

УДК 666.972.69

**Эдуард Иванович БАТЯНОВСКИЙ,**  
доктор технических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой  
"Технология бетона  
и строительные материалы"  
Белорусского национального  
технического университета

**Алексей Владимирович  
СМОЛЯКОВ,**  
инженер НИИЛ бетона  
и строительных материалов  
Белорусского национального  
технического университета

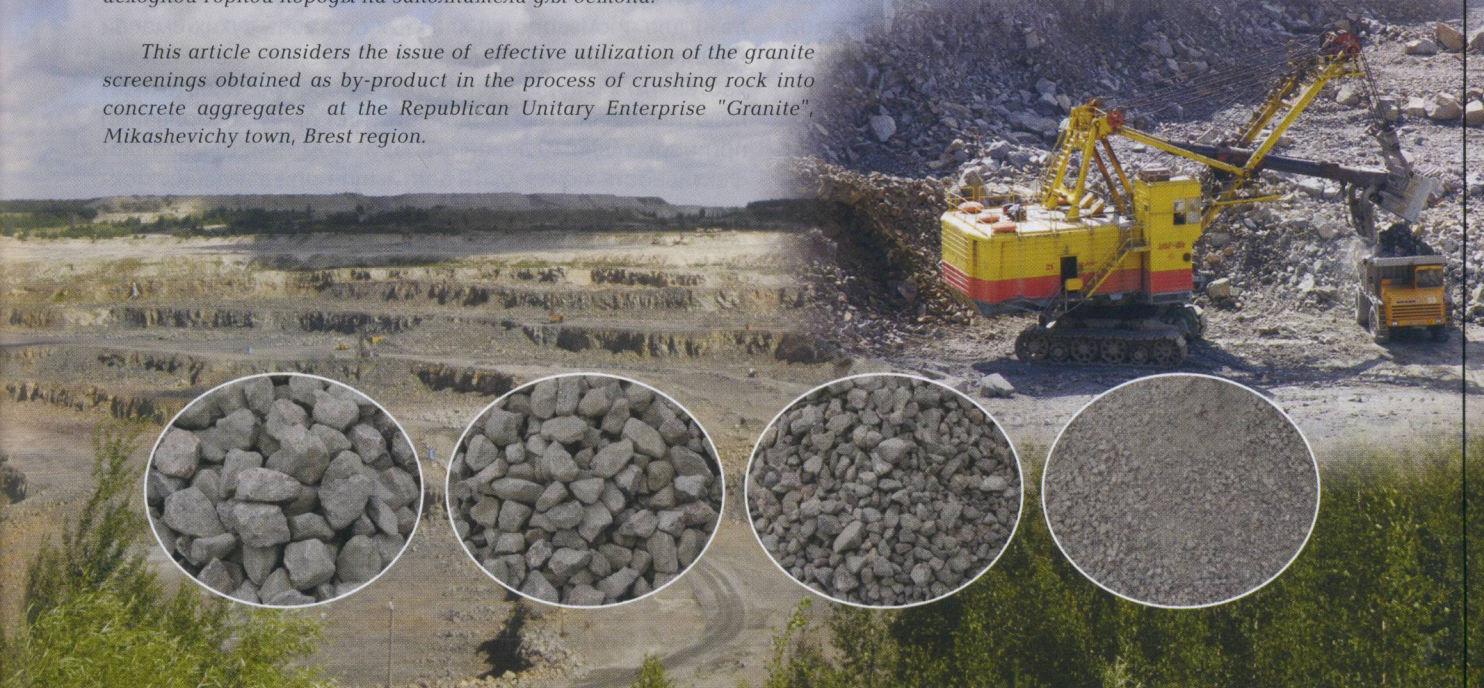
**Павел Владимирович РЯБЧИКОВ,**  
инженер НИИЛ бетона  
и строительных материалов  
Белорусского национального  
технического университета

## ГРАНИТНЫЙ ОТСЕВ РУПП "ГРАНИТ" — НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА

## GRANITE SCREENINGS AT THE REPUBLICAN UNITARY ENTERPRISE "GRANITE" — TRENDS OF USAGE AND PROPERTIES OF MATERIALS

*В статье рассматривается проблема эффективного использования гранитного отсева РУПП "Гранит" г. Микашевичи Брестской области, образующегося в виде побочного продукта камнедробления исходной горной породы на заполнители для бетона.*

*This article considers the issue of effective utilization of the granite screenings obtained as by-product in the process of crushing rock into concrete aggregates at the Republican Unitary Enterprise "Granite", Mikashevichy town, Brest region.*



### ВВЕДЕНИЕ

Многотоннажные накопления гранитного отсева — побочного продукта дробления гранитной породы на заполнители для бетона на РУПП "Гранит" — не нашли широкомасштабного рационального производственного использования ни в одной из отраслей народного хозяйства Беларуси. За последние 30 лет осуществлялись многократные попытки их применения в строительной отрасли, в частности, в качестве заполнителя для цементных и асфальтных бетонов. Экспериментальные исследования влияния гранитных отсеков на свойства традиционного бетона, а также бетона сухого формования [1] выявили снижение удобоукладываемости бетонных (растворных) смесей, снижение средней плотности

и прочности бетона, рост его проницаемости и водопоглощения при соответствующем ухудшении эксплуатационных свойств, что связано со следующими факторами. Во-первых, отсев содержит повышенное количество тонкодисперсных фракций (менее 0,16 мм), характеризующихся высокой удельной поверхностью, значительным водопоглощением, способностью адсорбироваться на поверхности более крупных зерен заполнителя, ухудшая сцепление их с цементным камнем. Во-вторых, в форме зерен отсева явно выражена лещадность, что предполагает рост коэффициента трения такой системы, ограничение во взаимном перемещении их при укладке и уплотнении бетона и неизбежно ухудшает условия его формования даже с повышенным расходом цемента (с увеличенным объемом цементного теста).



В-третьих, зерна мелких фракций отсева характеризуются структурой с массовым наличием микротрещин, которые резко снижают прочность и стойкость при циклических воздействиях (например, замораживании-оттаивании, насыщении-высушивании) как самого материала, так и приготовленного на его основе бетона. Под влиянием знакопеременных деформаций трещины начинают развиваться, снижая сопротивляемость бетона при циклических воздействиях, а под нагрузкой — его прочность на сжатие, осевое растяжение и растяжение при изгибе. Все это в целом показало нецелесообразность применения гранитного отсева в качестве заполнителя для бетона и растворов.

Вместе с тем существует область рационального применения этих отходов, где они могут служить базой для получения минерального наполнителя или минеральной добавки в бетоны и растворы различных видов. Как известно, в современных условиях строительства широко и эффективно используют [2–12] минеральные добавки в различных вариантах: активные (гидравлические) добавки, способные к самостоятельному твердению (на базе основных доменных шлаков, высококальциевых зол-уноса и др.); активные минеральные добавки, способные реагировать со щелочью, выделяемой при гидратации цемента, за счет наличия аморфного кремнезема (кислые доменные шлаки, золы, глиежи, опоки и др.); инертные минеральные добавки или наполнители, не вступающие в химические реакции при нормальной температуре твердения (молотые песок, известняк, доломит и др.). Особый случай представляет собой введение в бетон микродисперсной добавки кремнезема, являющейся (вследствие соизмеримости размеров его частиц с образующимися гидрокристаллами клинкерных минералов цемента) готовым "центром" кристаллизации или "подложкой", вокруг которой с меньшими затратами энергии, а потому ускоренно, образуются и формируются гидрокристаллы в твердеющем цементном камне [11–13]. Добавка микрокремнезема в количестве 5%–10% от массы цемента в сочетании с пластифицирующими добавками I-й группы (суперпластификаторами и гиперпластификаторами на основе поликарбоксилатов) позволяет получать быстротвердеющие и высокопрочные бетоны по литейной технологии, получившие названия: "особо прочные", "особо качественные", "самоуплотняющиеся".

Необходимо констатировать, что аморфный микрокремнезем не выпускается промышленностью Беларуси, а с учетом высокой стоимости применение его в мировой строительной практике (в Японии, США, России и других странах) ограничивается относительно небольшими объемами бетонирования уникальных сооружений. В общестроительном назначении широкое применение добавок в бетон такого уровня качества и стоимости в современных условиях экономически нецелесообразно. Вместе с тем рационален сам принцип или механизм действия добавок-затравок для использования их в качестве катализаторов процесса твердения и повышения темпа роста прочности цементного бетона или структурирования и повышения долговечности асфальтобетона. В технологии цементного бетона в качестве таких добавок используют тонкодисперсные

золы-уноса, содержащие аморфный кремнезем в меньшем количестве и более грубой, то есть крупнодисперсной форме, в сравнении с микрокремнеземом. Известно [4, 7, 8, 13], что считающиеся инертными тонкоизмельченные наполнители (их микрофракции), содержащие в своем составе кристаллический кремнезем, при определенных условиях [14] проявляют активность в щелочной среде твердеющего при нормальной температуре цементного камня и способствуют росту его плотности и прочности. В этой связи использование тонкоизмельченного гранитного отсева может оказаться более эффективным, чем применение его в качестве инертного наполнителя, то есть вещества, просто замещающего часть портландцемента в бетонах и растворах относительно низкой прочности. Основанием к такому утверждению является то, что гранит относится к типу кислых глубинных горных пород магматического происхождения, содержащих значительное количество  $\text{SiO}_2$  (более 65%), а значит, потенциально существует возможность проявления им эффектов, характерных для тонкодисперсных оксидов кремния.

Кроме этого, молотый гранитный отсев может быть качественным минеральным наполнителем (заполнителем) для производства клеевых составов сухих смесей различного назначения и, одновременно, является качественным заполнителем для пенобетона неавтоклавного твердения (естественного или при пропаривании при нормальном давлении). При этом наибольшая эффективность может быть достигнута при введении мокрого помола отсева в технологический процесс производства пенобетона.

Значительную ценность представляют фракции отсева крупностью более 1,25 мм (составляют, как будет показано далее, примерно до 50% общей массы), которые пригодны для обогащения природных (мелкозернистых) песков для бетона и строительных растворов с целью снижения расхода цемента и повышения их качества.

Материал данной статьи отражает результаты исследований свойств гранитного отсева, закономерности его измельчения и характеристики продукта помола с целью разработки рациональных направлений его использования.

## СВОЙСТВА ОТСЕВА И ИСХОДНОЙ ПОРОДЫ

### Физико-технические свойства

Методы экспериментальных определений физико-технических характеристик гранитного отсева соответствовали положениям и требованиям действующего ГОСТ 8736 [15].

Результаты испытаний сведены в таблицы 1 и 2. Сопоставление (см. таблицу 1) величин "Плотность зерен" ( $\rho_z \sim 2600 \text{ кг/м}^3$ ) и "Плотность измельченной породы" ( $\rho \sim 2740 \text{ кг/м}^3$ ) подтверждает наличие в зернах исходного отсева массы микротрещин, поризующих (что отражается существенной разницей значений  $\rho_z$  и  $\rho$ ) и ослабляющих этот материал. При диспергировании (помоле) дефекты структуры (микротрещины) ликвидируются и значение плотности восстанавливается в истинной величине, характерной для гранитной породы ( $\rho \sim 2700\text{--}2800 \text{ кг/м}^3$ ).





Таблица 1. Физико-технические характеристики отсева

Насыпная плотность $\rho^0$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность в виброуплотненном состоянии $\rho^a$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность зерен $\rho_z$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность измельченной породы $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1550	1680	2600	2740

Таблица 2. Зерновой состав фракций отсева

Сумма всех остатков	Частные остатки на ситах, %						
	Менее 0,16	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	5
100	4,44	19,46	15,37	6,75	18,55	28,75	6,68

Анализ данных таблицы 2 показывает, что зерновой состав отсева характеризуется неравномерным содержанием фракций стандартного набора сит. Очевидно повышенное содержание пылевидных фракций (менее 0,16 мм), суммарного содержания мелких фракций (0,315 и менее), а также фракций размером более 2,5 мм. Это (наряду с развитой поверхностью, ее шероховатостью и лещадностью зерен более крупных фракций) объясняет незначительный рост средней плотности отсева в виброуплотненном состоянии относительно средней плотности в рыхлонасыпном состоянии (см. таблицу 1). Для сравнения отметим, что природный (сухой) песок характеризуется значениями плотности  $\rho_n^a \sim 1750\text{--}1830$  кг/м<sup>3</sup> при исходной (в рыхлонасыпном состоянии), равной отсева, то есть  $\rho_n^0 \sim 1550$  кг/м<sup>3</sup>.

Общее влагопоглощение отсева (порами и поверхностью), характеризующее его предельную влагоемкость, то есть способность удерживать воду без отделения, составляет  $\sim 15\%$  по массе, что значительно превышает (в 1,5–2 и более раза) аналогичную характеристику природных песков. Это связано с повышенной удельной поверхностью отсева и пористостью (трещиноватостью) его зерен. Величина предельной влагоемкости была установлена путем замачивания проб отсева в воде с последующим выдерживанием их на сите с ячейкой 5 мм на слое ткани (с укрыванием влажной тканью поверхности проб) до прекращения отделения капельно-жидкой влаги.

#### Фазово-структурные свойства отсева

Как уже отмечалось, гранит в своем составе содержит значительное количество оксида кремния SiO<sub>2</sub>. Гранит относится к глубинным кислым силициновым горным породам магматического происхождения с содержанием SiO<sub>2</sub>  $\sim 65\%$ –75%. Вследствие "древнего" происхождения гранита (в частности, Микашевичского месторождения) в нем нет аморфного кремнезема, способного к прямым реакциям со щелочью гидратирующегося и твердеющего цемента в обычных условиях. Для развития реакций между ними требуется режим автоклавирования, то есть высокие температура и давление в присутствии жидкой щелочи (Ca(OH)<sub>2</sub>). Одной из задач проводимых исследований являлось определение условий, при которых возможен переход инертного измельченного до порошка гранита хотя бы в частично активную форму. Предположительно (в качестве рабочей гипотезы) этого можно добиться при наличии в измельченном материале фракций менее 1 мкм, то есть

менее 10 000 Е. Считается [1, 16–19], что усредненный "диаметр" частиц современных цементов составляет примерно 10–20 мкм. При этом содержание фракций менее 10 мкм колеблется от 10% до 30% для вяжущих, соответственно характеризующихся удельной поверхностью (по прибору типа ПСХ)  $S_{уд} \sim (2900\text{--}6000)$  см<sup>2</sup>/г (290–600 м<sup>2</sup>/кг) [17]. Таким образом, степень измельчения гранитного отсева, способного инициировать структурообразование твердеющего цемента, должна характеризоваться наличием фракций с размерами частиц на один – три порядка меньшими, чем размер частиц вяжущего.

В работах [9, 10, 14] отмечается, что эффектом катализа процесса твердения и роста прочности цементного камня характеризовались горные породы, измельченные до  $S_{уд} \sim 390$  см<sup>2</sup>/г. Это свидетельствует о наличии в порошке такой дисперсности микросоставляющей, способной ускорять процессы структурообразования цементного камня. На рис. 1 приведены рентгенограммы фазового состава цементного камня, содержащего наполнители из молотого диабазы и базальта (по данным [14]). Сопоставление данных, отраженных на графиках рис. 1, свидетельствует о наличии дополнительных реакций и появлении изменений в рентгенограммах, относящихся к образцам, содержащим минеральную добавку, в сравнении с контрольными. Так, при сопоставлении графика 1 (чистый цементный камень) с графиками 2 (с добавкой молотого диабазы) и 3 (с добавкой молотого базальта) очевидно изменение высот пиков на целом ряде участков графиков, относящихся к размерам: 1,9225; 2,6180; 2,7757; 3,017; 3,326; 4,9 Е. Такие изменения могут быть отражением результатов реакции кремнезема добавки со щелочью цемента.

Рентгенограммы позволяют фиксировать наличие продуктов реакции и по ним констатировать, что данные реакции имели место. Более полную информацию о развитии химических реакций дают комплексные испытания рентгеноструктурным и методом термического анализа проб материала с помощью прибора-дериватографа (Дериватограф Q-1500Д). Данный метод позволяет путем прокалывания пробы в диапазоне температур 0 °С–1000 °С получить информацию об изменении ее веса в процессе испытаний (график "ТГ" на дериватограмме, приведенной на рис. 2а и 2б, а также скорость развития процесса потерь веса пробой (график "ДТГ" на дериватограмме). Кроме этого, под воздействием постоянно возрастающей температуры начинает проявляться сущность химического строения испыты-



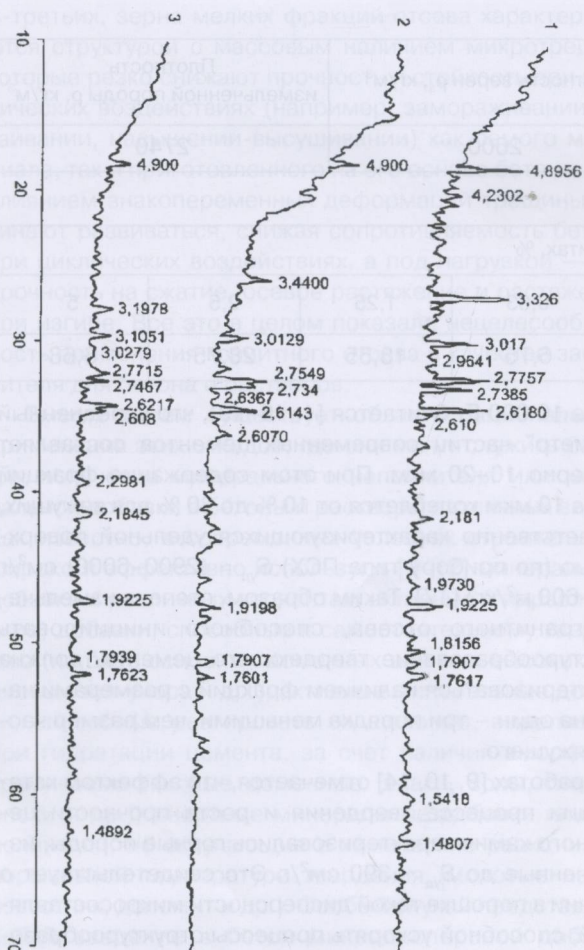


Рис. 1. Рентгенограммы фазового состава цементного камня с добавками:

- 1 — контрольный состав;
- 2 — с диабазом;
- 3 — с базальтом

емого вещества в виде химических реакций и физических превращений, происходящих под влиянием тепла в химических соединениях или, в случае многокомпонентных систем, между отдельными соединениями. Это позволяет установить наличие или отсутствие химического взаимодействия, например, вещества минеральной добавки на основе гранита с продуктами гидратации цемента и оценить возможное влияние минеральной добавки на физико-технические свойства бетона (раствора). В этой связи была произведена проверка проб гранитного отсева с целью получения дериватограмм его вещества для учета этих данных при последующих исследованиях.

На рис. 2 приведены дериватограммы по результатам детермического анализа проб порошкообразного материала исследуемого гранитного отсева после помола (см. рис. 2а) в сухом состоянии и до помола (см. рис. 2б). В последнем случае из навески сухого отсева отобрали его тонкодисперсную часть, прошедшую через сито № 0,16. Проба молотого отсева характеризовалась удельной поверхностью  $S_{уд} \sim 11\ 000\ \text{см}^2/\text{г}$ .

Очевидна идентичность обеих термограмм, отражающая тождественность материала проб по химико-минералогическому составу. Характер получаемых графиков (все они близки к прямым линиям без экстремумов

(или пиков)), свидетельствует, что материал испытанных проб не проявляет термической активности в диапазоне температур исследований, составившем  $15\ ^\circ\text{C} - 950\ ^\circ\text{C}$ . Это означает отсутствие каких-либо химико-физических превращений при формировании его соединений в названном диапазоне температур, включая процесс помола в шаровой мельнице. Одновременно следует ожидать, что присутствие минеральной добавки из молотого отсева в цементном камне не отразится в виде изменений графиков дериватограммы, если ее вещество не вступит в реакцию с продуктами гидратации цемента, и наоборот, вызовет какие-то изменения, если такие реакции будут иметь место.

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ПОМОЛА ГРАНИТНОГО ОТСЕВА

#### Кинетика процесса помола сухого гранитного отсева

Помол сухого отсева в шаровой мельнице осуществляли на предварительно высушенных навесках (5 кг) гранитного отсева до остаточной влажности не более 0,5 % (определена для высушенного отсева, хранившегося в помещении лаборатории ( $t \sim (20 \pm 5)\ ^\circ\text{C}$ ; относительная влажность  $\varphi \sim 60\ \% - 70\ \%$ ) навалом в открытой емкости).

Навеску отсева загружали в барабан шаровой лабораторной мельницы (двухотсечная, что позволяло одновременно производить помол двух проб) вместе с истирающими (стальные шары) элементами. Периодически (с интервалами, указанными в таблице 3) мельницу останавливали и отбирали пробы ( $\sim 50\ \text{г}$ ) для оценки степени измельчения исследуемого материала ( $S_{уд}$ ) в процессе помола.

Результаты экспериментов представлены в таблице 3. Из них следует, что в пределах времени помола отсева от 0,5 до 5,0 ч удельная поверхность продукта помола возрастает с  $S_{уд} \sim 3000$  до  $S_{уд} \sim 11\ 000\ \text{см}^2/\text{г}$ . При этом процесс измельчения наиболее интенсивно развивается в начале помола, а затем относительное увеличение удельной поверхности за единицу времени помола начинает снижаться. Это иллюстрируется данными таблицы 4, в которой кинетика роста  $S_{уд}$  при помоле сухого отсева показана в относительных величинах:  $\Delta S_{уд} / \tau$ , ( $\text{см}^2/\text{г}$ )/мин, то есть прирост удельной поверхности продукта помола за единицу времени. Так, если оценивать относительный прирост  $S_{уд}$  за весь период помола (см. поз. 2 таблицы 4), то он закономерно убывает от 101,3 ( $\text{см}^2/\text{г}$ )/мин (за первые 0,5 ч) до 35,67 ( $\text{см}^2/\text{г}$ )/мин за 5,0 ч работы мельницы.

В случае, когда определяется относительный прирост  $S_{уд}$  за последний отрезок времени (от предыдущего замера; см. данные строки 5 таблицы 4), прирост удельной поверхности интенсивен только в первые 60 мин помола, а после этого  $S_{уд}$  нарастает довольно равномерно до 5,0 ч работы мельницы.

Из данных таблиц 3 и 4 существенными являются несколько следствий:

— наиболее интенсивно удельная поверхность продукта помола нарастает в первые 0,5 ч работы шаровой мельницы, затем эффективность помола снижается;



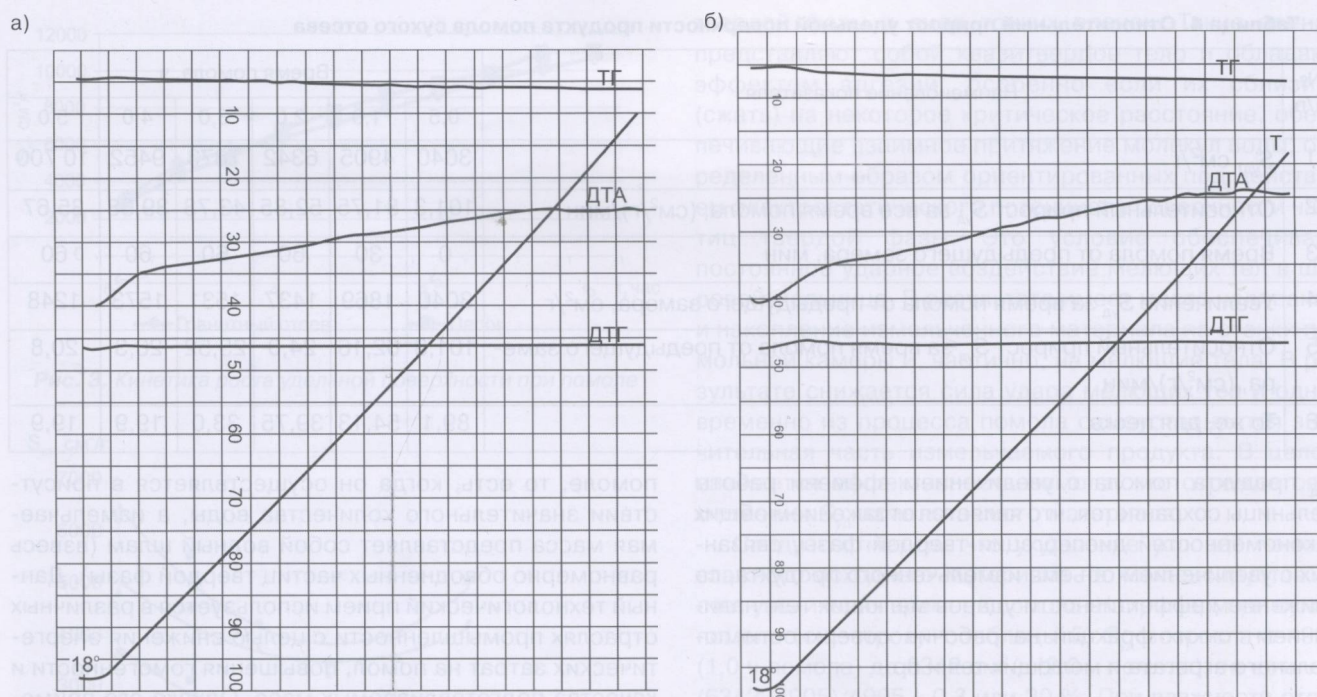


Рис. 2. Дериватограмма пробы измельченного гранитного отсева после сухого помола (а) и до помола (б)

— тонкость помола сухого отсева в шаровой мельнице за первые 0,5 ч достигает  $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ , что соответствует тонкости помола рядовых современных цементов, и принципиально достаточно для применения продукта помола в качестве минеральной добавки в строительные бетоны и растворы;

— помол гранитного отсева в шаровой мельнице более 0,5–1,0 ч сопровождается ростом удельной поверхности продукта помола, но относительный прирост  $S_{уд}$  на единицу времени после 1,0 ч помола резко снижается (примерно в 3 раза) и стабилизируется.

По мнению авторов, отмеченные различия в кинетике роста  $S_{уд}$  продукта помола с увеличением времени работы мельницы связаны с тем, что гранитный отсев, точнее составляющие его частицы, имеют многочисленные структурные дефекты в виде микротрещин. Как результат, на начальной фазе измельчения они способствуют интенсивному разрушению отдельных зерен по развивающимся трещинам и процесс измельчения идет быстро. После разрушения (измельчения) части исходного материала по имевшимся в структуре зерен дефектам он становится более однородным и сопротивляемость воздействию мелющих тел возрастает, что и отражается в снижении темпа роста  $S_{уд}$  продукта помола.

Естественно, что кроме отмеченного, на снижение прироста  $S_{уд}$  со временем помола оказывают влияние и другие закономерности, характерные (общие) для процесса диспергации твердой фазы, которые не рассматриваются авторами статьи.

Изложенное подтверждается другими данными таблиц 3 и 4, приведенными для мелкого и крупного отсева (см. таблицу 3), а также для песка (см. поз. 6 таблицы 4).

Так, сравнение данных о величине  $S_{уд}$  при помолке мелкого отсева с крупным отсевом свидетельствует о значительном росте  $S_{уд}$  для первого из них. За 0,5 ч помола  $S_{уд}$  составила соответственно: 4808 и 2224  $\text{см}^2/\text{г}$ , а за 1 ч — 6090 и 4040  $\text{см}^2/\text{г}$ . Для этого эксперимента гранитный отсев был рассеян по сити № 1,25. Фракции менее 1,25 мм составили мелкий отсев, а фракции крупнее 1,25 мм — крупный отсев. Последний измельчался в мельнице значительно хуже мелкого.

В отличие от гранитного отсева природный песок (см. поз. 6 таблицы 4) характеризуется достаточно однородной структурой мелких и крупных зерен. Это отражается в меньшей интенсивности роста  $S_{уд}$  в первые 0,5–1,0 ч помола, в сравнении с гранитным отсеком (рис. 3). При этом общая тенденция снижения прироста

Таблица 3. Кинетика роста удельной поверхности при помолке сухого отсева и кварцевого (природного) песка

Измельчаемый материал	Удельная поверхность $S_{уд}$ , $\text{см}^2/\text{г}$ , через время помола, ч									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Гранитный отсев	3040	4905	5630	6342	7100	7873	8700	9452	10 100	10 700
Песок	2673	4297	5199	6682	7709	8662	—	9856	—	11 050
Мелкий отсев	4808	6090	—	—	—	—	—	—	—	—
Крупный отсев	2224	4040	—	—	—	—	—	—	—	—



Таблица 4. Относительный прирост удельной поверхности продукта помола сухого отсева

№ п/п	Наименование показателя	Время помола, ч					
		0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
1	$S_{уд}$ , см <sup>2</sup> /г	3040	4905	6342	7873	9452	10 700
2	Относительный прирост $S_{уд}$ за все время помола, (см <sup>2</sup> /г)/мин	101,3	81,75	52,85	43,73	39,38	35,67
3	Время помола от предыдущего замера, мин	0	30	60	60	60	60
4	Увеличение $S_{уд}$ за время помола от предыдущего замера, см <sup>2</sup> /г	3040	1869	1437	1531	1573	1248
5	Относительный прирост $S_{уд}$ за время помола от предыдущего замера, (см <sup>2</sup> /г)/мин	101,3	62,16	24,0	25,52	26,3	20,8
6	То же, для песка	89,1	54,13	39,75	33,0	19,9	19,9

$S_{уд}$  продукта помола с увеличением времени работы мельницы сохраняется, что является отражением общих закономерностей диспергации твердой фазы, связанных с увеличением объема измельченного продукта, со снижением эффективности ударов мелющих тел, налипанием тонких фракций на рабочие поверхности помольного агрегата и мелющих тел и пр.

#### Влияние влажности на кинетику помола отсева

На процесс помола твердофазных материалов существенное влияние оказывает присутствие влаги. Известно, что мокрый помол может быть более эффективным, чем сухой. Причины этого явления были обоснованы академиком Ребендиром П.А., установившим эффект расклинивающего действия тонких пленок гидрофильной жидкости, усиливающих действие механических сил при диспергации твердой фазы в процессе помола. Его сущность заключается в том, что жидкость, смачивающая поверхность частиц твердой фазы, адсорбируется на ней и проникает в доступные по размерам для молекул воды трещины. Пленка жидкости на поверхности частицы состоит из многих "рядов" молекул воды. А в трещинах ситуация изменяется, в частности, к устью трещины (то есть в месте ее зарождения) жидкость располагается в виде монослоя молекул, т. е. большее их количество просто не вмещается из-за малых размеров трещины в этом месте. Поскольку на противоположных стенках устья трещины молекулы воды одинаково ориентированы силовым полем поверхности твердой фазы, то между монослоями молекул воды возникают взаимно отталкивающие силы (из-за одноименного заряда поверхностей контактирующих между собой монослоев молекул воды). Это разъединяющее усилие дополняет разрушающий эффект, присущий устью трещин, как концентрату напряжений. Кроме этого, заполнившая трещину и адсорбированная ее поверхностями жидкость, с одной стороны, снижает силы взаимного притяжения твердой фазы (стремящиеся восстановить сплошность структуры), с другой — несжимаемая жидкость в дефекте структуры твердой фазы вызывает (под действием механической ударной нагрузки от мелющих тел) дополнительное воздействие на стенки поры за счет возникающего гидравлического давления. Все это вместе взятое способствует ускоренному измельчению твердофазных материалов при мокром

помоле, то есть, когда он осуществляется в присутствии значительного количества воды, а измельчаемая масса представляет собой водный шлам (взвесь равномерно обводненных частиц твердой фазы). Данный технологический прием используется в различных отраслях промышленности с целью снижения энергетических затрат на помол, повышения гомогенности и качества подготавливаемых масс. Однако его применение целесообразно непосредственно по месту дальнейшего использования измельченного материала, то есть при включении мокрого помола в технологический процесс производства конечного продукта, например, в технологии получения цементного пенобетона. Не составляет исключения из изложенного и помол гранитного отсева.

Методика экспериментов по оценке влияния влажности гранитного отсева на процесс помола и кинетику изменений  $S_{уд}$  продукта помола была следующей. В предварительно высушенный гранитный отсев вводили (перемешивая до однородного состояния) расчетное количество воды, соответствующее его влажности в пределах 5 %–25 % (с интервалом в 5 %).

Навеску в 5 кг помещали в мельницу и измельчали в течение 0,5; 1,0 и 2,0 ч, отбирая через указанные промежутки времени пробы не менее 50 г. Эти пробы высушивали (при  $t \sim (105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ) до постоянной массы ( $\pm 0,1$ ) г, а затем определяли удельную поверхность  $S_{уд}$ , см<sup>2</sup>/г, по ранее изложенной методике.

В таблице 5 приведены экспериментальные данные об изменении  $S_{уд}$  измельчаемого в шаровой мельнице гранитного отсева под влиянием влажности, включая мокрый помол (воды — более 50 % от массы навески отсева). Из результатов исследований очевидно, что мокрый помол гранитного отсева эффективнее сухого с позиций ускорения процесса диспергации и снижения времени (энергоёмкости) помола до равной  $S_{уд}$ . Так, удельная поверхность продукта мокрого помола в первые 0,5–1,0 ч составила 5780–8115 см<sup>2</sup>/г, что почти в 2 раза больше, чем за это же время сухого помола. Через 2 ч мокрого помола дисперсность продукта оказалась значительно выше, чем после 5 ч сухого помола. Следует отметить, что мокрый помол осуществляли при введении воды не менее 50 % от массы навески отсева.

Промежуточные значения влажности исходного гранитного отсева (от 0,5 % до 25,0 % его массы) ухудшают условия помола и снижают темп роста  $S_{уд}$  продукта по-



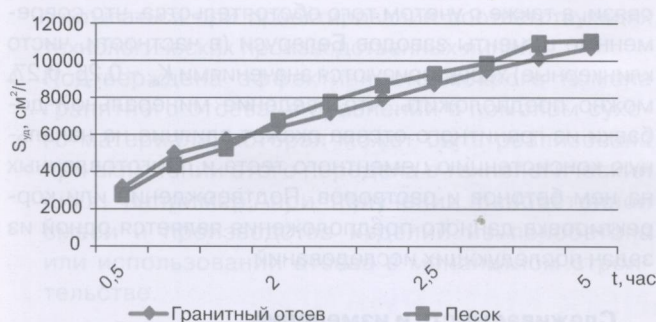


Рис. 3. Кинетика роста удельной поверхности при помоле

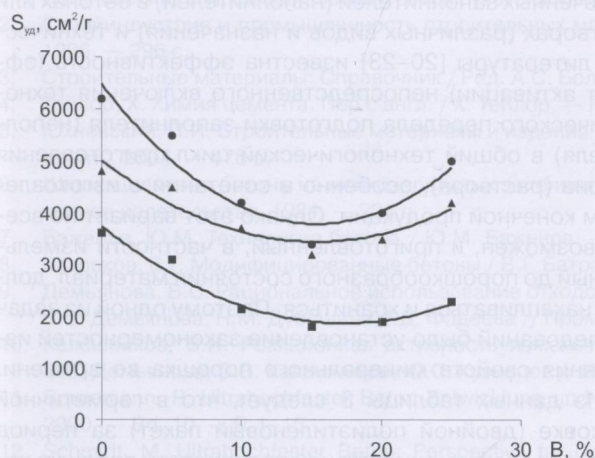


Рис. 4. Тенденция изменения  $S_{уд}$  в зависимости от влажности отсева

мола. Во всех этих случаях  $S_{уд}$  продукта помола ниже, чем при сухом исходном гранитном отсеве и в еще большей степени — в сравнении с мокрым помолом.

Отслеживается закономерность устойчивого снижения  $S_{уд}$  продукта помола до уровня влажности в 15 % с последующим ее повышением при увеличении влажности измельчаемого отсева до 20 %–25 %. Эта тенденция наглядно иллюстрируется графическими зависимостями рисунка 4, построенными по выборочным данным таблицы 5. Причина ухудшения условий помола (по существу, условий работы помольного агрегата или его мелющих тел) заключается в том, что присутствующая в измельчаемом продукте жидкость адсорбируется на свежесформированной поверхности частиц

твердой фазы в виде тонких пленок. Такие пленки представляют собой квазитвердое тело и обладают эффектом адгезии, особенно если их сблизить (сжать) на некоторое критическое расстояние, обеспечивающее взаимное притяжение молекул воды, определенным образом ориентированных под действием электростатического потенциала поверхности частиц твердой фазы. Это условие обеспечивает постоянное ударное воздействие мелющих тел в шаровой мельнице. В результате имеет место налипание и накопление измельченного материала на стенки помольной камеры и, частично, на мелющие тела. В результате снижается сила удара мелющих тел и одновременно из процесса помола самоустраняется значительная часть измельчаемого продукта. В целом снижается эффективность помола, что отражается в снижении  $S_{уд}$  измельчаемого материала.

Следует отметить, что ухудшение условий помола влажного исходного материала не компенсируется за счет увеличения времени помола. Например, при сухом помоле (см. строку 1 таблицы 5)  $S_{уд}$  возросла с 4905 (1,0 ч помола) до 6342  $см^2/г$  (2,0 ч помола), то есть на:  $(6342-4905)/4905 \approx 0,3$  или 30 %. При влажности отсева в 15 % (см. строку 4 таблицы 5) за этот же период помола  $S_{уд}$  изменилась:  $(3382-3100)/3100 \approx 0,09$ , то есть на 9 %, или прирост  $S_{уд}$  снизился в 3,3 раза.

Оценивая полученные результаты экспериментов помола влажного отсева, можно сделать вывод, что наилучшие условия для измельчения соответствовали его влажности в области 15 %, то есть значению предельной влагоемкости.

### ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛЬНОГО ПОРОШКА

**Плотность, среднюю плотность в насыпном и виброуплотненном состоянии** контролировали по стандартным (ГОСТ 310) и общепризнанным методикам. Полученные средние значения показателей приведены в таблице 6.

Очевидно, что повышение тонкости помола сверх  $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/г$  не оказывает существенного влияния на приведенные в таблице 6 физические характеристики минерального порошка. Так, по существу, при почти четырехкратном увеличении  $S_{уд}$  (с 3000

Таблица 5. Кинетика роста удельной поверхности при помоле влажного гранитного отсева

Влажность отсева, %	Удельная поверхность $S_{уд}$ , $см^2/г$ , через время помола, ч							
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Сухой помол (0,5 %)	3040	4905	5630	6342	7100	7873	9452	10 700
5	2660	4580	—	5510	—	—	—	—
10	2098	3704	—	4195	—	—	—	—
15	1890	3100	—	3382	—	3613	4006	5853
20	1912	3330	—	3970	—	—	—	—
25	2300	3615	—	4990	—	—	—	—
Мокрый помол	5780	8115	—	12 000	—	—	—	—



**Таблица 6. Физические характеристики минерального порошка**

Тонкость помола $S_{уд}$ , $см^2/г$	Средняя плотность в насыпном состоянии $\rho^0$ , $кг/м^3$	Плотность в виброуплотненном состоянии $\rho^в$ , $кг/м^3$	Плотность $\rho$ , $кг/м^3$
~3000	0,95	1,21	2,72
~6000	0,93	1,21	2,74
~9000	0,92	1,20	2,75
~11 000	0,91	1,19	2,77

**Таблица 7. Водопотребность минерального порошка**

Тонкость помола $S_{уд}$ , $см^2/г$	~3000	~6000	~9000	~11 000
Коэффициент нормальной густоты цементного теста $K_{нг}$ , доли ед.	0,18	0,20	0,25	0,28

**Таблица 8. Изменение  $S_{уд}$  порошка с течением времени**

Условия хранения минерального порошка	Величина $S_{уд}$ , $см^2/г$ , через время хранения, сут			
	0	30	60	90
Герметичная упаковка	~3000	2850	2850	2850
	~6000	5790	5700	5700
	~11 000	10 620	10 580	10 500
В емкости* (навалом под навесом)	~3000	2810	2700	2670
	~6000	5665	5547	5506
	~11 000	10 309	10 095	~10 000
Увлажнение-высушивание** (2 раза в месяц)	~3000	2500	2410	2380
	~6000	5348	5095	4066
	~11 000	10 085	9590	9500

\* В герметичной емкости в неотопляемом помещении.

\*\* Увлажнение, затем естественное высушивание до пылеобразования.

до 11 000  $см^2/г$ ), средняя плотность и плотность в виброуплотненном состоянии снизились примерно на 1,5 %–4,0 %, а плотность  $\rho$  увеличилась на 1,8 %. В отношении роста плотности порошка с повышением  $S_{уд}$  можно констатировать, что это отражение процесса ликвидации микротрещин в его зернах при их дроблении и уменьшении в размерах. Снижение средней плотности в насыпном и виброуплотненном состоянии объясняется все большей однородностью в размерах частиц порошка, сближением их размеров с некоторым средним его значением. Сужение "фракционности" порошка несколько увеличивает его пустотность, что и отражается в величинах  $\rho^0$  и  $\rho^в$ .

**Водопотребность минерального порошка**

Водопотребность минерального порошка различной дисперсности ( $S_{уд}$  ~ 3000–11 000  $см^2/г$ ) установили по стандартной методике определения нормальной густоты цементного теста (ГОСТ 310). В таблице 7 приведены значения  $K_{нг}$ , которые свидетельствуют о наличии близкой к линейной зависимости между тонкостью помола минерального порошка и его водопотребностью. В этой

связи, а также с учетом того обстоятельства, что современные цементы заводов Беларуси (в частности, чисто клинкерные) характеризуются значениями  $K_{нг}$  ~ 0,25–0,27, можно предположить, что введение минеральной добавки из гранитного отсева окажет влияние на начальную консистенцию цементного теста и приготовленных на нем бетонов и растворов. Подтверждение или корректировка данного предположения является одной из задач последующих исследований.

**Слеживаемость и изменение удельной поверхности порошка**

Из производственного опыта использования измельченных заполнителей (наполнителей) в бетонах или растворах (различных видов и назначения) и технической литературы [20–23] известна эффективность (эффект активации) непосредственного включения технологического передела подготовки заполнителя (наполнителя) в общий технологический цикл приготовления бетона (раствора), особенно в сочетании с изготовлением конечной продукции. Однако этот вариант не всегда возможен, и приготовленный, в частности измельченный до порошкообразного состояния материал, должен накапливаться и храниться. Поэтому одной из задач исследований было установление закономерностей изменения свойств минерального порошка во времени.

Из данных таблицы 8 следует, что в герметичной упаковке (двойной полиэтиленовый пакет) за период контроля изменения удельной поверхности порошка незначительны. Несколько большие потери  $S_{уд}$  наблюдаются при хранении навалом и еще заметнее — при увлажнении-высушивании проб.

По результатам хранения порошка в течение до 90 сут можно констатировать, что в пределах этого срока удельная поверхность порошка сохраняется на приемлемом для минеральной добавки уровне.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

- 1 Рациональное использование в строительной отрасли гранитного отсева с наибольшей эффективностью возможно после дополнительной переработки в виде разделения (рассева) на две фракции (мелкую, то есть менее 1,25 мм, и крупную, то есть более 1,25 мм) с последующим помолом мелкой фракции и применением крупной в бетонах и растворах с целью экономии цемента и повышения его качества.
- 2 Продукт помола гранитного отсева может быть эффективно использован в качестве минерального наполнителя в сухих строительных смесях (особенно для клеевых составов), при производстве цементно-пенобетона безавтоклавного твердения, а также в качестве минеральной добавки в цементный бетон (раствор) с целью снижения расхода цемента. После соответствующего обоснования возможно использование отсева для получения портландцементов с минеральной добавкой на его основе.
- 3 Для эффективной переработки отсева (разделения по фракциям и помола) требуется сухой исходный материал, что предполагает необходимость предварительной сушки отвального отсева. Это должно





- учитываться при проектировании соответствующих технологических производственных линий.
4. Подтверждена эффективность мокрого помола гранитного отсева, в сравнении с помолом сухого материала, которая может быть реализована при включении этого передела в технологический цикл, например, при получении пенобетонной смеси и производстве изделий из пенобетона или использовании отсева в монолитном строительстве.
  5. Выявлены закономерности диспергации гранитного отсева путем помола в шаровой мельнице, влияние на этот процесс исходной крупности материала, его влажности и времени помола, а также установлены основные физико-технические характеристики продукта помола, что ставит на повестку дня необходимость выполнения исследований влияния полученной минеральной добавки на физико-технические свойства цемента, цементного камня и приготовленного на таком вяжущем бетона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батяновский, Э.И. Особо плотный бетон сухого формования / Э.И. Батяновский. — Минск: НПО "Стринко", 2002. — 224 с.
2. Стройиндустрия и промышленность строительных материалов: Энциклопедия / Гл. ред. К.В. Михайлов. — М.: Стройиздат, 1996. — 296 с.
3. Строительные материалы: Справочник / Ред. А.С. Болдырев, П.П. Золотов. — М.: Стройиздат, 1989. — 567 с.
4. Тейлор, Х. Химия цемента. Пер с англ. / Х. Тейлор. — М.: Мир, 1996. — 560 с.
5. Юхневский, П.И. Строительные материалы и изделия: Учебное пособие / П.И. Юхневский, Г.Т. Широкий. — Минск: УП "Техно-принт", 2004. — 476 с.
6. Шлакощелочные бетоны на мелкозернистых заполнителях: монография / Под ред. В.Д. Глуховского. — Киев: Вища школа. Головное издательство, 1981. — 224 с.
7. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. — М.: Изд-во Ассоциации высших учебных заведений, 2002. — 500 с.
8. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков. — М.: Стройиздат, 1998. — 768 с.
9. Демьянова, В.С. Рациональное использование отходов камнедробильного производства в технологии смешанных вяжущих / В.С. Демьянова, Н.М. Дубошина, Г.Д. Фадеева // Промышленное и гражданское строительство. — 1999. — № 10. — С. 33–35.
10. Калашников, В.И. Реакционная активность измельченных горных пород в цементных композициях / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, С.В. Калашников, Ю.С. Кузнецов // Изв. Тульского гос. ун-та. — 2004. — № 7. — С. 26–33.
11. Bornemann, R. Ultrahochfester Beton-Entwicklung und Verhalten / R. Bornemann, E. Fenling // Leipziger Massivbauseminar. — 2000. — Bd. 10. — P. 1–15.
12. Schmidt, M. Ultrahochfester Beton: Perspective fur die Betonfertigteile Industrie / M. Schmidt [et. al.] // Betonwerk+Fertigteile Technik. — 2003. — Н. 3. — P. 16–29.
13. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон. 2-е изд. перераб. и доп. / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. — М.: Стройиздат, 1989. — 188 с.
14. Демьянова, В.С. Дисперсно-наполненные клинкерные цементы на основе отходов камнедробления / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, Г.Н. Казина // Известия вузов. Строительство. — 2006. — № 5. — С. 30–36.
15. Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736-93.
16. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. — М.: Стройиздат, 1979. — С. 198–203.
17. Блещик, Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона / Н.П. Блещик. — Минск: Наука и техника, 1977. — 230 с.
18. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. — М.: Стройиздат, 1979. — 344 с.
19. Ахвердов, И.Н. Высокопрочный бетон / И.Н. Ахвердов. — М.: Стройиздат, 1961. — 106 с.
20. Гезенцвей, Л.Б. Активация песка для асфальтового бетона / Л.Б. Гезенцвей // Автомобильные дороги. — 1961. — № 4. — С. 17–19.
21. Гезенцвей, Л.Б. Активированные минеральные материалы / Л.Б. Гезенцвей, В.Н. Сотникова, А.М. Алиев, Т.К. Юрашунас // Автомобильные дороги. — 1976. — № 8. — С. 23–25.
22. Кравченко, С.Е. Получение и применение трибоактивированных песков в дорожном асфальтобетоне: дис. .... канд. техн. наук. — Минск, 1987. — 143 с.
23. Ковалев, Я.Н. Активированные технологии дорожных композиционных материалов: монография / Я.Н. Ковалев. — Минск: Беларуская Энцыклапедыя, 2002. — 334 с.

Статья поступила в редакцию 06.08.2008.

**От редакции**

Авторы статьи в результате проведенного ими начального этапа исследования физико-технических и фазово-структурных свойств гранитного отсева излагают свое видение по возможности его использования. Следует отметить актуальность данной тематики в свете решения проблемы ресурсосбережения, поскольку в течение длительного периода гранитный отсев РУПП "Гранит" не находит применения и многотоннажные запасы его ежегодно увеличиваются. Безусловно, исследования требуют своего продолжения, что отмечено и авторами, с доведением их до выработки практических рекомендаций. Возможно, публикация данной статьи вызовет научно-практический интерес и других исследователей.

Редакция журнала готова к публикации других мнений по данной проблеме.