

Сулейманова Л. А., канд. техн. наук, проф.,  
Лесовик В. С., д-р техн. наук, проф.,  
Хархардин А. Н., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

## ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ НЕАВТОКЛАВНЫХ ЯЧЕЙСТЫХ БЕТОНОВ\*

[ludmilasuleimanova@yandex.ru](mailto:ludmilasuleimanova@yandex.ru)

Представлены топологические свойства полидисперсных композиционных вяжущих, обладающих особой гранулометрией с высокоплотной упаковкой частиц. Использование разработанных вяжущих обеспечивает повышение эффективности производства неавтоклавных ячеистых бетонов.

**Ключевые слова:** топологические свойства, композиционное вяжущее, неавтоклавные ячеистые бетоны

Производство неавтоклавных ячеистых бетонов с улучшенными эксплуатационными свойствами возможно за счет управления процессами структурообразования в твердеющей системе с эффективным композиционным вяжущим. Улучшенная поровая структура ячеистого бетона достигается за счет полимодального распределения пор по размерам, уменьшения их диаметра, уменьшения толщины и увеличения прочности межпоровой перегородки, а также снижения дефектности структуры. Но это затруднено при

существующих технологиях с применением традиционных вяжущих – портландцементов марок ЦЕМ I 42, 5 Н и ЦЕМ I 32, 5 Н, которые по геометрическим параметрам составляющих их частиц не соответствуют структурным показателям высококачественного неавтоклавного газобетона, для которого максимальный размер зерна цемента должен находиться на уровне менее 30 мкм во избежание нарушения целостности перегородки и снижения ее несущей способности (рис. 1) [1].

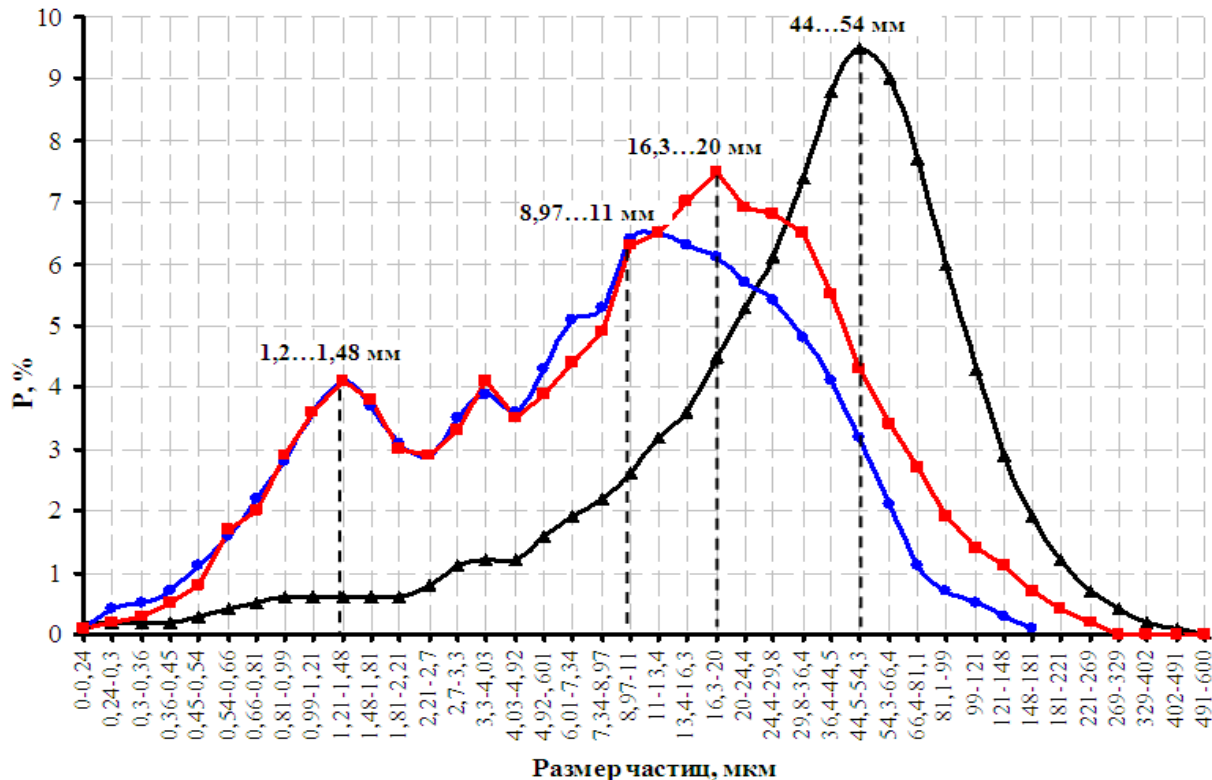


Рис. 1. Распределение частиц по размерам вяжущих:

- ▲ – портландцемент;
- – композиционное вяжущее с отсевами дробления кварцитопесчаника;
- – композиционное вяжущее с перлитом

Другим недостатком традиционных цементов, применяемых при производстве неавтоклавных ячеистых бетонов, является низкая степень их гидратации, которая является следствием плохой закристаллизованности продуктов гидратации и может быть причиной дефектной структуры и, в целом, низких показателей качества.

Поэтому для оптимизации структуры неавтоклавного ячеистого бетона требуются полидисперсные композиционные вяжущие с активными минеральными материалами, тонкодисперсной гранулометрией частиц, регулируемые коллоидно-химическими свойствами суспензий на их основе, интенсивными процессами гидратации клинкерных минералов и высокими физико-механическими характеристиками.

Нами создавались композиционные вяжущие на различных сырьевых компонентах – кварцсодержащих, кремнеземсодержащих и техногенных песках. Рациональность использования техногенных песков заключается в выборе кремнеземистых компонентов с повышенным содержанием минерало-образующей среды, газовоздушных включений, дефектов кристаллической решетки, которые в процессе добычи и дезинтеграции сырья, воздействия физических полей, обогащения и при помоле совместно с клинкером и пластификаторами трансформируются в

активные минеральные добавки. Последние интенсифицируют процессы гидратации клинкерных минералов и создают оптимальную структуру композита.

Повышение эффективности производства композиционных вяжущих достигалось применением различных добавок-интенсификаторов, рациональным подбором ингредиентов и порядком их введения, а также совершенствованием морфологии и характера поверхности частиц. Существенное отличие наблюдается по форме и морфологии поверхности частиц кварца техногенных песков в отличие от природного кварцевого песка. Если у природного кварцевого песка форма круглая, с гладкой поверхностью зерен, то у техногенного песка форма угловатая, с высокоразвитой поверхностью зерен. Это не могло не сказаться и на активности поверхности отсевов дробления кварцитопесчаника. Гранулометрия и форма зерен ингредиентов оказывают влияние на плотность межпоровых перегородок и степень использования новообразований, а, в конечном счете, на свойства композита [2–4].

Из результатов гранулометрического анализа композиционных вяжущих и портландцемента на микросайзере выделим размеры и содержание микрочастиц в точках максимумов кривой (рис. 2) и рассчитаем средние и относительные их размеры (табл. 1).

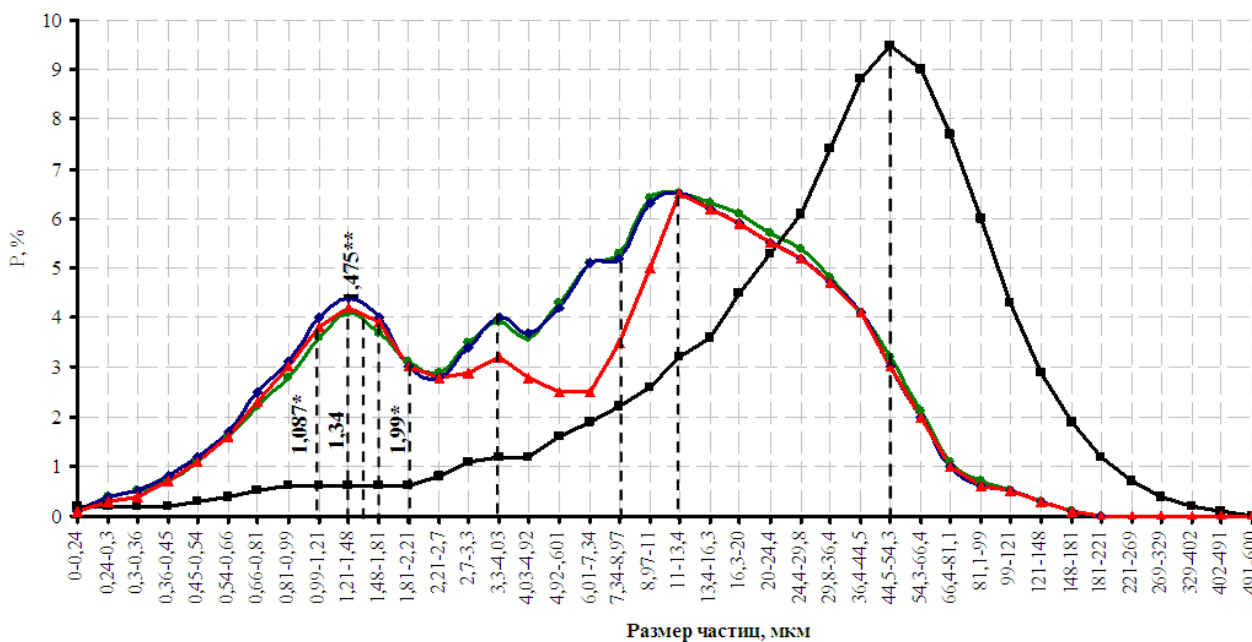


Рис. 2. Распределение частиц вяжущих по размерам:

— композиционное вяжущее 1; — композиционное вяжущее 2 — цемент — расчетная кривая  
 \* – расчет при  $m = 2$ ; \*\* – усредненный

Таблица 1

**Средние и относительные размеры микрочастиц вяжущих**

Размеры и содержание частиц	$d_{cp}, dn/d_1$	Фактическое значение	Расчетное значение
$d_1 = 13,4 \dots 11$ мкм – 6,5 %	12,14 мкм	1,0	1,0
$d_2 = 7,34 \dots 8,97$ мкм – 5,4 %	6,64 мкм	0,547	0,547
$d_3 = 4,03 \dots 3,3$ мкм – 4 %	3,65 мкм	0,300	0,300
$d_4 = 1,48 \dots 1,21$ мкм – 4,4 %	1,34 мкм	0,11	0,164
	< 1,34 мкм	< 0,11	0,09
	Класс $m = 2$		

Согласно структурной топологии дисперсных систем, распределение частиц по размерам при высокой упаковке описывается выражением вида [5]:

$$\frac{d_2}{d_1} = \left( \frac{0,2549}{10\eta_1} \right)^{\frac{m}{3}(n-1)} ; \quad (1)$$

Из этого выражения для класса системы  $m = 2$  распределения частиц по размерам найдем плотность упаковки частиц крупной фракции  $d_{1cp} = 12,14$  мкм. Так для класса систем  $m \leq 3$

$$d_n / d_1^{\frac{1}{3}} = 0,547^{\frac{2}{3}} = 0,40456, \text{ тогда } \frac{2,549}{10\eta_1} = 0,40456,$$

отсюда  $\eta_1 = 0,63$ .

При этом реальное распределение частиц:

$$\frac{dn}{d_1} = \left( \frac{2,549}{10 \cdot 0,63} \right)^{\frac{2}{3}(n-1)} = 1,0; 0,547; 0,300; 0,164; 0,094.$$

Первые три результата  $\frac{dn}{d_1}$  имеют

абсолютную сходимость, тогда как усредненный размер четвертой и пятой фракции частиц незначительно смещен в область крупных

размеров:  $d_{cp} = (0,164 \cdot 0,09)^{\frac{1}{2}} \cdot d_1 = 1,475$  мкм,  $d_{cp} > d_{cф}$ ,  $1,475$  мкм  $>$   $1,34$  мкм.

На рис. 2 расчетный размер пятой фракции  $d_{cp} = 0,09 \cdot 12,14 = 1,087$  мкм смещен от фактического среднего размера частиц  $d_{cф} = 1,21 \dots 1,48$  мкм в область мелких размеров.

Таким образом, фактическое распределение частиц по размерам соответствует их высокоплотной упаковке.

Проведем анализ их содержания в смеси на соответствие высокоплотной упаковке.

Расход каждой фракции определяется по формуле:

$$G_n = (1 - \sigma_{n-1}) \frac{\eta_n}{\sigma_{n-1}} \beta_n \sum_{i=1}^{n-1} G_i, \quad (2)$$

где  $\eta_n$  – плотность упаковки частиц каждой фракции  $\eta_n < \eta_{n-1}$  определяется по усредненным данным в зависимости от  $\frac{dn}{d_1}$

( $\eta_1 = 0,63$ ;  $\eta_2 = 0,62$ ;  $\eta_3 = 0,61$ ;  $\eta_4 = 0,60$ );  $\sigma_{n-1}$  – плотность упаковки частиц в смеси, состоящей из  $n-1$  фракций;  $\beta_n$  – коэффициент разъединения (раздвижки) зерен в смеси частицами очередной фракции, вводимой в

смесь,  $\beta_n = \frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n}$ ;  $G_1$  – количество первой

(наиболее) крупной фракции, обычно принимается  $G_1 = 100$  мас. ч.

Плотность упаковки частиц в смеси при введении очередной фракции определяется по формуле:

$$\sigma_n = \sigma_{n-1} + \frac{(1 - \sigma_{n-1})}{\beta_n} \cdot X_n, \quad (3)$$

где  $\sigma_1 = \eta_1$  – плотность упаковки частиц наиболее крупной фракции;  $X_n$  – степень заполнения пустот в смеси при введении очередной фракции (определяют с использованием табл. 6.1 [5]). При  $G_1 = 100$  мас. ч. расход второй фракции будет равен:

$$G_2 = (1 - \eta_1) \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1} \beta_2 \cdot 100 = (1 - 0,63) \cdot 100 = 37 \text{ мас.ч.}$$

$$\sigma_2 = \eta_1 + \frac{(1 - \eta_1) \cdot \eta_2^2 (1 - \eta_2)^2}{\beta_2} = 0,63 + \frac{0,37 \cdot (0,62 \cdot 0,38)^2}{0,63 / 0,62} = 0,651.$$

$$G_3 = (1 - 0,651) \cdot \frac{0,61}{0,65} \cdot \frac{0,65}{0,61} \cdot (100 + 37) = 47,8 \text{ мас.ч.}$$

$$\sigma_3 = 0,651 + \frac{(1 - 0,651) \cdot X_3}{\beta_3} = 0,651 + \frac{0,349 \cdot [(\varepsilon_2 \cdot \eta_2)^2 + (\varepsilon_3 \cdot \eta_3)^2 + \varepsilon_3^2]}{\frac{n}{2}(n-1) \cdot \frac{0,65}{0,61}} =$$

$$= 0,651 + \frac{0,37 \cdot [(0,62 \cdot 0,38)^2 + (0,61 \cdot 0,39)^2]}{0,65/0,61} = 0,651 + \frac{0,37 \cdot 0,088}{0,65/0,61} = 0,682.$$

$$G_4 = (1 - 0,64) \cdot (100 + 37 + 48) = 66,6 \text{ мас.ч.}$$

$$\sigma_4 = 0,682 + (1 - 0,682) \cdot \frac{X_4}{\beta_4} = 0,682 + 0,318 \cdot \frac{(0,088 \cdot 3 + \varepsilon_4^2 \eta_4^2 + \varepsilon_4^2 + \varepsilon_4 \eta_4)}{6} / \frac{0,682}{0,60} =$$

$$= 0,682 + 0,318 \cdot 0,076 / 1,137 = 0,703.$$

Сопоставление расхода каждой фракции расчетного с фактическим в смеси представлено в табл. 2.

Количество второй фракции в реальной смеси (рис. 2) несколько завышено по сравнению с расчетом. Но учитывая, что содержание фракции в реальной смеси с размером более  $d_1$  значительное – пологий участок кривой анализа смеси, повышенное содержание второй фракции пойдет на заполнение в них пустот. То же самое относится и к третьей фракции. Расчетное количество четвертой фракции почти совпадает с фактическим содержанием ее в смеси.

Следовательно, состав полидисперсной смеси композиционного вяжущего,

представленной на рис. 2 следует отнести к высокоплотным по плотности упаковки в ней частиц. Аналогичные выводы можно сделать и по составу полидисперсной смеси, представленной на рис. 3.

Таблица 2

Расход каждой фракции вяжущего

G, мас. ч.	Фактический расход	Расчетный расход
G <sub>1</sub> = 100	6,5	6,5
G <sub>2</sub> = 37	5	2,4
G <sub>3</sub> = 48	4	3,12
G <sub>3</sub> = 66,6	4,5	4,3

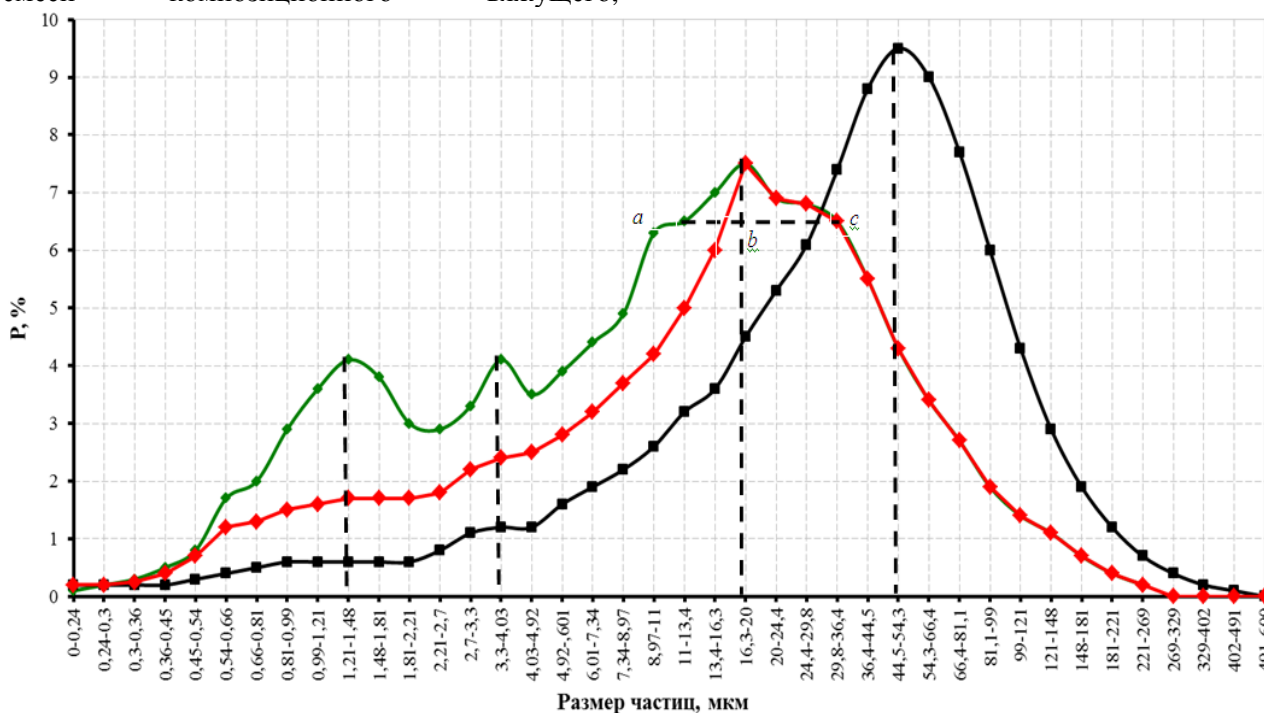


Рис. 3. Распределение частиц вяжущих по размерам:  
 $ab \approx bc$  – компенсирование (усредненное) размеров и содержание  
 до  $d_1 = 16,3...20$  мкм,  $d_{cp} = 18$  мкм,  $\varphi_1 = 6,5$ ;

—●— композиционное вяжущее; —■— Белгородский цемент; —◆— расчетная кривая

Приведем лишь некоторые исходные данные для расчета ее состава при высокоплотной упаковке частиц.

Таблица 3

**Расчет высокоплотной упаковки частиц вяжущего**

Размер частиц	$d_n/d_1$	$\eta_n$
$d_{1c} = (16,3 \cdot 20)^{1/2} = 18$ мкм	1	0,67(0,64)
$d_{2c} = (4 \cdot 3,3)^{1/2} = 3,63$ мкм	0,202	0,61
$d_{3c} = (1,48 \cdot 1,21)^{1/2} = 1,34$ мкм	0,07	0,60
$d_{4c} = (0,66 \cdot 0,54)^{1/2} = 0,597$ мкм	0,033	0,59

Определение  $\eta_1$ : так как  $d_2/d_1 = 0,202$ , то класс системы  $m = 5$  [4] и  $2,549/(10\eta_1) = 0,202^{3/5} = 0,383$ , отсюда  $\eta_1 = 2,549/3,83 = 0,666$ .

Наличие широкой полочки размеров крупных частиц, больших и меньших, чем  $d_1 = 16,3 \dots 20$  мкм приводит к несколько завышенному результату  $\eta_1$ , которое для монодисперсных сферических частиц составляет  $\eta_1 \leq 0,65$ . Как видно из рис. 3 экспериментальная кривая распределения частиц в смеси имеет широкую область размеров крупных фракций, на что потребует повышенный расход мелких фракций, что отображается двумя максимумами и крутым спуском участка с размером частиц более  $d_1$ . Такую смесь также следует отнести к высокоплотным полидисперсным смесям с основным по максимуму классом  $m = 5$ . При этом плотность упаковки частиц класса  $m = 5$  быстро возрастает  $\eta_1 = 0,64 \div 0,67$ ,  $\sigma_2 = 0,728$ ,  $\sigma_3 = 0,8115$  и  $\sigma_4 = 0,883$ .

Разработанные полидисперсные композиционные вяжущие обладают особой гранулометрией с высокоплотной упаковкой частиц, характеризующиеся наличием на кривых анализа гранулометрического состава

ниспадающих максимумов содержания фракций данного класса  $m$  их распределения, обеспечивая формирование оптимальной микроструктуры цементного камня межпоровых перегородок за счет плотной упаковки частиц и поверхностных явлений при гидратации компонентов композиционных вяжущих в тонких пленках, способствующей ускорению процессов структурообразования и повышению прочности на ранней стадии твердения неавтоклавного ячеистого бетона.

*\*Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012–2016 годы.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Suleymanova L.A. Non-autoclaved aerated concrete at composite binding / Ibausil: 18. Internatinal Baustofftagung // Weimar, 2012. В.2. P. 2-0830–2-0835.
2. Сулейманова Л.А., Лесовик В.С., Сулейманов А.Г. Неавтоклавные газобетоны на композиционных вяжущих. Белгород: КОНСТАНТА, 2010. 152 с.
3. Сулейманова Л.А., Кара К.А. Газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства. Белгород: КОНСТАНТА, 2011. 150 с.
4. Сулейманова Л.А., Жерновский И.В., Шамшуров А.В. Специальное композиционное вяжущее для газобетонов неавтоклавного твердения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 39–45.
5. Хархардин А.Н. Структурная топология. Белгород: Изд. БГТУ, 2009. Ч.1. 196 с.