

Figure 3. Structures of conventional AAC (a), microporous autoclaved concrete outside (b) and the internal structure of the sample after testing (c)

Table 6.

Physical and mechanical properties of the microporous AAC

Concrete grade by density	Levels of autoclaved aerated concrete strength, MPa, standard [8]	Density of the sample, kg / m <sup>3</sup>	Compressive strength, MPa
D250	0.72	280	0.86
D350	1.45	370	1.70
D400	1.45	400	2.08
D500	2.17 – 3.62	550	2.28
D600	2.90 – 3.62	630	4.60

## УДК 666.973.6

Дашкова Т. С., ассистент,  
Свидерский В. А., д.т.н., профессор,  
Глуховский В. В., к.т.н., доцент,  
Глуховский И. В., к.т.н., доцент

Dashkova T. S., assistant,  
Sviderskyi V. A., doctor of technical science, professor,  
Glukhovskiy V. V., candidate of engineering sciences, associate professor,  
Glukhovskiy I. V., candidate of engineering sciences, associate professor

## ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОМПЗИТЫ

### ВИСОКОМІЦНІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНІ КОМПЗИТИ

### HIGH-STRENGTH HEAT-INSULATING COMPOSITES

#### Исходные положения

Исходя из основных положений концепции устойчивого развития, газобетон можно рассматривать как один из наиболее перспективных конструктивных материалов, обеспечивающих существенное сокращение энергетических затрат на отопление помещений при низких расходах стенового материала на квадратный метр ограждающих конструкций.

Но, позволяя существенно сократить тепловые потери зданий, традиционный газобетон, в своем производстве предполагает присутствие высокотемпературных процессов (автоклавирование) и использование исходных продуктов, производство которых сопровождается образованием большого количества CO<sub>2</sub> (парникового газа). В состав сырьевой смеси автоклавного газобетона входит до 40 % по массе портландцемента и извести. Производство этих вяжущих сопровождается выделением в атмосферу большого количества CO<sub>2</sub>. Парниковый газ образуется не только при декарбонизации известняка (до 300 кг на тонну портландцемента и до 780 кг на тонну извести), но и при сжигании топлива, которое используется

для обжига исходных сырьевых смесей. С учетом углекислого газа, образующегося при транспортировании готового продукта, специалисты полагают, что создание одной тонны цемента сопровождается выпуском в атмосферу одной тонны углекислого газа [1].

Кроме вышеизложенного, необходимо отметить, что традиционный автоклавный газобетон характеризуется наличием ограничений по эксплуатации во влажных условиях (для помещений с относительной влажностью воздуха не более 75 %), что обуславливает необходимость защиты поверхности ограждающей конструкции от сорбции воды. Макропористая структура данного материала не позволяет использовать эффективно гидрофобные покрытия и обуславливает необходимость защиты поверхности с помощью разнообразных штукатурных растворов.

Целью комплекса научных исследований явилось создание новых технологий производства неавтоклавного газобетона на основе крупнотоннажных отходов промышленности и технологий изготовления микропористого автоклавного газобетона низкой плотности.

### Технология изготовления неавтоклавного газобетона на основе крупнотоннажных отходов промышленности

Известна обобщенная зависимость прочности пористых материалов ( $R_p$ ) от прочности материала матрицы ( $R_m$ ), которая была получена при анализе результатов испытаний горных пород [2]:

$$R_m = R_p (\rho_m / \rho_p)^2, \quad (1)$$

На основе указанной зависимости экспериментально была установлена аналогичная зависимость для газобетонов автоклавного твердения [3], которая имеет вид:

$$R_p = R_m [1 - 1,105 \cdot (1 - \rho_p / \rho_m)^{0,33}], \quad (2)$$

где:  $R_m$  – прочность материала матрицы плотностью  $\rho_m$ ;

$R_p$  – прочность пористого материала плотностью  $\rho_p$ .

Авторами экспериментально [4] был установлен вид аналогичных зависимостей для неавтоклавного газобетона на основе портландцемента и на основе щелочного цемента:

$$R_m = R_p (\rho_m / \rho_p)^{2,28}, \quad (3)$$

$$R_p = R_m [1 - 1,105 \cdot (1 - \rho_p / \rho_m)^{0,47}], \quad (4)$$

Достоверность найденных значений показателей степени подтверждена статистической обработкой результатов испытаний, которые представлены в таблице 1.

Для реализации целей исследований по разработке технологии изготовления высокопрочных неавтоклавных газобетонов на основе крупнотоннажных отходов промышленности, были использованы щелочные цементы [5] которые были разработаны в 70-х годах прошлого века в Украине. Особенностью указанного вида цементов, является то, что они изготавливаются на основе крупнотоннажного отхода металлургии – доменного гранулированного шлака и характеризуются высокой марочной прочностью (до 100 МПа), долговечностью (F1000) и коррозионной стойкостью [6].

Характеристики щелочного цемента, который был использован для разработки неавтоклавного газобетона на основе молотого доменного шлака, представлены в таблице 2.

Приведенные результаты указывают на то, что уровень прочности щелочного цемента уже в возрасте 7 суток соответствует уровню марочной прочности традиционного портландцемента (48...63 МПа). Марка щелочного цемента, в возрасте 28 суток, существенно превышает марку традиционного порт-

Таблица 1.

#### Результаты статистической обработки результатов испытания

Показатель	Расчетные значения показателя степени для выражения	
	(3)	(4)
Среднее арифметическое значение	2,281	0,472
Значение эмпирического стандарта	0,1427	0,0366
Погрешность значения при доверительной вероятности 95 %	±0,041	±0,011
Относительная погрешность среднего арифметического значения	1,8%	2,3%

Таблица 2.

#### Основные характеристики щелочного цемента

Вид щелочного компонента	Плотность раствора, кг/м <sup>3</sup>	Сроки схватывания, мин.		Марка щелочного цемента, МПа, в возрасте	
		начало	конец	7 суток	28 суток
метасиликат натрия	1200	36	45	63,0 (5,6)*	107,8 (7,6)
	1250	37	48	59,2 (7,1)	93,0 (6,5)
дисиликат натрия	1300	56	70	48,3 (4,6)	77,3 (6,3)

\* примечание – в скобках предел прочности на растяжение при изгибе

Таблица 3.

#### Физико-механические характеристики неавтоклавных газобетонов на основе щелочного цемента

Марка бетона по плотности	Средняя плотность образца, кг/м <sup>3</sup>	Влажность образца масс. %	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте		
			7 суток	28 суток	90 суток
<b>без заполнителя</b>					
D500	520	18,7	2,54	4,07	4,32
D600	610	16,9	3,74	4,75	5,10
D700	680	17,6	5,02	6,09	6,46
<b>заполнитель – кварцевый песок (фракция 0,25-0,5 мм) 50 % от массы шлака</b>					
D500	510	15,5	2,29	2,97	3,16
D600	620	15,7	3,87	4,36	4,55
D700	690	16,1	4,84	5,78	6,17
<b>заполнитель – кварцевый песок (фракция 0,25-0,5 мм) 100 % от массы шлака</b>					
D500	530	12,1	2,38	2,67	2,86
D600	610	13,7	3,74	3,82	4,02
D700	710	13,9	4,86	5,04	5,31
<b>заполнитель – шлак немолотый (фракция 0,25-0,5 мм) 50 % от массы шлака</b>					
D500	500	19,7	2,54	2,87	3,03
D600	620	18,5	4,03	4,47	4,67
D700	700	18,4	4,93	5,14	5,38
<b>заполнитель – шлак немолотый (фракция 0,25-0,5 мм) 100 % от массы шлака</b>					
D500	510	17,4	2,17	2,54	2,61
D600	590	17,5	3,02	3,75	3,90
D700	690	18,0	4,09	4,43	4,57

ландцемента и, в зависимости от вида и плотности щелочного компонента, находится в диапазоне 77...108 МПа.

Результаты испытания образцов неавтоклавного газобетона (табл. 3), которые были изготовлены на основе щелочного цемента без заполнителя и из композиций на основе щелочного цемента с заполнителем в виде фракционированного кварцевого песка и немолотого доменного гранулированного шлака, указывают на то, что представленные неавтоклавные газобетоны в возрасте 7 суток характеризуются высокими уровнями прочности при сжатии, на уровне требований национального стандарта для неавтоклавных газобетонов в возрасте 28 суток (табл. 4). Марочная прочность исследуемых композиций в возрасте 28 суток, во всех случаях, превышает требования к марке национального стандарта, а влажность газобетона находится в пределах нормируемых значений отпускной влажности, то есть не более 25 %.

Отличительной особенностью неавтоклавных газобетонов от аналогичных композиций автоклавного твердения заключается в увеличении предела прочности при сжатии при последующем твердении на протяжении 90 суток.

Высокая щелочная среда щелочного цемента обеспечивает химическое взаимодействие продуктов его гидратации с поверхностью заполнителя – кварцевого песка. Отсутствие такого взаимодействия в композициях

на основе портландцемента обуславливает заметное снижение прочности при сжатии композиций газобетона (табл. 4). При введении в состав газобетона кварцевого песка в количестве 25 % от массы портландцемента, прочность снижается до 68 % от прочности композиций без заполнителя. С увеличением доли заполнителя до 43 и 67 %, прочность снижается до 66 и 54 % соответственно. В то же время, при введении кварцевого песка в состав композиций на основе щелочного цемента в количестве 50 и 100 % от массы шлака, снижение прочности составляет 10 и 20 % соответственно.

Полученные результаты испытания неавтоклавных газобетонов на основе щелочного цемента показывают, что разработанные композиции характеризуются уровнями прочности в пределах показателей, регламентирующих прочностные характеристики газобетонов национальными стандартами, не только в области неавтоклавных композиций, но и в области автоклавного газобетона (табл. 5).

Высокие физико-механические характеристики неавтоклавного газобетона D600 были реализованы при выпуске опытно-промышленной партии стеновых газобетонных панелей размером 3300×1500×500 мм (рисунок 1, 2), которые были использованы при возведении жилого двухэтажного здания [8].

Таблица 4.

Прочность неавтоклавного газобетона D600 на основе портландцемента и щелочного цемента без заполнителя и с заполнителем, кварцевым песком, в возрасте 28 суток

Вид цемента	Количество заполнителя, %, от массы цемента	Марка неавтоклавного газобетона, МПа	Прочность в % от прочности образцов без заполнителя
Портландцемент	0	4,46	100
	25	3,05	68,4
	43	2,93	65,7
	67	2,41	54,0
Щелочной цемент	0	4,75	100
	50	4,36	91,8
	100	3,82	80,4

Таблица 5.

Требования стандарта и прочностные характеристики неавтоклавного газобетона на основе щелочного цемента

Марка бетона по плотности	Уровни прочности при сжатии газобетона, МПа, по стандарту [7]		Прочность при сжатии, МПа, неавтоклавного газобетона на основе щелочного цемента		
	автоклавного	неавтоклавного	без заполнителя	с заполнителем, немолотый шлак в количестве	
				50 %	100 %
D500	2,17 – 3,62	1,45 – 2,90	4,07	2,87	2,56
D600	2,90 – 3,62	2,17 – 2,90	4,75	4,47	3,75
D700	3,62 – 7,23	2,90 – 3,62	6,09	5,14	4,43



Рис. 1. Жилой двухэтажный дом, возводимый с использованием стеновых газобетонных панелей



Рис. 2. Фрагмент внутреннего помещения жилого двухэтажного дома возводимого с использованием стеновых газобетонных панелей

### Технология изготовления микропористого автоклавного газобетона низкой плотности

Целью исследований в области разработки технологии производства микропористого автоклавного газобетона было получение композиций, которые бы характеризовались наличием микропористой структуры.

Традиционные автоклавные газобетоны, в силу специфики их производства характеризуются наличием макропор размером 0,5 – 3,0 мм (рис. 3а). Данная структура полностью определяется пространственным расположением частиц алюминиевой пудры в смеси после ее перемешивания и размером частиц этого газообразователя. Макропористая структура традиционного газобетона определяет, в последующем, его эксплуатационные характеристики и ограничивает область его использования во влажных средах. По результатам длительного обследования [9] установлено, что использование изделий из автоклавного газобетона без защитных покрытий в условиях повышенной влажности или при воздействии агрессивных сред приводит к быстрому их разрушению. Традиционные наружные защитные покрытия эффективно устраняют указанный недостаток, однако в силу наличия макропористой структуры автоклавного газобетона требуют обязательного выполнения штукатурных работ, что заметно усложняет и удорожает завершающий этап строительства.

Современные гидрофобные покрытия способны существенно упростить процесс защиты изделий на основе автоклавного газобетона, однако в силу специфики его структуры, требуют повышенного расхода дорогого гидрофобизирующего продукта.

Разработанная технология микропористого автоклавного газобетона позволяет получать композиции, в структуре которых отсутствуют крупные поры, как на поверхности массива (рис. 3в), так и внутри его (рис. 3с).

Физико-механические характеристики микропористого автоклавного газобетона приведены в таблице 6.

Представленные результаты показывают, что прочностные характеристики микропористого автоклавного газобетона по уровню прочности соответствуют требованиям стандарта. При этом необходимо отметить, что технология их изготовления позволяет осуществлять не только поверхностную гидрофобизацию, которая выполняется после автоклавной обработки, но и осуществлять гидрофобизацию в объеме массива в процессе приготовления смеси.

Особенностью указанной технологии является повышенный удельный расход тепловой энергии, однако в структуре себестоимости этот перерасход компенсируется отсутствием в технологической смеси алюминиевой пудры.

Таблица 6.

Физико-механические характеристики микропористого автоклавного газобетона

Марка бетона по плотности	Уровни прочности автоклавного газобетона, МПа, по стандарту [7]	Плотность образца, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа
D250	0,72	280	0,86
D350	1,45	370	1,70
D400	1,45	400	2,08
D500	2,17 – 3,62	550	2,28
D600	2,90 – 3,62	630	4,60

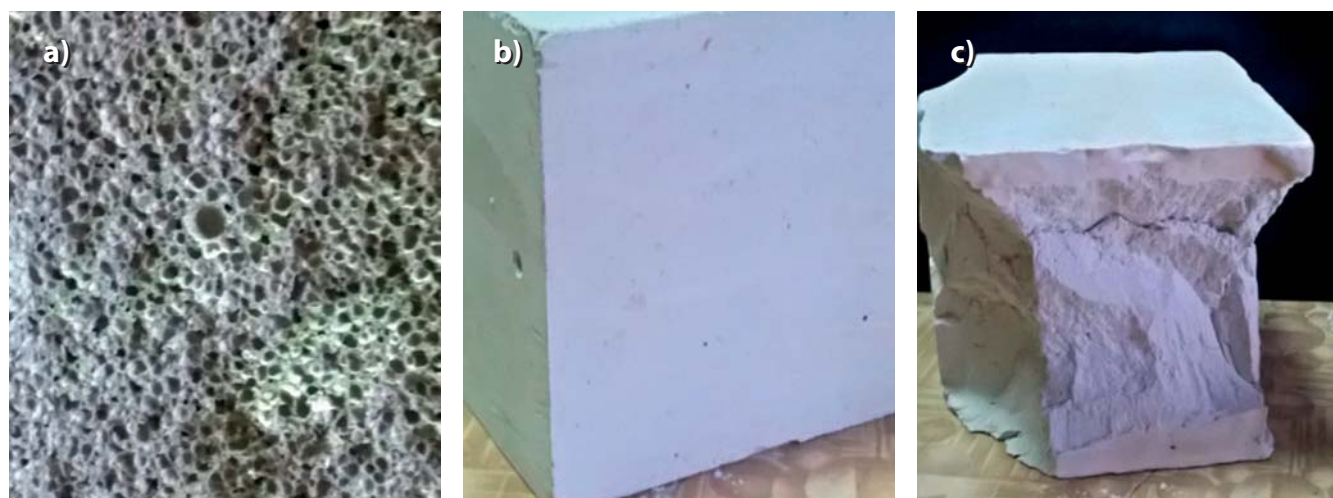


Рис. 3. Структуры традиционного автоклавного газобетона (а), микропористого автоклавного бетона снаружи (в) и внутренняя структура образца после испытания (с)

#### Ссылки:

1. <http://www.us-concrete.com/sustainability/ef-technology/>
2. Ицкович С.М. Заполнители для бетона. – Минск: Выш. шк., 1983. – 214 с.
3. Пинкскер В.А. Физическая основа параболической зависимости между объемной массой и прочностью ячеистого бетона / Пинкскер В.А. // Строит. материалы. 1965. № 8. С. 27 – 28.
4. Глуховський В.В. Залежність міцності ніздрюватих бетонів від міцності матеріалу матриці // VII Міжнародна конференція «Strategy of quality in the industry and education» / Глуховський І.В., Глуховський І.В., Дашкова Т.С. – Варна – 2011. – Том 3. – с. 67 – 70.
5. ДСТУ Б В.2.7-181:2009 Строительные материалы. Щелочные цементы.
6. Щелочные и щелочно-щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны / Под общ. ред. проф. В.Д. Глуховского. – Киев : Вища школа, 1979. – 232 с.
7. ДСТУ Б В.2.7-45:2010 Строительные материалы. Ячеистые бетоны.
8. Raw mixture and method for producing gas concrete: пат. 9487442 США: U.S.Cl. C04B 7/1535 (2013.01) / V. Glukhovskiy, I. Glukhovskiy, заявл. 03.02.2016, опубл. 08.10.2016.
9. Силаенков Е.В. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. – М.: Стройиздат. 1986. – 176с.