

## СНИЖЕНИЕ ПУСТОТНОСТИ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПОДБОРОМ РАЦИОНАЛЬНОГО ЗЕРНОВОГО СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ

Розглянуто проблеми ефективного використання заповнювачів і вторинних ресурсів промисловості в бетонах міцністю до 20 МПа, вирішення яких забезпечує економію цементу.

Изложены проблемы эффективного использования заполнителей и вторичных ресурсов промышленности в бетонах прочностью менее 20 МПа, решение которых обеспечивает экономию цемента.

The article deals with the tasks of efficient use of fillers and reusable industrial materials in the concretes with strength less than 20 MPa, the solution of which provides savings of cement consumption.

**Постановка проблеми.** Состав бетонной смеси определяет важнейшие свойства бетона и его экономичность. Применение общепризнанных методик, базирующихся на формировании системы четырех уравнений с последующим их решением и определением количества каждого из четырех основных компонентов, не обеспечивает эффективного использования цемента в бетонах. Особенно эта проблема актуальна для бетонов прочностью менее 20 МПа, а также в связи с появившейся в последние годы тенденцией модификации бетонов наполнителями и пластификаторами. А применение для транспортирования бетонных смесей на строительных площадках бетононасосов при существующих подходах к определению составов бетонных смесей по сути вынуждает строителей для обеспечения требуемой удобоукладываемости бетонных смесей значительно увеличивать расходы цемента. Это приводит к обострению весьма актуальных экологических, энергетических и экономических проблем [1].

**Анализ последних исследований и определение нерешенных проблем.** Проведенный нами анализ существующих методов определения составов многих композиционных материалов, сходных по свойствам с бетонами (силикальцитов, асфальтобетонов, керамических и др.), показал, что они принципиально отличаются от тех, которые применяются в бетоноведении [2–6]. Наши исследования подтвердили, что и для определения составов бетонов, как и вышеназванных композиционных материалов, необходимо учитывать тот рациональный зерновой состав компонентов, который может обеспечить наиболее высокую плотность смеси, а следовательно наименьшую дефектность затвердевшего бетона. Кроме того не декларативное, как это наблюдается в общепринятых методиках определения составов бетонных смесей, а реальное обеспечение рационального зернового состава компонентов предопределяет также и улучшен-

ную удобоукладываемость бетонных смесей при существенной экономии цемента, особенно для бетонов прочностью менее 20 МПа [7; 8].

**Цель проведенных исследований.** Разработать эффективную методику определения составов бетонных смесей с рациональным зерновым составом компонентов, обеспечивающим требуемые технологические характеристики бетонной смеси и свойства затвердевшего бетона при минимальном расходе цемента и требуемом количестве вторичных мелкозернистых продуктов промышленности.

**Основной материал исследований.** Анализ проведенных нами исследований показал, что как при наличии цемента в наиболее мелкой фракции, так и без него, пустотность смеси наименьшая при количественном соотношении фракций (по абсолютным объемам) крупной, средней и мелкой равном 52:23:25 %. С уменьшением мелкой фракции до 20 % и соответствующем пропорциональном увеличении содержания других фракций, пустотность смеси увеличивается незначительно. Но с увеличением мелкой фракции до 30 % и соответствующем пропорциональном уменьшении содержания других фракций, пустотность смеси увеличивается более существенно. При этом содержание цемента в составе наиболее мелкой фракции практически не влияет на пустотность смеси.

Проведенными экспериментальными исследованиями определены рациональные соотношения важнейших характеристик зернового состава компонентов бетонной смеси, обеспечивающие повышенную плотность ее минерального скелета. Но реальные характеристики применяемых в бетонах материалов, в том числе соотношение размеров зерен и их количество, минералогический состав могут существенно отличаться от полученных рациональных соотношений. Так, например, наиболее широко применяемый для бетонов в Украине песок состоит

в основном (примерно 85 %) из зерен крупностью более 0,14 и менее 0,63 мм, т. е. средним размером около 0,4 мм. В то же время применяемый для бетонов цемент состоит в основном из зерен средней крупностью 60...70 мкм, т. е. основная часть зерен примерно в 7 раз мельче зерен песка. Чтобы обеспечить соотношение размеров зерен этих компонентов 1:10, необходимо либо доизмельчить цемент, либо находить более крупный песок. Кроме цемента необходимо также наполнитель с таким же размером зерен, как у цемента.

Однако для помола песка до требуемой тонины, а также доизмельчения цемента требуются значительные энергозатраты. Поэтому, очевидно, в качестве наиболее мелкой составляющей целесообразно кроме цемента использовать вторичные тонкомолотые продукты, которые были измельчены ранее и не находят своего применения.

Для определения их основных характеристик по тонине помола нами проведен планированный эксперимент. Кодовые и натуральные значения переменных этого эксперимента с использованием в качестве наиболее мелкой составляющей хвостов обогащения железных руд приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Кодовые и натуральные значения переменных в эксперименте с хвостами обогащения железных руд**

Код	Натуральные значения		
	$W, \% (X_1)$	$V_m, \% (X_2)$	$D_c/d_m (X_3)$
-1	6,0	10	5
0	7,5	20	7,5
+1	9,0	30	10,0

Хвосты обогащения железных руд предварительно рассеяли на фракции, выделив три: мельче 40 мкм, 50...60 мкм и 80...90 мкм. Таким образом, в сочетании с зернами песка крупнее 0,14 мм – мельче 0,63 мм соотношение размеров зерен средней фракции к мелкой  $D_c/d_m (X_3)$  варьировали в пределах 10; 7,5; 5. А в качестве наиболее крупной использовали фракцию 3...5 мм, которую получили из гранотсева. Следовательно, соотношение размеров зерен крупной фракции к средней оставляли постоянным и равным 10:1 во всех вариантах. А количественное соотношение наиболее крупной фракции к средней во всех вариантах оставляли постоянным и равным 7:3. Содержание

наиболее мелкой фракции  $V_m, \% (X_2)$  варьировали в пределах 10...30 % от общей массы трехфракционной смеси. Варьировали также и влажностью смеси  $W, \% (X_1)$  в пределах 6...9 %.

Матрица плана эксперимента по трем вышеприведенным переменным представлена в табл. 2. В качестве оптимизируемого фактора принята пустотность минерального скелета за вычетом воды, используемой для увлажнения смеси. Уплотнение смеси проводили трамбованием по вышеприведенной методике.

Таблица 2

**Матрица плана трехфакторного эксперимента по оптимизации пустотности смеси с хвостами обогащения железных руд**

№ вариантов	$X_1 (W)$	$X_2 (V_m)$	$X_3 (D_3)$
1	+1	+1	-1
2	-1	+1	-1
3	0	0	-1
4	+1	-1	-1
5	-1	-1	-1
6	0	0	0
7	+1	0	0
8	-1	0	0
9	0	+1	0
10	0	-1	0
11	+1	+1	+1
12	-1	+1	+1
13	0	0	+1
14	+1	-1	+1
15	-1	-1	+1

Результаты статистической обработки этого эксперимента представлены в виде полинома (1).

$$Y(x_1, x_2, x_3) = 15,78 - 1,08x_1 - 0,77x_2 - 0,083x_3 + 2,9x_1^2 + 1,42x_2^2 + 2x_3^2 - 0,013x_1x_2 - 0,845x_1x_3 + 0,65x_2x_3 + 0,77x_1x_2x_3. \quad (1)$$

Для детального анализа, полученного по результатам планированного эксперимента уравнения регрессии (1), нами строились графические зависимости (номограммы) влияния исследуемых факторов на пустотность смеси. Некоторые наиболее характерные из них представлены ниже. На рис. 1 представлены зависимости пустотности трехкомпонентной смеси от влажности и соотношения диаметров средних и мелких ( $D_c/d_m$ ) зерен при содержании мелкой фракции 10 % (рис. 1, а) и 20 % (рис. 1, б).

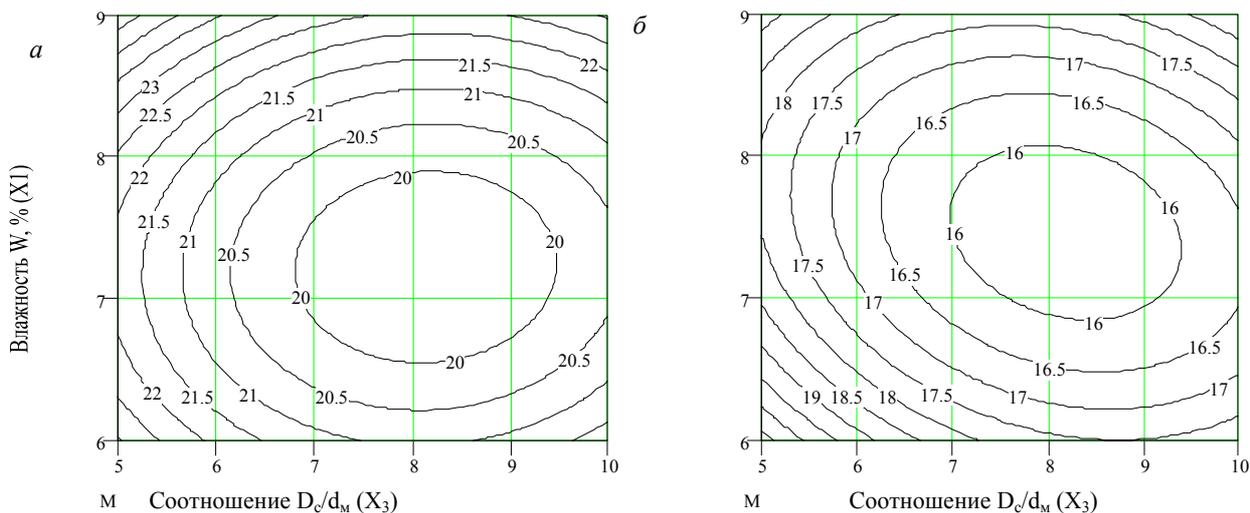


Рис. 1. Номограммы зависимости пустотности трехкомпонентных смесей от соотношения диаметров средней и мелкой фракций и влажности смеси при содержании мелкой фракции:  $a - 10\%$ ;  $b - 20\%$

Их анализ показывает, что по мере увеличения влажности в исследуемом диапазоне пустотность смеси сначала снижается и достигает минимума при влажности в пределах  $7...8\%$ . А при дальнейшем увеличении влажности пустотность смеси возрастает, достигая максимума равного  $24,5\%$  при максимальной влажности смеси  $9\%$  и минимальном соотношении диаметров средней и мелкой фракций равном  $5$ . Но при той же влажности и соотношении диаметров средней и мелкой фракций равном  $7$  и более пустотность равна около  $22,5\%$  (см. рис. 1,  $a$ ).

По мере увеличения соотношения диаметров средней и мелкой фракций пустотность смеси также уменьшается и достигает миниму-

ма при их соотношении большем  $7$ . Минимальная пустотность при постоянном содержании мелкой фракции обеспечивается практически при одинаковых значениях остальных исследуемых параметров – влажности  $7...8\%$ , соотношении диаметров средней и мелкой фракций более  $7$ . Но она существенно (на  $4\%$ ) меньше и равна  $16\%$  при содержании мелкой фракции  $20\%$  (см. рис. 1,  $b$ ), чем при ее содержании  $10\%$  (пустотность равна  $20\%$ , см. рис. 1,  $a$ ).

Зависимость пустотности от влажности и содержания мелкой фракции при постоянном соотношении диаметров средней и мелкой фракций равном  $5$  представлена на рис. 2,  $a$ ; равном  $7,5$  – на рис. 2,  $b$ .

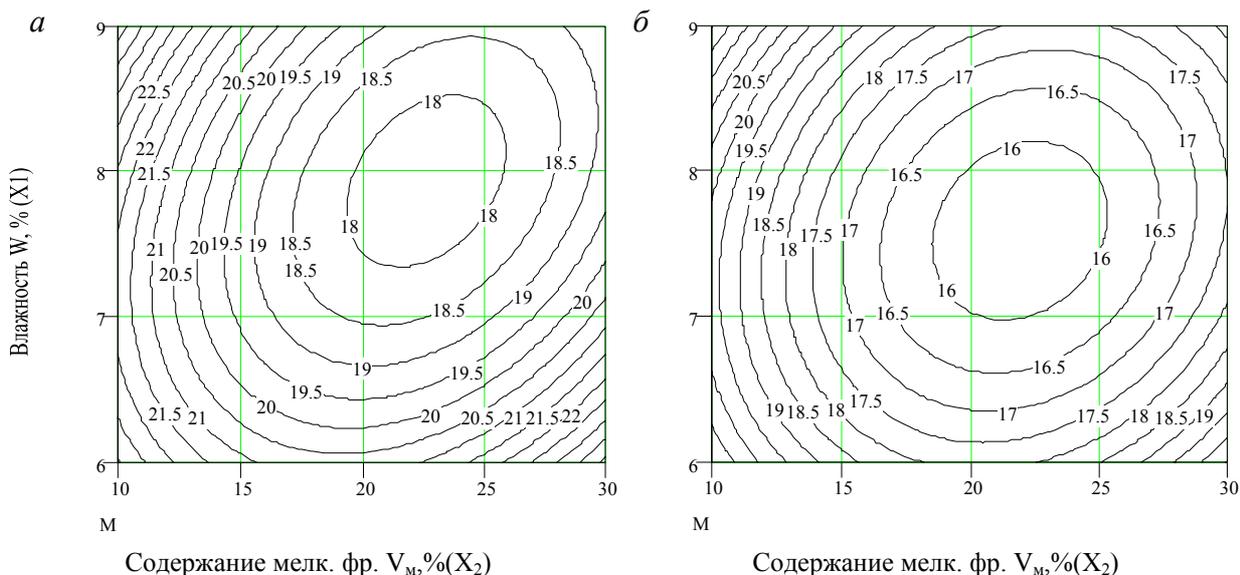


Рис. 2. Номограммы зависимости пустотности трехкомпонентных смесей от содержания мелкой фракции и влажности смеси при соотношении диаметров средней и мелкой фракции:  $a - 5$ ;  $b - 7,5$

Анализ представленных зависимостей позволяет определить следующие закономерности. При минимальном соотношении диаметров зерен средней и мелкой фракций равном 5, пустотность смеси уменьшается по мере увеличения влажности и достигает минимума (18 %) при влажности 7,5...8,5 % в диапазоне содержания мелкой фракции 20...25 %. А по мере дальнейшего увеличения влажности пустотность несколько увеличивается. Максимальная пустотность равная 24,5 % определена при влажности 9 %, минимальном содержании мелкой фракции 10 %, а также при влажности 6 % и максимальном содержании мелкой фракции 30 %, если соотношение диаметров средней и мелкой фракций равно 5 (см. рис. 2, а).

При соотношении диаметров средней и мелкой фракций равном 7,5 (см. рис. 2, б) минимальная пустотность ниже, чем в предыдущем варианте (см. рис. 2, а) на 2 % и составляет 16 % при влажности 7...8 %, содержании мелкой фракции 20...25 %. Примерно на 2 % ниже и максимальные значения пустотности, чем при соотношении диаметров средней и мелкой фракций равном 5, но они определены при одинаковых значениях влажности и содержания мелкой фракции.

Из трех исследуемых факторов наиболее существенное влияние на пустотность смеси оказывает содержание мелкозернистого компонента. При его изменении от 10 до оптимального значения около 25 % пустотность уменьшается на 3,5...4 % и составляет 16 % при оптимальном значении остальных факторов – влажности 7...8 %, соотношении средних диаметров зерен средней и мелкой фракций не менее 8. А при дальнейшем увеличении содержания мелкой фракции до 30 % пустотность увеличивается на 1,5 %. Характерно, что аналогичная закономерность изменения пустотности смеси в зависимости от изменения содержания мелкой фракции наблюдается и при неоптимальных значениях двух других переменных. Так, например, если соотношение диаметров средней и мелкой фракций равно 7,5 (близко к оптимальному), то при влажности 6 % пустотность смеси уменьшается от 21 до 17,5 % при увеличении содержания мелкой фракции от 10 до 20...25 %. А при дальнейшем увеличении содержания мелкой фракции и тех же значениях двух других переменных пустотность увеличивается до 20 % (см. рис. 2, б). Если влажность смеси равна 6 %, соотношение диаметров средней и мелкой фракции – 5, то по мере увеличения содержания мелкой фракции от 10 до 20 %

пустотность уменьшается от 23 до 20,5 %. А по мере дальнейшего увеличения содержания мелкой фракции до 30 % пустотность увеличивается до 24 % (см. рис. 2, а).

Менее существенно на изменение пустотности влияют две других исследуемых переменных. При изменении влажности от 6 до 7 % пустотность смеси уменьшается максимум на 2,5 % (см. рис. 1, а), а, в основном, как при оптимальных так и неоптимальных значениях других переменных, пустотность изменяется на 1,5...2 %. Примерно в тех же пределах изменяется пустотность и при изменении соотношения диаметров средней и мелкой фракций в исследуемых границах. Наиболее существенно (3 %) пустотность уменьшается при содержании мелкой фракции 20 %, влажности 6 % и увеличении соотношения диаметров средней и мелкой фракций от 5 до 9 (см. рис. 2, а). А во всех остальных вариантах изменения этого параметра изменение пустотности не превышает 2 %.

Весьма важной для практики производства бетонов является наблюдаемая закономерность плавного, постепенного увеличения и уменьшения пустотности по мере изменения всех исследуемых переменных. В довольно широком диапазоне их варьирования пустотность остается практически на одном уровне. Так, пустотность остается минимальной (см. рис. 1, 2) при изменении влажности смеси более чем на один процент (более 20 литров воды на кубометр смеси). Пустотность смеси также остается практически постоянной в довольно широком диапазоне содержания мелкой фракции от 19 до 26 % от общего содержания твердых компонентов, что составляет 120...150 кг/м<sup>3</sup> смеси (см. рис. 1, 2). Следовательно, возможное колебание этих параметров в процессе производства бетонов не приведет к резкому изменению плотности, а, вероятно, и других физико-механических характеристик бетонов. Но более существенное изменение, особенно уменьшение расхода мелкозернистого компонента до пятнадцати и менее процентов, что часто имеет место, особенно при производстве низкопрочных бетонов, может привести к существенному снижению пустотности смеси, следовательно, и важнейших характеристик затвердевшего бетона.

Как отмечалось ранее, соотношение диаметров смешиваемых средних и мелких фракций в исследуемом диапазоне наименее существенно влияет на пустотность смеси, но после его уменьшения до шести – семи раз и менее пустотность смеси начинает интенсивно снижаться. Поэтому в бетонных смесях наиболее важно

на оптимальном уровне поддерживать количество мелкой фракции и влажность смеси. А целесообразность выдерживания определенного соотношения диаметров средних и мелких фракций необходимо определять по результатам технико-экономических расчетов. Для этого необходимо продолжить экспериментальные исследования с поиском оптимальных соотношений исследуемых параметров не только по пустотности смеси, но также прочности и другим важнейшим характеристикам затвердевшего бетона. В этих экспериментах необходимо использовать полученные выше закономерности по влиянию зернового состава смеси на пустотность. Но продолжать экспериментальные исследования целесообразно с использованием реально применяемых для получения бетонов составляющих и режимов их формирования.

### Выводы

1. Для обеспечения повышенной плотности бетонных смесей и затвердевшего бетона необходимо обеспечивать рациональный зерновой компонентов.

2. Требуются дальнейшие исследования по обеспечению надежного перемешивания смесей с низкими расходами цемента, а также изучению долговечности таких бетонов и защите в них арматуры от коррозии.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Труды 1 Всероссийской конференции по бетону и железобетону «Бетон на рубеже третьего тысячелетия», проходившей 9...14 сентября 2001 г. В 3-х т. М.: НИИЖБ, 2001. – 1820 с.
2. Боженков П. И. Технология автоклавных материалов. – Л.: Стройиздат, 1978. – 368 с.
3. Хавкин Л. М. Технология силикатного кирпича. – М.: Стройиздат, 1982. – 384 с.
4. Попильский Р. Я. Прессование керамических порошков / Р. Я. Попильский, Ф. В. Кондрашов. – М.: Metallurgy, 1968. – 272 с.
5. Гуменский Б. М. Основные сведения из общего грунтоведения. – Л.: ЛИИЖТ, 1968. – 54 с.
6. Юшкевич М. О. Технология керамики / М. О. Юшкевич, М. И. Роговой. – М.: Наука, 1969. – 379 с.
7. Нетеса Н. И. Проблемы экономии цемента в бетонах введением рационального количества микронаполнителей // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. – Д.: Изд-во ПГАСА, 2001. - Вып. 12. - С. 301–305.
8. Нетеса Н. И. Влияние зернового состава компонентов на структуру, прочность и морозостойкость бетонов // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Д.: Изд-во ПГАСА. - 2002. - Вып. 16. – С. 100–107.

Поступила в редколлегию 14.11.2007.