

УДК 666.972.69:691.32

## ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИИ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА БЕТОНА

*П.Л. Федорович, Э.И. Батяновский*

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь  
e-mail: fedorovich@bntu.by, but47@tut.by

*Материал статьи содержит решение задачи по повышению качества мелкого заполнителя для бетона путем обогащения природного мелкозернистого песка более крупными фракциями гранитного отсева – побочного продукта производства гранитного щебня на РУПП «Гранит».*

**Ключевые слова:** бетон, заполнитель, песок, гранулометрический состав, обогащенный песок, гранитный отсев.

## INFLUENCE OF GRANULOMETER OF FINE AGGREGATE ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF CONCRETE

*P. Fedarovich, E. Batyanovsky*

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus  
e-mail: fedorovich@bntu.by, but47@tut.by

*The article contains a solution to the problem of improving the quality of fine aggregate for concrete by enriching natural fine-grained sand with larger fractions of granite screenings - a by-product of the production of granite crushed stone at RUPP "Granit".*

**Keywords:** concrete, aggregates, sand, grain size, enriched sand, granite screening.

**Введение.** Заполнители занимают в бетоне до 80% объема и оказывают определенное влияние на свойства бетона, его долговечность и стоимость. Применение заполнителей позволяет резко сократить расход вяжущего, являющегося наиболее дорогим компонентом бетона. Кроме того, заполнители улучшают технические свойства бетона. Жесткий скелет из высокопрочного заполнителя несколько увеличивает прочность и модуль упругости бетона — уменьшает деформации конструкций под нагрузкой, а также ползучесть бетона — необратимые деформации, возникающие при длительном действии нагрузки.

Рационально подобранные заполнители уменьшают деформации усадки бетона, снижая “усадочное” трещинообразование и способствуя получению более долговечного материала.

Существует много предложений по назначению оптимального состава заполнителя. Большинство исследователей [1-5] считают более эффективным непрерывный зерновой состав заполнителя. В результате уменьшается необходимый на заполнение пустотности и образование “оболочки” на поверхности их зерен объем цементного теста и снижается расход цемента, появляется возможность его экономии. Кроме того, смеси с непрерывным зерновым составом менее склонны к расслоению, что способствует повышению физико-механических характеристик за счет однородности структуры бетона.

При этом технологические и физико-механические свойства бетона зависят от плотности упаковки смеси зерен мелкого и крупного заполнителей. Однако смесь с минимальной пустотностью не всегда будет оптимальной в бетоне, так как при выборе правильного соотношения между крупным и мелким заполнителями необходимо учитывать расходы цемента и воды, т.е. объем цементного теста и его влияние на формуемость (удобоукладываемость) смеси.

Важной характеристикой заполнителя, связанной с его зерновым составом и оказывающей существенное влияние на свойства бетонной смеси и бетона, является площадь и качество (шероховатость) поверхности зерен заполнителя. Площадь поверхности зерен обратно пропорциональна их диаметру и с уменьшением размеров зерен их поверхность возрастает. Для получения слитной структуры бетона необходимо, чтобы цементное тесто заполнило пустоты между зернами заполнителя с некоторой раздвижкой их прослойкой цементного теста. Соответственно расход цемента в бетоне зависит от пустотности смеси заполнителей и удельной поверхности и возрастает с уменьшением размера зерен.

Необходимо констатировать, что эти известные факторы обеспечения высоких качественных характеристик тяжелого конструкционного бетона за счет использования рационального подбора мелкого и крупного заполнителей зачастую не соблюдаются в современных условиях функционирования строительной отрасли Республики Беларусь. Причиной является отсутствие во многих регионах страны качественных природных песков и предприятия вынуждены использовать некачественный материал, например:

- в Витебской области используют очень мелкие (здесь и далее классификация по ГОСТ 8736-2014 [6]) речные пески с модулем крупности  $M_k \sim 1,2 \dots 1,6$ , песок мелкий и очень мелкий  $M_k \sim 1,3 \dots 1,8$  карьер «Скуловичи», песок мелкий  $M_k < 2,0$  карьер «Крулевщизна» и т.д.;
- в Минской области используют песок мелкий  $M_k < 2,0$  карьер Филиал КУП «Минскоблдорстрой» «ДРСУ №125» г. Слуцк, очень мелкие речные пески  $M_k \sim 1,0 \dots 1,2$  и т.д.;
- в г. Гомель и Гомельской области используют очень мелкие речные пески  $M_k \sim 1,0 \dots 1,2$ ;  $\leq 2,0$  карьер «Березинский» и т.д.;
- в Брестской области используют тонкие и очень мелкие речные пески  $M_k \sim 0,9 - 1,4$  Филиал РТУП «Белорусское речное пароходство» речной порт Микашевичи и т.д.;
- в Гродненской области используют очень мелкий песок  $M_k \sim 1,2 \dots 1,5$  карьер №142 «Дьяки», песок мелкий  $M_k \sim 1,5 \dots 1,8$  карьер №1 «Скураты» и т.д.;
- в Могилевской области используют песок мелкий  $M_k \sim 1,6 \dots 2,0$  карьер «Охотичи», очень мелкие речные пески  $M_k \sim 1,0 \dots 1,2$ ;  $\leq 2,0$  карьер «Березинский» и т.д.

Как следствие, при производстве изделий с повышенными требованиями в части физико-механических свойств, морозостойкости, водонепроницаемости многие предприятия вынужденно осуществляют доставку более качественного мелкого заполнителя (песка) из других районов и даже областей Республики Беларусь, что удорожает их продукцию. Отсутствие качественного материала вынуждает использовать мелко- и тонкодисперсные речные пески (модуль крупности  $M_k < 1,5$  ед., а зачастую  $M_k < 1,0$  ед.) или материал местных карьеров с повышенным содержанием загрязняющих примесей (преимущественно – глины), что сопровождается ухудшением качества бетона, несмотря на существенный (10...20%) перерасход вяжущего. Использование в строительстве такого мелкозернистого заполнителя вынужденная мера, которая сопровождается повышенным расходом цемента (из-за повышенной удельной поверхности и пустотности, а также низкого качества сцепления с цементным камнем) для обеспечения качественных характеристик бетона (раствора).

В этой связи очевидна возможность использования гранитного отсева в технологии бетонов и растворов для обогащения местных природных песков. Однако его применение в исходном виде, т.е. в совокупности всех образующихся при дроблении горной породы фракций, оказалось нерациональным. Это было установлено экспериментальной оценкой использования отсевов в бетоне научно-исследовательскими организациями Минстройархитектуры Белорусской ССР с началом работы Микашевичского карьера в 70-е годы XX века (тогда – НИИ «ИСИА» и НИИ строительных материалов), а также в НИЛ защиты бетона от коррозии в БПИ

(теперь НИИЛ бетонов и строительных материалов – БНТУ). Причина заключается в том, что фракции с размером зерна менее 0,5...0,6 мм характеризуются чрезвычайно развитой удельной поверхностью, массовым наличием микротрещин в структуре твердой фазы и игольчатолещадной формой зерен. В результате содержание (до 35...40 % по массе) этих фракций в отсеве резко снижает формуемость бетонных (растворных) смесей, как следствие – плотность, прочность и эксплуатационные свойства бетона, что делает его практически непригодным в качестве мелкого заполнителя для бетонов и растворов при “прямом” применении. Вместе с тем, если вывести из гранитного отсева фракции менее 0,5 мм, то оставшийся материал (а это 65...75 % от его общей массы) может составить базу для разработки технологии обогащения используемых в строительстве местных мелкозернистых песков и существенного повышения качества бетона (раствора) при одновременной значительной экономии (как будет показано экспериментально – до 15...20 %) цемента. Этот эффект обеспечивается за счет нормализации гранулометрического состава как мелкого заполнителя, так и его смеси с крупным заполнителем в бетоне.

На основании изложенного решением данной проблемы является разработка технологии нормализации гранулометрического состава мелкого заполнителя для тяжелого конструкционного бетона путем обогащения мелких природных песков крупными фракциями (номинально  $\geq 0,50...5,0$  мм) гранитного отсева РУПП «Гранит», отходящего после дробления исходной горной (гранитоидной) породы, т.е. отхода его основного производства.

**Экспериментальная часть.** Общая методология исследований включала ряд экспериментальных испытаний, выполненных в следующей последовательности. Вначале (на основе определенного предварительно зернового состава мелкого природного песка и его модуля крупности) теоретически с помощью авторской программы «Нормализация» определили необходимое количественное содержание отдельных фракций гранитного отсева, обеспечивающих увеличение модуля крупности с исходной величины, равной:  $M_k \sim 0,9...2,0$ , до расчетного значения:  $M_k \sim 2,5...3,25$ . На этом основании определяли количество крупных фракций отсева, обеспечивающих эти значения « $M_k$ ». На обогащенном, а также и на исходном песке, готовили замесы бетонных смесей «при прочих равных условиях» и оценивали физико-механические свойства бетона.

С целью оценки эффективности приема обогащения мелкого заполнителя и его влияние на физико-механические характеристики тяжелого конструкционного бетона определили прочность образцов бетона на осевое растяжение и срез, а также оценили изменения усадки и упруго-деформативных свойств. Бетонные смеси равной подвижности готовили на природном мелком заполнителе с модулем крупности  $M_k \sim 0,9; 1,5; 2,0$  и на обогащенном гранитным отсевом заполнителе при  $M_k \sim 2,5; 3,0; 3,25$ , соответственно, (составы бетона с крупным заполнителем фр. 5-10 мм по таблице 1; марка по удобоукладываемости П1).

Таблица 1. – Составы бетонов для испытаний

Вид мелкого заполнителя (Мк)	Цемент	Щебень	Песок	Отсев	Вода
Природный Мк $\sim 0,9$	350	1150	700	-	195
Обогащенный Мк $\sim 2,5$	350	1150	380	320	175
Природный Мк $\sim 1,5$	350	1150	700	-	180
Обогащенный Мк $\sim 3,0$	350	1150	310	390	175
Природный Мк $\sim 2,0$	350	1150	700	-	175
Обогащенный Мк $\sim 3,25$	350	1150	290	410	175

При оценке усадки готовили мелкозернистый бетон номинального состава Ц : П = 1 : 3, при расходе цемента (марки ЦЕМ I 42,5Н) 500 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона и водоцементном отношении  $(В/Ц)_6 = 0,5$  долей ед. для составов на обогащенном песке и с увеличением водосодержания до  $(В/Ц)_6 = 0,6; 0,55$  и  $0,53$  долей ед. при  $M_k \sim 0,9; 1,5$  и  $2,0$  для обеспечения равноподвижности мелкозернистой бетонной смеси.

*Усадка бетона.* Процесс твердения бетона в воздушно-сухих условиях сопровождается уменьшением его объема и в особенной мере при пониженной влажности среды.

Усадка бетона вызывается физико-химическими процессами, происходящими в бетоне (а по существу – в цементном камне) при твердении, а также с изменением его влажности. Суммарная величина деформаций усадки складывается из ряда составляющих, среди которых наиболее существенное значение имеют влажностные, контракционные и «карбонизационные» деформации, названные так по виду определенного фактора.

Влажностная усадка вызывается изменением распределения, перемещением и испарением влаги в капиллярных порах структуры как твердеющего, так и затвердевшего цементного камня и бетона в целом. Эта составляющая играет ведущую роль в суммарной усадке бетона.

Контракционная усадка есть следствие того, что объем новообразований цементного камня меньше объема, занимаемого веществами, вступившими в реакцию при их формировании (исключая образование гидросульфатоалюмината кальция – этрингита).

В бетонах, характеризующихся повышенной плотностью и сниженным количеством воды затворения, развивается специфический вид усадки, названный «аутогенной» [7], причины которой кроются в продолжении реакции гидратации цемента и связанным с этим явлением перераспределением в объеме новообразований цементного камня воды, количество которой исходно близко к теоретически необходимому для протекания реакции между водой и вяжущим.

Усадка бетона, развивающаяся в твердеющем материале, может привести к возникновению трещин в бетоне, особенно в изделиях (конструкциях) с большой открытой поверхностью при твердении в воздушно-сухих условиях.

Величина усадки бетона также зависит от его состава и свойств использованных материалов и увеличивается при повышении содержания цемента и воды, применении высокоалюминатных и содержащих минеральные добавки (кроме зол-уноса) цементов, мелкозернистых и пористых заполнителей. В особой мере опасно быстрое «высыхание» бетона, что приводит к значительной и неравномерной усадке (усадка поверхностных слоев материала выше) и сопровождается появлением усадочных трещин, снижающих качество и долговечность строительных изделий и конструкций.

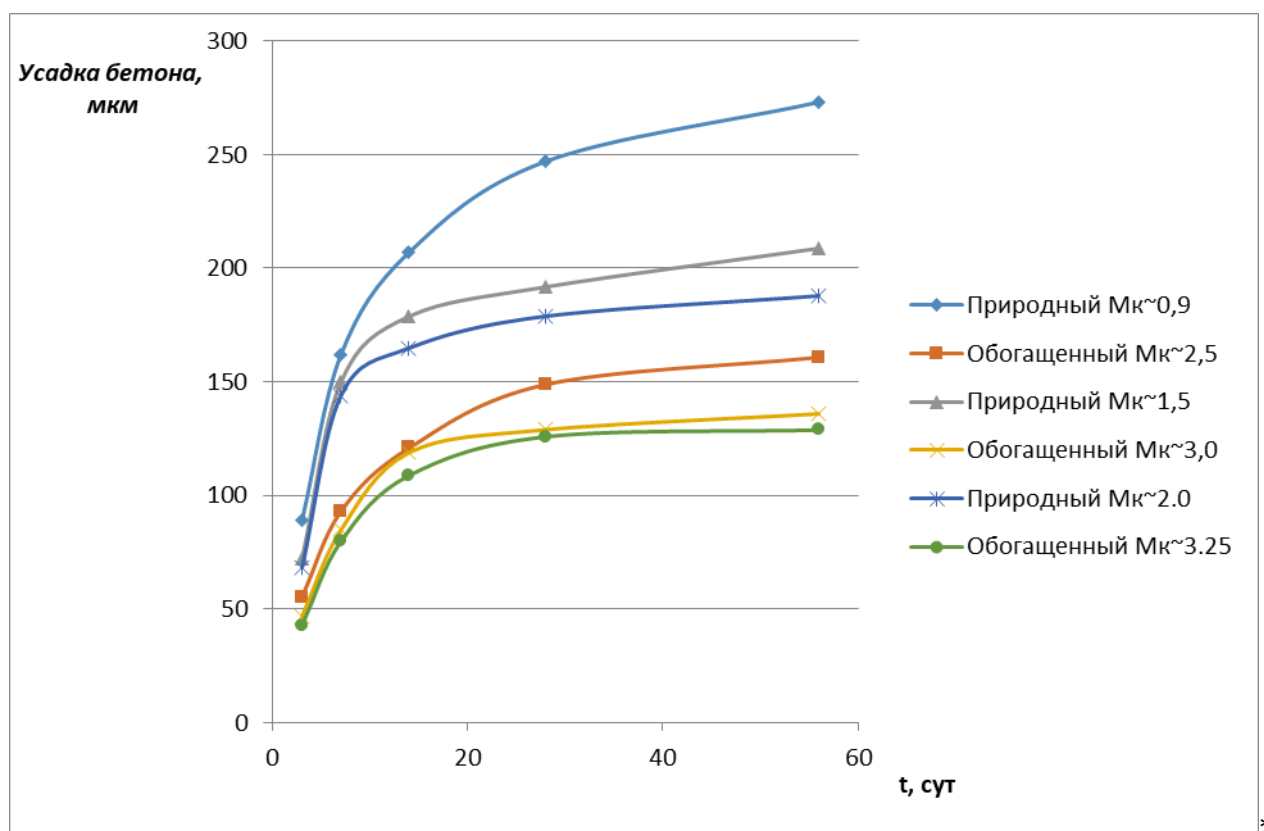
Испытания выполнены в варианте сравнения, то есть путем оценки влияния изменений гранулометрии мелкого заполнителя в бетоне (за счет введения в состав крупных фракций гранитного отсева) на величину деформаций усадки мелкозернистого бетона при соблюдении правила «прочих равных условий». Результаты экспериментов приведены в таблице 2 и частично представлены на рисунке 1 в виде графиков, отражающих тенденцию изменений усадки бетона в зависимости от крупности примененного мелкого заполнителя.

Оценку величины (в мкм) усадки ГОСТ 24544-81 [8] по продольной оси (относительно длины образцов (призмы 40x40x160 мм; в серии по 3 образца) начали на 3 суток после их изготовления и твердения на воздухе в помещении лаборатории ( $t \sim (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ;  $\phi \sim (60 \pm 5) \%$ ); периодичность испытаний: 3, 7, 14, 28 и 56 суток; показания индикатора округляли до микрометра (мкм).

Из анализа результатов экспериментов следует очевидная закономерность снижения усадки мелкозернистого бетона (соответственно следует ожидать и бетона с крупным заполнителем), приготовленного на обогащенном, с нормализованной гранулометрией мелком заполнителе.

Таблица 2. – Усадка мелкозернистого бетона в зависимости от крупности мелкого заполнителя

Вид мелкого заполнителя (Мк)	Усадка* образцов, мкм, в возрасте, сут.					Относительное изменение усадки в возрасте 56 сут, %
	3	7	14	28	56	
Природный Мк ~ 0,9	89	162	207	247	273	100,0
Обогащенный Мк ~ 2,5	55	93	121	149	161	-41,0
Природный Мк ~ 1,5	72	150	179	192	209	100,0
Обогащенный Мк ~ 3,0	47	85	119	129	136	-34,8
Природный Мк ~ 2,0	68	144	165	179	188	100,0
Обогащенный Мк ~ 3,25	43	80	109	126	129	-31,4



Среднее в серии из 3-х образцов-балочек

Рисунок 1. – Тенденция изменений усадки мелкозернистого бетона на исходном песке и после его обогащения

Эти данные в полной мере согласуются с результатами испытаний прочности на сжатие бетона, приведенными в [9], т.к. усадочное трещинообразование в объеме цементного камня и растворной составляющей непосредственно влияет на «работу» бетона под нагрузкой. Повышенная усадка растворной части бетона на мелкозернистом песке сопровождается образованием большого количества дефектов структуры в виде усадочных трещин, являющихся концентраторами напряжений при нагружении бетона, что приводит к снижению его прочности. И наоборот – снижение усадки создает предпосылки для повышения плотности и прочности бетона.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что снижение величины усадки образцов мелкозернистого бетона, приготовленного на обогащенном до  $M_k \sim 2,5$ , в сравнении с бетоном на исходном песке с  $M_k \sim 0,9$ , составляет  $\sim 1,7$  раза (или 41,0 %), что (наряду с другими факторами) предопределяет рост прочности бетона на нормализованном заполнителе.

С улучшением гранулометрии исходного мелкого заполнителя, что отражается в росте модуля крупности исходного песка, например, при  $M_k \sim 1,5$  и  $M_k \sim 2,0$ , снижение усадки после их обогащения до  $M_k \sim 3,0$  и  $M_k \sim 3,25$ , соответственно, составляет 34,8 % и 31,4 %. То есть, налицо общая тенденция изменений усадки (как и прочности бетона) при обогащении мелкозернистого исходного материала, заключающаяся в том, что больший эффект (снижение усадки) проявляется с уменьшением размера зерен исходного песка, при максимальном для тонкого песка с  $M_k \leq 1,0$ . При этом усадочные явления стабилизируются на обогащенном до  $M_k \sim 3,0 \dots 3,25$  к 28 суткам, а при меньших модулях крупности в более поздние сроки.

Определение прочности мелкозернистого бетона на осевое растяжение при раскалывании осуществили по далее изложенной методике «Ахвердова И.Н. – Ицковича С.М.» [10] используя образцы-балочки (40x40x160 мм) с приложением нагрузки (при 3-х испытаниях на одной балочке) по схеме, приведенной на рисунке 2; по величине прочности на растяжение рассчитали [11] прочность мелкозернистого бетона на срез.

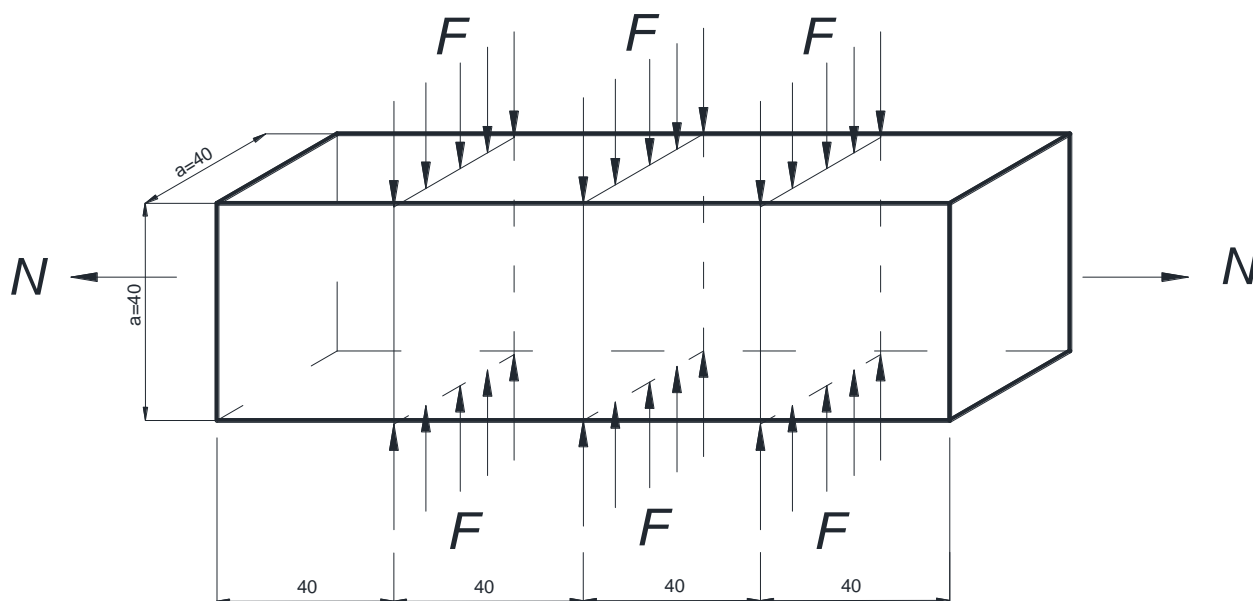


Рисунок 2. – Схема испытаний на осевое растяжение путем раскалывания образцов

Испытательная нагрузка передавалась на образец через 2 стержня цилиндрической формы (проволока  $\varnothing 5$  мм), расположенные в одной плоскости и обеспечивавшие передачу усилия на бетон по всему сечению образца. В результате в перпендикулярном этой плоскости направлении в сечении образца возникает растягивающее усилие, нарастающее до момента хрупкого разрушения бетона. Средняя скорость нарастания испытательной нагрузки на образец соответствовала  $(0,05 \pm 0,01)$  кН/с в пересчете на единицу площади приведенного сечения образца.

Прочность бетона на одноосное (осевое) растяжение рассчитывали [12] по формуле:

$$f_{ctm.sp} = K_{cm} \cdot \frac{2F}{\pi a}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $K_{cm}$  – коэффициент смятия, равный для тяжелого бетона  $K_{cm} = 1,1$ ;  
 $F$  – разрушающая нагрузка, Н;

$\pi$  – число  $\pi = 3,14$ ;

$a$  – размер стороны сечения, мм.

Прочность бетона на срез – нестандартизированная характеристика, рассчитана по методике, изложенной в источнике [11], по величине прочности бетона на осевое (одноосное) растяжение по формуле:

$$f_{\text{ср}} = \frac{\pi}{2} \cdot f_{\text{ctm.sp}}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

или

$$f_{\text{ср}} = 1,57f_{\text{ctm.sp}}, \text{ МПа}. \quad (3)$$

Результаты сравнительных испытаний (средние значения показателей серий из 6-ти образцов, т.е. 18-ти отдельных испытаний) в возрасте 28 суток нормально-влажностного твердения приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Прочность бетона на осевое растяжение

Вид мелкого заполнителя (Мк)	Среднее значение прочности бетона на:			
	осевое растяжение		срез	
	МПа	%	МПа	%
Природный Мк ~ 0,9	2,20	100	3,46	100
Обогащенный Мк ~ 2,5	3,20	+45,5	5,02	+45,1
Природный Мк ~ 1,5	3,05	100	4,79	100
Обогащенный Мк ~ 3,0	4,15	+36,1	6,43	+34,2
Природный Мк ~ 2,0	4,36	100	6,84	100
Обогащенный Мк ~ 3,25	5,70	+30,7	8,95	+31,0

Из экспериментальных данных очевиден общий эффект роста прочностных показателей на осевое растяжение и срез во всех вариантах обогащения исходного песка крупными фракциями гранитного отсева.

Также очевидно, что в наибольшей мере этот эффект проявляется при обогащении «тонкого» мелкозернистого природного песка. И это подтверждает ранее выявленные закономерности повышения устойчивости бетона на обогащенном песке к усадочному трещинообразованию в процессе твердения и роста прочности бетона на сжатие в разных условиях твердения (при тепловой обработке, нормально-влажностных и водных).

**Заключение.** Анализ и обобщение результатов экспериментов показывает эффективность приема обогащения (нормализации) гранулометрии мелкого заполнителя.

Экспериментально установлено снижение усадочных явлений при твердении бетона на нормализованном песке, что одновременно является базовым условием для повышения его упруго-деформативных характеристик, подтвержденных результатами соответствующих испытаний при изгибе и на сжатие образцов бетона.

В целом результаты экспериментальных исследований выявили существенный рост физико-механических характеристик бетона, приготовленного на нормализованном мелком заполнителе, в сравнении с бетоном на исходных вариантах природного песка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ахвердов, И.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Стройиздат, 1961. – 106 с.
2. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 404 с.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона: учеб. для студентов ВУЗов строит. спец. / Ю.М. Баженов. – 3-е изд. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с: ил. – ISBN 5-93093-138-0.
4. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум бетона. – Минск: Наука и техника, 1977. – 230 с.
5. Барташевич А.Я. Исследование структурно-технических свойств бетонной смеси, уплотненной пресованием и вакуумированием: Автореф. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05 / ИСиА Госстрой БССР. – Минск, 1973. – 37 с.
6. Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736-2014. – Введ. 01.04.2017: постановление Госстандарта РБ №27, 2016. – 10 с.
7. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
8. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести: ГОСТ 24544-81. – Введ. 01.01.1982. – Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1980. – 26 с.
9. Смоляков А.В. Научно-технические основы технологии полного использования гранитного отсева в бетонах / А.В. Смоляков, П.Л. Федорович, Э.И. Батяновский // Строительная наука и техника. Научно-технический журнал — Минск, 2011. – С. 35-41.
10. Ахвердов, И.Н. Исследование метода испытания бетона на растяжение посредством раскалывания образцов / И.Н. Ахвердов // Бетон и железобетон. – 1961. – №1. – С. 19-23.
11. Технология заводского производства бетонных и железобетонных изделий: методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 1-70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций» / сост. : Э.И. Батяновский, В.В. Бабицкий, А.И. Бондарович, П.В. Рябчиков. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 37-39.
12. Ахвердов, И.Н. Исследование метода испытания бетона на растяжение посредством раскалывания образцов / И.Н. Ахвердов // Бетон и железобетон. – 1961. – №1. – С. 19-23.