперечным сечением. Он противодействует выдавливанию бетонной смеси за счет сил трения между пневмоэлементом и металлической опалубкой с одной стороны и между пневмоэлементом и породной стенкой с другой. Схема установки пневмоэлемента представлена на рис. 5.



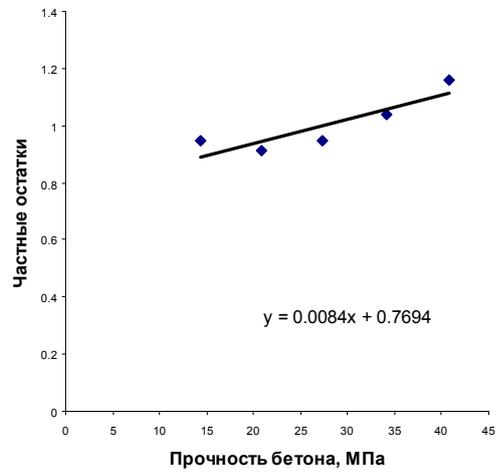
а)



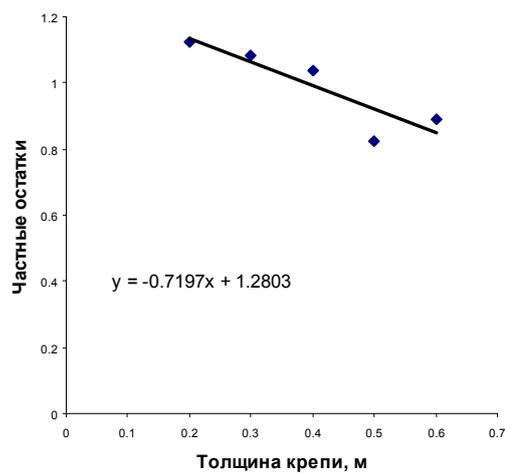
б)



в)



г)



д)

Рис. 4. Графики частных зависимостей

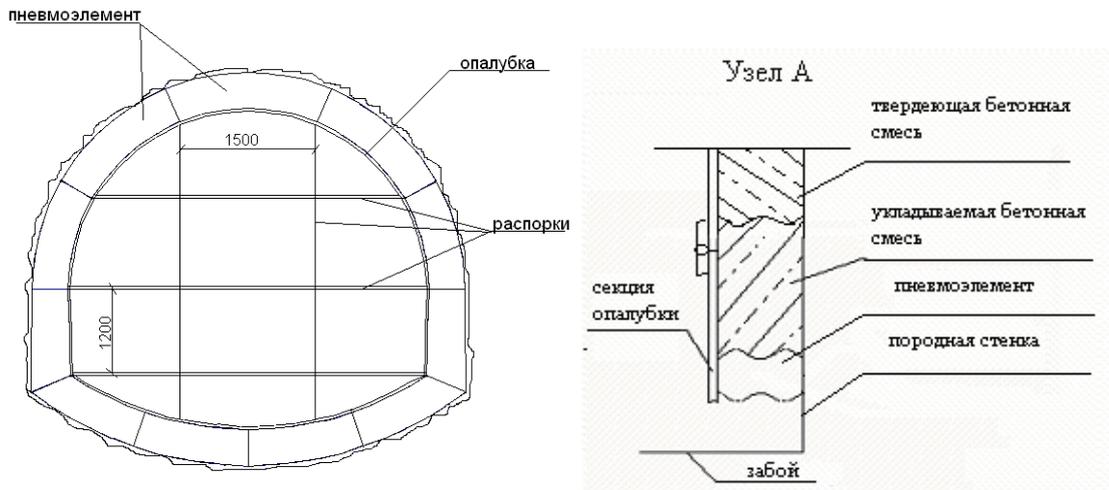


Рис. 5. Схема установки секций опалубки и пневмоэлементов

В ходе проведенных исследований впервые были установлены зависимости: 1 - изменения прочностных свойств модифицированных бетонов в сверхранные и ранние сроки твердения; 2 - максимальных главных напряжений в крепи подземных сооружений от величины заходки, ширины выработки, величины горного давления и изменяющихся во времени механических характеристик бетона.

Разработаны: 1 - математическая модель для определения параметров проведения и крепления подземных сооружений с учетом упрочняющейся во времени крепи; 2 - технология строительства подземных сооружений в слабоустойчивых породах без применения специальных способов и временной крепи.

### Библиографический список

- 1/ Булычев Н.С., Фотиева Н.Н., Стрельцов Е.В. Проектирование и Расчет крепи капитальных выработок. – М., 1986, - 288 с.
2. Методика рационального планирования эксперимента Протодяконов М.М., Тедер Р.И. – М.: Недра, 1970. – 76 с.
3. Булатов А.И. Управление физико-механическими свойствами тампонажных систем. – М.: недра, 1976. - 243 с.

Надійшла до редколегії 08.09.2011

С. В. Борщевський<sup>1</sup>, В. Ф. Формос<sup>1</sup>, А. С. Бабичева<sup>1</sup>, В. А. Дмитренко<sup>2</sup>, М. А. Бауер<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, Україна

<sup>2</sup> Шахтинский институт (ф) ЮРДТУ (НПИ), Шахти, Росія

Розробка технології і параметрів кріплення з використанням високоміцних композиційних матеріалів для будівництва підземних споруд в малостійких гірських породах

У роботі наводяться результати досліджень властивостей модифікованих складів бетонів в ранні терміни твердіння для підземного будівництва. Розроблено вузли з'єднання секцій опалубки забезпечують мінімум витрат на монтаж і демонтаж щитів металеві збірної опалубки

Ключові слова: кріплення, модифікований бетон, термін твердіння

S. V. Borschevsky<sup>1</sup>, V. F. Formos<sup>1</sup>, A. S. Babicheva<sup>1</sup>, V. A. Dmitrenko<sup>2</sup>, V. A. Bauer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Donetsk national technical university, Donetsk, Ukraine*

<sup>2</sup>*Shakhtinsky Institute (f) SRSTU (NPI), Shakhty, Russia*

## Development of technology and barring options using high-strength composite materials for the construction of underground structures in unstable rocks

This paper presents the results of studies of the properties of modified concrete composition in the early stages of hardening. for underground construction. Developed nodes connecting sections of formwork to ensure minimum costs for installation and dismantling of formwork panels metal team

Keywords: lining, modified concrete, curing time