

Лопухов В. Ю., аспирант,  
Беленцов Ю. А., д-р техн. наук, проф.,  
Золотов В. М., канд. техн. наук, доц.  
Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

## СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ БЕТОНОВ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЦЕМЕНТА

seva-piter@rambler.ru

Области применения бетона на цементном вяжущем разнообразны. Можно с уверенностью сказать, что сегодня бетон является строительным материалом номер один в мире. Но с ростом его потребления растёт спрос на цемент процесс производства, которого дорог и экологически вреден. Одним из способов снижения затрат цемента может быть уплотнение упаковки бетонной смеси по средствам подбора оптимального гранулометрического зернового состава заполнителей с наименьшей водопотребностью. Проведенные расчеты и опыты подтверждают суждение о способности уплотнения бетонной смеси при жестком каркасе упаковки из зерен заполнителя и оптимальном соотношении объемов связующего (цемента) и заполнителя. Такие смеси на многофракционном заполнителе 3-5 фракций реализуется эффект упрочнения. Что позволяет при применении наименьшего количества цемента сохранить прочность бетона близкой к исходной. По расчетам экономия цемента при создании такой плотной упаковки составит 120 кг.

**Ключевые слова:** бетон, цемент, плотность, гранулометрический состав, прочность, упаковка бетонной смеси.

**Введение.** Бетон используется практически во всех областях строительства: в возведении гидротехнических сооружений, гражданских и

промышленных объектов. А, следовательно, с ростом потребления бетона стремительно растет и производство цемента что показано на (рис.1).



Рис.1. Динамика производства цемента и товарной бетонной смеси в России за 2002–2012 гг.[1]

Цемент вместе с бетоном является вторым после воды наиболее употребляемым ресурсом на земле: ежегодно его потребление на нашей планете составляет около 1 тонны на человека. Цемент производится в 156 странах мира. Однако 70% мирового производства цемента сосредоточено лишь в 10 странах мира, где проживает 70% населения земли. Темпы развития цементной промышленности в 1,5-2 раза выше, чем темпы роста мирового ВВП [2].

Однако процессы производства цемента, а именно его главной составной части, клинкера, ответственны за высокие уровни выбросов диоксида углерода. Высокие уровни выбросов диоксида углерода в стандартных процессах про-

изводства цемента и бетонных композиций составляют главную экологическую проблему и, в контексте современности, составляют предмет высоких экономических санкций.

Поэтому существует настоятельная необходимость в способе, дающем возможность производить бетон с меньшими затратами цементного составляющего с целью экономической выгоды и снижения экологических последствий. Но при этом данные бетоны должны обеспечивать удовлетворительные механические свойства для применения в строительстве без вреда прочностным характеристикам конструкций.

Наибольшая плотность, а, следовательно, и прочность бетона при наименьшем расходе це-

мента достигаются подбором оптимального гранулометрического зернового состава заполнителей с наименьшей водопотребностью.

**Основная часть.** Сема упаковки зерен заполнителя оказывает значительное влияние на плотность. Для формирования более прочной структуры необходимо выбрать схему которая обеспечила бы наибольшую плотность смеси и большую протяженность линии разрушения

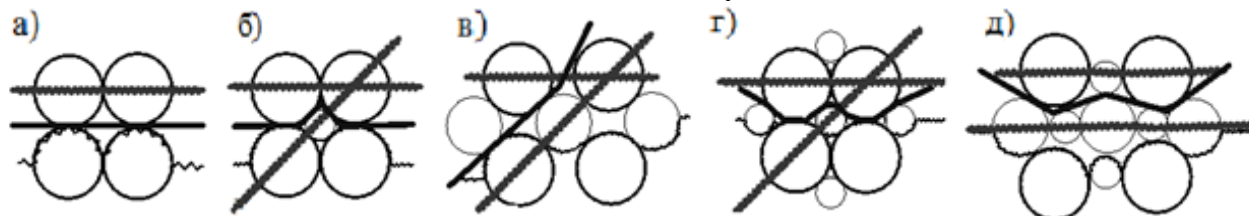


Рис.2.Схемы разрушения растворной составляющей приразнофракционном составе:  
а) однофракционных; б) двухфракционных при  $K_{разд} < 1$ ; в) двухфракционных при  $K_{разд} > 1$ ;  
г) трех или более фракционных при  $K_{разд} < 1$ ; д) трех или более фракционных при  $K_{разд} > 1$

Если представить, что зерна заполнителя идеальной шарообразной формы как это показано на рисунке, то можно рассчитать состав бетонной смеси с идеальным соотношением количества заполнителя разных фракций что позво-

добиваясь распределение действующих напряжений на большее количество элементов.

Рассмотрим возможные схемы упаковки (рис.2). Для достижения выше упомянутой цели подходит многофракционная схема упаковки с коэффициентом раздвижки зерен заполнителя  $K_{разд} \leq 1$ . В такой схеме зерна более мелкого заполнителя припадают в меж зерновые пустоты более крупной фракции, без раздвижки зерен т.к.  $K_{разд} \leq 1$ .

лит получить наиболее плотную упаковку[3]. В (табл. 1) представлены расчеты пустотности для специально подобранных 3-х и 4-х фракционных составов бетонной смеси.

Таблица 1

**Расчетная пустотность упаковки бетонной смеси**

| Фракция               | Средний размер зерен(мм) | Средний размер пустот(мм) | Коэффициент раздвижки | Пустотность (%) |
|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------|
| 3х фракционный состав |                          |                           |                       |                 |
| 5-2.5мм               | 3,75                     | 1,53                      | 1                     | 40              |
| 2.5-0.63мм            | 1,53                     | 0,64                      | 0,62                  | 16              |
| 0.63-0.16мм           | 0,4                      | 0,162                     |                       | <b>6,4</b>      |
| 4х фракционный состав |                          |                           |                       |                 |
| 15-5мм                | 10                       | 4,1                       | 0,91                  | 40              |
| 5-2.5мм               | 3,75                     | 1,53                      | 1                     | 16              |
| 2.5-0.63мм            | 1,53                     | 0,64                      | 0,62                  | 6,4             |
| 0.63-0.16мм           | 0,4                      | 0,162                     |                       | <b>2,6</b>      |

Из таблицы№1 видно, что конечная пустотность 3-х фракционного состава уменьшилась до 6,4 % а 4-х фракционного до 2,6 % что свидетельствует о возможности уплотнения состава

за счет правильного фракционирования заполнителя. Увеличение числа фракций также способствует уменьшению пустотности упаковки.

Таблица 2

**Экспериментальная пустотность упаковки бетонной смеси**

| Фракция                | Пустотность(%) | Фракция                | Пустотность(%) |
|------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| 3х фракционный состав. |                | 4х фракционный состав. |                |
| 5-2.5мм                | 42,4           | 15-5мм                 | 43,7           |
| 2.5-0.63мм             | 24,3           | 5-2.5мм                | 22,5           |
| 0.63-0.16мм            | <b>8,7</b>     | 2.5-0.63мм             | 8,1            |
|                        |                | 0.63-0.16мм            | <b>3,8</b>     |

Теоретически расчеты были проверены на практике. Пустотность составов была определена опытным путем. Для достижения результатов наиболее близких к расчетным было применено

активное вибрирование смеси и воздействие на нее внешней нагрузки. Все это дало более полное заполнение меж зерновых пустоты более

крупной фракции, более мелким зернами. Результаты опыта приведены в (табл. 2).

Значения пустотности определенные расчетно-теоретическими опытным методом различаются смотри (табл. 3) Это связано с тем что в реалии зерна заполнителя имеют различную форму, а не шарообразную как в расчетной теории. Но в общем значения пустотности определенные опытным методом также подтверждают возможности уплотнения состава за счет правильного фракционирования заполнителя в смеси.

На основе трех фракционного и четырех фракционного составах была изготовлена серия образцов бетона кубической формы 70×70×70мм и 100×100×100 соответственно. Водоцементное отношение 0,5, на портландцементе ПЦ-500. Расход цемента для заполнения оставшейся пустотности в размере 6,4% в трех фракционном составе по расчетам составил 90 кг/м<sup>3</sup> и 50кг/м<sup>3</sup> для четырех фракционного при пустотности 2,6 %.

Таблица 3

## Сравнение пустотности

| Состав бетонной смеси  | Пустотность (%) |               | Отношение пустотности (%) |
|------------------------|-----------------|---------------|---------------------------|
|                        | Расчетный метод | Опытный метод |                           |
| 3х фракционный состав. | 6,4             | 8,7           | 26,1                      |
| 4х фракционный состав. | 2,6             | 3,8           | 31,5                      |

Лабораторные образцы твердели в нормальных условиях, при  $t = 18 \pm 3^\circ\text{C}$  и влажности 100% течение. Прочность образцов на сжатие была определена в возрасте 28 суток. Испытание

образцов проводились при помощи гидравлического пресса ПГМ-100МГ4. Результаты испытания занесены в (табл. 4).



Рис.2. Испытание бетонных образцов на прочность

Таблица 4

## Результаты испытаний бетонных образцов

| Составы бетонной смеси  | Плотность (кг/м <sup>3</sup> ) | Прочность на сжатие |
|---|--------------------------------|---------------------|
| 4х фракционный состав 1:5:10; В/Ц=0,4 расход цемента 50 кг/м <sup>3</sup>       | 1910                           | 8,7 (МПа)           |
| 3х фракционный бетон песчаный 1:14; В/Ц=0,4 расход цемента 90 кг/м <sup>3</sup> | 2100                           | 11,4 (МПа)          |
| бетон песчаный 1:6; В/Ц=0,4 расход цемента 210 кг/м <sup>3</sup>                | 2200                           | 13,0 (МПа)          |

**Вывод.** Проведенные расчеты и опыты подтверждают суждение о способности уплотнения бетонной смеси с жестком каркасом упаковки из зерен заполнителя при оптимальном гранулометрическом составе заполнителя и соотношении объемов связующего (цемента) и заполнителя. Также при этом в смесях на многофракци-

онном заполнителе 3 фракции реализуется эффект упрочнения как видно из(табл. 4).А, следовательно, при применение наименьшего количества цемента в пределах 100 кг/м<sup>3</sup> удается сохранить прочность близкой к исходной. При дальнейшем уменьшение количества цемента наблюдается значительная потеря прочности. По

расчетам экономия цемента при создании такой плотной упаковки составит 120 кг.

Следующим этапом упрочнения бетона может послужить применение фибр различного происхождения. Фибры помогут связать заполнитель при меньшем расходе связующего.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никольская.Н.Н. Российский рынок цемента. [Электронный ресурс]. Систем. требования: InternetExplorer-er.<http://www.stroyka.ru/Rynok/1407469/rossijskij-rynok-cementa-nachalo-2011-goda-chast-1/> (дата обращения: 15.05.2014)
2. Кондратьев В. Б. Мировая цементная промышленность. [Электронный ресурс]. Систем. требования: InternetExplorer. [http://www.perspektivy.info/rus/gos/mirovaja\\_cementnaja\\_promyshlennost\\_2012-06-06.htm](http://www.perspektivy.info/rus/gos/mirovaja_cementnaja_promyshlennost_2012-06-06.htm) (датаобращения: 20.05.2014)
3. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат,1981 г, 464 с.