

УДК 666.9.002.8-033.33

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ДЕКОРАТИВНОГО БЕТОНА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЫТОВОГО СТЕКЛОБОЯ****канд. техн. наук, доц. О.В. ЛАЗАРЕНКО, Ю.В. СУВОРОВА  
(Полоцкий государственный университет)**

*Определен комплексный метод подавления щелочно-кремниевой реакции между заполнителем – несортированным стекловым песком, и продуктами гидратации цемента. Проведены исследования по определению оптимального состава мелкозернистого декоративного бетона цемент : заполнитель; процента ввода добавки С-3; количества силикагеля для подавления деструкции бетона. Показано, что комплексный подход обеспечит уплотнение и упрочнение структуры цементного камня, снизит объем щелочно-кремниевой коррозии и позволит использовать вибролитьевой метод и режим естественного твердения изделий с ранней распалубкой. Определен состав декоративного мелкозернистого бетона с несортированным бытовым стеклосбоя в качестве заполнителя, который может быть использован для производства декоративных элементов фасада.*

**Введение.** В прогрессивно развивающемся современном городе все чаще находят место оригинальные проекты жилых домов и общественных зданий, успешно развивается ландшафтный дизайн, это требует производства высококачественных материалов для фасадов, тротуарных плиток, малых архитектурных форм, удовлетворяющих требованиям архитектурной выразительности и обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Наибольшей декоративностью обладают изделия из натурального камня, но они имеют высокую стоимость и их сырьевая база ограничена. Одним из вариантов снижения стоимости отделки является использование искусственного камня – декоративного (в основном мелкозернистого) бетона. Цветовая гамма бетона достигается за счет применения пигментов, белого и цветного цемента, заполнителей различных оттенков. Однако в современных условиях использование цемента малодоступно и дорого, так как даже за рубежом их производят в небольших объемах. В качестве заполнителей традиционно применяют горные породы с широкой цветовой гаммой (в основном мрамор), благодаря которым имеется возможность изменять декоративность готового изделия. Однако в Республике Беларусь использование мрамора ограничено из-за отсутствия его природных месторождений.

Ранее нами была установлена возможность использования в качестве заполнителя декоративного бетона твердого бытового отхода – несортированного стеклосбоя [1]. Несортированный цветной стеклосбой – это бой бытовых искусственных, техногенных стекол, имеющий широкую цветовую гамму, неподдающийся разрушающему воздействию солнечных лучей, воды, атмосферы, низких температур и являющийся коррозионно-стойким материалом (не действует грибок и бактерии, большинство из органических, минеральных и биокислот, солей), а также экологически чистый, поскольку в основном это бой тарного, оконного стекла.

В настоящее время на территории Беларуси сбор разными службами бытового стеклосбоя составляет около 136 тыс. тонн в год [2]. Основной потребитель стеклосбоя – стекольная промышленность. Однако для использования бытового стеклосбоя в качестве вторичного сырья необходим стабильный химический состав, поэтому для его применения при производстве стекла требуются дополнительные материальные затраты на сортировку для усреднения его состава и свойств. Мусороперерабатывающие предприятия республики производят дробленый и фракционированный стеклосбой. Стоимость 1 т такого стеклосбоя составляет 70 тыс. руб. (для сравнения: 1 т щебня декоративного гранитного стоит 1 млн. руб.; крошки мраморной – 1,9 млн. руб.). Вместе с тем масштабного применения бытовой стеклосбой не нашел вследствие использования сложных и энергоемких технологий переработки [3]. Известно использование стекольного боя фракции 10...20 в качестве крупного заполнителя бетона [4], информация о полной замене минеральных заполнителей бетона отсутствует. Таким образом, в полном объеме бытовой стеклосбой в настоящее время не утилизируется. Так, только на Новополоцком заводе по переработке твердых бытовых отходов в настоящее время находится свыше 300 тонн невостребованного стеклосбоя с размером зерен 0,14...10 мм. Поэтому большая часть стеклосбоя подлежит захоронению, что вызывает особую тревогу у экологов, учитывая тот факт, что стекло, как и сталь, способно сохраняться без особых разрушений десятки и даже сотни лет. Ущерб от его захоронения выражается в деградации почв, земель и будет с каждым годом возрастать, как возрастают объемы стеклосбоя.

В связи с вышеизложенным, утилизация стеклосбоя, образующегося в результате сбора коммунальных отходов, является важной задачей, решение которой позволит не только получить декоративные бетоны, но и улучшить экологическую ситуацию в Республике Беларусь.

**Основная часть.** Возможность широкого применения бытового стеклосбоя в качестве заполнителей ограничивается его реакционной способностью, вызывающей расширение бетона при твердении [5]. Стекло содержит на своей поверхности  $\text{Na}^+$ , способный создать  $\text{NaOH}$  в цементной композиции, даже если щелочь в исходном цементе отсутствует, кроме того, стекло на поверхности содержит аморфный оксид кремния, который характеризуется высокой реакционной способностью. В результате реакции ме-

жду щелочью цемента и оксидом кремния (щелочно-кремниевой) образуется гелеобразное вещество, состоящее из силикатов щелочных металлов. Гель характеризуется значительной способностью к разбуханию. Он поглощает воду с последующим увеличением своего объема. Так как гель заключен в порах цементного камня, то возникает внутреннее давление, которое приводит к возникновению трещин и разрушению цементного камня, при этом, по данным [6], это давление может превышать  $2 \text{ Н/мм}^2$ .

К настоящему времени известны различные способы подавления щелочно-кремниевой реакции: снижение содержания щелочей в цементе, введение в состав бетона солей лития, использование активных минеральных (гидравлических) добавок, использование ингибиторов коррозии бетона, снижение водоцементного отношения бетонных смесей [7 – 12].

Анализируя перечисленные способы подавления щелочно-кремниевой реакции, нами был выбран комплексный подход к решению данной проблемы – использование силикагеля и снижение водоцементного отношения бетонной смеси. Способ введения силикагеля как ингибитора коррозии обусловлен доступностью и простотой. При этом учитывали тот факт, что в настоящее время оборудование, аппаратура для технического переоснащения промышленных комплексов упакованы под защитой гранулированного силикагеля, который затем собирают в мешки и вывозят на свалку. Таким образом, использование силикагеля обосновано с точки зрения утилизации отхода, следовательно, уменьшения себестоимости декоративного бетона. Снижение водоцементного отношения бетона позволит снизить не только дифференциальную и интегральную пористость цементного камня, но и упрочнить его, что повысит сопротивление цементного камня разрушению при набухании геля.

Учитывая, что белые и цветные цементы в Республике Беларусь не производят, а также их высокую стоимость, в качестве вяжущего был принят серый портландцемент (ПЦ 500-Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы»). В качестве заполнителя применяли тарный цветной стеклянный бой с размером зерен от менее 0,14 до 10 мм Новополоцкого предприятия по переработке твердых бытовых отходов. Был проведен анализ гранулометрического состава заполнителя. Испытания показали, что песок, полученный дроблением тарного стекла, удовлетворяет требованиям ГОСТ 8736-93. Модуль крупности песка равен 3,28 (II класс, песок повышенной крупности). Для снижения водоцементного соотношения использовали суперпластификатор С-3. Добавка соответствует требованиям СТБ 1112-98. В качестве ингибитора коррозии использовали силикагель технический гранулированный со средним эффективным диаметром пор  $20 \dots 150 \text{ \AA}$  и удельной поверхностью  $102 \dots 103 \text{ м}^2/\text{г}$ .

При проектировании состава декоративного бетона следует учитывать тот факт, что бетонные смеси, применяемые для изготовления ограждений лоджий, балконов, малых архитектурных форм, в большинстве случаев должны иметь достаточную прочность за малое время твердения и быть самоуплотняющимися. Эти требования обусловлены и небольшой толщиной изделий, иногда до  $3 \dots 5 \text{ мм}$ . Исходя из этого принят вибролитьевой метод формования. Кроме того, был рассмотрен вопрос о необходимости гидротермальной обработки бетона. При этом учитывалось, что с повышением температуры в бетоне реакционная способность двуоксида кремния со щелочной средой повышается вследствие увеличения подвижности гидроксида кальция, что может привести к дополнительному расширению бетона. Многочисленные исследования показывают, что введением С-3 достигается экономия цемента до 30 % или снижение температуры изотермического прогрева при тепловлажностной обработке на  $30 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , что создает реальные предпосылки отказа от её применения. В работе [13] показано, что декоративный бетон с использованием суперпластификатора С-3 имел прочность в суточном возрасте нормального твердения 60 МПа.

В ходе экспериментальных исследований необходимо было определить оптимальное соотношение цемент:заполнитель, дозировку добавки С-3, которая обеспечит уплотнение и упрочнение структуры цементного камня, снизит объем щелочно-кремниевой коррозии, позволит использовать вибролитьевой метод формования, режим естественного твердения изделий с ранней распалубкой, а также процент ввода силикагеля. Расчет состава бетона проводили в соответствии с СТБ 1182, СТБ 775 и СТБ 1374 из условия, что декоративный бетон, предназначенный для производства ограждений балконов и лоджий, малых архитектурных форм, деталей фасадов, должен иметь прочность  $15 \dots 20 \text{ МПа}$ , марку бетонной смеси по удобоукладываемости – П<sub>3</sub>.

Из приготовленной смеси формовали образцы кубы с размером ребра  $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ , фрагменты плиты размером  $4 \times 16 \times 16 \text{ см}$ . Формование лицевого слоя плиток проводили несколькими способами:

- 1) на дно формы укладывали полиэтиленовую подложку для получения глянцевой поверхности плиток;
- 2) засыпали слой стеклобоя толщиной 0,8 см на дно формы;
- 3) обнажали заполнитель после распалубки образцов.

Высолы от пигментов на лицевой поверхности плиток после распалубки смачивали водой и обрабатывали 1 Н раствором соляной кислоты, промывали горячей водой.

Были исследованы прочностные характеристики декоративного бетона с разным соотношением цемент:песок. Прочность образцов определяли в возрасте 3 сут. Такое решение было принято исходя из того, что максимальное расширение бетона под действием щелочно-кремниевой реакции происходит через 72 часа после формования образцов.

Результаты испытаний бетонной смеси и бетона представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

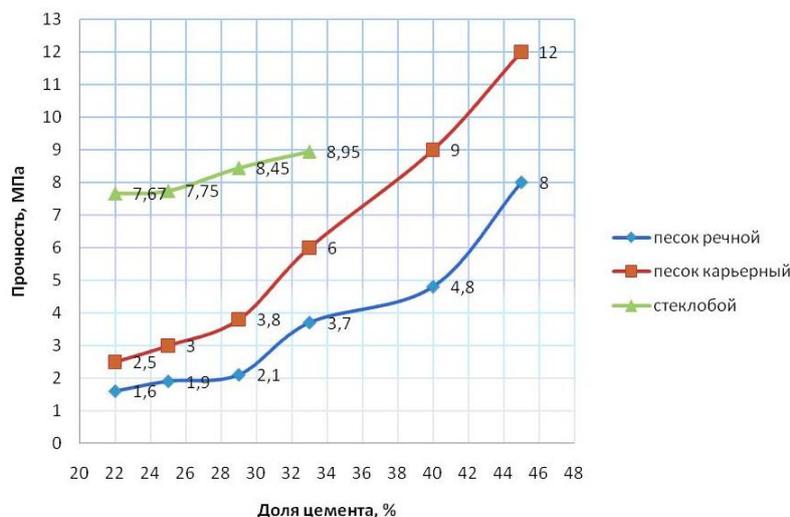


Рис. 1. Зависимость прочности бетона от доли цемента в смеси:  
1 – стеклобой; 2 – песок карьерный; 3 – песок речной

Примечание. При построении зависимостей 2, 3 использованы данные [14].

Таблица 1

Физико-механические свойства бетонной смеси и бетона

| № составов | Осадка конуса, см | Средняя плотность бетонной смеси/бетона, кг/м <sup>3</sup> | Прочность бетона естественного твердения, МПа (возраст – 3 сут) |
|------------|-------------------|--|---|
| 1          | 9                 | 1924/1809  | 8,95  |
| 2          | 8                 | 2201/2091  | 6,45  |
| 3          | 6                 | 2197/2131  | 7,75  |
| 4          | 6                 | 2288/2220  | 7,67  |

Увеличение прочности бетона на основе стеклобоя можно объяснить следующим образом: в отличие от кварцевых инертных песков, стеклобой имеет большую прочность на сжатие и является реакционно-способным заполнителем. На стадии твердения происходит механическое взаимодействие между клинкерными составляющими и стекольным боем в связи с краеугольной формой его зерен и шероховатостью их поверхности, кроме того составляющие цемента гидратируют и выделяют при этом гидратную фазу, активно воздействуют на зерна стеклобоя, в результате между ними возникает промежуточный гидратный слой, упрочняющий систему.

Уменьшение прочности состава № 4, по сравнению с составами 1...3, является следствием щелочно-кремниевой реакции, происходящей в бетоне, объем которой увеличивается с увеличением в системе аморфного кремнезема.

Учитывая требования по прочности бетонов, предназначенных для изготовления декоративных бетонов 15...20 МПа, для дальнейших исследований выбран состав № 4 с соотношением Ц : П = 1 : 3,5. Кроме достаточной прочности в возрасте 3 суток, основаниями для выбора данного состава являются: наименьший расход цемента, максимально возможная утилизация стеклобоя, усиление декоративности бетона за счет насыщенности бетона декоративным заполнителем.

Рекомендуемый процент ввода добавки С-3 от массы цемента находится в пределах 0,5...0,9 %. Известен комбинированный эффект от действия добавки: снижение расхода воды на 20...30 % с частичным увеличением подвижности бетонной смеси.

Учитывая ожидаемый результат от действия добавки: уплотнение структуры цементного камня, снижение действия щелочно-кремниевой коррозии, достижения марки бетонной смеси по удобоукладываемости П<sub>3</sub>, необходимо определить оптимальный эффект от действия С-3 с разным процентом ее ввода. Принимали следующее количество добавки: 0,5; 0,65; 0,7; 0,8 % от массы цемента; количество воды затворения для каждого ввода добавки уменьшали на 25 %. Свойства бетонных смесей и бетонов приведены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства бетонной смеси и бетона с добавкой С-3

| № составов | Количество добавки, % | В/Ц  | Осадка конуса, см | Прочность бетона естественного твердения, МПа |       |       |        |
|------------|-----------------------|------|-------------------|---|-------|-------|--------|
|            |                       |      |                   | 1 сут   | 3 сут | 7 сут | 28 сут |
| 1          | –                     | 0,55 | 6                 | 6,5   | 7,67  | 11,05 | 13,86  |
| 2          | 0,5                   | 0,41 | 7                 | 7,67  | 9,05  | 11,38 | 16,9   |
| 3          | 0,65                  | 0,4  | 9                 | 7,41  | 9,35  | 11,97 | 17,1   |
| 4          | 0,7                   | 0,41 | 10                | 7,09  | 8,6   | 11,06 | 15,8   |
| 5          | 0,8                   | 0,41 | 11                | 6,69  | 8,3   | 11,8  | 14,1   |

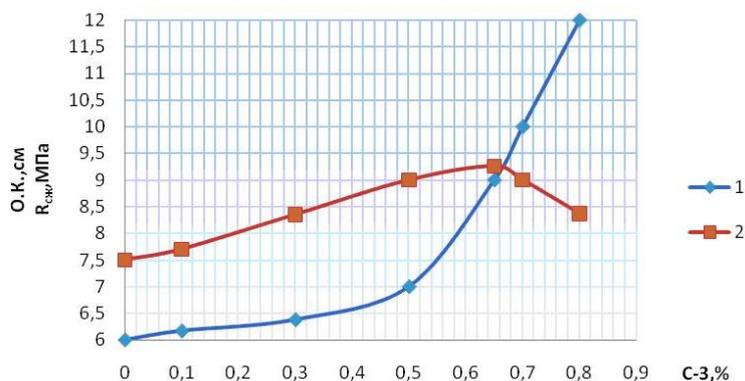


Рис. 2. Зависимость свойств бетонной смеси и бетона от количества добавки С-3:  
1 – зависимость С-3 – ОК; 2 – зависимость С-3 – R<sub>сж</sub> (прочность в возрасте 3-х суток)

Рассматривая данные таблицы 2 и зависимость, представленную на рисунке 2, можно сделать вывод, что с точки зрения прочности бетона оптимальным является состав с процентом ввода добавки С-3, равным 0,67 %. Однако, учитывая требования по подвижности бетонной смеси, необходимую для использования вибролитьевого метода формования и незначительную разницу в прочности для дальнейших исследований нами выбран состав № 4 с количеством С-3, составляющим 0,7 % от массы цемента.

Ранее установлено, что количество добавки силикагеля, позволяющее подавить деструкцию бетона, колеблется в пределах 4...8 % [12] и во многом зависит от гранулометрического состава заполнителя. В целях определения расширения бетона в зависимости от размера зерен стекольного заполнителя, нами была определена прочность бетона в возрасте 28 суток нормального твердения на равноподвижных смесях (рис. 3).

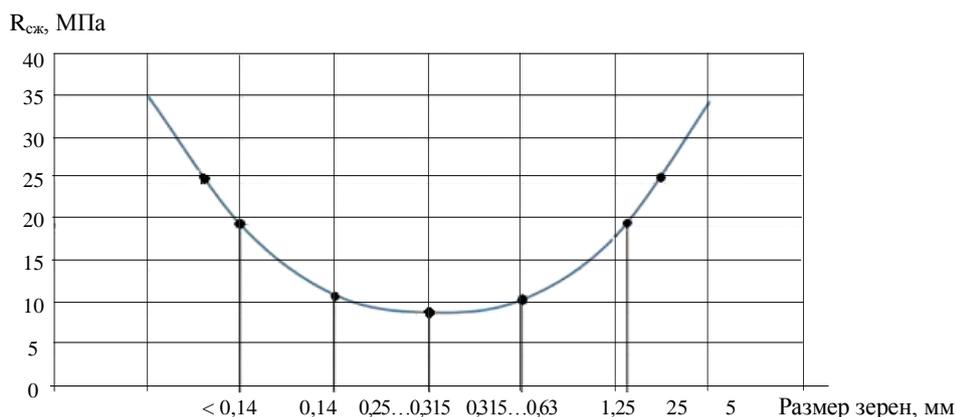


Рис. 3. Зависимость прочности бетона на стекольном заполнителе от размера зерен в возрасте 28 суток

Установлено, что с увеличением крупности зерен заполнителя >1,25 мм прочность бетона увеличивается. Это можно объяснить тем, что стекло имеет высокую прочность на сжатие и, создавая скелет бетона, обеспечивает его дополнительную прочность, превышающую величину давления новообразований.

Увеличение прочности бетона на заполнителе с размером зерен менее 0,14 мм, свидетельствует о том, что чем больше поверхность реакционноспособного заполнителя, тем меньше количество щелочей, приходящихся на единицу поверхности, и тем меньше образуется щелочесиликатного геля. Кроме того, благодаря чрезвычайно низкой подвижности гидроксида кальция в реакции участвует только гидроксид

кальция, которая непосредственно контактирует с поверхностью заполнителя. Поэтому количество гидроксида кальция, приходящейся на единицу поверхности заполнителя, не зависит от величины общей площади поверхности заполнителя. Таким образом, увеличение площади поверхности приводит к повышению соотношения между гидроксидом кальция и щелочами в растворе в контактном слое заполнителя. В таких условиях образуется безвредный не расширяющийся щелочной силикат кальция.

Рассматривая гранулометрический состав стеклобоя, полученного на предприятии по переработке твердых бытовых отходов г. Новополюцка, определено, что в составе преобладают (около 45,2 %) зерна в пределах 0,315...0,63, что приведет к существенному снижению прочности бетона при использовании такого заполнителя без ингибитора коррозии.

Процент ввода силикагеля определяли на составе № 4 (см. табл. 2).

Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3

Влияние добавки силикагеля на прочность мелкозернистого бетона на стекловом заполнителе

| Кол-во добавки, % | Прочность бетона естественного твердения, МПа |       |       |        |
|-------------------|---|-------|-------|--------|
|                   | 1 сут   | 3 сут | 7 сут | 28 сут |
| 4                 | 10,17   | 1,38  | 15,93 | 22,75  |
| 6                 | 13,51   | 13,98 | 18,64 | 31     |
| 8                 | 15,7  | 16,84 | 20,03 | 33     |

Анализируя данные таблицы 3, можно сделать вывод, что оптимальный ввод добавки силикагеля, обеспечивающий распалубку изделий через 24 часа, составляет 6 %.

Испытания бетона на морозостойкость по ускоренной методике показали морозостойкость F 150, что соответствует требованиям СТБ 775, СТБ 1374 и ГОСТ 26633.

В качестве пигментов были использованы зеленый пигмент (оксид хрома) и желтый железистый оксид. Пигменты вводили в количестве 4 % от массы цемента. Визуальный осмотр образцов показал, что использование 4 % оксида хрома создает слишком насыщенный темный цвет бетона. Желтый пигмент не придал выразительности поверхности, тон бетона практически не изменился. Исходя из сказанного был принят зеленый пигмент в количестве 2 %. Образцы, изготовленные при таком количестве пигмента, имели хорошую насыщенность цвета. Кроме того, выявлено:

- лицевая поверхность образцов с обнаженным заполнителем не отличалась декоративностью;
- в результате применения полиэтиленовой подложки была получена глянцевая поверхность, наблюдалось небольшое количество мелких сферических пор, на снижение прочности они не повлияли, но ухудшили внешний вид поверхности;
- наилучшие результаты были получены при засыпке слоя стеклобоя толщиной 0,8 см на дно формы. Качество лицевой поверхности соответствовало категории А согласно ГОСТ 13015, 26633 (рис. 4).



Рис. 4. Лицевая поверхность образцов плиток

В результате проведенных исследований нами разработан оптимальный состав декоративного бетона, отвечающий требованиям СТБ 775, 1374 [15, 16] (табл. 4).

Таблица 4

Оптимальный состав мелкозернистого декоративного бетона

| Расход составляющих на 1 м <sup>3</sup> |           |          |     |        |               |            | R <sub>сж</sub> , МПа |        | F, цикл |
|---|-----------|----------|-----|--------|---------------|------------|-----------------------|--------|---------|
| цемент, кг                              | песок, кг | вода, кг | В/Ц | С-3, % | силикагель, % | пигмент, % | 1 сут                 | 28 сут |         |
| 453                                     | 1586      | 186,8    | 0,4 | 0,70   | 6             | 2          | 16,8                  | 33,7   | 150     |

**Заключение.** Разработанный состав декоративного бетона может быть использован для изготовления плит, предназначенных для облицовки фасадов, внутренних поверхностей стен, малых архитектурных форм, ограждений балконов и лоджий.

При проведении дополнительных исследований выявлено, что такой состав может быть использован для покрытия полов, лестниц в зданиях и сооружениях различного назначения.

Простая технология получения позволит изготавливать изделия с минимальными затратами, достаточной декоративности и долговечности и при этом решать серьезную экологическую задачу – предотвращение загрязнения окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко, О.В. К вопросу об утилизации несортированного стеклобоя / О.В. Лазаренко, Ю.В. Суворова // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. науч. тр.; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2011. – Вып. 3. – С. 102 – 105.
2. Ежегодный экологический бюллетень [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://minpriroda.by/ ru/](http://minpriroda.by/ru/). – Дата доступа: 05.01.2011.
3. Пузанов, С.И. Комплексная переработка стеклобоя в производстве строительных материалов / С.И. Пузанов, А.А. Кетов // Экология и промышленность России. – 2009. – № 12.
4. Способ получения бетона: заявка на патент: 2006124267/03 / А.А. Кетов, И.С. Пузанов, С.И. Пузанов, А.С. Рассомагина, Д.В. Саулин, А.В. Конев; заявитель ЗАО «Пермское производство пеносиликатов»; заявл. 07.07.2006; опубл. 10.02.2008.
5. Lesage R., Sierra r. le Point sur les Reactions Alcalis-granulats dans les Betons Hydrauliques. Взаимодействие между щелочами и заполнителями в бетонах на гидравлических вяжущих // Bull. liais. Lab. Points et chaussées. – 1997. – № 90. – Р. 103 – 105, 123 – 125, 127, 130.
6. Ситников, И.В. Декоративный высокопрочный мелкозернистый бетон / И.В. Ситников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://trg-mramor.ucoz.ru/publ/1-1-0-1>. – Дата доступа: 20.01.2011.
7. Concrete compositions for controlling alkali-silica reactions in concrete and processes for making same: United States Patent 5,755,876, C04B7/42, C04 B7/00 / Palet James E.; Hutchens H. Wayne; Baxter Steven Z.; Publication date 05.02.2002.
8. Method of suppressing alkaline aggregate reaction in concrete structure: пат. C03C13/00, W04C14/02, C04B14/02; Publication date 21.06.2002.
9. Method for preventing deterioration for hardened concrete: пат. W03C13/00, W04C14/02, C04B14/02, C04C14/02, C04C28/00; Publication date 21.04.1989.
10. Buttler Frank G.; Newman John B. PFA and Alkali-Silica Reactions. Влияние золы-уноса на взаимодействие кремнезема заполнителей со щелочами цемента // Consult. Eng. (Gr. Brit.). – 1980. – № 11. – Р. 57, 59 – 62.
11. Баженов, Ю.М. Многокомпонентные мелкозернистые бетоны / Ю.М. Баженов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2001. – № 10. – С. 13 – 19.
12. Белокопытова, А.С. О разработке процессов утилизации стеклобоя для производства комплексных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А.С. Белокопытова. – М., 2006. – 18 с.
13. Возможности декоративного бетона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://beton-cy47.ru/ statyi.html](http://beton-cy47.ru/statyi.html). – Дата доступа: 05.02.2011.
14. Томин, А.Н. Некоторые аспекты организации сбора и утилизации стеклобоя на Тираспольском стекльном заводе / А.Н. Томин // Стекло мира. – 2000. – № 1. – С. 71.
15. Ограждения балконов и лоджий железобетонные. ТУ: СТБ 775-2002.
16. Плиты облицовочные бетонные. ТУ: СТБ 1374-2003.

Поступила 03.11.2011

#### DESIGN OF DECORATIVE CONCRETE USING DOMESTIC GLASS CULLET

**O. LAZARENKO, J. SUVOROVA**

*An integrated method to suppress alkali-silica reaction between filler-within glass sand and cement hydration products are defined in this paper. The determination of the optimum composition of fine decorative concrete cement: placeholder; per input supplements-3; quantities of silica, to quell the destruction of concrete are studied. It is shown that an integrated approach will ensure sealing and hardening of cement stone structure, reduce the amount of alkali-silica corrosion and allows you to use the vibrocasting method and mode of natural curing products with early demolding. The decorative concrete with fine within domestic cullet as a placeholder that can be used for the production of decorative elements of the facade are defined.*