

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ
ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 27-28.05.2014)

УДК 666.972.69; 691.32

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА ВО ВЗАИМОСВЯЗИ
С ГРАНУЛОМЕТРИЕЙ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

ФЕДОРОВИЧ П.Л., БАТЯНОВСКИЙ Э.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение

В данной работе представлены результаты исследований, направленных на решение проблемы рационального использования побочного продукта технологического процесса производства гранитного щебня, образующегося в виде мелких фракций (менее 5 мм) и называемого гранитным отсевом.

По оценкам фактического положения дел на РУПП «Гранит» гранитный отсев по массе составляет 30...35% от исходной горной породы, идущей на производство щебня, и до настоящего времени практически не используется, накапливаясь в отвалах промышленной площадки предприятия.

В Республике Беларусь есть проблема мелких (речных песков), которые используются как мелкий заполнитель при производстве бетонов. 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.

В этой связи было бы рациональным использовать гранитный отсев в технологии бетонов и растворов для обогащения местных природных песков. Однако его применение в исходном виде оказалось не выгодным. Причина 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 игольчато-лещадной формой зерен. В результате содержание (до 35...40% по массе) этих фракций в отсевах делают его непригодным для бетонов и растворов при “прямом” применении. Но если вывести из гранитного отсева фракции менее 0,5 мм, то оставшийся материал (а это 65...75% от общей массы) можно использовать для обогащения используемых в строительстве местных мелких песков.

«Идеальные» кривые оптимального гранулометрического состава

Оптимальный гранулометрический состав заполнителя, обеспечивающий наиболее плотную упаковку в смеси заполнителя получают путем смешивания различных отдельно взятых фракций заполнителя, количество которых можно определить экспериментально. Однако более эффективно воспользоваться методами оптимизации, основывающихся на представлениях об «идеальном» гранулометрическом составе заполнителей непрерывного зернового состава. Под «идеальным» понимают такой заполнитель, который характеризуется наименьшей межзерновой пустотностью при минимальной поверхности частиц заполнителя.

Для выбора оптимального гранулометрического состава заполнителя предлагаются различные “идеальные” кривые просеивания.

При подборе соотношения зерен различных размеров в соответствии с “идеальной” кривой смеси имеют максимальную подвижность при минимальном расходе цемента и менее склонны к расслоению. Примером подобных “идеальных” кривых могут служить кривые просеивания, предложенные Фуллером [1]

“Идеальная” гранулометрическая кривая по Фуллеру описывается уравнением:

$$A = 100 - \sqrt{\frac{di}{D}}, \% \quad (1)$$

A - проход через сито с размером ячейки d , мм, выраженный в масс. %;

di - размер ячейки сита, мм;

D - наибольший размер зерна в смеси, мм.

В линейных координатах "идеальная" гранулометрическая кривая по Фуллеру имеет вид параболы (рисунок 1)

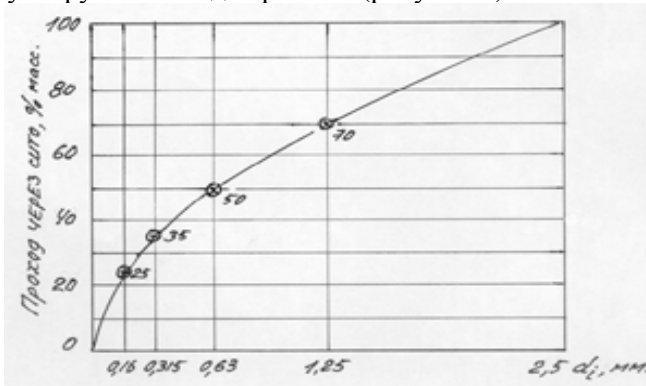


Рис. 1. "Идеальная" кривая гранулометрического состава заполнителя с предельным размером зерна 2,5 мм (по Фуллеру)

Г. Ротфуксом [1] был предложен графический способ построения "идеальных" кривых гранулометрического состава, при котором эти кривые приобретают вид прямых линий (рис. 2). График на рис. 2 по оси ординат показывает выраженные в массовых процентах значения проходов материала через сита с ячейкой di , мм (рассчитанные по уравнению Фуллера), а по оси абсцисс откладываются в линейном масштабе значения Vdi , мм. "Идеальная" кривая может быть построена с учетом содержания в смеси зёрен минимального размера. Так, если, например, минимальный размер зерна в смеси составляет 0,1 мм, то уравнение, описывающее "идеальную" кривую имеет вид:

$$A = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{di}{D}} - \sqrt{\frac{0,1}{D}}}{1 - \sqrt{\frac{0,1}{D}}}, \% \quad (2)$$

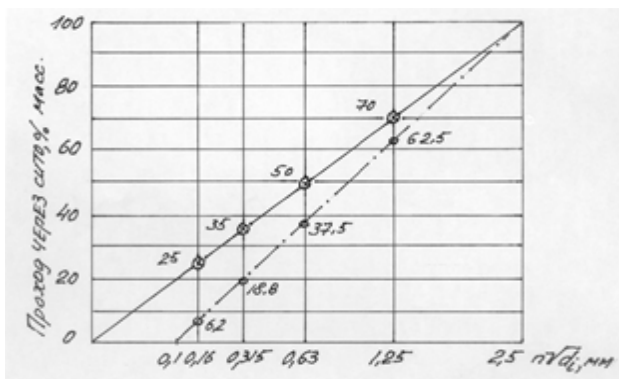


Рис. 2. "Идеальная" кривая гранулометрического состава заполнителя с предельным размером зерна 2,5 мм (по Ротфуксу). Штрих-пунктирная кривая соответствует смеси с минимальным размером частиц 0,1 мм.

Физические свойства смеси заполнителей для бетона

Под строением или сложением таких систем, как песок, щебень (гравий), подразумевается совокупность ряда внешних признаков: размера и формы зерен, шероховатости поверхности и взаиморасположения их в пространстве. От строения сыпучей среды зависят, например, такие ее свойства, как водопотребность, способность деформироваться. Сумма факторов, характеризующих строение песка, щебня, может быть выражена одним параметром – пустотностью. В естественном песке, щебне, где зерна имеют разнообразную форму и размеры, величина пустотности отличается от приведенных теоретических пределов.

Независимо от размеров и формы зерен песка, щебня по аналогии с моделью фиктивного грунта различают рыхлую и плотную упаковку зерен [2]. Рыхлая упаковка характеризуется неустойчивым пространственным взаиморасположением зерен из-за отсутствия контактов соприкосновения всех зерен и большими промежутками между ними (рис. 3, а). Плотная упаковка характеризуется устойчивым пространственным взаиморасположением зерен и незначительной пустотностью (рис. 3, б).

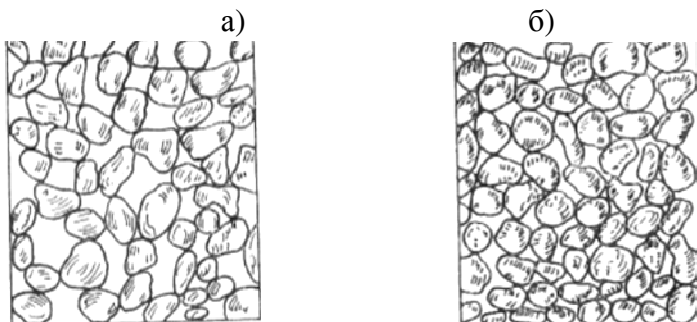


Рис. 3. Упаковка зерен песка, щебня или гравия: а – рыхлая, б – плотная

Частицы крупностью менее 0,1 мм имеют в основном угловатую форму, а следовательно – и большую пористость. Однако увеличение пустотности песка при наличии фракций менее 0,1 мм обуславливается также их способностью адсорбироваться на более крупных зернах и образовывать вокруг них пленки из сцепленных между собой микрочастиц. Такие пленки раздвигают зерна и способствуют увеличению пустотности песка. Изучение влияния виброуплотнения на пустотность песка свидетельствует о том, что нижний предел песчаной фракции следует ограничить величиной 0,1 мм [2].

При содержании фракции 0,1 мм большинство кривых гранулометрического состава различных песков резко меняет характер очертания, переходя из крутонаклонных в пологие.

Для смеси песка и крупного заполнителя (рис. 4), на основании рассмотренных закономерностей изменения плотности упаковки и пустотности песка и щебня (гравия), можно сделать следующие выводы.

Если в смеси песка и щебня (гравия) между двумя смежными фракциями зерен соблюдается определенное отношение (допустим, стандартизированное, $a = 2$), то в таком случае упаковка зерен данной формы будет тем плотнее, а пустотность тем меньше, чем больше различных фракций зерен содержится в смеси [2].

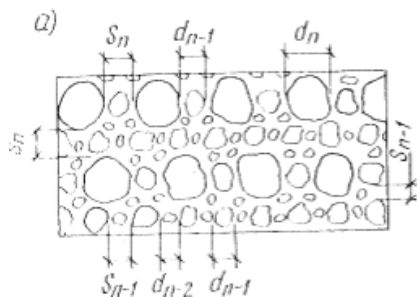


Рис. 4. Схема компоновки зерен заполнителя при оптимальной плотности упаковки

Подтверждением выдвинутого положения могут быть теоретические представления о плотности упаковки зерен упорядоченного гранулометрического состава, в основу которых положена схема, приведенная на рисунке 4 [2]. В этой связи следует ожидать, что используя крупные фракции гранитного отсева (от 0,5...0,6 мм) возможно создать оптимальную гранулометрию мелкого заполнителя для бетона на основе местных мелкозернистых и тонких песков, дополняя их недостающими (или вовсе отсутствующими) в их составе крупными фракциями.

Основные положения методики исследований и их результаты

Общая методика исследований. В процессе выполнения исследований выявили свойства исходного отсева (технологического отсева РУПП «Гранит»), включая стандартизированные физико-механические характеристики и нестандартизированные, а также связанные с морфологическими свойствами горной породы. К нестандартизированным испытаниям следует отнести исследования по оценке содержания отмучиваемых (мокрый рассев) фракций (пылевидных), содержащихся не в отсеке в целом, а с выделением их «пофракционно», т.е. содержание пылевидных частиц в крупных фракциях отсека. Это было необходимо определить для последующего учета при использовании этих фракций в обогащении мелких песков.

Методики выполнения экспериментов по каждому из стандартизированных свойств соответствовали действующим стандартам, на которые приведены ссылки в соответствующих разделах. Там же

указаны особенности конкретных методик отдельных экспериментов и нестандартизированные методики ряда из них.

Общая методика исследований включала ряд экспериментальных испытаний, выполненных в следующей последовательности. Вначале (на основе определенного предварительно зернового состава мелкого природного песка и его модуля крупности) теоретически (расчетом) определили необходимое количественное содержание отдельных фракций гранитного отсева, обеспечивающих увеличение модуля крупности с исходной величины, равной: $M_k \sim 0,9 \dots 2,5$, до расчетного значения: $M_k \sim 2,0 \dots 3,5$.

Затем подбирали 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 осадку конуса и ее сохраняемость во времени.

Одновременно из этих замесов изготавливали образцы бетона, прочность которых определяли после твердения образцов в стандартизированных [3, 4] нормально-влажностных условиях (относительная влажность: $\varphi \geq 90 \%$; температура среды: $t \sim 20 \pm 3^\circ\text{C}$).

Методика исследований физико-технических свойств бетона включала подготовку обогащенного песка по ранее приведенной методике с целью получения материала с модулями крупности $M_k \sim 2,0; 2,5; 3,0$ и $3,5$, приготовление и оценку свойств бетонной смеси; изготовление серий образцов из бетона «стандартизированного» состава. Под каждый вид испытаний изготавливали образцы всех 5 вариантов состава бетона, отличающихся модулем крупности песка в указанном диапазоне, т.е., от $M_k \geq 1,0$ до $M_k = 3, 5$. Во всех случаях принята консистенция бетонной смеси, соответствующая марке «П1» (т.е. ОК ~ 4 см), как характерная для стандартизированного состава бетона (см. далее).

Влияние гранулометрии мелкого заполнителя на физико-механические свойства бетона

Результаты экспериментальных исследований, представленные далее, получены в варианте сравнения уровня показателей прочности на сжатие, водопоглощения, морозо- и солестойкости образцов тяжелого бетона (куб с ребром 100 мм), приготовленных на природном песке с $M_k = 1,0$ и обогащенном до $M_k = 2,0; 2,5; 3,0$ и $3,5$

переработанным гранитным отсевом, т.е. его крупными фракциями ($\geq 0,63$ мм) с установленным в исследованиях долевым соотношением по табл. 2, при соблюдении правила “прочих равных условий”. Для испытаний использовали “стандартизированный” состав бетона по оценке эффективности химических добавок по ГОСТ 30459-96[5]. Также рассматривалась возможность экономии цемента.

Результаты исследований частично отражены данными таблиц 1,2,3,4,5 и 6, в которых приведена оценка изменений прочности (на сжатие), водопоглощения, морозо-, водо- и солестойкости бетона образцов, изготовленных с использованием исходного ($M_k \sim 1,0$) и обогащенного крупными фракциями гранитного отсева этого же песка до $M_k \sim 2,0 \dots 3,5$

Таблица 1 - Прочность бетона при твердении в нормально-влажностных условиях

№ состава	Характеристики песка:			Прочность бетона, МПа, в возрасте, сут.:				
	M _к д.ед.	Содержание, кг		1	3	7	14	28
		песка	отсева					
1	1,0	700	-	6,3	17,2	23,7	27,6	34,5
2	2,0	492	208	9,8	24,7	34,7	39,6	46,6
3	2,5	389	311	10,2	25,5	35,6	41,0	48,2
4	3,0	288	412	10,9	26,2	36,6	43,3	49,5
5	3,5	185	515	9,9	25,9	36,0	41,2	48,5

Таблица 2 - Водопоглощение бетона по массе (W_m , %) и по объему (W_0 , %)

№ состава	Характеристики песка:			W_m , %	W_0 , %	Изменение W_m , в %-х от W_m , бетона состава № 1
	M _к д.ед.	Содержание, кг				
		песка	отсева			
1	1,0	700	-	4,55	~ 10,6`	100
2	2,0	492	208	3,4	~ 8,0	74,7
3	2,5	389	311	3,25	7,6	78,0
4	3,0	288	412	2,6	6,2	57,1
5	3,5	185	515	2,45	5,9	53,8

Таблица 3 - Прочность бетона в процессе испытаний

№ со- става	Характеристики песка:			Прочность бетона, МПа, через количество циклов:							Процент сни- жения f_c , %
	M _к , д.ед.	Содержание, кг		0	2 (75)	3 (100)	4 (150)	5 (200)	8 (300)	12 (400)	
		песка	отсева								
1	1,0	700	-	24,5	24,0	23,4	-	-	-	-	4,5
2	2,0	492	208	29,7	30,2	30,9	30,0	28,9	-	-	3
3	2,5	389	311	31,2	32,2	32,4	33,5	31,8	30,0	-	4
4	3,0	288	412	32,8	33,3	34,1	33,9	33,2	31,6	30,2	9
5	3,5	185	515	32,9	33,6	34,3	34,8	34,9	33,7	30,5	7

Таблица 4 - Прочность бетона при циклическом насыщении (в воде)-высушивании

№ со- става	Характеристики песка:			Прочность бетона, МПа, после количества циклов:				
	M _к , д.ед.	Содержание, кг		0	10	30	50	70
		песка	отсе- ва					
1	1,0	700	-	23,5	34,2	40,6	41,5	38,9
2	2,0	492	208	26,0	38,8	44,8	47,8	49,1
3	2,5	389	311	28,5	38,6	44,5	48,5	51,0
4	3,0	288	412	27,6	39,6	44,9	49,9	52,6
5	3,5	185	515	28,1	39,7	43,4	47,6	49,5

Таблица 5 - Прочность бетона при циклическом насыщении (5-% раствор NaCl)-высушивании

№ со- става	Характеристики песка:			Прочность бетона, МПа, после количество циклов:				
	M _к , д.ед.	Содержание, кг		0	10	30	50	70
		песка	отсева					
1	1,0	700	-	24,4	33,3	39,5	29,6*	-
2	2,0	492	208	27,5	37,5	44,4	42,0	36,1*
3	2,5	389	311	26,5	38,5	43,3	44,8	43,9
4	3,0	288	412	26,3	37,1	45,7	46,6	45,4
5	3,5	185	515	27,5	39,5	45,4	45,9	44,7

*Эксперимент завершен

Экономия цемента

В настоящем материале (таблица 6) оценка возможной экономии цемента дана в форме сравнения прочности образцов бетона «стандартизированного» состава на исходном песке (при Ц = 350 кг на

1 м³ бетона) и приготовленного с уменьшением расхода цемента (при соблюдении прочих равных условий) при использовании обогащенного песка. На основании данных таблицы 6 можно сделать вывод, что прирост прочности «пропаренного» бетона на обогащенном песке относительно прочности образцов на тонком песке составил $\geq 30\%$, а в проектном возрасте $\geq 20\%$.

Таблица 6 - Прочность бетона при снижении расхода цемента

№ п/п	M _к песка, д. ед.	Расход цемента на 1 м ³ бетона, кг	Снижение расхода цемента:		Прочность (f _c) пропаренных образцов				Прочность бетона в проектном возрасте (28 сут.):	
			кг	%	МПа	в %	Δ %	МПа	в %	Δ %
1	0,91	350	-	-	22,7	100	-	44,1	100	-
2	2,5	350	-	-	33,7	148	+48	59,8	122	+22
3	2,5	315	35	10	29,0	127	+27	45,5	103	+3
4	2,5	280	70	20	30,4	134	+34	45,1	102	+2
5	2,5	245	105	30	23,4	103	+3	41,2	93	-7
6	2,5	245*	105	30	30,1	133	+33	51,5	117	+17

* Бетон из равноподвижной смеси (П1) с пластифицирующей добавкой

Это означает, что при сохранении равной прочности на обогащенном крупными фракциями гранитного отсева песке экономия цемента может составить не менее (10...15) % от его расхода на «тонком» песке. Кроме этого, приведенные данные свидетельствуют о возможности повышения качества бетона при одновременной экономии цемента путем обогащения мелкозернистых песков крупными фракциями гранитного отсева, при сопутствующем экономическом эффекте.

Заключение

Результаты исследований свидетельствуют о том, что использование крупных фракций гранитного отсева для обогащения природных мелкозернистых песков позволяет решить проблему повышения качества (физико-механических свойств) бетона и снижения расхода цемента для целого ряда районов Беларуси, не располагающих запасами местного качественного мелкого заполнителя для бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rothfuchs Geory "Betonfibel. VEB Verlag Technik Berlin, 1956. - 136с.
2. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
3. ГОСТ 10180-90 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
4. ГОСТ 18105-86 Бетоны. Правила контроля прочности.
5. ГОСТ 30459-96 Добавки для бетонов. Методы определения эффективности.