

**Федорович Павел Леонидович**, магистр техн. наук, младший научный сотрудник, Научно-исследовательская испытательная лаборатория бетонов и строительных материалов, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ НОРМАЛИЗАЦИИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА**

© РУП «Институт БелНИИС», 2018  
Institute BelNIIS RUE, 2018

### **АННОТАЦИЯ**

*В статье представлены результаты лабораторных исследований и их производственной апробации, показывающие возможность решения проблемы рационального использования гранитного отсева, образующегося при производстве гранитного щебня, и повышения качественных характеристик бетона за счет обогащения им природного тонкодисперсного песка ( $M_k \sim 1,0$  доли ед.).*

*С одной стороны, это позволяет рационально использовать накапливающиеся на РУПП «Гранит» отходы (достигающие 30...35 % от массы перерабатываемой горной породы), а с другой – на 10...20 % снизить расход цемента без снижения физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств тяжелого бетона.*

*Эффект базируется на обеспечении рационального многофракционного состава мелкого заполнителя, включающего природный (в рассматриваемом случае – тонкий ( $M_k \sim 1,0$  доли ед.) речной песок поймы р. Припять) песок и фракции гранитного отсева (0,16...0,63 мм, а также: 2,0...5,0 мм), которые (песок и отсев) отдельно дозируют и вводят в смеситель при приготовлении бетона.*

*В остальном в исследованиях и при производственной апробации использованы стандартные приемы ведения работ и методики действующей нормативно-технической документации при оценке свойств бетонных смесей и бетона.*

*В результате показано, что при сниженном на 10...20 % расходе цемента бетон производственных составов ОАО*

*«Спецжелезобетон», предназначенных для изготовления преднапряженных железнодорожных шпал широкой колеи и безнапорных вибропрессованных труб, обеспечил требуемый по нормативно-технической документации уровень прочности, водонепроницаемости и морозостойкости. Отформованные из этих составов бетона изделия соответствовали всем предъявляемым к ним требованиям, что подтверждает эффективность использования приема обогащения природного песка гранитным отсевом.*

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

**Для цитирования:** Федорович, П. Л. Эффективность нормализации гранулометрического состава мелкого заполнителя для тяжелого бетона / П. Л. Федорович // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 10. – С. 273–288. <https://doi.org/10.23746/2018-10-18>

**Pavel Fedorovich**, Master in Engineering Science, Junior Researcher, Research and Testing Laboratory of Concrete and Building Materials, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

## **EFFICIENCY OF NORMALIZATION OF GRANULOMETRIC COMPOSITION OF A SMALL FILLER FOR HEAVY CONCRETE**

### **ABSTRACT**

*The article presents the results of laboratory studies and their production approbation, showing the possibility of solving the problem of rational use of granite screening, formed during the production of granite rubble, and improving the quality characteristics of concrete by enriching it with natural fine sand ( $M_k \sim 1.0$  share units).*

*On the one hand, this makes it possible to use rationally the waste accumulating at the Granit Unitary Enterprise (reaching 30...35 % of*

the processed rock mass), and on the other hand – by 10...20 % to reduce cement consumption without reducing the physical and mechanical characteristics and performance characteristics of heavy concrete.

The effect is based on the provision of a rational multi-fraction composition of fine aggregate including natural (in this case, thin (Mk ~ 1.0 fraction of unit) river sand of the Pripyat floodplain) sand and granite screenings (0.16...0.63 mm, and also: 2,0...5,0 mm), which (sand and screenings) are separately dosed and injected into the mixer during the preparation of concrete.

In all other respects, the standard methods of conducting the work and the methodology of the current normative and technical documentation in assessing the properties of concrete mixtures and concrete were used in the studies and during the production approbation.

As a result, it was shown that with the cement consumption reduced by 10...20 %, the concrete of the production facilities of Limited Liability Company “Spetszelezobeton” intended for the production of prestressed broad gauge railroad sleepers and non-pressure vibropressed pipes provided the required level of strength, waterproofness and frost resistance according to normative and technical documentation. The products molded from these concrete compositions met all the requirements imposed on them, which confirms the effectiveness of using the enrichment of natural sand granite screening.

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

**For citation:** Fedorovich P. Efficiency of normalization of granulometric composition of a small filler for heavy concrete. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 10. 2018. Pp. 273–288. <https://doi.org/10.23746/2018-10-18> (in Russian)

## **ВВЕДЕНИЕ**

Бетон представляет собой конгломератный материал, в котором заполнители занимают до 80 % объема и оказывают существенное влияние на его свойства, эксплуатационную надежность и долговечность, а также стоимость. Жесткий «каркас» из

высокопрочного заполнителя способствует росту прочности, уменьшению деформативности и ползучести бетона при «работе» конструкций под нагрузкой. 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, 2, 3] 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. При исследовании этого вопроса и разработке соответствующих математических зависимостей часто пользуются моделью фиктивного грунта [4, 5]. В данной модели плотность упаковки максимальна, если в пустоты между крупными (основными) шарообразными «зернами» без их раздвижки поместить шары меньшего диаметра.

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, то есть 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. Как уже отмечалось, 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 Беларуси. Причиной является отсутствие во многих регионах страны качественных природных песков, что вынуждает использовать мелко- и тонкодисперсные речные пески или материал местных карьеров с повышенным содержанием загрязняющих примесей (преимущественно – глины).

Решением этой проблемы может стать технологический прием обогащения природных песков крупными фракциями гранитных отсеков РУПП «Гранит», эффективность которого отражают данные производственной апробации этого приема на примере изготовления труб вибропрессованных и шпал железнодорожных на ОАО «Спецжелезобетон» г. Микашевичи и приведенные материалы данной статьи.

## **МЕТОДОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ ПЕСКА РАЗЛИЧНОЙ ЗЕРНИСТОСТИ**

Принцип подбора требуемого зернового состава песка заключался в определении необходимого содержания недостающих в зерновом составе исходного природного песка крупных фракций, обеспечивающего расчетный модуль крупности и введение их в состав обогащаемого мелкого заполнителя с последующими испытаниями его в бетонных смесях и бетоне.

Расчетное количество недостающих в природном песке фракций определено из общей зависимости по ГОСТ 8735-88 [6] и ГОСТ 8736-2014 [7], отражающей взаимосвязь их количественного содержания и расчетного значения модуля крупности песка:

$$M_e = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_i + A_n}{100}, \text{ доли ед.}, \quad (1)$$

и решенной относительно любой из учитываемых в формуле 3 фракций, то есть  $A_i$ :

$$A_i = 100 \dot{I}_e - [(\dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dots + \dot{A}_i + \dot{A}_n) - A_i], \% \quad (2)$$

В обеих формулах значения  $A_1 \dots A_n$  соответствуют полным остаткам на ситах стандартного набора, выраженным в процентах, за исключением фракций, прошедших через сито № 0,14 (пылевидных фракций). В соответствии с ГОСТ 8735-88 (п. 3.5) при обработке результатов эти формулы конкретизируются (для стандартного набора сит) следующим образом.

По результатам просеивания вначале вычисляют частный остаток на каждом сите ( $a_i$ ) в процентах по формуле

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \% \quad (3)$$

где  $m_i$  – масса остатка на данном сите, г;

$m$  – масса просеиваемой навески, г, а затем полный остаток на каждом сите ( $A_i$ ) в процентах по формуле

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,3} + \dots + a_i, \% \quad (4)$$

где  $a_{2,5}$ ,  $a_{1,3}$ ,  $a_i$  – частные остатки на соответствующих ситах.

На основании этого подхода было определено соотношение массовых долей между исходным (обогащаемом) песком в диапазоне модулей крупности от  $M_k \leq 1,0$  (тонкий песок) до  $M_k \sim 2,5$  (среднезернистый с переходом к крупнозернистому) и обогащающими фракциями гранитного отсева РУПП «Гранит» (крупностью 0,63...5,0 мм) с целью получения обогащенного песка с модулем крупности в диапазоне  $M_k \sim 2,0 \dots 3,5$  доли ед.

В таблице 1 в качестве примера приведена гранулометрия природного песка при  $M_k \sim 1,0$  доли ед. (используемого ОАО «Спецжелезобетон», г. Микашевичи) и после его обогащения крупными фракциями отсева (раздел А), а также соотношение масс исходного песка и отсева (раздел Б), обеспечивающее получение мелкого заполнителя различной (т. е. требуемой для конкретного случая использования в бетоне) зернистости, характеризующейся величиной модуля крупности  $M_k = 2,5 \dots 3,25$  доли ед. (промежуточные значения при необходимости определяются интерполяцией).

Таблица 1

**Гранулометрия исходного песка и обогащенного песка (раздел А)  
и долевое соотношение исходного песка и отсева в обогащенном  
заполнителе (раздел Б)**

Вид мелкого заполнителя	Зерновой состав (%) по фракциям, мм:						Мк, доли ед.
	< 0,14	0,14	0,315	0,63	1,25	2,5	
1	2	3	4	5	6	7	8
А. Гранулометрия природного и обогащенного песка							
1. Песок завода «Спецжелезобетон»	20,4	63,1	15,0	1,1	0,4	–	~ 1,0
2. Обогащенный песок завода «Спецжелезобетон» при исходном Мк ~ 1,0							
2.1. средний	11,4	35,1	8,3	6,5	14,7	24,0	2,5
2.2. крупный	8,4	26,0	6,2	8,2	19,4	31,8	3,0
2.3. повышенной крупности	6,9	21,4	5,1	9,1	21,7	35,8	3,25
Б. Долевое содержание природного песка и крупных фракций отсева в обогащенном заполнителе, кг/1 000 кг							
3. Обогащенный завода «Спецжелезобетон»	Природный тонкий (Мк = 1,0), кг			Отсев, кг (фр. 0,63...5,0)			
3.1. средний	560			440			2,5
3.2. средний	420			580			3,0
3.3. средний	340			660			3,25

Здесь необходимо отметить, что разработанная технология обогащения реализуется раздельным дроблением обоих материалов (исходного песка и отсева) с образованием обогащенного мелкого заполнителя при смешивании компонентов приготавливаемой бетонной смеси. Это исключает отрицательный эффект расслоения смеси, который мог бы проявиться при предварительном ее приготовлении, и гарантирует соответствие гранулометрии расчетной.

Приведенные в таблице 1 данные, это часть результатов исследований крупных фракций гранитного отсева, предварительно переработанного с его разделением на крупности зерна ~ 0,5...0,6 мм. Доля в отсева крупных фракций (до 5,0 мм) практически стабильна и составляет до 65...70 % его массы. Мелкие фракции предложено использовать [8, 9] в качестве минеральной

добавки при производстве цемента. Практическое использование переработанного отсева на дочернем предприятии (ООО «НПК Гранит») потребовало оценки возможности использования как отдельно крупной его фракции 2,0...5,0 мм, так и всей их совокупности после удаления фракций менее 0,16 мм, которые нашли использования в других отраслях хозяйствования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования были выполнены в два этапа. На первом этапе произвели (в НИИЛ бетонов и строительных материалов БНТУ) экспериментальную оценку эффективности исследования переработанного отсева на составах бетона (табл. 2) и материалах для него, предоставленных ОАО «Спецжелезобетон»; затем на предприятии изготавливали изделия (ж/д шпалы и вибропрессованные трубы) и контролировали качественные характеристики бетона и изделий в лаборатории (отделом технического контроля) предприятия. В обоих случаях использовали: портландцемент ПЦ 500-Д0 (ГОСТ 10178-85), песок Мк = 1,0 (ГОСТ 8736-2014), крупный отсев фр. 2,0–5,0 мм (ТУ ВУ 291256446.002-2016), мелкий отсев фр. 0,16–0,63 мм (ТУ ВУ 291256446.002-2016), гранитный щебень фр. 5–20 мм (ГОСТ 8267-93) и воду для затворения бетонной смеси (СТБ 1114-98, СТБ 1188-99).

Таблица 2

### Номинальные составы бетона

№ состава	Цемент	Песок природный	Отсев фр. 2–5	Отсев фр. 0,16–0,63	Щебень	Вода	Показатель жесткости, с
А. Составы, предоставленные ОАО «Спецжелезобетон»							
А1. Составы для изготовления шпал (С32/40)							
1	475	524	–	–	1 256	155	~20
2	475	262	262	–	1 256	140	~20
3	475	–	236	288	1 256	140	~25
А2. Составы для изготовления труб вибропрессованных (С25/30)							
4	450	821	–	–	1 004	175	~8
5	450	411	411	–	1 004	160	~9
6	450	–	369	452	1 004	160	~10

№ состава	Цемент	Песок природный	Отсев фр. 2–5	Отсев фр. 0,16–0,63	Щебень	Вода	Показатель жесткости, с
Б. Составы откорректированные со сниженным расходом цемента							
Б1. Составы для изготовления шпал (С32/40)							
7	400	600	–	–	1 256	150	~16
8	400	300	300	–	1 256	135	~18
9	400	–	270	330	1 256	135	~23
Б2. Составы для изготовления труб вибропрессованных (С25/30)							
10	400	870	–	–	1 004	160	7
11	400	435	435	–	1 004	145	11
12	400	–	391	479	1 004	145	12

Эксперименты выполнены (в НИИЛ БиСМ БНТУ и при отборе проб бетона на предприятии) с использованием образцов кубов с ребром 100 мм, а по показателю водонепроницаемости – на образцах цилиндрах диаметром и высотой 150 мм; бетон уплотняли на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрирования (амплитуда  $A \sim 0,5$  мм; частота колебаний  $f \sim 50$  Гц). В случае тепловлажностной обработки (ТВО) бетона режим соответствовал: предварительная выдержка – 1 час, подъем температуры – 3 часа (до 80 °С), изотермическая выдержка – 7,5 часа, остывание в камере – 4,5 часа. Испытания бетона по показателям: водопоглощение по массе, прочность на сжатие, водонепроницаемость, морозостойкость, проводили через 24 часа после окончания ТВО. Для оценки прочности бетона на сжатие в проектном возрасте образцы испытывали через 28 суток твердения в нормально-влажностных условиях (температура  $\sim 20$  °С, относительная влажность  $\geq 90$  %).

В таблице 3 приведены данные о влиянии на величину средней плотности ( $\rho_g^0$ , кг/м<sup>3</sup>), прочности на осевое сжатие ( $f_{cm}$ , МПа (%)), водопоглощение по массе ( $W_m$ , %) приема обогащения тонкого природного песка крупными фракциями отсева (2,0...5,0 мм – составы № 2, 5, 8, 11) и гранитным отсевом (0,16...5,0 мм – составы № 3, 6, 9, 12), определенные после тепловлажностной обработки и в проектном возрасте (28 суток). При оценке прочности бетона масштабный фактор ( $\alpha = 0,95$ ) учтен.

## Физико-механические характеристики бетона

№ состава	После ТВО					После 28 суток нормально-влажностного твердения	
	fcm, МПа	fcm, %	Wm, %	Снижение водопоглощения, %	ρ <sub>б0</sub> , кг/м <sup>3</sup>	fcm, МПа	fcm, %
А. Составы, предоставленные ОАО «Спецжелезобетон»							
А1. Составы для изготовления шпал (С32/40)							
1	57,0	100,0	1,8	–	2 470	69,2	100,0
2	64,4	113,0	1,6	11,1	2 520	75,1	108,5
3	60,3	105,8	1,6	11,1	2 530	69,6	100,6
А2. Составы для изготовления труб вибропрессованных (С25/30)							
4	42,0	100,0	2,6	–	2 470	58,6	100,0
5	48,9	116,4	2,0	23,1	2 580	70,8	120,8
6	48,0	114,3	1,9	26,9	2 570	65,2	111,3
Б. Составы, откорректированные со сниженным расходом цемента							
Б1. Составы для изготовления шпал (С32/40)							
7	54,0	100,0	2,0	–	2 545	55,6	100,0
8	59,9	110,9	1,8	10,0	2 590	63,7	114,6
9	59,1	109,4	1,7	15,0	2 600	60,3	108,5
Б2. Составы для изготовления труб вибропрессованных (С25/30)							
10	38,5	100,0	2,4	–	2 510	49,4	100,0
11	51,0	132,5	1,8	25,0	2 580	57,8	117,0
12	47,6	123,6	2,1	12,5	2 605	54,1	109,5

Очевидно, что улучшение гранулометрического состава песка способствует более плотной взаимной укладке зерен заполнителя в бетоне, что отражается в росте его средней плотности и, как следствие, росте плотности структуры, снижается водопоглощение и растет прочность.

Необходимо отметить большую эффективность использования крупной фракции (2,0...5,0 мм) в сравнении со смесью их (0,16...5,0 мм). Эти данные подтверждают ранее установленные нами закономерности [8, 9], согласно которым наибольшая эффективность достигается при использовании фракций отсева размерами (0,5...0,6)...5,0 мм, то есть при отсеве фракций < 0,5 мм. Эти мелкие фракции снижают эффективность приема обогащения, так как характеризуются повышенной «лещадностью»,

наличием микротрещин в своей структуре и повышенной удельной поверхностью. В совокупности это сопровождается ухудшением формуемости (растет показатель жесткости бетонной смеси; табл. 2) и в меньшей степени, чем для крупных фракций, растет прочность бетона при обогащении им песка (табл. 3). Эти результаты явились основанием того, что как при последующем определении эксплуатационных свойств бетона, так и при производственной апробации использовали вариант обогащения песка крупными фракциями (2,0...5,0 мм).

Составы бетона со сниженным на 50...75 кг (на 10...16 %) расходом цемента, приготовленного на обогащенном песке, обеспечили предъявляемые к нему требования по водонепроницаемости ( $> W_8$ ), определенной по воздухопроницаемости с использованием прибора «АГАМА-2РМ», морозостойкости  $> F_{200}$  (определена ускоренным (третьим) методом по ГОСТ 10060.2-95 при насыщении, замораживании (при минус  $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ ) и оттаиванием в 5 %-ном растворе NaCl при температуре  $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$ ).

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ АПРОБАЦИИ**

По существующим производственным технологиям изготавливали серийные для ОАО «Спецжелезобетон» изделия: преднапряженные железобетонные железнодорожные шпалы широкой колеи (бетон тяжелый класса С32/40), изготавливаемые в 10 местных формах, и трубы железобетонные ( $\varnothing 800$  мм, длиной 2,5 м; бетон тяжелый класса С25/30), изготавливаемые вертикально методом вибропрессования с немедленной распалубкой.

На местах формирования этих изделий работниками предприятия (совместно с автором) отбирались пробы бетонных смесей, оценивалась их формуемость и изготавливались образцы-кубы с ребром 100 мм. Бетон образцов уплотняли вибрированием: при изготовлении шпал – на виброплощадке одновременно формуемыми с изделиями, для труб – на стандартной лабораторной виброплощадке.

Образцы бетона для изготовления железобетонных шпал пропаривали в камере тепловой обработки вместе с изделиями

(для контроля передаточной прочности сразу после пропаривания) по режиму: предварительная выдержка ~ 1,5 часа; подъем температуры ( до 70...75 °С) ~ 1,5 часа; изотермическая выдержка ~ 8,5...9,0 часа и последующее остывание в формах в камере до распалубки; общая продолжительность подвода тепла ~ 10,0 часа.

Образцы бетона вибропрессованных труб твердели под гидроизолирующим пологом, укрывающим отформованные трубы, по режиму: предварительная выдержка ~ 1,5 часа, затем низкотемпературный (25...35 °С) обогрев подачей пара под полог в течение 8 часов.

В обоих случаях для контроля прочности в проектном 28-суточном возрасте образцы твердели в стандартных нормально-влажностных условиях.

Особенности составов бетона и формирования изделий

*Шпалы.* В производственном режиме технологической линии по изготовлению этих изделий, наряду с серийно формуемыми шпалами (производственный состав № 1 табл. 2), были заформованы три формы (на 10 изделий в каждой) с использованием состава № 8 таблицы 2.

Замена 50 % песка на гранитный отсев проявилась в более плотной структуре, формирующейся при уплотнении бетона. В этой связи при ручной доработке бетона в процессе формирования трудоемкость несколько выросла по сравнению с формированием на одном природном (речном) песке (состав № 1 табл. 2).

Внешний вид изделий (состояние поверхности) характеризовался практически полным отсутствием раковин (категория А2), которые имели место в изделиях из бетона на небогатенном песке.

*Трубы.* Формование труб также осуществляли в обычном производственном режиме, наряду с серийно изготавливаемыми изделиями. Отличие использованных составов от приведенных для труб в таблице 2 заключалось в том, что на этот момент (май 2017 г.) действовали «летние» нормы расхода цемента. В этой связи производственный состав включал: цемента – 425 кг, песка – 834 кг, щебня – 1 020 кг, воды – 150 л; состав на обогащенном песке включал: цемента – 380 кг (снижение на 10,5 %), песка ( $M_k \sim 1,0$ ) – 417 кг, гранитного отсева (фр. 2,0...5,0 мм) – 417 кг, щебня

– 1 020 кг, воды – 140 л (при равной жесткости смеси ~ 8...10 с). Оценка процесса формования, немедленной распалубки изделий и их внешнего вида не выявила отличий при замене 50 % песка на гранитный отсев.

В таблице 4 приведены результаты испытаний контрольных образцов бетона на сжатие (масштабный фактор ( $\alpha = 0,95$ ) учтен).

Таблица 4

**Прочность бетона при производственных испытаниях**

Характеристика состава бетона	$\rho_{\text{б0}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность бетона:				
		после ТВО		после твердения, сут.		
		МПа	%	1 (МПа/%)	3 (МПа/%)	28 (МПа/%)
А. Шпалы						
1. Контрольный (производственный; цемента – 475 кг)	2 530	42,5	100,0	–	–	52,1/100,0
2. С отсевом (цемента – 400 кг)	2 580	50,9	119,8	–	–	73,4/140,9
Б. Трубы						
1. Контрольный (производственный; цемента – 425 кг)	2 495	–	–	22,8/100	32,5/100	42,5/100
2. С отсевом (цемента – 380 кг)	2 550	–	–	32,2/141,2	44,2/136,0	56,1/132,0

Очевидно, что результаты оценки прочности на сжатие контрольных образцов бетона, изготовленных в производственных условиях из проб, отобранных при формовании изделий, подтверждают выявленную в лабораторных исследованиях тенденцию ее роста при обогащении природного (речного) песка крупными фракциями гранитного отсева, несмотря на одновременное снижение на 50...75 кг (10...16 %) расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона. То есть дальнейшее снижение расхода цемента, обеспечиваемое «запасом» прочности бетона, возможно, но если оно допускается по условиям качественного формования изделий и при обеспечении иных требований, предъявляемых к бетону.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты исследований свидетельствуют о том, что использование крупных фракций переработанного гранитного отсева для обогащения природных мелкозернистых песков позволяет решить проблему повышения физико-механических свойств бетона при снижении расхода цемента на 10...20 % для целого ряда регионов Беларуси, не располагающих местными запасами качественного мелкого заполнителя для бетона. При этом одновременно не только не снижаются, но становятся более высокими качественные характеристики бетона (средняя плотность и непроницаемость как характеристика структуры материала) и, как следствие, улучшаются эксплуатационные свойства бетона.

Установлено, что эффективность приема обогащения мелкого заполнителя для тяжелого бетона обеспечивает в большей мере предварительное отделение из отсева фракций менее 0,5 мм [8, 9]; приведенными в настоящей статье данными подтверждена эффективность введения в мелкий заполнитель и бетон крупных фракций отсева (2,0...5,0 мм), производимой ООО «НПК Гранит» (г. Микашевичи) фракционного песка из отсевов дробления ГОСТ 31424-2010 [10].

Многократное подтверждение эффективности нормализации гранулометрии природных песков за счет их обогащения крупными фракциями гранитного отсева РУПП «Гранит», осуществленные как в лабораторно-испытательных условиях, так и при производстве железобетонных изделий, изготавливаемых различными предприятиями Беларуси (в Минске, Барановичах, Могилеве, Орше и др.), по разным технологиям (что подтверждено соответствующими актами производственных апробаций), ставит на повестку дня вопрос о необходимости мер по крупнотоннажной переработке гранитных отсевов для эффективного использования их в строительной отрасли Беларуси.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Ахвердов, И. Н. Высокопрочный бетон / И. Н. Ахвердов – М.: Стройиздат, 1961. – 106 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.
4. Лейбензон, Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М. – Л.: Гостехиздат, 1947. – С. 11–73.
5. Щелкачев, В. Н. Подземная гидравлика / В. Н. Щелкачев, Б. Б. Лапук. – М. – Л.: Гостехиздат, 1949. – С. 50–89.
6. Песок для строительных работ. Методы испытаний : ГОСТ 8735-88. – Введ. 01.07.1989. – М : Государственный строительный комитет СССР, 1989. – 23 с.
7. Песок для строительных работ. Технические условия : ГОСТ 8736-2014. – Введ. 01.04.2017. – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2017. – 10 с.
8. Батяновский, Э. И. Эффективность «глубокой» переработки гранитного отсева РУПП «Гранит» / Э. И. Батяновский, А. А. Дрозд, П. Л. Федорович, А. В. Смоляков // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2(41). – С. 38–43.
9. Федорович, П. Л. Эффективность применения «технологического» гранитного отсева РУПП «Гранит» / П. Л. Федорович, А. В. Смоляков // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Сборник трудов XVIII Международного научно-методического семинара – Новополоцк, 2012. – С. 148–153.
10. Материалы строительные нерудные из отсевов дробления плотных горных пород при производстве щебня. Технические условия : ГОСТ 31424-2010. – Введ. 01.08.2014. – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2014. – 13 с.

Статья поступила: 20.11.2018

## REFERENCES

1. Akhverdov I. N. *Osnovy fiziki betona* [Fundamentals of Physics concrete]. Moscow : «Stroyizdat», 1981. 404 p. (rus)
2. Akhverdov I. N. *Vysokoprochnyy beton* [High-strength concrete] Moscow : «Stroyizdat», 1961. 106 p. (rus)

3. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betona* [Technology of concrete] Moscow : «Izd-vo ACB», 2003. 500 p. (rus)
4. Leybenzon L. S. *Dvizheniye prirodnykh zhidkostey i gazov v poristoy srede* [Movement of natural liquids and gases in a porous medium] Moscow : «Gostekhizdat», 1947. Pp. 11–73. (rus)
5. Shchelkachev V. N., Lapuk B. B. *Podzemnaya gidravlika* [Underground hydraulics] Moscow : «Gostekhizdat», 1949. Pp. 50–89. (rus)
6. GOST 8735-88. *Pesok dlya stroitelnykh rabot. Metody ispytaniy* [Sand for construction work. Test methods]. (rus)
7. GOST 8736-2014. *Pesok dlya stroitelnykh rabot. Tekhnicheskiye usloviya* [Sand for construction work. Technical conditions]. (rus)
8. Batyanovskiy E. I., Drozd A. A., Fedorovich P. L. *Construction Science and Engineering*. 2012. No. 2(41). Pp. 38–43. (rus)
9. Fedorovich P. L., Smolyakov A. V. *Perspektivy razvitiya novykh tekhnologiy v stroitelstve i podgotovke inzhenernykh kadrov Respubliki Belarus*. 2012. Pp. 148–153. (rus)
10. GOST 31424-2010. *Materialy stroitelnyye nerudnyye iz otsevoy drobleniya plotnykh gornykh porod pri proizvodstve shchebnya. Tekhnicheskiye usloviya* [Nonmetallic building materials from screenings of the crushing of dense rocks in the production of rubble. Technical conditions]. (rus)

*Received: 20.11.2018*