

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРКРЕТ-БЕТОННЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ПУСТОЙ ПОРОДЫ

В.В. Коваленко, В.С. Гаркуша, Национальный горный университет, Украина

Представлены результаты исследования прочностных характеристик торкрет-бетона на основе пустой породы угольной шахты. Обоснована зависимость изменения прочности торкрет-бетона от гранулометрического состава применяемого заполнителя. Исследована возможность частичной замены песка измельченной породой и соотношения компонентов Цемент: Песок: Порода, при которых бетонные образцы будут обладать наибольшей и наименьшей прочностью. Исследована возможность использования ПВА эмульсии в качестве активной добавки с целью улучшения технологических свойств торкрет-бетонной смеси и прочностных характеристик торкрет-бетона.

Введение. Ежегодно угольная промышленность Украины добывает около 80 млн. т угля, но вместе с полезными ископаемыми на поверхность выдается около 3 млн. т пустых пород, которые складывают в отвалы. На угольных шахтах Украины практически отсутствуют мероприятия по переработке пустых пород. Единственный способ утилизации пустых пород, применяемый на угольных шахтах Украины, – это их обратная закладка в выработанное пространство. Однако таким образом утилизируется всего лишь 20-30% пустых пород.

С другой стороны, для приготовления тампонажных и торкрет-бетонных растворов в шахту необходимо опускать достаточно большое количество материалов, таких как кварцевый песок, щебень, цемент. Это приводит к большой нагрузке транспортной системы шахты и, как следствие, к увеличению энергоемкости и трудоемкости производственного цикла. В связи с этим целесообразно исследовать возможность использования пустых пород угольных шахт в качестве заполнителя для тампонажных и торкрет-бетонных смесей.

Целью данной работы является определение физико-механических свойств торкрет-бетонных составов с использованием пустых пород угольных шахт.

Задачи исследования:

1. Экспериментально определить прочностные характеристики торкрет-бетонных материалов.
2. Исследовать возможность максимального использования пустой породы в качестве заполнителя взамен природного кварцевого песка.
3. Определить рациональные составы торкрет-бетона при использовании ПВА эмульсии в качестве добавки, которая позволит улучшить прочностные и технологические характеристики торкрет-бетонных смесей.

Описание эксперимента. При выполнении работы применялись следующие сырьевые компоненты – цемент марки ПЦ I 500 Н, природный кварцевый песок, измельченная порода шахты им. Героев Космоса ПАО ДТЭК «Павлоградуголь».

Порода представлена алевролитами темно-серого цвета и аргиллитами горизонтально-слоистой структуры. Прочность пород по шкале проф. Протодьяконова $f=1,4$, сцепление среднее. Также в относительно небольшом количестве присутствует песчаник серый, слюдястый, мелкозернистый, кварцевый на глинистом цементе. Строение горизонтально-слоистое за счет переслаивания с алевролитом. Коэффициент крепости $f=1,4$. Аргиллит темно-серый, горизонтально-слоистый за счет переслаивания с алевролитом, средней крепости $f=2,3$.

Большое значение для приготовления торкрет-бетонной смеси имеет гранулометрический состав заполнителя. В качестве заполнителя выступал для мелкой фракции – кварцевый песок, для более крупных фракций – измельченные породы с шахты им. Героев Космоса ПАО ДТЭК «Павлоградуголь». Измельчение пустой породы происходило в щековой дробилке лаборатории кафедры обогащения полезных ископаемых ГВУЗ «Национальный горный университет». Процесс измельчения выполнялся в 3-4 подхода, после чего измельченный мате-

риал разделялся на фракции (0 – 1,6 мм, 1,6 – 5 мм, 5 – 10 мм), и каждая из фракций была взвешена. В результате этого был определен выход разных фракций для каждого из этих типов пород (таблица 1).

Таблица 1

Выход продуктов измельчения по фракциям

Аргиллит			Алевролит		
0 – 1,6 мм	1,6 – 5 мм	5 – 10 мм	0 – 1,6 мм	1,6 – 5 мм	5 – 10 мм
29,97 %	32,81 %	37,22 %	22,75 %	34,29 %	42,96 %

Из представленной таблицы следует, что более прочный алевролит в меньшей степени подвержен измельчению в процессе дробления, в результате чего количество измельченного материала возрастает с увеличением размера фракций. В отличие от алевролита в аргиллите наблюдается тенденция получения в результате дробления большего количества самой мелкой (0 – 1,6 мм) и самой крупной (5 – 10 мм) фракций. Данная таблица показывает степень дробимости пород обоих типов. Полученные данные могут быть полезны для определения выхода отдельных фракций в результате измельчения, когда в исходном сырье будет преобладать тот или иной тип пород.

В реальных условиях зачастую встречается случай, когда в исходном сырье присутствуют оба типа пород, либо породы представлены переслаивающимися пропластками аргиллита и алевролита. Для этого случая также были проведены исследования и получены следующие результаты, представленные в таблице 2.

Таблица 2

**Выход продуктов измельчения по фракциям
для ординарной смеси горных пород из аргиллита и алевролита**

0 – 1,6 мм	1,6 – 5 мм	5 – 10 мм
38,42 %	28,33 %	33,25 %

В результате измельчения не отсортированных пород и последующего разделения полученного материала на фракции был отмечен значительный выход мелкой фракции (1,6 – 5 мм). Для проведения лабораторных испытаний были рассмотрены варианты, в которых использовались все фракции измельченных пород, а также варианты, когда самая мелкая фракция (0 – 1,6 мм) была заменена кварцевым песком.

Гранулометрический состав используемого природного кварцевого песка представлен в таблице 3.

Таблица 3

Гранулометрический состав песка

Отверстия сит, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %
2,5	-	-	-
1,25	1	0,1	0,1
0,63	13,9	1,39	1,4
0,315	353	35,3	36,8
0,14	512	51,2	88
Дно	121	12,1	100

Данный природный кварцевый песок относится к классу очень мелких. Модуль крупности составляет $M_k = 1,26$.

При подборе гранулометрического состава торкрет-бетона учитывались рекомендации профессора И.П. Александрина относительно оптимального количества и размера частиц применяемого заполнителя (кварцевого песка, щебня, гравия) [1].

Для дальнейшего проведения лабораторных работ с использованием измельченных пород в качестве заполнителя сначала был выполнен рассев полученного измельченного продукта и уже после этого осуществлялся подбор различных фракций для получения наиболее оптимального состава.

Для выбора непрерывного состава заполнителя предлагается целый ряд «идеальных» кривых просеивания, предложенных различными авторами (Фуллер, Болмей, Александрин и др.). Их подбирают из условия, чтобы количество пустот в смеси и суммарная поверхность зерен требовали минимального расхода цемента для получения определенной подвижности и прочности плотного бетона. В этом случае получаются более подвижные смеси при одинаковом расходе цемента, менее склонные к расслаиванию (рис. 1) [2].

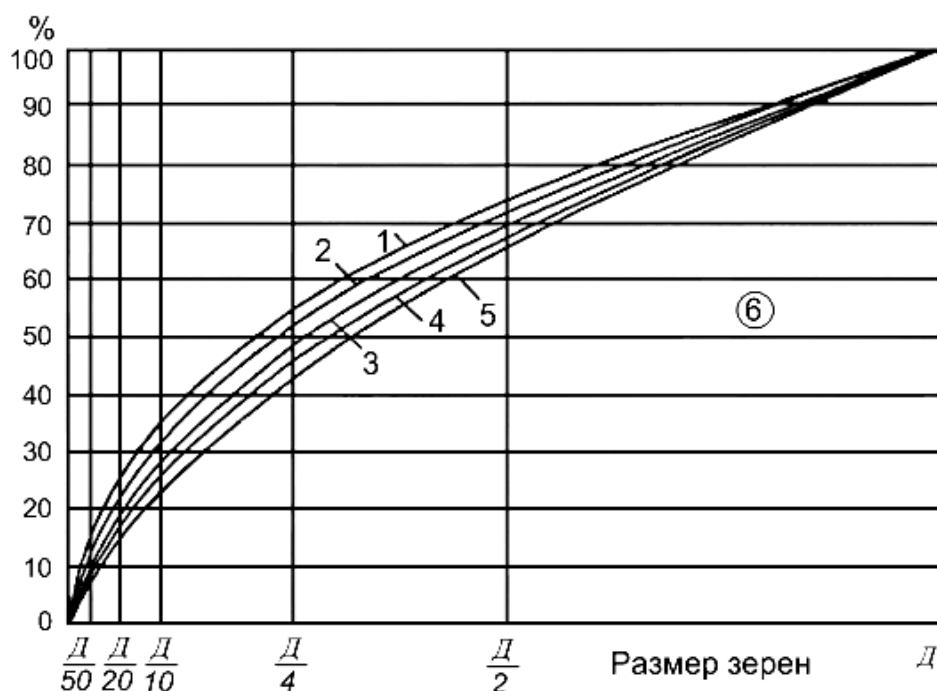


Рис. 1. Кривые оптимального гранулометрического состава смеси песка и щебня, по И.А. Александрину. Расход цемента: 1 – 230 кг/м³; 2 – 270 кг/м³; 3 – 320 кг/м³; 4 – 400 кг/м³; 5 – 500 кг/м³

В соответствии с представленными кривыми были рассчитаны рекомендуемые составы заполнителя для торкрет-бетона. Данные представлены в таблице 4

Таблица 4

Рекомендуемый состав заполнителя для торкретбетона

Тип заполнителя	Содержание фракций в крупности заполнителя, %		
	менее 1,6 мм	1,6 – 5 мм	5 – 10 мм
мелкий	43	32	25
оптимальный	37	33	30
крупный	30	36	34

В ходе выполнения эксперимента изготавливались образцы-кубы размером 10×10×10 см и образцы-балочки размером 4×4×16 см. При приготовлении всех исследуемых смесей в воду затворения вводили суперпластификатор «Виматол» в количестве 0,6 % от массы цемента с целью уменьшения водопотребности.

В процессе приготовления торкрет-бетонной смеси, имеющей в качестве заполнителя все фракции измельченных пород, стало очевидно, что суперпластификатор не работает с данным заполнителем. Это объясняется тем, что используемая порода по химическому составу близка к глинам. В таблице 2 представлен химический состав пород шахты им. Героев Космоса и шахты «Западно-Донбасская» [3].

Таблица 5

Химический состав пород

Шахты	Химический состав, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	п.п.п.
им. Героев Космоса	48,92	13,43	6,45	-	3,30	2,04	3,12	-	18,7
Западно-Донбасская	50,23	17,6	7,36	0,76	0,65	2,03	0,43	0,40	18,3

Очевидно, что наличие в торкрет-бетонной смеси фракции породы 0 – 1,6 мм значительно ухудшает технологические свойства торкрет-бетонной смеси. Данная фракция увеличивает водопотребность бетонной смеси, что приводит к ухудшению физико-механических свойств материала. С целью улучшения технологических свойств и, в конечном итоге, физико-механических свойств торкрет-бетонных смесей было принято решение заменить фракцию породы 0 – 1,6 мм на природный кварцевый песок. Замена в бетонной смеси мелкой фракции пород кварцевым песком позволило снизить негативное влияние диспергированных частиц пород, которые в измельченном состоянии по физико-механическим свойствам были схожи с глинистыми частицами.

При выполнении работы исследовалась возможность максимального использования пустой породы и минимальной замены мелкой фракции заполнителя на природный кварцевый песок. Было выявлено, что оптимальным является соотношение Цемент: Песок: Порода = 1: 1: 2. Меньшее количество песка не имеет положительного влияния на технологические свойства торкрет-бетонной смеси. Благодаря содержанию песка повышается удобоукладываемость торкрет-бетонной смеси при меньшей ее водопотребности.

Физико-механические характеристики исследованных составов торкрет-бетона представлены в таблице 6.

Таблица 6

Физико-механические характеристики торкрет-бетона

№ п/п	Состав					Прочность при сжатии, МПа				Прочность на изгиб, МПа 28 суток
	Цемент	Песок	Порода	Суперпластификатор	В/Ц	7 суток	14 суток	21 сутки	28 суток	
1.	1	3	-	0,006	0,4	11,15	14,02	15,4	16,74	-
2.	1	1,11	1,89	0,006	0,5	14,37	15,6	17,01	18,32	4,7
3.	1	1	2	0,006	0,45	16,82	17,38	18,8	19,87	5,44
4.	1	0,75	2,25	0,006	0,5	-	13,93	17,6	18,13	4,82
5.	1	0,55	2,45	0,006	0,5	13,4	13,97	14,57	16,67	4,65
6	1	-	3	0,006	0,55	-	8,09	9,69	9,86	3,41

На рис. 2 представлен график набора прочности исследованных составов торкрет-бетонных смесей.

Согласно данным, представленным в таблице 6 можно сделать вывод, что наиболее высокими показателями предела прочности на сжатие и изгиб обладает смесь Цемент: Песок: Порода = 1: 1: 2. Данный состав среди остальных представленных в таблице вариантов отличается наибольшей прочностью на сжатие 19,87 МПа и наибольшей прочностью на изгиб – 5,44 МПа.

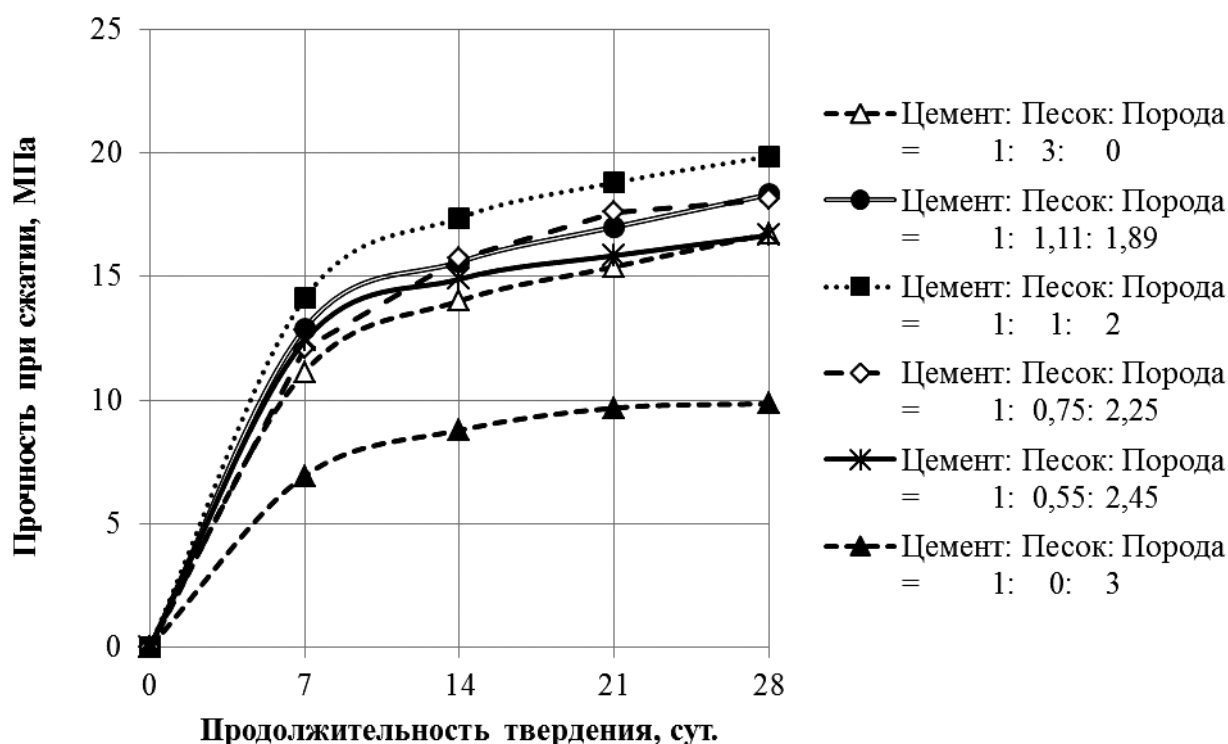


Рис. 2. График набора прочности торкрет-бетона

Как видно из графиков при лабораторных испытаниях использовалось соотношение Цемент: Заполнитель как 1: 3. При этом в качестве заполнителя рассматривалось применение двух компонентов – измельченных пород и кварцевого песка. В контрольном образце для сравнения не применялся песок, а вместо него использовалась самая мелкая фракция измельченных пород. Рассматривая кривые с разным соотношением исходных компонентов Цемент: Песок: Порода можно сделать вывод, что в случае, когда песок полностью заменяется породой самой мелкой фракции, у бетонных образцов наблюдается наименьшая прочность на сжатие. Таким образом, измельченные породы фракции менее 1,6 мм не целесообразно использовать для приготовления торкрет-бетона.

Как свидетельствуют результаты ранее проведенных исследований [3] прочность используемой породы не превышает 16 МПа. Тогда как прочность цементно-песчаного раствора Цемент: Песок = 1:3, которая была определена нами экспериментально, составила 16,74 МПа. Из этого следует, что разрушение может происходить как по поверхности контакта заполнителя и растворной части, так и по поверхности самого заполнителя [5].

На рис. 3 представлены изображения испытанных на сжатие образцов-кубов. По характеру деформаций видно, что разрушение происходило по боковым поверхностям образцов-кубов, тогда как грани образца-куба, которые соприкасались с плитами пресса остались не поврежденными. Наблюдается так называемый «эффект обоймы», когда плиты пресса защищают прилегающие к ним грани образца-куба. После испытаний образуются две встречных усеченных пирамиды [6]. Следует также отметить, что на поверхности обнаженной грани образца-куба отчетливо наблюдалось небольшое вкрапление частиц угля (рис. 3, г), что свидетельствует о невозможности полного очищения материала смеси пустой породы, которая будет идти при приготовлении торкрет-бетона в качестве заполнителя. Данные инклюзивы, при условии меньшей прочности угля, могут в некоторой степени ослаблять поперечное сечение бетонного образца. Данный эффект может проявляться в большей степени при увеличении количества частиц угля в исходной породной смеси. Это в большей степени зависит от квалификации работников, осуществляющих отбор породы, которая будет идти для приготовления торкрет-бетона.

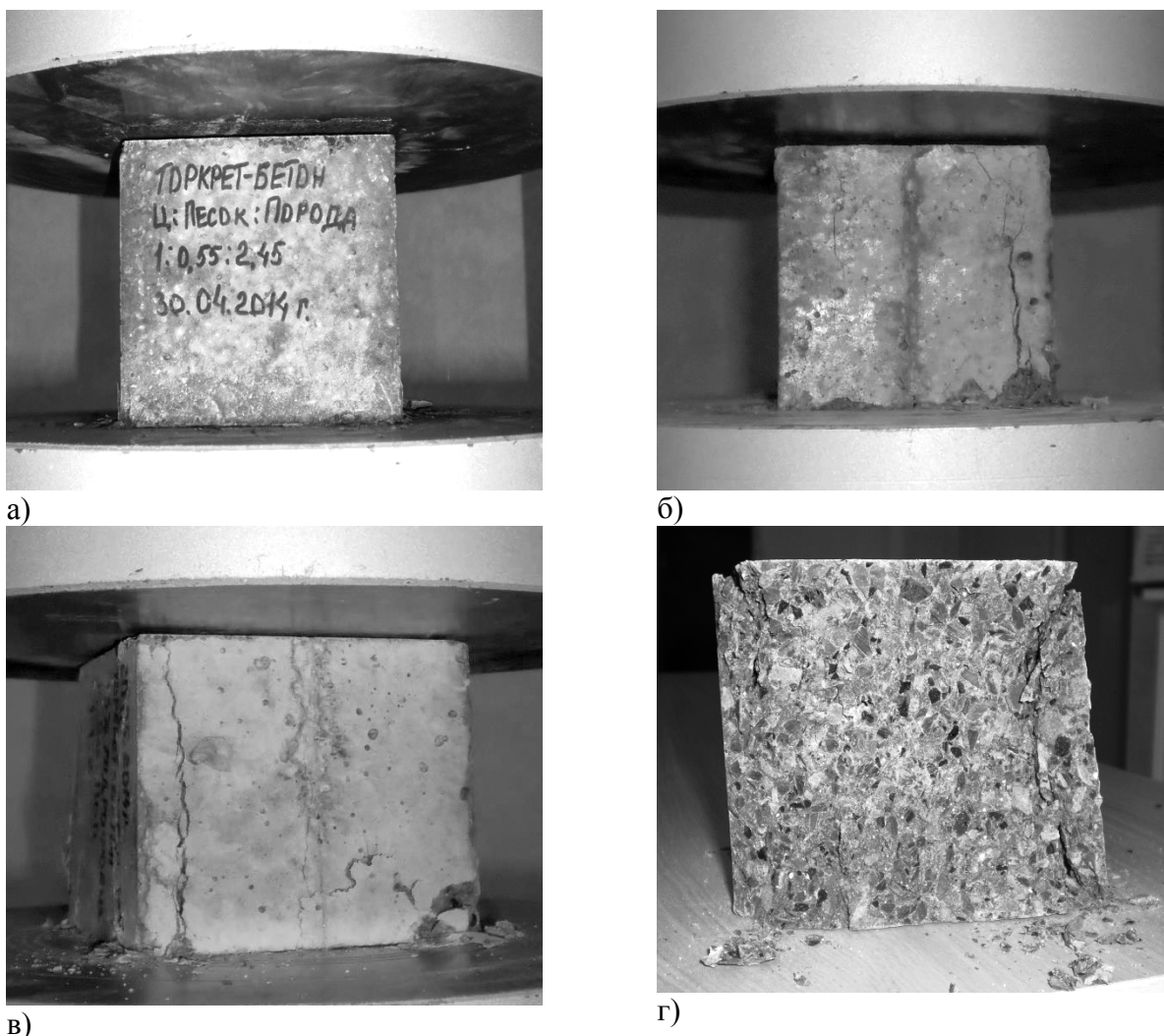


Рис. 3. Испытания образцов-кубов на сжатие: а) образец в не разрушенном состоянии; б), в) разрушенные образцы; г) поверхность разрушения образца.

Для используемой породы наблюдается следующая закономерность – с увеличением количества крупной фракции увеличивается прочность торкрет-бетона. Это были случаи, когда в составе бетона варьировалось минимальное количество песка (от 0,55 до 1,11 частей к отношению количества цемента в смеси). Однако при этом наблюдалось ухудшение таких технологических свойств торкрет-бетонной смеси, как удобоукладываемость. Для улучшения технологических и физико-механических свойств торкрет-бетонной смеси целесообразным является введение добавок. Условиями эксперимента определено применение в качестве добавки ПВА эмульсии. Физико-механические характеристики торкрет-бетонных смесей с добавкой ПВА в количестве 5, 10, 15, 20, 30% представлены в таблице 7.

В результате приготовления бетонной смеси и последующего определения прочности готовых образцов было определено, что для бетонов является оптимальным добавление ПВА в количестве 10-20%. ПВА оказывает пластифицирующее воздействие на бетонную смесь, улучшает адгезию торкрет-бетонной смеси к породному массиву. Однако введение ПВА в количестве больше 20% повышает водопотребность бетонной смеси при том же самом В/Ц. При недостаточном количестве воды смесь имеет плохую удобоукладываемость и низкие физико-механические показатели. Из полученных результатов следует, что введение ПВА в количестве больше, чем 5% от массы цемента оказывает отрицательное влияние на прочностные характеристики торкрет-бетона. Добавка ПВА 5% от массы цемента является оптимальной.

График набора прочности торкрет-бетона с добавкой 5, 10, 15, 20, 30% ПВА представлен на рис. 3.

Физико-механические характеристики торкрет-бетона добавкой ПВА 5, 10, 15, 20, 30%

№ п/п	Состав						Прочность при сжатии, МПа				Прочность на изгиб, МПа 28 сут.
	Цемент	Песок	Порода	ПВА	Суперпластификатор	В/Ц	7 сут.	14 сут.	21 сут.	28 сут.	
1.	1	1	2	0,05	0,006	0,47	10,68	14,82	16,69	19,86	5,4
2.	1	1	2	0,1	0,006	0,4	12,51	14,48	-	18,42	5,6
3.	1	1	2	0,15	0,006	0,4	9,86	11,63	14,01	16,32	5,73
4.	1	1	2	0,2	0,006	0,4	9,14	9,67	13,57	15,92	5,81
5.	1	1	2	0,3	0,006	0,4	9,05	9,75	10,46	12,56	5,96

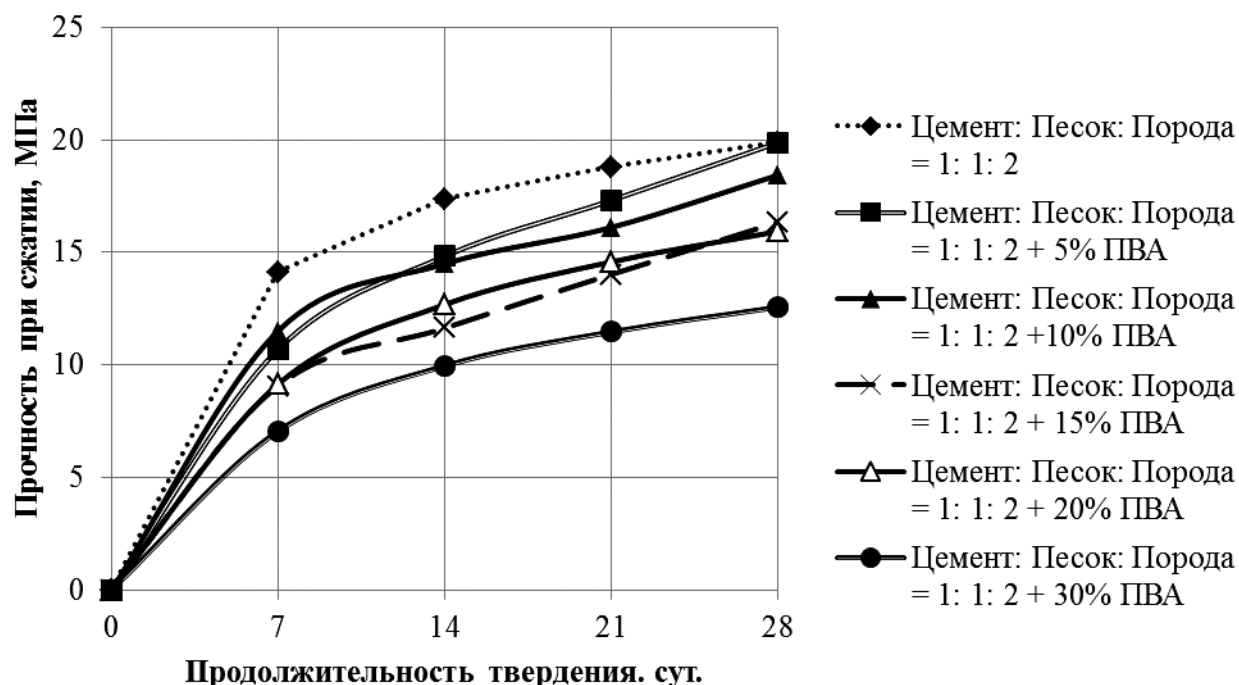


Рис. 3. График набора прочности торкрет-бетона с добавкой 5, 10, 15, 20, 30% ПВА

Наиболее представительными являются результаты испытаний балочек на изгиб, изложенные на рисунке 4.

В отличие от диаграммы, отображающей динамику твердения и набора прочности образцов, где увеличение количества ПВА свыше 20% негативно сказывается на прочности образцов на сжатие, в случае испытания образцов-балочек на изгиб наблюдается четкая тенденция незначительного увеличения прочности на изгиб при увеличении количества ПВА эмульсии в составе бетонной смеси от 5 до 30%.

Из анализа двух последних рисунков следует, что выбор составов для торкрет-бетонных работ будет определяться в первую очередь рациональным выбором между свойствами бетонной смеси к сопротивлению на сжатие и изгиб. Наиболее целесообразным является выбор составов торкрет-бетонных смесей содержащих 20 % ПВА. В этом составе будут относительно высокие значения прочности на сжатие при возрастающем значении предела прочности на изгиб.

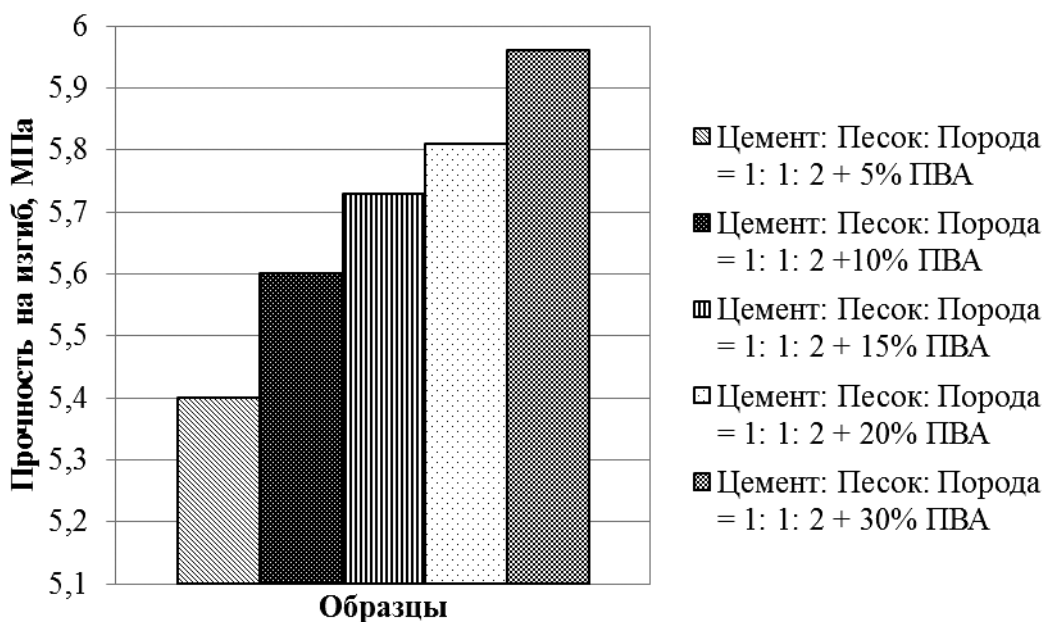


Рис. 4. Предел прочности на изгиб бетонных балочек, модифицированных добавкой ПВА в количестве 5, 10, 15, 20, 30 %

Выводы. Пустая порода угольных шахт может быть использована для выполнения торкрет-бетонных работ. Наряду с тем данный материал имеет определенные ограничения для использования – низкую прочность, склонность к размоканию. Несмотря на указанные недостатки, он может быть эффективно использован в качестве крупного заполнителя для торкрет-бетонных смесей. Данные составы торкрет-бетонной смеси могут быть использованы при креплении капитальных и основных подготовительных выработок и выполнять функцию ограждающей крепи.

Исследования показали, что для получения торкрет-бетонных смесей с хорошими технологическими характеристиками и физико-механическими показателями необходима замена фракции породы менее 1,6 мм на природный кварцевый песок. Максимально возможная прочность торкрет-бетона на основе пустых пород с заменой фракции породы меньше 1,6 мм на природный кварцевый песок составляет 16-20 МПа, тогда как прочность торкрет-бетона на основе породы без введения песка составляет 8-10 МПа.

Внедрение технологии дробления пустых пород и приготовления торкрет-бетонных смесей непосредственно в шахте позволит уменьшить количество выдаваемой на поверхность породы, уменьшит загруженность транспортной системы шахты и, соответственно, снизит затраты на традиционные заполнители для торкрет-бетона (песок, щебень) и на их транспортировку на действующие горизонты угольных шахт.

Список литературы

1. Александрин И.П. Строительный контроль качества бетона. - Л.-М.: Гостройиздат, 1955. - 227 с.
2. Домокеев А.Г. Строительные материалы: учеб. / А.Г. Домокеев. – М.: Высш. школа, 1982. – 383 с.
3. Халимендик Ю. М. Применение породобетонных смесей для возведения шахтных конструкций / Халимендик Ю. М., Южакова Р. А. // Уголь Украины. – 1994. - № 11. – с. 24 -26.
4. Ицкович С.М. Технология заполнителей бетона. / Л.Д. Чумаков, Ю.М. Баженов - Москва: Высшая школа, 1991. – 271 с.
5. Штумпф Г.Г. Характер разрушения образцов пород и совершенствование методов определения их прочности. / Штумпф Г.Г. // Уголь Украины. – 1988. - № 6. – с. 10 – 12.
6. Баженов Ю. М. Технология бетона. – М.: Высшая школа, 1987. – 415 с.