

Чернышева Н. В., канд. техн. наук, доц.,  
Хархардин А. Н., д-р техн. наук, проф.,  
Эльян Исса Жамал Исса, аспирант,  
Дребезгова М. Ю., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## РАСЧЕТ И ПОДБОР ВЫСОКОПЛОТНОГО ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЗАПОЛНИТЕЛЯ И БЕТОНА НА ГИПСОВОМ КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ

naukavs@mail.ru

В настоящее время большой интерес представляют материалы на основе композиционных гипсовых вяжущих. При этом особое внимание уделяется модификации таких вяжущих тонкодисперсными наполнителями.

В работе были исследованы свойства композиционных гипсовых вяжущих в зависимости от вида вводимой активной минеральной добавки, полученной из характерных сырьевых материалов стран Ближнего Востока. Установлено, что наибольшими прочностными характеристиками обладают вяжущие с использованием бетонного лома по сравнению с составами на кварцевом песке и цеолитовом туфе.

**Ключевые слова:** композиционные гипсовые вяжущие, бетонный лом, цеолитовый туф, активная минеральная добавка

Прибрежные европейские и азиатские зоны Средиземного моря имеют богатейшие залежи плотного известняка. Плотный известняк ( $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ ) относится к карбонатным породам, имеет достаточную прочность ( $R_{сж} = 60-80 \text{ МПа}$ ) и может быть использован для получения пилёных строительных изделий: блоков, камней и кирпичей. Некондиционная часть его переработки в изделия – отходы дробления и отсева

представляют интерес использования их для строительства в качестве заполнителя и наполнителя в тяжелых бетонах на гипсовом композиционном вяжущем для ускоренного строительства малоэтажных зданий, в том числе в районах сейсмического и конфликтного разрушения [1,2]. Исходные данные для расчета и его результаты приведены в табл.1.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета высокоплотных зерновых составов смеси известнякового заполнителя и наполнителя

№ фр	Размер зерен, мм		Плотн. упаковки зерен, $\eta_p$	Зерновой состав					
	Расчет	Ситовой подбор		Класс $m=3$			Класс $m=6$		
				содерж. масс. ч	содерж. масс., доли	плотн. упаковки, $\sigma_p$	содерж. масс. ч	содерж. масс., доли	плотн. упаковки, $\sigma_p$
1	20-10	20-10	0,59	100	0,425	0,59	100	0,510	0,59
2	8,6-4,3	10-5	0,64	43(433)	0,183	0,624	-	-	-
3	3,7-1,9	5-2,5	0,56	48(47)	0,183	0,679	39	0,200	0,689
4	1,6-0,8	1,25-0,63	0,52	47(27)	0,125	0,737	-	-	-
5	0,7-0,35	0,63-0,31	0,53	42(15)	0,064	0,796	33	0,162	0,798
6	0,3-0,15	0,31-0,14	0,54	39(7)	0,03	0,850	24	0,122	0,873
7	0,13- 0,07	<0,14	0,56	-	-	-	-	-	-

\*В скобках приведены расходы, рассчитанные по формуле (1)

В расчетах предусматривается подбор такого высокоплотного состава твердой фазы, который обеспечит бы образование жесткого каркаса из зерен крупного заполнителя в бетоне и вовлечение его в работу при сжатии изделий и конструкций. Этому условию соответствует достаточно высокое содержание мелких фракций, прежде всего наименьшая величина коэффициента раздвижки (разъединения) зерен частицами каждой очередной вводимой в состав смеси мелкой фракции –  $\beta_n=1$ , а коэффициент раздвижки зерен в смеси вяжущим должен обеспечивать достаточную подвижность бетонной смеси.

В расчетах использовали методику, изложенную в работе [3], где принимают наиболее крупную фракцию зерен из имеющегося сырья и содержание ее в проектируемой смеси 100 массовых частей. Количество второй и каждой последующей фракции (в масс.ч.) вычисляют по формуле с учетом минимального расхода мелких фракций:

$$G_n = (1 - \sigma_{n-1}) \cdot (\eta_n / \sigma_{n-1}) \cdot \beta_n \cdot \sum_{i=1}^n G_i \quad (1)$$

где  $\sigma_{n-1}$  – плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из  $(n-1)$  фракций, так при  $n=2$ ,  $\sigma_1 = \eta_1$ ;  $\eta_n$  – плотность упаковки частиц в каждой очередной фракции.  $\beta_n=1$  – для умеренно подвижных

зернистых смесей;  $\beta_n = (\sigma_{n-1}/\eta_n)^{m-n}$ , где  $m=1,2,3$  для умеренно жестких смесей;  $\beta_n = \sigma_{n-1}/\eta_n$  – для подвижных полидисперсных смесей.

При  $\beta_2=1$  и  $\beta_2 = (\sigma_{n-1}/\eta_n)^{2-n}$  соответственно получим:

$$G_2 = (1 - 0,59)(0,64/0,59) \cdot 100 = 43 \text{ мас.ч. и}$$

$$G_2 = (1 - 0,59)(0,64/0,59) \cdot (0,59/0,64)^{2-2} \cdot 100 = 43 \text{ мас.ч.}$$

Плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из (n-1) фракций при введении в нее очередной мелкой фракции вычисляют по формуле:

$$\sigma_n = \sigma_{n-1} + (1 - \sigma_{n-1}) \cdot X_n / \beta_n \quad (2)$$

$\beta'_n = 1 \dots 1,01; 1,015; 1,02$  – для всех значений  $m$ .  $X_n$  – степень (полнота) заполнения свободного объема в смеси, состоящей из (n-1) фракций, при введении в нее каждой очередной фракции – берут из (табл. 2) в зависимости от принятого класса т системы и распределения зерен в проектируемом составе полидисперсной смеси относительного размера  $d_n / d_1$  второй фракции класса  $m$ .

$$d_n = (20 - 10) \cdot (1; 0,432; 0,187; 0,081; 0,035; 0,015; 0,0065 \dots) = 20 \dots 10;$$

$$8,64 \dots 4,32; 3,74 \dots 1,87; 1,62 \dots 0,81; 0,7 \dots 0,35; 0,3 \dots 0,15; 0,13 \dots 0,065 \text{ мм.}$$

Расчет заканчивают тогда, когда  $d_n \geq 0,14$  мм.

В данном случае смесь будет состоять из 6-ти фракций. Из этого распределения можно выделить классы  $m=6; m=9; m=12$ .

Так для классат  $m=6$  бимеем:  $d_n = 20 \dots 10$  мм;  $3,74 \dots 1,87$  мм;  $0,7 \dots 0,35$  мм. Смесь будет состоять из 3-х фракций, а при  $m=9$  – из 2-х...3-х фракций:

$$d_n = 20 \dots 10 \text{ мм; } 1,62 \dots 0,81; 0,13 \dots 0,65 \text{ мм.}$$

Плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из крупной фракции  $40 \dots 10$  мм и второй фракции с размером зерен  $10 \dots 5$  мм класса  $m=6$  будет, согласно (2), равно:

Величины  $X_n$  рассчитывают по числу бимодальных упаковок (связей) в смеси согласно схеме распределения зерен (частиц) по размерам.

Показатель  $m$  в выражении для  $\beta_n = (\eta_n)^{m-n}$ , позволяет регулировать количество промежуточных фракций по массе.

Класс системы распределения зерен в смеси  $m$  подбирают наиболее приемлемым для условий подвижности зернистой и бетонной смеси и имеющихся в наличии фракций заполнителя и наполнителя из закономерности общего вида:

$$d_n/d_1 = (0,2549/\eta_1)^{m(n-1)/3} \quad (3)$$

Так, для случайной упаковки зерен крупной фракции  $m=3$ , распределение в ней пустот и пор, заполняемых частицами соответствующих размеров будет следующим:

$$d_n/d_1 = (0,2549/0,59)^{(n-1)} = 1; 0,432; 0,187;$$

$$0,081; 0,0035; 0,015; 0,0065 \dots$$

Принимая размер наиболее крупной фракции 20-10 мм, а  $d_{1cp} = 15$  мм, получим:

$$\sigma_2 = \eta_1 + (1 - \eta_1) \cdot \varepsilon_2^2 \cdot \eta_2 = 0,59 + 0,41 \cdot 0,36^2 \cdot 0,64 = 0,624.$$

Количество третьей фракции согласно (1) потребуется:

при  $\beta_n = 1$ ,

$$G_3 = (1 - 0,624) \cdot (0,56/0,624) \cdot (100 + 42,7) = 48 \text{ мас.ч.}$$

при  $\beta_n = [\sigma_{n-1}/\eta_n]^{(2-3)}$ ,

$$G_3 = (1 - 0,624) \cdot (0,56/0,624) \cdot (0,624/0,56)^{2-3} \cdot 143 = 43 \text{ мас.ч.}$$

Плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из трех фракций согласно схеме их распределения при  $m=3$  будет равна:

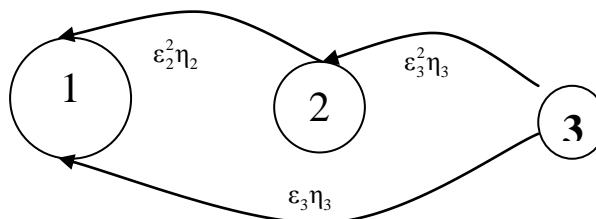


Рис.1. Распределение зерен в смеси, состоящей из 3-х фракций

$$X_3 = \varepsilon_2^2 \eta_2 + \varepsilon_3^2 \eta_3 + \varepsilon_3 \eta_3 / [n(n-1)/2] \alpha =$$

$$(0,36^2 \cdot 0,64 + 0,44^2 \cdot 0,56 + 0,44 \cdot 0,56) / 3 = 0,1459$$

Плотность упаковки частиц в смеси, состоящей из 3 фракций:

при  $\beta_4 = 1$ ,

$$G_4 = (1 - 0,679) \cdot (0,52/0,679) \cdot (100 + 42,7 + 48) = 47 \text{ мас.ч.}$$

при  $\beta_4 = (\sigma_{n-1}/\eta_4)^{2-4}$ ,

$$G_4 = (1 - 0,679) \cdot (0,52/0,679) \cdot (0,679/0,52)^{2-4} \cdot (100 + 43 + 43) = 27 \text{ мас.ч.}$$

$$\sigma_3 = 0,624 + (1 - 0,624) \cdot 0,1459 = 0,679$$

Количество четвертой фракции требуется:

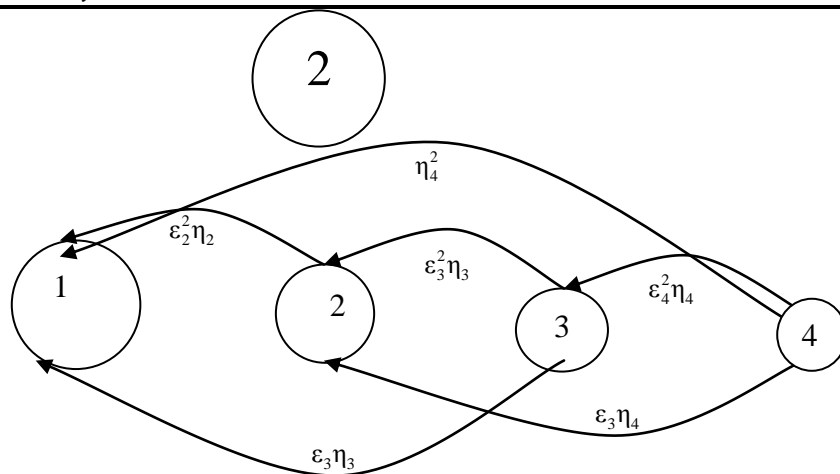


Рис. 2. Распределение зерен в смеси, состоящей из 4 фракций

$$X_4 = (0,36^2 \cdot 0,64 + 0,44^2 \cdot 0,56 + 0,48^2 \cdot 0,52 + 0,440,56 + 0,480,52 + 0,52^2) / [4(4-1)/2] = 0,1796$$

Плотность упаковки частиц в смеси, состоящей из 4 фракций:

$$\sigma_4 = 0,679 + (1 - 0,679) \cdot 0,1796 = 0,737$$

Количество пятой фракции потребуется:

при  $\beta_5 = 1$ ,

$$G_5 = (1 - 0,737) \cdot (0,53 / 0,737) \cdot (191 + 47) = 45 \text{ мас.ч.}$$

при  $\beta_5 = (\sigma_{n-1} / \eta_5)^{2-5}$ ,

$$G_5 = (1 - 0,737) \cdot (0,53 / 0,737) \cdot (0,737 / 0,53)^{2-5} \cdot (100 + 43 + 43 + 27) = 15 \text{ мас.ч.}$$

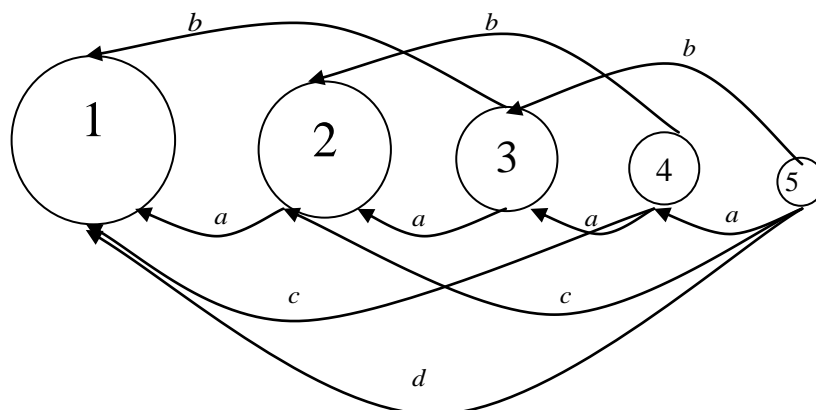


Рис. 3. Распределение частиц в смеси, состоящей из 5 фракций

$$X_5 = (0,1796 + \varepsilon_5^2 \eta_5 + \varepsilon_5 \eta_5 + \eta_5^2 + \eta_5) / [n(n-1)/2] = (1,0776 + 0,47^2 \cdot 0,53 + 0,47 \cdot 0,53 + 0,53^2 + 0,53) / 10 = 0,2255$$

Плотность упаковки частиц в смеси, состоящей из пяти фракций:

$$\sigma_5 = 0,737 + (1 - 0,737) \cdot 0,2255 = 0,796$$

Количество шестой фракции потребуется:

при  $\beta_6 = 1$ ,

$$G_6 = (1 - 0,796) \cdot (0,54 / 0,796) \cdot (191 + 47 + 45) = 39 \text{ мас.ч.}$$

при  $\beta_6 = (\sigma_{n-1} / \eta_6)^{2-6}$ ,

$$G_6 = (1 - 0,796) \cdot (0,54 / 0,796) \cdot (0,796 / 0,54)^{2-6} \cdot (186 + 27 + 15) = 7 \text{ мас.ч.}$$

Схема распределения зерен в смеси не приводится.

$$X_6 = 10 \cdot 0,2255 + \varepsilon_6^2 \eta_6 + \varepsilon_2^2 \eta_2 + \varepsilon_6 \eta_6 + \eta_6^2 + \eta_6 = 2,255 + 0,46^2 \cdot 0,56 + 0,460,54 + 0,54^2 + 0,54 + 0,54 = 0,2659$$

Плотность упаковки частиц в смеси, состоящей из 6 фракций:

$$\sigma_6 = 0,796 + (1 - 0,796) \cdot 0,2659 = 0,850$$

$$\sigma_6 = 0,850 / 1,03 = 0,825$$

Для создания жесткого каркаса из зерен крупного заполнителя в формуле (1) для  $\beta_n$  использован показатель степени  $n_1 - n$ , которым ре-

гулируется ( $m=2$ ) - снижение при этом расхода мелких фракций, имеющих повышенную удельную поверхность и привносящих дефекты в структуру бетона. Расход по объему пластического теста из гипсового композиционного вяжущего с учетом раздвижки зерен

$\alpha_3=1,05\dots1,331$  в зависимости от подвижности  $1\text{ м}^3$  бетонной смеси при  $V/T=0,45$  будет равен:  
 $V=1-0,85/(1,06\dots1,331)=0,20\dots0,36\text{ м}^3$   
 $m_{КГВ}=(0,2\dots0,36) \cdot \rho_r=(0,2\dots0,36)\text{ м}^3$

1950кг=390...702 кг  
 где  $\rho_m$  – плотность гипсового композиционного теста при  $V/T=0,45$

Таблица 2

Класссистемы $m$	<1	1	2	3	4	4,5	5
$\Psi_{i,j}^{(m)}$	$\varepsilon_i^3 \eta_i^3$	$\varepsilon_i^2 \eta_i^3$	$\varepsilon_i^2 \eta_i^2$	$\varepsilon_i^2 \eta_i$	$\varepsilon_i^2$	$\varepsilon_i \eta_i^2$	$\varepsilon_i^{3/2} \cdot (\varepsilon_i^2 \eta_i)$
$\Psi_{i,j}^{(m)}$	0,012	0,033	0,052	0,080	0,123	0,148	0,189
$d_n / d_1$	$\leq 0,73$	0,73	0,54	0,39	0,29	0,25	0,21
Класссистемы $m$	6	7	8	9	10	11	12
$\Psi_{i,j}^{(m)}$	$\varepsilon_i \eta_i$	$\varepsilon_i \eta_i^{3/2}$	$\varepsilon_i$	$\eta_i^2$	$\eta_i^{3/2} (\varepsilon_i / \eta_i)$	$1 - \eta_i^2$	$\eta_i$
$\Psi_{i,j}^{(m)}$	0,297	0,290	0,35	0,422	0,524	0,578	0,65
$d_n / d_1$	0,15	0,11	0,08	0,06	0,04	0,03	0,02

Степень заполнения свободного объема в слое крупных частиц в бимодальных упаковках частицами мелкой фракции в зависимости от класса системы  $m$  и ее относительного размера

Расчет зернового состава полидисперсной смеси заполнителя и наполнителя класса  $m=6$  системы распределения зерен. Расчет производился по выше изложенной методике.

Количество второй фракции с размером зерен 3,74...1,87 мм (5...2,5 мм) потребуется:

$$G_2=(1-0,59) \cdot 0,56/0,59 \cdot 100=39\text{ мас.ч.}$$

$$X_3=\varepsilon_2 \eta_2 + \varepsilon_3 \eta_3 + \eta_3 / n(n-1)/2=(0,59 \cdot 0,41 + 0,56 \cdot 0,44 + 0,56)/3=0,349$$

$$\sigma_3=0,689 + (1-0,689) \cdot 0,349=0,798$$

Таким образом, плотность упаковки зерен в смеси из трех фракций класса  $m=6$  несколько больше, чем класса  $m=3$  (где  $\sigma_3=0,679$ ).

Примем в расчет 4-ю фракцию с размером зерен 0,3...0,15 мм (0,315...0,14 мм). Количество ее потребуется:

Плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из 2-х фракций 20...10 мм и 3,74...1,87 мм (5...2,5 мм) при  $\beta_2=1$  и  $m=3$  будет равна:

$$\sigma_2=\sigma_1 + (1-\sigma_1) \cdot \varepsilon_2 \eta_2=0,59+0,41 \cdot 0,41 \cdot 0,59=0,689$$

Количество третьей фракции с размером зерен 0,7...0,35 (0,63...0,315) мм потребуется:

$$G_3=(1-0,689) \cdot (0,53/0,63)^{2-3} \cdot (100+39)=33\text{ мас.ч.}$$

$$\text{при } \beta_n=1, G_3=(1-0,689) \cdot (0,53/0,63) \cdot (100+39)=36,4\text{ мас.ч.}$$

Плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из первых двух предыдущих и третьей фракции с размером 3,74...1,87 (5...2,5 мм) будет равна:

$$G_4=(1-0,686) \cdot (0,54/0,686)^{2-4}$$

$$(100+39+33)=24\text{ мас.ч.}$$

$$\text{при } \beta_n=1, G_4=(1-0,686) \cdot (0,54/0,686)$$

$$(100+39+33)=42\text{ мас.ч.}$$

Степень заполнения свободного объема в смеси при этом будет равна согласно схеме распределения:

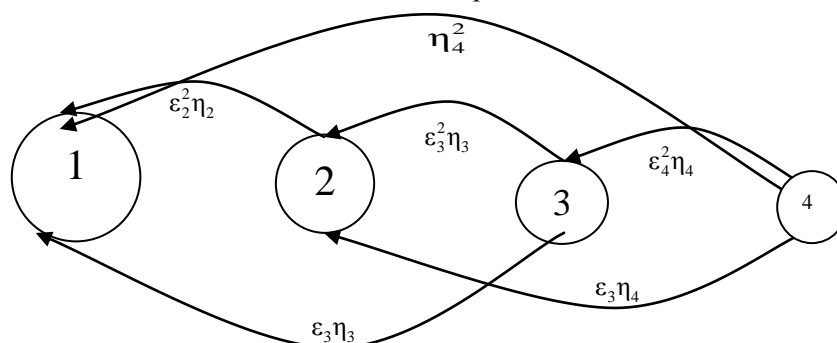


Рис. 4 Распределение зерен в смеси, состоящей из 4 фракций:

$$X_4=(\varepsilon_2 \eta_2 + \varepsilon_3 \eta_3 + \varepsilon_4^2 \eta_4 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5) / [n(n-1)] / [4(4-1)/2] =$$

$$=0,44 \cdot 0,56 + 0,53 \cdot 0,47 + 0,54 \cdot 0,46^2$$

$$=0,56+0,53+0,54/[4(4-1)/2]=0,3737$$

$$\sigma_4=0,798+(1-0,798) \cdot 0,3737=0,8735$$

При введении в полидисперсную смесь, состоящую из 3-х фракций класса  $m=6$  четвертую фракцию с размером зерен 0,315-0,14 мм клас-

сам=3, плотность упаковки возрастает до  $(0,8735/1,015)=0,860$

Тогда объем пластического теста из гипсового композиционного вяжущего на  $1\text{ м}^3$  бетонной смеси будет равен:

$$V=1-0,860/(1,06\dots1,331)=0,176\dots0,344\text{ м}^3$$

Результаты расчета сведены в табл.1.

Состав и свойства бетона с высокоплотной упаковкой заполнителя представлены в табл. 3-

Таблица 3

Состав бетона с высокоплотной упаковкой заполнителя

Фракции, мм	Масса заполнителя для образцов размером 10x10x10 см			Расход КГВ ( кг) на один куб размером 10x10x10 см, кг	В/В <sub>яж</sub>	Добавка, %
	1*	2*	3*			
10-5	0,850	0,850	0,850	400	0,6	0,3
5-2,5	0,465	0,365	0,365	400	0,6	0,3
2.5-0,63	0,408	0,408	0,365	400	0,6	0,3
0.63-0,315	0,400	0,348	0,230	400	0,6	0,3
0.315-0,14	0,380	0,146	0,130	400	0,6	0,3
<0.14	0,325	0,06	0,060	400	0,6	0,3

Примечание: 1- при  $\beta_n=1$ ; 2- усредненный состав; 3- при  $\beta_{6-}=(\sigma_{n-1}/\eta_n)^{m-n}, m=2$ .

На основании проведенных расчетов, для подтверждения целесообразности использования высокоплотной упаковки заполнителя изготавливались из бетонной смеси Ж35 с, которые после твердения в нормальных условиях испытывали на сжатие в возрасте 7 и 28 суток. Отно-

сительные величины В/В<sub>яж</sub> отношений рассматривали совместно с конкретными расходами КГВ и воды, обеспечивающими требуемую подвижность бетонной смеси и слитную мелкозернистую структуру бетона [ 4 ].

Таблица 4

Свойства бетона с высокоплотной упаковкой заполнителя

Заполнитель	$\rho_{б-на}$ кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{уп}$	Прочность образцов, МПа	
			7 сут	28 сут
Естественного состава	2285	0,68	11,0	23,6
Расчетного состава	2340	0,83	13,63	29,4

Результаты испытания бетонных образцов на прочность при сжатии приведены в табл.5.

Таблица 5

Составы тяжелого бетона на известняковом щебне

Требуемая марка бетона	Удобукладываемость, с	Фактическая средняя плотность кг/м <sup>3</sup>	Фактический расход материалов на 1 м <sup>3</sup> , кг					Плотность, кг/м <sup>3</sup>	
			КГВ	Щебень известняковый	Песок кварцевый	вода	добавка	Прочность при сжатии, Мпа через	
								1 сутки	28 суток
100	35	2310	340	1200	590	180	-	<u>2290</u> 7,5	<u>2230</u> 10,5
100	35	2285	340	1200	590	155	0,3	<u>2275</u> 9,5	<u>2240</u> 19,0
150	35	2305	400	1200	350	175	-	<u>2260</u> 8,0	<u>2220</u> 15,2
150	35	2285	400	1200	350	155	0,3	<u>2245</u> 11,0	<u>2240</u> 23,6
150	35	2340	400	1200	350	155	0,3	<u>2285</u> <u>13,63</u>	<u>2260</u> <u>29,4</u>
200	35	2315	500	1100	350	185	-	<u>2290</u> 11,5	<u>2215</u> 20,5
200	35	2295	500	1100	350	165	0,3	<u>2210</u> 15,0	<u>2210</u> 32,0

Таким образом, анализируя результаты испытаний, можно отметить, что прочность образцов с плотнейшей упаковкой частиц на 24 % выше, чем у образцов, приготовленных традиционным способом. Величина коэффициента разьединения частиц в смеси  $\beta_n = (\sigma_{n-1}/\eta_n)^m$  позволяет при  $m < 3$  регулировать расход второй и третьей крупных фракций и снижать при этом расход мелких.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород: – М.: Изд. АСВ, 2006. 526 с.
2. Лесовик В.С., Чернышева Н.В. Быстро-твердеющие композиты на основе водостойки гипсовых вяжущих // Белгород, Изд. БГТУ, 2011. 123 с.
3. Хархардин А.Н., Топчиев А.И. Тяжелый бетон с плотным структурным каркасом заполнителя // Известия Вузов. Строительство. 2001. №4. С.51 – 59.
4. Влияние минеральных добавок различного генезиса на микроструктуру гипсоцементного камня / Н.В. Чернышева, М.С. Агеева, Эльян-Исса-Жамал-Исса, М.Ю. Дребезгова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С.12– 18.