

П.В. Корниенко

УДК 666.973.6

*Павлодарский государственный университет
им. С. Торайгырова*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Цемент тасының құрылымының капиллярларының бойлық өлшемдеріне, ішкі қуыстардың және олардың құрылымдарының қаңқасына байланысты бетонның қасиеттерінің қалыптасуына анализ берілген.

The article analysis of depend on property on concretes to floyly processes are become of structure of cemently stone with use linely sizes of dropes, cells and elements of structure the frame

Свойства и долговечность ячеистого бетона в значительной мере зависят от качества его структуры. [1, 2]. Наибольшее влияние на качество структуры оказывают составы и методы изготовления ячеистого бетона [3, 4].

Результаты ряда исследований свидетельствуют о положительном влиянии на структуру и свойства ячеистого бетона вибрационных воздействий в период приготовления и вспучивания массы, регулирования реологических свойств, газовыделения и температуры массы в процессе вспучивания, гранулометрического состава сухих компонентов смеси [5, 6, 7], поверхностно-активных веществ [3, 8, 9], качества алюминиевых газообразователей [9, 10]. К какой же структуре газовых пор и межпоровых перегородок следует стремиться, чтобы значительно повысить качества ячеистого бетона, какие условия формирования этой структуры считать оптимальными? Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимо, прежде всего, определить эталон высококачественной структуры для ячеистого бетона и разработать научно обоснованный метод ее образования, максимально приближающий реальный материал к эталону.

Обычно при подборе состава ячеистого бетона не учитывается различие в толщине стенок газовых пор с изменением объемной массы и для разных ее значений применяют молотые пески с удельной поверхностью, согласно СН 277-80, не менее 2000 см²/г. В то же время, как показывают исследования при повышенной объемной массе возможно применение грубомолотых и немолотых мелкозернистых песков. Это позволит резко сократить количество воды затворения, влажность изделий, уменьшить усадку и ползучесть, значительно упростить технологию и снизить стоимость изделий. Вместе с тем резкое снижение объема воды затворения вызывает уменьшение общего объема массы, в связи, с чем возникает вопрос о достаточности его для заполнения межпорового пространства ячеистого бетона.

Настоящая работа является попыткой подойти к вопросу построения структуры ячеистого бетона на основе идеальной модели пористого тела, принятого за эталон, и содержит теоретические предпосылки и экспериментальную проверку метода формирования оптимальной структуры ячеистого бетона [14].

Метод базируется на следующих основных положениях, отражающих качественную зависимость свойств ячеистого бетона от его структуры: исходные смеси должны содержать минимальное количество воды с целью получения наиболее плотных и прочных стенок пор; газовые поры должны иметь наиболее плотную упаковку при максимальном отношении их объема к объему пор от испарения свободной воды; объем смеси должен быть достаточным для заполнения межпорового пространства.

В качестве эталона принята модель идеально пористого тела, образованного сферическими порами разного диаметра, упакованными в плотнейшей гексагональной или кубической сингониях, подобно ионам или атомам в кристаллах в металлах [11]. Такая упаковка соответствует принципу минимума потенциальной энергии системы, имеющей в этом случае наибольшую устойчивость. В пространстве между крупными порами располагаются более мелкие, так что образуются структуры с максимальными координационными числами, зависящими от соотношения диаметров соприкасающихся пор. Компактность упаковки пор — в данном случае пористость системы — оценивается отношением их объема, приходящегося на одну элементарную ячейку, к объему ячейки. В таблице 1 приведены пористости такой модели при последовательном заселении пустот более мелкими порами.

Таблица 1

Характеристика элементарной ячейки ромбической призмы

Диаметр поры	Координационное число	Объем одной поры	Количество пор в ячейке	Общий объем пор в ячейке	Пористость, %
D	12	$5,235 \cdot 10^{-1} D^3$	1	$5,235 \cdot 10^{-1} D^3$	74,05
0,414 D	6	$3,713 \cdot 10^{-2} D^3$	1	$3,713 \cdot 10^{-2} D^3$	5,25
0,225 D	4	$5,96 \cdot 10^{-3} D^3$	2	$1,192 \cdot 10^{-2} D^3$	1,69
0,155 D	3	$1,948 \cdot 10^{-3} D^3$	15	$2,922 \cdot 10^{-2} D^3$	4,13
0,12 D	2	$9,046 \cdot 10^{-4} D^3$	16	$1,347 \cdot 10^{-2} D^3$	1,9
Итого 87,02					

Важное значение при этом имеет правильное определение количества пор разного диаметра, приходящихся на одну элементарную ячейку. Расчет произведен для элементарной ячейки - ромбической призмы — с ребром D и объемом $0,707 \cdot D^3$.

При дальнейшем заселении пустот порами диаметром меньше 0,12D пористость модели возрастает совершенно незначительно, координационное число и положение таких пор становятся неопределенными. Поэтому пористость 87,02% принимается за максимально достижимую для данной модели. Существенно, что вычисленные значения пористости модели соответствуют состоянию соприкасающихся сфер - пор.

Реальные ячеистые бетоны, естественно, не имеют такой упорядоченной упаковки и идеальной формы пор - соответствующих размеров, как у модели. Газовые поры в них раздвинуты на некоторое расстояние δ , зависящее от удельной поверхности пор и объемной массы ячеистого бетона. В то же время конструкция идеальной модели позволяет произвести необходимые расчеты, сопоставить их с экспериментальными данными

и установить отклонения от модели, которые согласно терминологии принятой в физике твердого тела, можно также характеризовать дислокациями и мозаичностью [11,12].

Изменение пористости идеальной модели возможно при раздвижке пор [13,14]. Однако в этом случае меняться будут стенки δ и пористость модели, диаметры пор останутся неизменными. Это противоречит практически наблюдаемым изменениям размера пор с изменением объемной массы ячеистого бетона. Поэтому допускается, что изменение пористости модели происходит вследствие уменьшения начальных диаметров соприкасающихся пор и соответственного увеличения толщины стенки. В этом случае при $\delta = D$ пористость модели будет равна нулю, а при $\delta = 0$ достигнет максимального значения – 87,02%. Промежуточные значения пористости модели при одинаковой толщине стенки между порами (для данной пористости модели) могут быть получены из уравнения

$$P_c = 74,05 \cdot \left(1 - \frac{\delta}{D}\right)^3 + 5,25 \cdot \left(1 - \frac{\delta}{0,414D}\right)^3 + 1,69 \cdot \left(1 - \frac{\delta}{0,225D}\right)^3 + 413 \cdot \left(1 - \frac{\delta}{0,155D}\right)^3 + 1,9 \cdot \left(1 - \frac{\delta}{0,12D}\right)^3 \quad (1)$$

На рисунке 1 представлен график изменения пористости модели, построенный на основании решения этого уравнения подстановки его различных значений δ/D (расчет произведен на ЭВМ). Из уравнения видно, что пористость модели, рассматриваемая обособленно, не зависит от толщины стенки и диаметра пор D , а зависит от их отношения. Чтобы иметь возможность известным значениям δ/D рассчитать толщины стенок и диаметры пор модели разной пористости необходимо знать наиболее вероятный диаметр пор D ячеистого бетона, имеющего газовую пористость, близкую к максимальной и качественную макроструктуру, приближающуюся к эталону.

Теоретически определить этот диаметр пока не представляется возможным. Поэтому в работе он был определен экспериментальным путем. С этой целью готовились образцы газобетона объемной массы. Для изготовления их применялись рядовые материалы, удовлетворяющие требованиям инструкции СН 277-80. Объем исходной массы в опытах изменялся от 13 до 22 % проектного объема газобетона. Водотвердые отношения для каждого объема массы также менялись от 0,55 до 1. Смеси готовились холодными при 20...25 °С. Вспучивание их производилось с использованием вибрации. После вспучивания образцы твердели в нормальных условиях, а затем их исследовали. Принятые условия изготовления образцов отвечают требованию минимального содержания воды в смеси, что находится в соответствии с первым положением метода.

Качество макроструктуры газобетонных образцов оценивалось по количеству дефектов в стенках пор, отклонениям пор сферической формы (путем сравнения диаметров, измеренных в двух направлениях), характеру распределения пор по размерам и механической прочности. Оптимальной была признана структура газобетона, изготовленного из смеси объемом 19,5 \pm 0,6% при водотвердом отношении 0,65 \square 0,03. Структура газобетона в этом случае имела наименьшее количество дефектов, поры имели преимущественно сферическую форму при явно выраженном многомодальном их распределении, приближающимся к идеальному в эталоне (рисунок 2). Структура газобетона при других исходных данных была значительно хуже. Поэтому объем массы, равный 19,6 \square 0,6%, назван нами критическим. Он представляет собой тот минимальный объем массы, который обеспечивает получение качественной структуры ячеистого бетона. Объемная масса вибровспученного газобетона при этом составляет в среднем 216 кг/м³.

Определение истинных диаметров пор D производилось двумя способами, путем измерения глубины лунок с последующим расчетом диаметров [5,14] и непосредственно по участкам с семерной группировкой больших пор, в промежутках между которыми наблюдались мелкие, соответствующие в модели размеру $0,155D$. Определенный таким образом истинный средний диаметр пор D с учетом доверительного интервала оказался равным $1,27 \pm 0,07$ мм. На основании его и расчетных значений δ/D были вычислены толщины перегородок и диаметры наибольших пор D всех технических объемных масс ячеистого бетона (табл. 6). Фактические замеры толщин перегородок и наибольших диаметров пор D различных объемных масс газобетона, изготовленного в соответствии с вышеуказанными условиями, показали хорошее совпадение их с расчетными данными (таблица 3).

Таблица 4 свидетельствует о том, что с увеличением объемной массы ячеистого бетона толщина межпоровых перегородок возрастает. Исходя из этого, представляется целесообразным и дисперсность песка или другого кремнеземистого компонента выбирать таким образом, чтобы крупность его частиц была соизмерима с толщиной стенки.

В таблице 4 приведены результаты микроскопического анализа гранулометрического состава песков разной крупности.

Как видно из таблице 4, дисперсность песка начиная $\gamma_0 = 500 \dots 600$ кг/м³ может быть уменьшена вплоть до применения для бетона объемной массой $900 \dots 1200$ кг/м³ немолотого мелкозернистого песка с модулем крупности $0,7 \dots 1,3$. Это позволит уменьшить водопотребность смесей, ускорить и удешевить помол песка, снизить усадку и влажность ячеистого бетона, увеличить плотность межпоровых перегородок. Кроме того, появляется возможность использования неограниченных запасов мелкозернистых песков, например барханных песков республик Средней Азии, что очень ценно для организации производства стеновых камней и блоков для сельского строительства.

С уменьшением содержания воды смеси газовая пористость ячеистого бетона возрастает. Это хорошо согласуется с требованиями второго положения метода подбора состава. При критическом объеме массы $19,6 \pm 0,6\%$ соответствующая ему максимальная газовая пористость ячеистого бетона будет равна $80,4 \pm 0,6\%$, а отношение ее к пористости, образующейся при испарении свободной воды, - 7,5 (в расчете принималось количество химически связываемой воды в размере 10% массы твердых компонентов).

Очевидно, это отношение будет максимальным и для других объемных

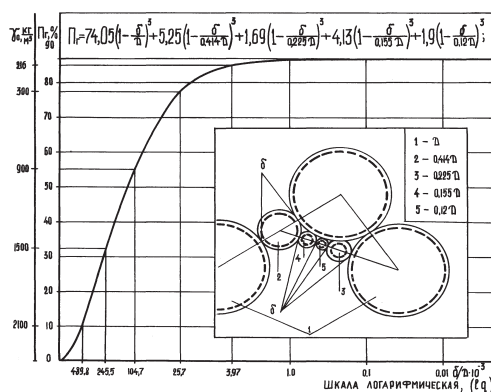


Рисунок 1 - Изменение пористости модели в зависимости от отношения δ/D

масс ячеистого бетона, и поэтому может быть принято постоянным. Обозначив в общем случае его значение через α и приняв во внимание, что единица объема ячеистого бетона может быть представлена в виде

$$1 = V_T + V_{ca} + V_{\bar{a}} + V_{\text{энн}}, \quad (2)$$

получим после нескольких преобразований и подстановки в формулу (2) значений

$$V_T = \omega \cdot T; V_{ca} = \gamma_0 \cdot (1 - k), T = k \cdot \gamma_0, \quad (3)$$

следующие выражение для водотвердого отношения

$$B/T = \frac{1 - \omega \cdot k \cdot \gamma_0 + \alpha \cdot \gamma_0 \cdot (1 - k)}{k \cdot \gamma_0 (1 + \alpha)}, \quad (4)$$

где В - количество воды, л (кг);

T - масса твердых компонентов, кг;

ω - удельный объем твердых компонентов, равный в среднем 0,36 л/кг;

γ_0 - объемная масса ячеистого бетона, кг/л, т/м³;

$\alpha = \frac{V_{\bar{a}}}{V_{\text{энн}}}$ - постоянная (для данного метода изготовления ячеистого бетона) величина;

k - коэффициент, учитывающий химически связываемую воду (согласно СН 277-80 для расчетов $k = 0,9091$).

Для вибровспученного газобетона на холодных смесях при $a = 7,5$ формула (5) принимает вид

$$B/T = \frac{0,13}{\gamma_0} + 0,05 \quad (5)$$

Таблица 2

Характеристика пористости

Объемная масса, кг/м ³	В/Т	Пористость, %			Расчетные значения			
		газовая, Пг	капиллярная, Пкап	общая, Побщ	δ/D	толщина перегородок в мкм при исходном диаметре D, мм		
						1,27	1,2	1,34
216	0,66	80,4	10,72	91,12	0,01738	22	21	23
300	0,48	77,42	10,30	87,72	0,02570	33	31	35
400	0,37	73,67	9,85	83,52	0,03631	46	44	48
500	0,31	70,08	9,35	79,43	0,04842	61,5	58	65
600	0,26	66,39	8,86	75,25	0,06081	77	73	81
700	0,24	62,70	8,36	71,06	0,07482	95	90	100
800	0,21	58,98	7,86	66,84	0,09016	114	108	120

900	0,19	55,44	7,39	62,83	0,1047	133	126	140
1000	0,18	51,51	6,87	58,38	0,1245	158	150	166
1100	0,175	47,81	6,37	54,18	0,1416	180	170	190
1200	0,17	43,76	5,83	49,59	0,1687	214	202	226

Таблица 3

Характеристика межпорового материала для разных масс

Объемная, масса, кг/м ³	Толщины перегородок фактические			Диаметры пор			
				фактические			расчетные
	δст.ср.	δст.min.	δст.max.	Dср	Dmin	Dmax	Dср±ΔD
400	41	9	96	1,17	0,77	1,35	1,224±0,068
500	57	12	116	1,15	0,75	1,33	1,208±0,067
600	72	17	137	1,08	0,72	1,31	1,193±0,066
700	92	19	165	1,05	0,70	1,26	1,175±0,065
900	122	29	227	0,99	0,69	1,20	1,137±0,063
1100	170	42	270	0,95	0,66	1,18	0,090±0,060

Для вибровспученного газобетона, для литого газобетона при $a = 4$ горячих смесей ($t = 40 \dots 45^\circ\text{C}$) $a = 5$ и формула 5 приобретает вид

$$B/T = \frac{0,184}{\gamma_0} + 0,023; \quad (6)$$

$$B/T = \frac{0,22}{\gamma_0} + 0,01 \quad (7)$$

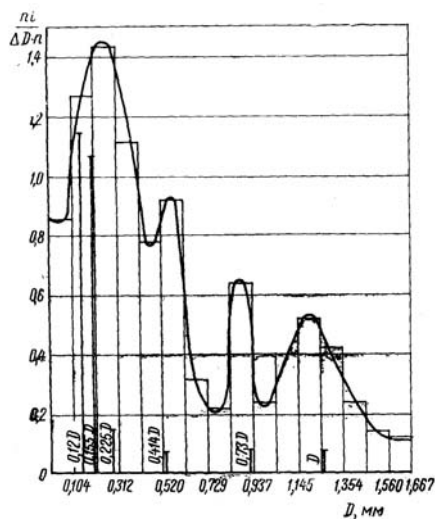
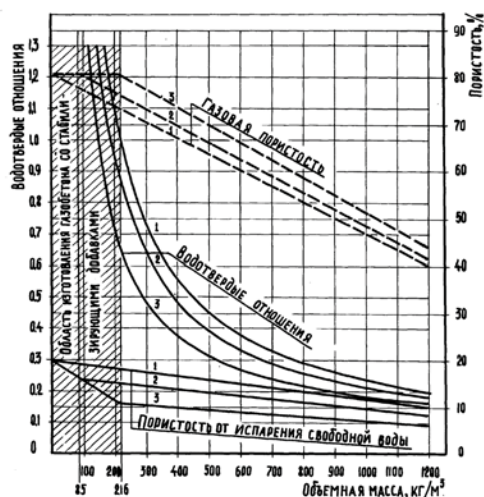


Рисунок 2 - Распределение сечений пор по размерам в газобетоне с объемной массой 216 кг/м³



1 - литейная технология; 2 - вибрационная; 3 - холодное виброформование

Рисунок 3 - Изменение водотвердых отношений и пористости газобетона в зависимости от объемной массы

Таблица 4

Связь удельной поверхности песка и плотности газобетона

№ п/п	Удельная поверхность песка, см ² /г	Размеры песчинок, мкм			Рекомендуемые объемные массы газобетона, кг/м ³
		d _{cp}	d _{min}	d _{max}	
1	Немолотый с M _{кр} =1 - 1,3	185	80	290	1100 - 1200
2	360	144	63	270	900 - 1100
3	640	84	51	256	700 - 900
4	1000	74	39	249	
5	1470	65	36	242	600 - 500
6	1700	55	33	227	
7	2100	52	28	163	400 - 500
8	2350	42	21	124	
9	2810	34	17	116	
10	3200	32	15	109	300 - 400
11	3700	26	12	101	

Величина α для виброупученного и литого газобетона на горячих смесях определена экспериментальным путем так же для объемной массы 216 кг/м³. Значения В/Т, вычисленные по формулам (12), (13), (14), оказываются ниже применяемых в настоящее время, особенно для повышенных объемных масс. Возможность их понижения обусловлена меньшей дисперсностью песка и водопотребностью смеси. Графически полученные зависимости В/Ц – γ_0 представляют собой неравнобочные гиперболы (рисунок 3). На рисунке показан также характер изменения газовой и капиллярной пористости. При достижении критических значений объемной массы (216 и 85кг/м³) наблюдается резкий излом на прямых пористости. Для литого газобетона это состояние наступает при $\gamma_0 = 0$.

Для закритических значений объемной газобетона формулы (4), (5), (6) для определения В/Т непригодны. Расчет В/Т в этом случае должен производиться по формуле

$$V/T = \frac{0,216}{\gamma_0} - 0,36, \quad (8)$$

а для изготовления газобетона необходимо принять стабилизирующие добавки, предотвращающие осадку массы после вспучивания.

Разработанный метод подбора состава ячеистого бетона и его основные расчетные положения широко апробированы в лабораторных и полупроизводственных условиях Автовского ДСК-3 Ленинграда. Экспериментальными данными подтверждены теоретические разработки метода. Показана реальная возможность оптимизации составов и способов изготовления ячеистого бетона. Прочность газобетона, изготовленного различными способами с помощью предлагаемого метода, превышает нормативную для различных - объемных масс в среднем на 20...40%. Влажность газобетона после автоклавной обработки составляет 13...19 %.

В связи с повышенной плотностью межпоровых перегородок сопротивление паропроонианию газобетона с объемной массой 600...700 кг/м³, по полученным данным, возрастает на 30...70% по сравнению с расчетными. Это будет способствовать улучшению тепловлажностного режима ограждающих конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А. Г., Бахтияров К. И., Ухова Т. А., Максимов Л.П., Усова Л. С. Влияние качества макрапористой структуры ячеистого бетона на его прочность и морозостойкость. Сб. «Вопросы технологии ячеистых бетонов и конструкций из них». -Стройиздат, 1972.
2. Кривицкий М.Я., Левин Н.И., Макаричев В.В. Ячеистые бетоны. -Стройиздат, 1972.
3. Горчаков Г.И., Сахаров Г.П., Абдуганиев А.А. К вопросу оптимизации составов и методов изготовления ячеистого бетона. Строительство и архитектура Узбекистана. -1971, № 12.
4. Производство ячеистых бетонов в СССР (обзор). ЦНИИТЭСТРОМ. М., 1969.
5. Меркин А.П. Теоретические предпосылки и практические рекомендации к производству поризованных бетонов с малодефектной структурой. Сб. трудов № 69 МИСИ им. В. В. Куйбышева (кафедра общей химии) «Способы интенсификации и методы контроля процессов производства строительных материалов. -М., 1971.
6. Горайнов К. Э. Новые пути интенсификации производства изделий из ячеистых автоклавных бетонов. «Строительные материалы», 1970.-№ 2.
7. Иванов И.А., Федьнин Н.И. О значении рационального гранулометрического состава сырьевых смесей в улучшении свойств ячеистых бетонов. Сб. «Структурообразования и органическая коррозия цементных и полимерных бетонов. Пензенский ИСИ. Сб. трудов 7*4. 1967.
8. Меркин А.П., Сахаров Г.П., Гаджилы Р.А., Зеленцова Т.К., Алиев З.А. Производство теплоизоляционных и конструктивных автоклавных ячеистых бетонов по газопенной технологии. ЦНИИТЭСТРОМ. Техническая информация. Серия «Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих, вып. 1, 1968.
9. Мирецкий Ю.И. Предварительная поризация растворной массы при изготовления газобетона. Материалы четвертой конференции по ячеистым бетонам. Саратов — Пенза, 1969.

10. Меркин А. П., Вагина Л. Ф., Куйбышев А. З. Алюминиевые газообразователи для ячеистых бетонов. «Строительные материалы», 1971.-№ 5.
11. Попов Г.М., Шафрановский И. И. Кристаллография. Изд. «Высшая школа». М., 1972.
12. Физика твердого тела. Изд. «Наука».-М., 1972.
13. Шумков А. И. Формирование структуры ячеистых бетонов. «Известия вузов», 1966.-№ 5.
14. Корниенко П.В. Образование оптимальной структуры ячеистого бетона. – М.: 1973. - 161 с.