

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ БЕТОНОВ С РАЦИОНАЛЬНЫМ ЗЕРНОВЫМ СОСТАВОМ КОМПОНЕНТОВ

Розглянуті проблеми утилізації в бетонах вторинних продуктів промисловості та підвищення ефективності використання цементу забезпеченням раціонального зернового складу компонентів.

Рассмотрены проблемы утилизации в бетонах вторичных продуктов промышленности и повышения эффективности использования цемента обеспечением рационального зернового состава компонентов.

The problems of utilization of the secondary products of industry in the concretes and increase of efficiency of the use of cement providing the rational composition of components are considered.

### Постановка проблемы

Проектирование составов бетонных смесей является важной проблемой, решение которой позволяет обеспечить требуемые важнейшие свойства бетона с минимальными затратами. Общеизвестные методики, базирующиеся на формировании системы четырех уравнений с последующим их решением и определением количества каждого из четырех основных компонентов, не отвечают современным требованиям к бетонам. Это связано, прежде всего, с тем, что последнее время широко используются модифицированные бетоны, свойства которых регулируются в широких пределах введением в бетоны суперпластификаторов, наполнителей, органоминеральных комплексов и других модификаторов. Особенно эта проблема актуальна для бетонов прочностью менее 20 МПа, удельный расход цемента в которых на достижение единичной прочности значительно выше, чем в бетонах средней и высокой прочности. Поэтому совершенствование методов проектирования составов бетонов является актуальной проблемой, особенно при использовании в бетонах вторичных продуктов промышленности, загрязняющих окружающую среду.

### Анализ последних исследований и определение нерешенных проблем

Анализ существующих методов определения составов бетонов [1–4] показывает, что основное внимание уделяется количеству и качеству цемента. В проводимых исследованиях предполагается, что качество цементного камня предопределяет и основные физико-механические характеристики бетона. В связи с тем, что в бетонах применяется все большее количество компонентов, для определения рационального количества каждой составляющей бетона

все более широко используются кибернетические методы, основанные на статистических теориях прочности композиционных материалов [5–7]. Эти методы имеют несомненное преимущество, но, по нашему мнению, последнее время мало внимания уделяется развитию структурных теорий прочности бетонов [8, 9], которые позволяют определить существенную роль заполнителей и наполнителей в формировании структуры и важнейших физико-механических характеристик бетонов. Проведенные нами ранее исследования подтвердили, что для определения составов бетонов необходимо учитывать тот рациональный зерновой состав компонентов, который может обеспечить наиболее высокую плотность смеси, а, следовательно, наименьшую дефектность затвердевшего бетона [10, 11]. Кроме того, не декларативное, как это наблюдается в общепринятых методиках определения составов бетонных смесей, а реальное обеспечение рационального зернового состава компонентов с минимальной пустотностью предопределяет также и улучшенную удобоукладываемость бетонных смесей при существенной экономии цемента, особенно для бетонов прочностью менее 20 МПа. Поэтому целесообразно продолжить исследования по определению рациональных составов бетонных смесей с различными вторичными продуктами промышленности с целью их утилизации в бетонах с максимально возможной эффективностью использования цемента в них.

### Цель проведенных исследований

Определить возможность и рациональный расход эффективного использования гранотсева в составах тяжелого бетона из условий максимальной плотности и минимально расхода цемента для обеспечения требуемых физико-механических характеристик бетона.

## Основной материал исследований

Проведенными ранее исследованиями нами установлено, что пустотность смеси наименьшая при количественном соотношении фракций (по абсолютным объемам) крупной, средней и мелкой, равном 52 : 23 : 25 %, а соотношении их средних размеров зерен 100 : 10 : 1.

Многочисленными экспериментальными исследованиями нами подтверждено, что именно в этом диапазоне зернового состава компонентов можно получать бетоны с требуемыми физико-механическими характеристиками при минимальном расходе цемента. Для проектирования составов бетона с использованием вышеприведенной закономерности по рациональному зерновому составу компонентов и использованием исходных материалов с различным зерновым составом нами разработаны технические условия ТУ У 26.6-30324948-001-2004. Применением изложенных в этих технических условиях методик можно определять рациональные

составы бетонов как расчетным, так и графическим методами. Исползованием этих методик при проектировании составов бетона с наполнителями из хвостов обогащения железных руд подтверждена их высокая эффективность. Полученные по этим методикам составы отличались повышенной экономичностью с высокой степенью эффективности использования цемента при обеспечении требуемых физико-механических характеристик бетона.

Одним из важных преимуществ предлагаемой нами методики определения рациональных составов бетонов является возможность предварительного анализа имеющихся компонентов для возможности получения из них бетонов с определенными физико-механическими характеристиками и рациональным эффективным расходом цемента в них. В качестве примера покажем возможности нашей методики для определения составов бетона с использованием гранитного отсева Рыбальского карьера. Зерновой состав этого отсева приведен в табл. 1.

Таблица 1

Зерновой состав гранитного отсева

| Остатки    | Диаметр отверстий сит, мм |       |       |      |       |      |       |
|------------|---------------------------|-------|-------|------|-------|------|-------|
|            | 5                         | 2,5   | 1,25  | 0,63 | 0,315 | 0,16 | дно   |
| Частные, г | 96,5                      | 159   | 202,5 | 139  | 151,5 | 98,5 | 153   |
| Частные, % | 9,65                      | 15,9  | 20,25 | 13,9 | 15,15 | 9,85 | 15,3  |
| Полные, %  | 9,65                      | 25,55 | 45,8  | 59,7 | 74,85 | 84,7 | 100,0 |

Модуль крупности гранотсева  $M_{кр} = 3$ , но в нем значительное количество мелкой пылевидной фракции, которая может создать проблемы для получения бетонов с высокими физико-механическими характеристиками. Однако многие исследователи отмечают, что для некоторых видов бетонов эта пылевидная составляющая может быть весьма полезной. Используя нашу методику проектирования составов бетона, определим, для каких конкретно видов бетона такой заполнитель можно использовать с наибольшей эффективностью.

Рассевом щебня Рыбальского карьера фракции 5...20 установлено, что 90 % его составляющих крупнее 1,25 мм, а 5 % проходит через сито 0,16 мм. Примерно половина пылевидной фракции щебня и гранотсева проходит через сито 008, т.е. соизмерима с частицами цемента.

Анализ зернового состава применяемых материалов для получения бетона показывает, что в них можно выделить три основные фракции. Наиболее мелкая фракция, которая проходит через сито 0,16 мм, к которой относится пылевидная фракция щебня, гранотсева и цемент, имеет средний размер зерен около 70 мкм

(0,07 мм). К средней фракции можно отнести зерна, которые прошли через сито 1,25 мм, но не прошли через сито 0,16, средний размер зерен этой фракции около 0,6 мм. А к крупной фракции относятся остальные зерна, которые проходят через сито 20 мм, но не проходят через сито 1,25 мм. Следовательно, их средний размер около 8 мм. Таким образом, при таком условном разделении на фракции соотношение средних размеров зерен выделенных крупной, средней и мелкой фракций составит: 114 : 8,6 : 1. Это соотношение по размерам зерен фракций несколько отличается от вышеприведенного рационального, однако может быть принятым. Проведенными нами ранее исследованиями установлено, что смесь с таким соотношением по размерам зерен фракций и обеспечением рационального соотношения по количеству уплотняется примерно так же, как и при наиболее рациональном соотношении по размерам 100 : 10 : 1. При таком разделении на фракции в составе гранотсева (см. табл. 1) крупной фракции с размером зерен более 1,25 мм 45,8 %, средней с размером зерен более

0,16 мм и менее 1,25 мм 38,9 % и мелкой с размером зерен менее 0,16 мм 15,3 %.

Но можно рассмотреть и другой вариант соотношения размеров выделенных трех фракций. К наиболее мелкой фракции следует отнести те же зерна, которые проходят через сито 0,16, средний размер зерен около 70 мкм (0,07 мм). А к средней фракции можно отнести зерна, которые прошли через сито 2,5 мм, но не прошли через сито 0,16, средний размер зерен этой фракции около 1,07 мм. А к крупной фракции относятся остальные зерна, которые проходят через сито 20 мм, но не проходят через сито 2,5 мм. Следовательно, их средний размер около 9 мм. Таким образом, при таком условном разделении на фракции соотношение размеров выделенных крупной, средней и мелкой фракций составит: 128 : 15 : 1. Такое соотношение размеров зерен фракций более существенно отличается от рационального, но также приемлемо, так как при обеспечении рационального соотношения по количеству уплотняется примерно так же, как и при наиболее рациональном соотношении по размерам 100 : 10 : 1. При таком втором варианте деления на фракции в составе гранотсева (см. табл. 1) крупной фракции с размером зерен более 2,5 мм 25,55 %, средней с размером зерен более 0,16 мм и менее 2,5 мм 59,15 % и мелкой с размером зерен менее 0,16 мм 15,3 %.

Чтобы определить рациональный расход каждого из применяемых материалов из условия обеспечения рационального зернового состава компонентов, обеспечивающего минимальную пустотность смеси, воспользуемся разработанным нами ранее графическим методом с помощью треугольника Ферре. Такой треугольник с координатами количества каждой из крупной, средней и мелкой фракций изображен на рис. 1.

Точка Р и заштрихованная вокруг нее площадь находится в координатах рационального зернового состава компонентов бетонной смеси – при количественном соотношении фракций (по абсолютным объемам) крупной, средней и мелкой равном 52 : 23 : 25 %. При обеспечении этого соотношения (с изменением в пределах 3...4 %) и минимальном расходе цемента обеспечиваются наилучшие физико-механические характеристики затвердевшего бетона при прочих равных условиях (одинаковых удобоукладываемости, интенсивности уплотнения и т.д.).

Нанесем на этот треугольник точки с соответствующими координатами, отражающими зерновой состав каждой составляющей бетонной смеси. Точка Ц отражает координатную точку цемента, который на 100 % состоит из зерен, отнесенных по нашей вышеприведенной

градации к мелкой фракции. Точка Щ отражает координатную точку щебня, в составе которого по нашей вышеприведенной градации 90 % крупной, 5 % средней и 5 % мелкой фракций. Точка Г<sub>1</sub> отражает координатную точку гранотсева, в составе которого по первому варианту вышеприведенной градации количественное соотношение крупной к средней и к мелкой фракций составляет, соответственно, 45,8 : 38,9 : 15,3. А точка Г<sub>2</sub> отражает координатную точку гранотсева, в составе которого по второму варианту вышеприведенной градации количественное соотношение крупной к средней и к мелкой фракций составляет соответственно 25,55 : 59,15 : 15,3.

Используя методику графического определения рационального зернового состава компонентов бетонной смеси, изложенную в ТУ У 26.6-30324948-001-2004, определим рациональный расход каждого из используемых материалов по первой их вышеприведенных градаций количественного соотношения крупной к средней и к мелкой фракций гранотсева. Из соотношения длин отрезков Г<sub>1</sub>С<sub>1</sub> : С<sub>1</sub>Щ, равном 1 : 1,67, определяем, что на одну часть гранотсева необходимо 1,67 частей щебня. А из соотношения длин отрезков С<sub>1</sub>Р : РЦ, равном 1 : 5,64, определяем, что на одну часть цемента необходимо 5,64 частей смеси гранотсева со щебнем с вышеприведенным их количественным соотношением.

Следовательно, на одну часть цемента необходимо 2,11 частей гранотсева и 3,53 частей щебня (Ц : Г : Щ = 1 : 2,11 : 3,53). Таким образом, если в кубометре бетона около 2240 кг сухих компонентов, то рациональный расход используемых материалов из условий минимальной пустотности смеси составит: цемента 337 кг, гранотсева 712 кг, щебня 1191 кг.

Возможное изменение расхода используемых материалов с рациональным зерновым составом компонентов (в пределах заштрихованной на рис 1 зоны вокруг точки Р) также определим графическими построениями. Из соотношения длин отрезков С<sub>1</sub>Р<sub>1</sub> : Р<sub>1</sub>Ц определяем, что на одну часть цемента необходимо 7,45 частей смеси гранотсева со щебнем с вышеприведенным их количественным соотношением 1 : 1,67. Следовательно, на одну часть цемента необходимо 2,79 частей гранотсева и 4,66 частей щебня (Ц : Г : Щ = 1 : 2,79 : 4,66). Таким образом, если в кубометре бетона около 2240 кг сухих компонентов, то рациональный расход используемых материалов из условий минимальной пустотности смеси составит: цемента 265 кг, гранотсева 740 кг, щебня 1235 кг. А из соотношения длин отрезков С<sub>1</sub>Р<sub>2</sub> : Р<sub>2</sub>Ц определяем, что на одну часть цемента необходимо

4,47 частей смеси гранотсева со щебнем с вышеприведенным их количественным соотношением 1 : 1,67. Следовательно, на одну часть цемента необходимо 1,67 частей гранотсева и 2,8 частей щебня ( $\text{Ц} : \text{Г} : \text{Щ} = 1 : 1,67 : 2,8$ ). Та-

ким образом, если в кубометре бетона около 2240 кг сухих компонентов, то рациональный расход используемых материалов из условий минимальной пустотности смеси составит: цемента 410 кг, гранотсева 685 кг, щебня 1145 кг.

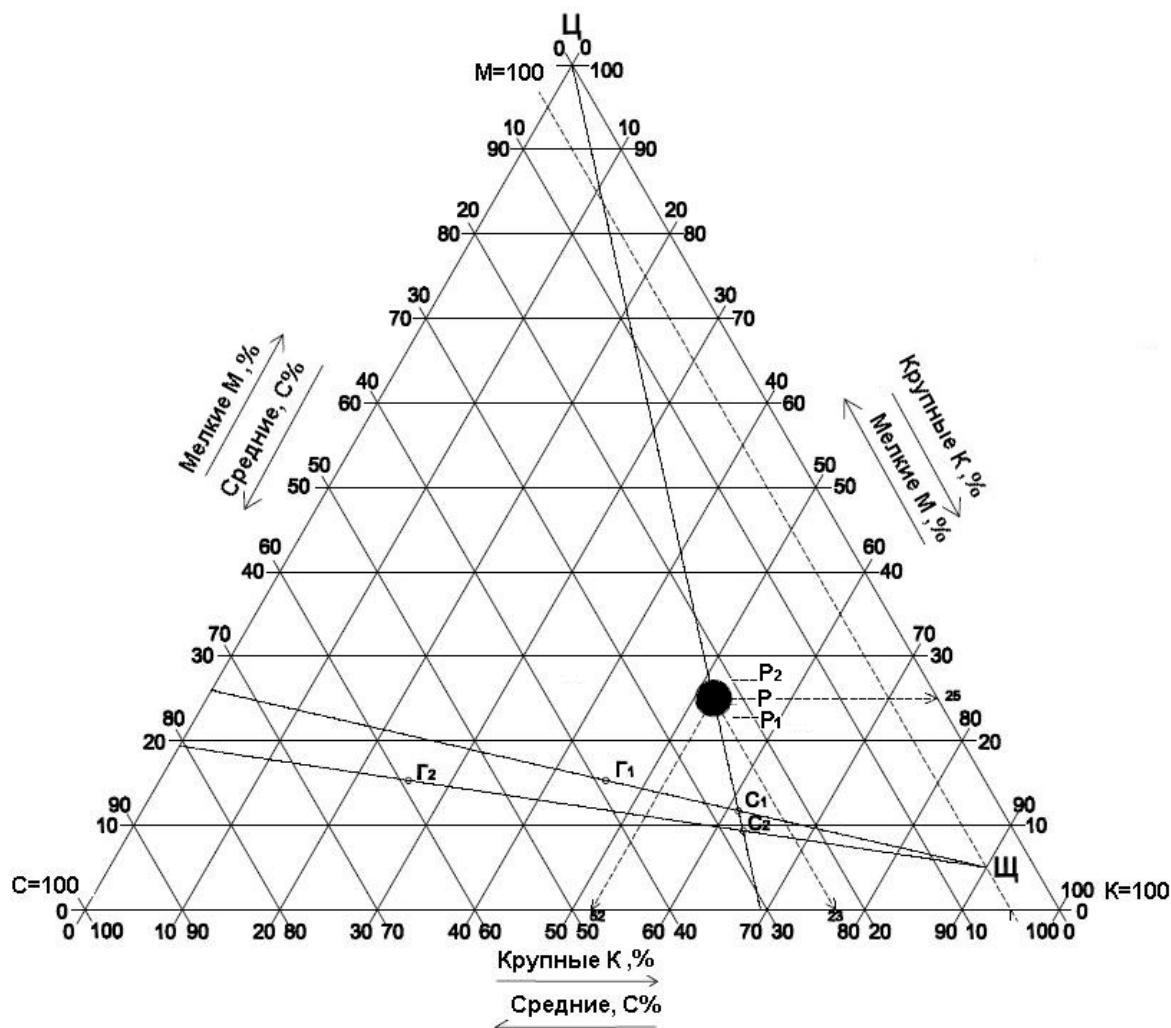


Рис. 1. Равносторонний треугольник Ферре с координатными точками используемых материалов и их смесей

Аналогичными построениями, используя треугольник Ферре, определим рациональный расход каждого используемого материала по второй из вышеприведенных градаций количественного соотношения крупной к средней и к мелкой фракций гранотсева, которое составляет 25,55 : 59,15 : 15,3. В этом варианте точка  $\Gamma_2$  отражает соответствующую координатную точку гранотсева. Из соотношения длин отрезков  $\Gamma_2\text{С}_2 : \text{С}_2\text{Щ}$ , равном 1,16 : 1, определяем, что на одну часть щебня необходимо 1,16 частей гранотсева. А из соотношения длин отрезков  $\text{С}_2\text{Р} : \text{РЦ}$ , равном 1 : 4,94, определяем, что на одну часть цемента необходимо 4,94 частей смеси гранотсева со щебнем с вышеприведенным их количественным соотношением 1,16 : 1. Следовательно, на одну часть цемента необхо-

димо 2,65 частей гранотсева и 2,29 частей щебня ( $\text{Ц} : \text{Г} : \text{Щ} = 1 : 2,65 : 2,29$ ). Таким образом, если в кубометре бетона около 2240 кг сухих компонентов, то рациональный расход используемых материалов из условий минимальной пустотности смеси составит: цемента 377 кг, гранотсева 1000 кг, щебня 863 кг.

Возможное изменение расхода используемых материалов с рациональным зерновым составом компонентов (в пределах заштрихованной на рис 1 зоны вокруг точки Р) также определим графическими построениями. Из соотношения длин отрезков  $\text{С}_2\text{Р}_1 : \text{Р}_1\text{Ц}$  определяем, что на одну часть цемента необходимо 5,86 частей смеси гранотсева со щебнем с вышеприведенным их количественным соотношением 1,16 : 1. Следовательно, на одну часть цемента

необходимо 3,15 частей гранотсева и 2,71 частей щебня ( $\text{Ц} : \text{Г} : \text{Щ} = 1 : 3,15 : 2,71$ ). Таким образом, если в кубометре бетона около 2240 кг сухих компонентов, то рациональный расход используемых материалов из условий минимальной пустотности смеси составит: цемента 326 кг, гранотсева 1030 кг, щебня 884 кг. А из соотношения длин отрезков  $\text{C}_2\text{P}_2 : \text{P}_2\text{Ц}$  определяем, что на одну часть цемента необходимо 3,8 частей смеси гранотсева со щебнем с вышеприведенным их количественным соотношением 1,16 : 1. Следовательно, на одну часть цемента необходимо 2,04 частей гранотсева и 1,76 частей щебня ( $\text{Ц} : \text{Г} : \text{Щ} = 1 : 2,04 : 1,76$ ). Таким образом, если в кубометре бетона около 2240 кг сухих компонентов, то рациональный расход используемых материалов из условий минимальной пустотности смеси составит: цемента 467 кг, гранотсева 953 кг, щебня 820 кг.

Полученные составы представим в табл. 2.

Таблица 2

**Рациональные составы бетона с гранотсевом из условий минимальной пустотности смеси**

| № состава                         | Расход компонентов, кг |      |      |
|-----------------------------------|------------------------|------|------|
|                                   | Ц                      | Щ    | Г    |
| Первый вариант фракций гранотсева |                        |      |      |
| 1                                 | 265                    | 1235 | 740  |
| 2                                 | 337                    | 1191 | 712  |
| 3                                 | 410                    | 1145 | 685  |
| Второй вариант фракций гранотсева |                        |      |      |
| 4                                 | 326                    | 884  | 1030 |
| 5                                 | 377                    | 863  | 1000 |
| 6                                 | 467                    | 820  | 953  |

Анализ представленных в табл. 2 составов показывает, что при полученной нами ранее эффективности использования цемента М400 в составах с рациональным зерновым составом компонентов бетонной смеси не менее 10 кг цемента на 1 МПа прочности бетона рационально получать бетоны классов от В 20 до В 40. Для бетонов более высокого класса прочности необходимы материалы с меньшим количеством пылевидных фракций, а более низкого – с большим количеством пылевидных фракций.

Полученные составы бетонов на основе разработанных нами теоретических предпосылок требуют экспериментальной проверки с тщательным изучением всего комплекса свойств затвердевшего бетона.

**Выводы**

1. Рациональные составы бетонов необходимо определять с учетом зернового состава компонентов, обеспечивая максимальную плотность бетона.
2. Необходимо проводить дальнейшие исследования по изучению свойств затвердевшего бетона, полученного из составов с рациональным зерновым составом компонентов бетонной смеси.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М.: Технопроект, 1998. – 768 с.
2. Сизов В. П. Проектирование составов тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1979. – 144 с.
3. Баженов Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов. – М.: Стройиздат, 1975. – 272 с.
4. Дворкин О. Л. Проектирование составов бетона. Основы теории и методологии. – Ровно: УГУВХП, 2003. – 266 с.
5. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
6. Вознесенский В. А. Численные методы решения строительного-технологических задач на ЭВМ / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Б. Л. Огарков. – К.: Вища школа, 1989. – 328 с.
7. Вознесенский В. А. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В. А. Вознесенский, В. Н. Выровой, С. В. Коваль, Т. В. Ляшенко и др.; Под ред. В. А. Вознесенского. – К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
8. Грушко И. М. Структура и прочность дорожного цементного бетона / И. М. Грушко, Н. Ф. Глушенко, А. Г. Ильин. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1965. – 135 с.
9. Берг О. Я. Высокопрочный бетон / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
10. Нетеса Н. И. Проблемы экономии цемента в бетонах введением рационального количества микронаполнителей // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. – Вып. 12. – Д.: Изд-во ПГАСА, 2001. – С. 301-305.
11. Нетеса Н. И. Влияние зернового состава компонентов на структуру, прочность и морозостойкость бетонов // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. – Вып. 16. – Д.: Изд-во ПГАСА, 2002. – С. 100-107.

Поступила в редколлегию 23.05.2008.