

УДК 666.972

*Волошина Т.Н., м.н.с.,
ГП «НИИСМИ», г. Киев*

ВЛАЖНОСТНАЯ УСАДКА ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ВЛАЖНОСТИ

В Украине на большинстве предприятий производятся по литьевой технологии изделия из конструкционно-теплоизоляционного газобетона, который обеспечивает выполнение теплоизоляционных и конструкционных функций в ограждающей конструкции. При литьевой технологии влажность бетона на выходе из автоклава находится, как правило, на уровне 35-45% (чем меньше плотность, тем выше значение влажности).

Высокая влажность автоклавного газобетона, обусловленная в начальный период эксплуатации наличием технологической и построечной влаги, быстро снижается, достигая постепенно (за 1-2 года) эксплуатационного уровня. Установившаяся влажность ячеистого бетона автоклавного твердения в составе ограждающих стен составляет 4-6% по массе.

Как известно, повышенная влажность ячеистого бетона в начальный период эксплуатации обуславливает меньшие расчетные значения целого ряда таких показателей, - прочности бетона в кладке, теплотехнических и деформационных характеристик. Информация о динамике изменения влажности кладки в начальный период эксплуатации позволяет оценивать сроки выхода конструкций на квазистационарный влажностный режим, а значит, на расчетные прочностные и теплофизические показатели. Поэтому необходимо тщательно анализировать влияние фактора начальной влажности газобетона на эксплуатационные характеристики, и, в частности, на показатель усадки при высыхании.

Для ячеистого бетона важна объективная оценка изменчивости структуры и свойств в естественных условиях эксплуатации. Такая оценка, полученная по результатам длительных испытаний усадки, ползучести, изменения прочности и метаморфизации структуры гидратных соединений, характеризует поведение материала при комплексном воздействии нагрузки, переменной температуры и влажности, углекислого и др. газов в атмосферных условиях.

Влагообмен бетонов с эксплуатационной средой приводит к изменению количественного содержания и соотношения видов воды с различной энергией связи со структурой и, соответственно, к изменению баланса сил, а именно: межмолекулярного взаимодействия поверхности твердой фазы с водой, расклинивающего давления адсорбционных пленок, сил поверхностного натяжения, капиллярных сил. Мера изменения строительно-технических свойств бетонов зависит от вклада составляющих в баланс сил и определяется размерно-геометрическими и энергетическими характеристиками твердой фазы и порового пространства материала.

Влажностные напряжения и деформации при изменении влагосодержания материала обусловлены последовательным включением в действие сил капиллярного стяжения, расклинивающего давления, поверхностного натяжения, взаимодействия между частицами, сил внутренних связей в кристаллогидратах и упругого противодействия твердой фазы ее деформированию.

Величина деформаций зависит от условий и возможности изменения баланса этих сил в материале и определяется следующими параметрами состава и структуры:

1) объемным соотношением элементов твердой фазы и пор в структуре, так как от этого зависит количество воды в структуре и мера сопротивляемости твердофазового каркаса развитию деформаций;

2) качественными характеристиками структурных элементов (распределение по размерам

пор и частиц твердой фазы, их удельная поверхность и поверхностная энергия), которые определяют меру действия и вклад каждой из обозначенных составляющих баланса сил и, следовательно, величину усадочных напряжений.

Определяющий вклад в изменение свойств материала в различном влажностном состоянии вносят структурные составляющие именно новообразований цементирующего вещества [1-6]. Кинетика влажностной усадки и ее величина находятся под влиянием объемного содержания пор, цементирующего вещества и наполнителя и их соотношения, распределения пор по размерам, кристаллохимического строения и минералогического состава, морфологии, дисперсности частиц цементирующего вещества, энергетического состояния его поверхности.

Закономерности развития влажностных деформаций в зависимости от силы связи твердой фазы и порового пространства с водой согласно классификации, введенной Е.М. Чернышовым, характеризуются тремя типами кривых усадки (рис.1). Основой классификации является величина силы связи структуры с водой, количественно характеризуемая удельной усадкой материала в расчете на масс. % удаленной влаги.

Для кривых усадки I типа (соответствует структуре с наиболее сильной связью с жидкой фазой и отличается проявлением максимальной удельной усадки на каждом этапе обезвоживания материала) характерны значения удельной усадки при обезвоживании в эксплуатационном диапазоне 0,04-0,06 (мм/м)/(%уд.вод.), для кривой II типа (квалифицируется как промежуточный) – 0,02-0,006 (мм/м)/(%уд.вод.), для кривой III типа (свойственен структурам с малой активностью взаимодействия с водяными парами и водой; ему присущ минимум значений удельной усадки и явно выраженный эффект упругого восстановления объема твердой фазы при удалении воды из капилляров) – 0,005-0,008 (мм/м)/(%уд.вод.) [1].

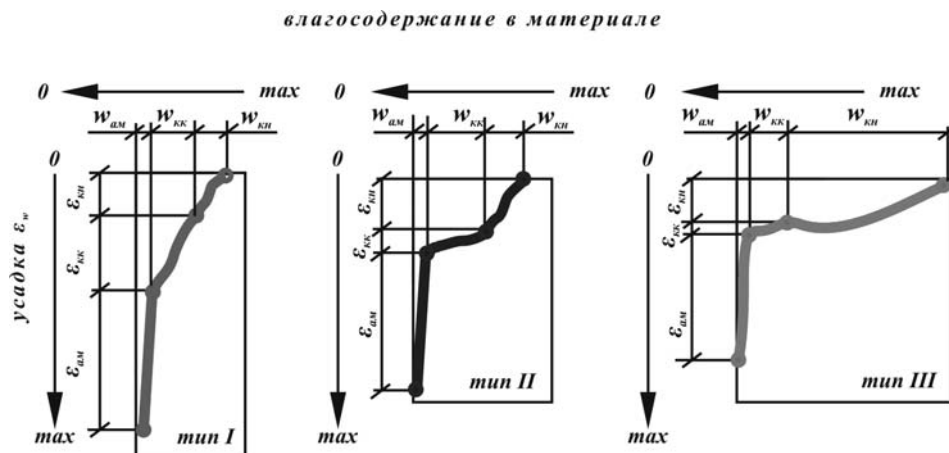


Рисунок 1 - Характерные типы кривых развития влажностной усадки водонасыщенного

силикатного автоклавного материала в условиях квазистатического высыхания [1]:

ϵ_w - полная влажностная усадка; $\epsilon_{кн}$, $\epsilon_{кк}$, $\epsilon_{ам}$ - усадка соответственно на этапах удаления капиллярно-насыщенной $w_{кн}$, капиллярно-конденсированной $w_{кк}$, адсорбционной и межслоевой воды $w_{ам}$

Возможности «перехода» от первого типа кривой развития усадки к третьему, то есть возможности снижения уровня удельных и полных усадочных напряжений при удалении воды из пор, с поверхности твердой фазы и из межслоевых пространств гидросиликатов кальция обеспечиваются, если в материале уменьшается содержание объема цементирующего вещества и пор или увеличивается объемная доля частиц наполнителя (заполнителя); в составе его цементирующей связки возрастает количество хорошо закристаллизованных новообразований с пониженной удельной поверхностью и удельной поверхностной энергией (теплотой смачивания), а функция распределения объема пор по размерам изменяется в сторону увеличения их среднего эффективного радиуса.

Вся система структурных параметров определяет количественное содержание и силу связи воды в материале, кинетику его высыхания. В общем случае, более высоким значениям содержания цементирующего вещества и пор, удельной поверхности и удельной поверхностной энергии цементирующего вещества, меньшему радиусу пор соответствуют большие по величине значения энергетического потенциала поверхности твердой фазы и порового пространства, а именно, не скомпенсированных поверхностных сил, плотности силового поля пор, сил капиллярного давления, обуславливающих способность поглощать и удерживать водяные пары и воду на поверхности твердой фазы материала и в объеме порового пространства. Преодоление действия этих «удерживающих» жидкую фазу сил при обезвоживании требует соответственно затраты большей работы, то есть большей энергии активации процесса (пониженных значений парциального давления водяных паров и повышенной температуры среды), но «высвобождение» этих сил в результате удаления единицы массы жидкой фазы приводит к развитию больших напряжений и деформаций в материале.

При рассмотрении ячеистого бетона как капиллярно-пористой структуры необходимо отметить, что наибольшее влияние на влажностные деформации оказывают микропоры. Механизм влагообмена и связанных с ним объемных изменений очень сложен. Однако установлено, что снижение градиентов влагосодержания и напряжений может быть достигнуто при введении в структуру материала пор воздухововлечения, а также уменьшением концентрации новообразований.

Гидратные соединения, синтезируемые в процессе автоклавной обработки, обладают большой удельной поверхностью. При сорбции водяных паров на поверхности цементирующих веществ высвобождается энергия и система переходит в более устойчивое состояние, при этом совершается работа, связанная с увеличением объема твердого тела. При десорбции водяных паров имеет место обратное явление. По этой причине, чем выше удельная поверхность новообразований, тем более заметно проявляют себя влажностные деформации. По данным расчетов, выполненных на основе экспериментальных данных, установлено, что при наличии слабо закристаллизованных гидратных соединений усадка материала составляет $4 \cdot 10^{-3}$; при увеличении закристаллизованности новообразований (содержание тоберморита в них составляет 50%) она снижается до $0,4 \cdot 10^{-3}$ [2].

В табл. 1 представлены результаты испытаний усадки неармированного ячеистого бетона автоклавного и неавтоклавного твердения разной плотности за длительный период. Из данных табл. 1 следует, что начальная усадка в интервале изменения влажности ($w_{\text{нас}} \div 5$)% происходит в автоклаве, пропарочной камере или при нормальном твердении. Остальная часть усадки проявляется при высыхании ячеистого бетона до равновесной влажности, в среднем до 5 %. Исходя из этого, самой большой усадкой в воздушно-сухих условиях эксплуатации и, следовательно, наименьшей трещиностойкостью обладает обычный ячеистый бетон, полученный по литевой технологии, что следует также из сравнения коэффициентов трещиностойкости.

Для армированных ячеистобетонных элементов при определении допустимой величины свободной усадки после твердения необходимо учитывать условия твердения, характер и степень армирования, а также массивность конструкций. При наличии арматуры, вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения металла и ячеистого бетона, последний после окончания твердения в автоклаве будет сжат, что потенциально повышает трещиностойкость конструкций, а при пропаривании – растянут, что снижает их трещиностойкость. Это предопределяет начало отсчета воздушной свободной усадки: при автоклавной обработке - от послеавтоклавной влажности - $w_{\text{ф}}$, а при пропаривании и нормальном твердении – от состояния водонасыщения – $w_{\text{нас}}$. Во всех случаях усадка уменьшается при снижении В/Т, дисперсности песка и расхода вяжущего, что видно из табл. 1.

Известно, что влажностная усадка ячеистого бетона автоклавного твердения взаимосвязана со структурой мелких пор в диапазоне радиуса пор 7,5...60 нм. Если внутренняя поверхность этих пор $S > 30,5 \text{ м}^2/\text{г}$, то усадка превышает 0,5 мм/м [4].

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ВИРОБИ ТА САНІТАРНА ТЕХНІКА

Таблица 1 - Усадка ячеистого бетона (по данным Сахарова Г.П. [3])

Вид вяжущего	Плотность ячеистого бетона, кг/м ³	Вид технологии и структуры ячеистого бетона	В/Т	Влажность после тепловой обработки или естественного твердения, w _ф , % по массе	Водонасыщение при капиллярном подсосе за 3 суток, w _{нас} , % по массе	Усадка при естественной сушке в условиях относительной влажности φ=60±5% и t=20±2 °С, мм/м в интервале влажности ячеистого бетона, %					w _{нас} - w _ф	Усадка в интервале влажности, w _{нас} - w _ф		Предельная растяжимость, ε _p , мм/м	Коэффициент трещиностойкости, ε _p /ε _y в интервале влажности	
						w _{нас} — 20	20 — 5	w _ф — 5	5 — 0	w _{нас} — 0		1 + 0,01 w _{нас}	мм/м		В % от усадки в интервале влажности w _{нас} — 5	20-5
цементное	700	Л	0.5	30	34	0.4	0.34	0.625	0.95	1.69	3.0	0.П5	15.5	0;32	0.941	0.51
		ЛО	0.33	16	21	0.03	0.29	0.21	0.88	1.2	4.0	О.П	34.0	0.39	1.34	1.83
		ВО	0.24	12	21	0.02	0.19	0.09	0.79	1.0	7.4	0.12	57	0.36	1.89	4.06
		НВО	0.24	14	21	0.03	0.63	0.38	1.0	1.66	6.0	0.26	39	0.58	0.92	1.53
смешанное	600	Л	0.48	22	49	0.14	0.57	0.58	1.6	2.31	18(7.6)	0.13	18	0.76	1.33	1.31
		ЛО	0.38	15	47	0.15	0.42	0.3	1.54	2.11	22(10)	0.27	47	0.7	1.66	2.33
		В	0.39	19	45	0.15	0.9	0.85	1.7	2.75	18(5)	0.2	19	0.97	1.08	1.14
		ВО	0.3	15	46	0.2	0.59	0.42	1.51	2.3	21(5)	0.37	47	0.83	1.41	1,98
	900	Л	0.42	23	35	0.21	0.62	0.66	1.47	2.3	9(5)	0.17	20	1.12	1.81	1.7
		ЛО	0.29	15	31	0.15	0.57	0.4	1.35	2.07	12(4.6)	0.32	44	0.84	1.47	2.1
		В	0.31	18	33	0.22	0.74	0.65	1.52	2.48	11	0.31	32	1.2	1.62	1.85
		ВО	0.24	15	31	0.16	0.57	0.4	1.36	2.09	12.	0.33	34	0.98	1.72	2.45

Принятые обозначения: Л - литевая, В - вибрационная, Н - неавтоклавно-технология; О - оптимальная структура ячеистого бетона на грубомолотом песке, пониженном В/Т и температуре исходных смесей

По данным [4] у бетона на базе α-C₂SH при снижении влажности от насыщенного состояния до 35% усадки практически не происходит. При влажности 35% усадка незначительна; практически вся усадка происходит при высушивании от 5 до 0%. У бетона на базе С-S-H (I) усадка происходит относительно равномерно в пределах изменения влажности от насыщенной до 5% и затем ускоряется. В случае тоберморита при влажности от насыщенного состояния до 35...30% происходит усадка, которая несколько меньше, чем в случае С-5-Н (I), однако при высыхании от 30 до 5% усадка

значительно замедляется, и на кривой зависимости усадки от влажности по массе появляется характерная ступень. В дальнейшем (5%-0) материал на базе тоберморита дает примерно такую же усадку, как и ЯБ на базе С-S-H (I) (табл. 2).

Таблица 2 - Состав и влажностная усадка ячеистого бетона плотностью $\gamma=700$ кг/м³ (по данным [4])

Основной структурообразующий минерал	Содержание минерала, в % по массе	Усадка, в мм/м, при весовой влажности			
		Насыщ. \rightarrow 35	35 \rightarrow 5	5 \rightarrow 0	Σ
α -C ₂ SH	24	0	0,15	0,65	0,8
C-S-H (I)	16	0,50	0,55	1,05	2,10
тоберморит	22	0,30	0,15	1,0	1,45

Относительно близкие значения усадки различных ячеистых бетонов при высушивании от 5% до 0% объясняются выделением межслоевой воды из кристаллов гидросиликатов кальция. При этом, как морфология кристаллов, так и внутренняя поверхность капиллярных пор в значительной мере теряют влияние на величину усадки.

Чем больше в материале содержание тоберморита, тем более «характерно» вырисовывается ступень на кривой усадки в пределах влажности 35...5%. По данным [4-6] усадка ячеистого бетона с содержанием тоберморита более 23% при снижении влажности от насыщенного состояния до 5% находится в пределах 0,40...0,55 мм/м, от 18 до 23% - в пределах 0,40...0,85 мм/м, менее 18% - в пределах 0,35...1,10 мм/м. При этом, если вместе со снижением содержания тоберморита ход кривой усадки приобретает вид, характерный для С-S-H (I), то величина усадки значительно возрастает. Если же кривая сохраняет ступенчатый ход, характерный для тоберморита, то величина усадки практически не изменяется. То есть, количественные изменения содержания тоберморита мало влияют на изменение влажностной усадки, если при этом не появляются новообразования с качественно отличной структурой мелкой пористости.

В соответствии с [5] в процессе высыхания С-S-H(I) усадка плавно нарастает, начиная практически от состояния капиллярного насыщения водой (тип усадки плавный). В случае 1,13 нм-тоберморита усадка протекает в два этапа - от капиллярно-насыщенного состояния до влажности образца примерно 40...35% (по массе) и от 10...5% до 0%, а удаление воды от 35% до 10% протекает практически без усадочных явлений (тип усадки ступенчатый). Различный характер процесса усадки объясняется характерной морфологией кристаллов минералов в цементирующем веществе, которая обуславливает различную форму и различное дифференциальное распределение объема пор между кристаллами. Именно в этих межкристаллических порах (пределы замеренных гидравлических радиусов 0,0075...0,1 мкм) образуются капиллярные силы, взаимодействие которых с элементами структуры цементирующего вещества вызывает явление влажностной деформации материала в эксплуатационных условиях ($w=5...35\%$).

Для высококачественных автоклавных газобетонов характерно содержание около 37% по массе тоберморита в составе цементирующего вещества [5]. На рис.2-5 приведены результаты исследования влияния дифференциальной пористости на процесс влажностной усадки ячеистых бетонов, в котором основным минералом цементирующего вещества был тоберморит (по данным НИПСИ силикатобетон). Усадка при высыхании протекала, в основном, по ступенчатому типу, однако по мере снижения В/Т и доли извести, форма кривых усадки изменялась в сторону плавного типа (рис. 3 и 5). Кривые дифференциальной пористости исследованных образцов представлены в координатах $\Delta V / \Delta r - r$. В этих координатах соотношения между радиусами пор и их объемами даны без искажения. Следует отметить, что в случае использования координат

$\Delta V / \Delta \text{Log} r$ – г происходит некоторое искажение дифференциальных максимумов.

Дифференциальные кривые распределения пор образцов с В/Т от 0,57 до 0,34 образуют семейство кривых, в которых при снижении В/Т закономерно уменьшается объемная доля (и абсолютный объем) более крупных капилляров ($r = 0,1 \dots 0,025$ мкм) и увеличивается доля более мелких пор $r < 0,025$ мкм), а первоначальные относительно пологие кривые превращаются в кривые с сильно выраженным максимумом в области наиболее мелких пор (учитываемых применяемой методикой). Примерно таким же образом влияет снижение доли извести (рис. 2 и 4).

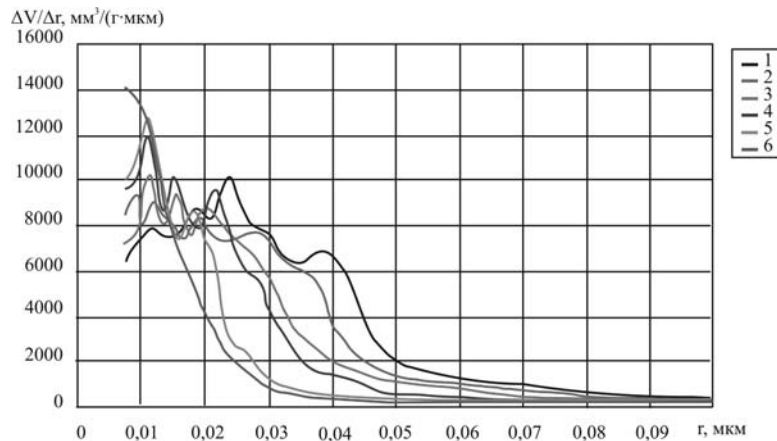


Рисунок 2 – Кривые дифференциальной пористости ячеистого бетона с различным В/Т:
 1 – В/Т=0,57; 2 – В/Т=0,52; 3 – В/Т=0,49; 4 – В/Т=0,45; 5 – В/Т=0,40; 6 – В/Т=0,34
 (виброформование)

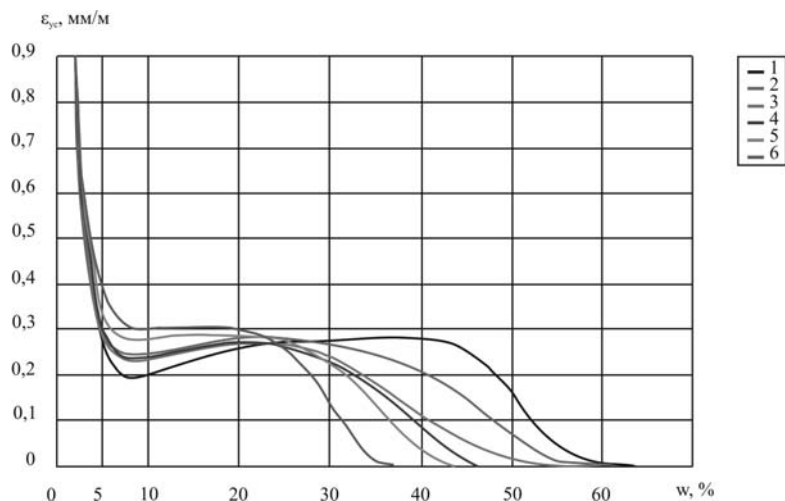


Рисунок 3 – Кривые усадки ячеистого бетона с различным В/Т:
 1 – В/Т=0,57; 2 – В/Т=0,52; 3 – В/Т=0,49; 4 – В/Т=0,45; 5 – В/Т=0,40; 6 – В/Т=0,34
 (виброформование)

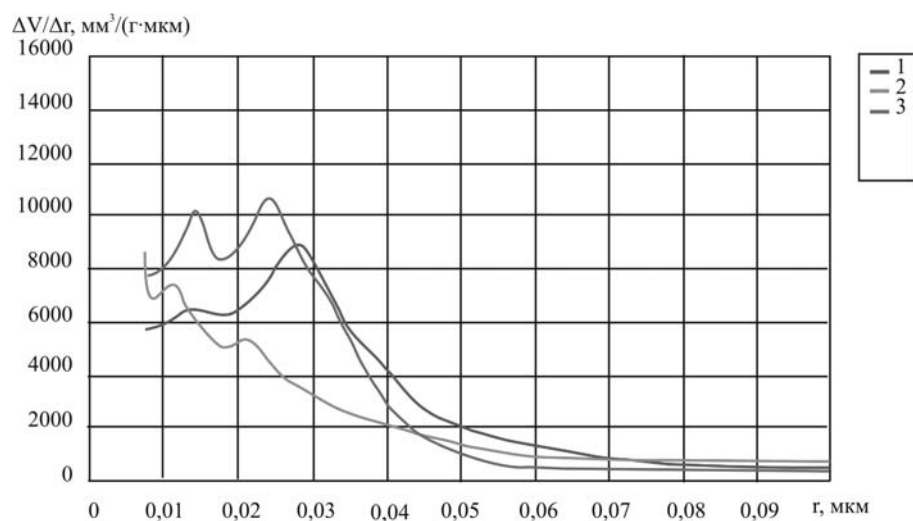


Рисунок 4 - Кривые дифференциальной пористости ячеистого бетона с различным соотношением $\text{CaO}_{II}:\text{CaO}_{III}$: 1 – $\text{CaO}_{II}:\text{CaO}_{III}=8:1$; 2 – $\text{CaO}_{II}:\text{CaO}_{III}=1,2:1$; 3 – $\text{CaO}_{II}:\text{CaO}_{III}=4:1$

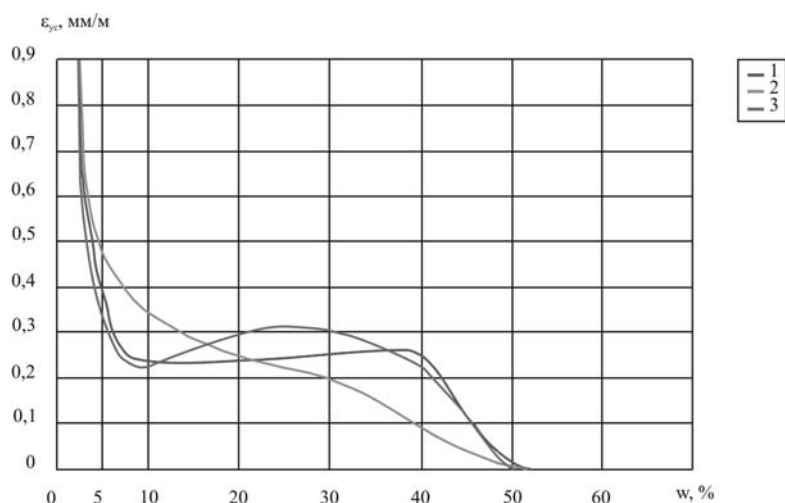


Рисунок 5 - Кривые усадки ячеистого бетона с различным соотношением $\text{CaO}_{II}:\text{CaO}_{III}$: 1 – $\text{CaO}_{II}:\text{CaO}_{III}=8:1$; 2 – $\text{CaO}_{II}:\text{CaO}_{III}=1,2:1$; 3 – $\text{CaO}_{II}:\text{CaO}_{III}=4:1$

Представленные результаты показывают, что на образование капиллярно-пористой структуры ячеистого бетона, кроме стехиометрических и кинетических факторов (состав и характеристики смеси, температура и длительность автоклавирования), заметное влияние оказывают физические условия проведения синтеза (формовочная влажность, наличие гелеобразной структуры и т.д.), а также определенные химические добавки, которые могут присутствовать в сырьевых материалах (особенно в цементе и промышленных отходах).

Для автоклавных ячеистых бетонов, изготовленных на золе-уноса без применения цемента (т.н. PGS-технология, которая применяется на заводах в Польше и ряде других предприятий) получены величины усадки, приведенные в табл. 3 [6]. Усадка при высыхании была определена в соответствии со стандартом PN-EN 680:2008 путем изменения длины образцов в процессе снижения влажности от 30% до 6% по массе. Для всех серий образцов была принята величина $V/T=0,5$. Образцы отличались содержанием и удельной поверхностью золы-уноса.

Образцы серий 3 и 7 имели наибольшую усадку при высыхании. В образцах серии 3 зола-уноса содержала очень мелкие частицы, а в образцах серии 7 зола-уноса содержала очень крупные частицы невыгоревшего угля, которые (по мнению А. Łagosz), стали причиной высокой усадки при высыхании.

Таблица 3 – Результаты определения усадки ячеистого бетона, произведенного на заводе Skawina (Польша)

Показатель	Серия образца						
	1	2	3	4	5	6	7
Плотность в сухом состоянии, кг/м ³	605	630	635	640	590	630	600
Прочность при сжатии, Н/мм ²	4,4	4,3	3,3	5,0	4,7	4,1	3,6
Усадка в диапазоне снижения влажности от 30% до 6% $\epsilon_{cs,ref}$, мм/м	0,26	0,40	0,44	0,06	0,35	0,31	0,45
Полная усадка $\epsilon_{cs,total}$, мм/м	0,87	0,92	0,68	0,58	0,91	0,93	0,71

Выводы

Интенсивность влагообмена со средой определяет меру изменения свойств бетонов при эксплуатации. Параметры строения определяют меру изменения запаса внутренней энергии материала и, тем самым, его реакцию на влажностные воздействия. При этом интенсивность взаимодействия твердой фазы со средой определяется площадью поверхности, ее энергетическим состоянием параметрами порового пространства (энергетическим полем объема пор и их распределением по размерам).

Для ячеистого бетона возможность уменьшения уровня усадочных напряжений при обезвоживании достигается, главным образом, за счет повышения закристаллизованности цементирующего вещества, изменения функции распределения объема пор по их радиусам в сторону увеличения их среднего эффективного радиуса до 60 нм и минимального содержания пор радиусом менее 10 нм.

Рекомендуется с целью получения малоусадочных силикатных автоклавных бетонов в технологии их изготовления принимать условия формирования структуры с таким расчетом, чтобы цементирующее вещество состояло из низкоосновных силикатов кальция с содержанием тоберморита 1,13 нм не менее половины их общего количества, имело удельную поверхность не более 100-150 м²/г и характеризовалось теплотой смачивания более 20 Дж/г, а поровое пространство включало минимальный объем пор с эффективным радиусом менее 25-30 нм и особенно менее 10 нм. При этом содержание цементирующего вещества в твердой фазе материала должно приниматься минимально возможным по критерию обеспечения заданного уровня качества по сопротивлению разрушению и прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Структурные факторы управления влажностной усадкой силикатных автоклавных материалов / Е.М. Чернышов // Тезисы докладов V республиканской конференции «Долговечность конструкций из автоклавных бетонов» Часть 1. – Таллинн. - 1984
2. Теоретические аспекты долговечности ограждающих конструкций и пути повышения качества ячеистых бетонов / А.А. Федин // Тезисы докладов V республиканской конференции «Долговечность конструкций из автоклавных бетонов» Часть 1. – Таллинн. – 1984

3. Экспериментальная оценка надежности ячеистого бетона в связи с технологическими факторами / Г.П.Сахаров // Тезисы докладов V республиканской конференции «Долговечность конструкций из автоклавных бетонов» Часть 1. – Таллинн. – 1984

4. О взаимосвязи влажностной усадки и минералогического состава ячеистого бетона автоклавного твердения / Г.Ф. Грюнер, К.К. Эскуссон, П.А. Грюнер, А.Р. Кубо // Тезисы докладов V республиканской конференции «Долговечность конструкций из автоклавных бетонов» Часть 1. – Таллинн. – 1984

5. Исследование влажностной усадки и мелкой пористости автоклавного ячеистого бетона / Г.Ф. Грюнер, Л.И. Острат, К.К. Эскуссон, У.И. Юурвээ // Тезисы докладов VI республиканской конференции «Долговечность конструкций из автоклавных бетонов». – Таллинн. 1987

6. Influence of the fly ash properties on properties of autoclaved aerated concrete / A. Łagosz, P. Szymański, P. Walczak // 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete “Securing a sustainable future” to be held at Bydgoszcz to celebrate 60 years of AAC experience in Poland , September 14-17, 2011, University of Technology and Life Sciences