

УДК 691.327.32

# КОНСТРУКЦИОННЫЙ ЛЁГКИЙ БЕТОН С ВНУТРЕННИМ УХОДОМ

**Н.М. ЗАЙЧЕНКО**, доктор техн. наук, профессор,

**С.В. ЛАХТАРИНА**, канд. техн. наук

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Выполнены исследования влияния пористого заполнителя в сухом, водонасыщенном состоянии, а также количества дополнительной воды затворения на показатели легкобетонной смеси и бетона – удобоукладываемость смеси, сохраняемость подвижности, объём вовлечённого воздуха, изменение внутренней влажности в процессе твердения, аутогенную усадку, степень гидратации цемента, среднюю плотность и предел прочности при сжатии. Разработаны составы конструкционных лёгких бетонов с показателями предела прочности при сжатии 54–56 МПа на основе концепции внутреннего ухода для снижения риска трещинообразования вследствие развития аутогенной усадки.

**Ключевые слова:** конструкционный лёгкий бетон, внутренний уход, аутогенная усадка, трещинообразование.

**Введение.** В практике современного строительства с каждым годом всё большее распространение получают конструкции и изделия из высокопрочного лёгкого бетона. Анализ целого ряда уникальных проектов, реализованных в мировой практике строительства, показывает, что при проектировании и возведении зданий нового поколения в ближайшее время специалисты будут стремиться к тому, чтобы собственный вес здания был минимальным. Это особенно актуально для больших городов, где существует острый дефицит земельных участков, и проектировщики вынуждены проектировать здания большой этажности. В то же время основания под этими зданиями зачастую могут быть ослаблены в результате прокладки различных инженерных коммуникаций [1].

Целесообразным представляется также снижение веса зданий при строительстве в регионах с различными подрабатываемыми горными выработками территориями (например, угольные шахты). Практически в любых условиях строительства снижение веса проектируемого здания позволяет экономить арматурную сталь (уменьшение процента армирования кон-

струкций) и бетон за счёт снижения нагрузок на фундаменты и несущие конструкции.

Практическим способом решения этой задачи является разработка и применение конструкционных лёгких бетонов.

Конструкционный лёгкий бетон наиболее широко апробирован и применяется в настоящее время в США, Австралии, Японии, Германии, Австрии, Венгрии и др. развитых странах. Высокая эффективность конструкционного лёгкого бетона показана в реализованных проектах различных высотных зданий, например, Australian Square, г. Сидней; Picasso Tower, г. Мадрид; Like Point Tower, г. Чикаго; административные здания высотой 218, 222 и 310 м, г. Хьюстон; правительственное здание Tokyo City Hall, г. Токио; административные здания Assembly Hall University, г. Чикаго, аэропорт Кеннеди, г. Нью-Йорк.

Повышение прочности при сжатии лёгких бетонов определённой средней плотности, в принципе, базируется на повышении прочности, плотности и жёсткости матрицы строительного раствора, как правило, уменьшении водоцементного отношения



*Зайченко  
Николай Михайлович*



*Лактарина  
Сергей Викторович*

и применения комплекса химических и минеральных модификаторов [1]. Многочисленными исследованиями установлен положительный эффект применения активных минеральных добавок (микрокремнезём, зола-уноса ТЭС) взамен части портландцемента, а также золошлаковой смеси взамен части плотного мелкого заполнителя [2-5]. Повышение прочности лёгкого бетона при добавлении микрокремнезёма и золы-уноса обусловлено повышением прочности сцепления между цементной матрицей и пористым заполнителем, а также уплотнением контактной зоны. Это результат как физического, так и химического факторов – микрозаполнитель обеспечивает снижение пористости контактной зоны и повышение плотности микроструктуры, а пуццолановая активность способствует формированию прочных связей между цементной матрицей и поверхностью заполнителя в результате образования низкоосновных гидросиликатов кальция, что подтверждается данными сканирующей электронной микроскопии [5].

В то же время проектирование состава высокопрочного лёгкого бетона с низким значением водоцементного отношения и повышенным расходом вяжущего в сочетании с комплексом минеральных и химических добавок-модификаторов обуславливает риск трещинообразования бетонов в раннем возрасте твердения вследствие развития усадочных деформаций, вызванных самовысыханием бетона – аутогенной усадкой.

Образование трещин в бетонных и железобетонных конструкциях снижает их долговечность вследствие попадания различных агрессивных веществ в эти трещины, что обуславливает развитие коррозии бетона и потерю его защитных свойств по отношению к арматурной стали [6-7]. Ремонт и восстановление конструкций, как правило, связаны с высокими показателями трудоёмкости и капитальных затрат, поэтому более экономичными являются мероприятия по предотвращению трещинообразования в бетоне [8-9].

Одним из важнейших условий минимизации усадки и трещинообразования бетона в раннем возрасте является правильный уход за бетоном, наряду с модификацией цемента, применением минеральных и химических добавок. За последние десятилетия научными школами под руководством известных отечественных и зарубежных учёных: Powers, T.C., Jensen, O.M., Bentz, D.P., Geiker, M.R., Lura, P., Hoff, G.C., Zhutovsky, S., Ковлер К., Фаликман В. и др. выполнены теоретические и экспериментальные исследования оптимизации процесса внутреннего ухода за бетоном.

Специалистами международного комитета по уходу за бетоном RILEM [10] предложена классификация способов ухода за бетоном, основанных на контроле его влажности, которая предусматривает

как внешний (водный и безводный), так и внутренний (водный и безводный) уход. Из литературных источников известно, что R. Philleo [11] одним из первых в 1990 году предложил использовать предварительно водонасыщенные пористые заполнители (Light Weight Aggregates – LWA) в качестве компонентов (агентов) внутреннего ухода за бетоном.

Введение высокопористого заполнителя в плотную цементную матрицу оказывает существенное влияние на механические характеристики бетона. В большинстве случаев отмечено отрицательное воздействие пористых заполнителей на прочность бетона в раннем возрасте. Тем не менее, влияние данного вида заполнителей на прочность зрелого бетона является переменным и зависит от вида заполнителя и его содержания, наличия химических добавок [12]. Так, по данным [6] частичная замена (до 25 %) плотного песка водонасыщенным пористым не оказывает отрицательного влияния на прочность при сжатии.

Пористые заполнители вследствие своей способности к влагообмену с цементным тестом в большей мере, чем плотные заполнители, влияют на процессы структурообразования [13-14]. На первом этапе пористые заполнители, поглощая влагу, способствуют получению более плотного и прочного контактного слоя на поверхности раздела фаз «цементный камень – пористый заполнитель». На втором этапе, при уменьшении количества воды в цементном камне вследствие гидратации цемента, пористые заполнители возвращают ранее поглощённую воду, создавая благоприятные условия для твердения цемента и уменьшая усадочные деформации в цементном камне.

Кроме того, более низкий модуль упругости пористых заполнителей и более совершенная контактная зона вокруг зёрен заполнителя благодаря их пористой структуре поверхности (рис. 1) обеспечивают снижение концентраций напряжений в контактной зоне, что снижает риск раннего трещинообразования в бетоне [13].

В процессе приготовления легкобетонной смеси пористые заполнители обычно предварительно перемешивают с водой перед добавлением цемента.

Так, в работе [15] сообщается, что примерно шесть литров дополнительной воды на кубический метр лёгкого бетона необходимо для повышения подвижности на 25 мм. Таким образом, это обычная практика – предварительно водонасыщать пористые заполнители перед их дозированием [16]. В то же время в лабораторных условиях обычно используется предварительное водонасыщение заполнителя в течение 24 ч перед перемешиванием бетонной смеси. Однако в реальных условиях производства предварительное водонасыщение пористых заполнителей не всегда практично.

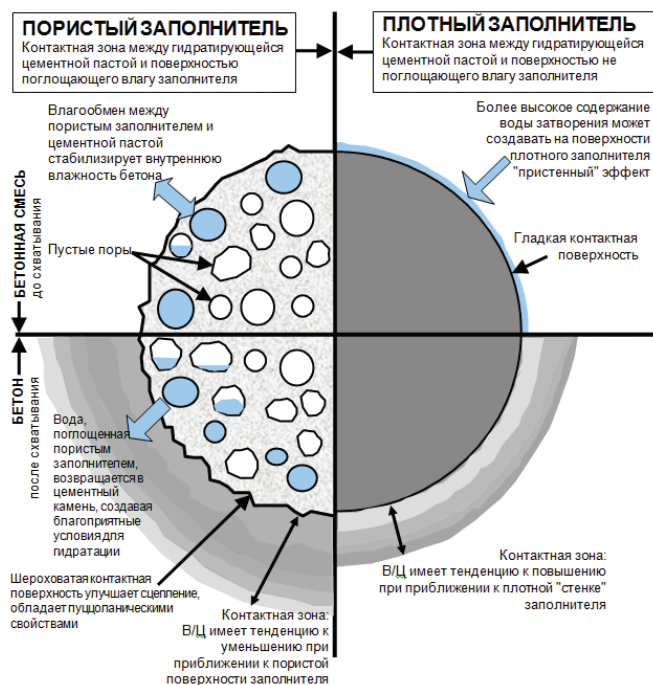


Рис. 1. Сравнительные характеристики контактной зоны с пористым и плотным заполнителями [Expanded Shale, Clay & Slate Institute, Salt Lake City, UT]

Многие производители готового товарного бетона, как правило, предварительно увлажняют заполнитель на складах хранения путём разбрызгивания на него воды. На некоторых заводах применяется технология предварительного вакуумного водонасыщения пористых заполнителей, при этом заполнитель характеризуется высокой и регулируемой влажностью [17].

В некоторых случаях для предотвращения потери удобоукладываемости бетонных смесей применяется способ отсроченного добавления воды затворения непосредственно перед укладкой бетонной смеси на строительной площадке.

При использовании сухого пористого заполнителя эффект потери подвижности бетонной смеси может быть компенсирован введением избыточного количества воды затворения сверх расчётного для исходной подвижности. В этом случае избыток воды затворения поглощается пористым заполнителем, не влияет на величину эффективного В/Ц отношения и не снижает прочность бетона [13].

В данной работе выполнены исследования влияния пористого заполнителя в сухом и водонасыщенном состоянии, а также количества дополнительной воды затворения на показатели легкобетонной смеси и бетона – удобоукладываемость смеси, сохраняемость подвижности, объём вовлечённого воздуха, изменение внутренней влажности в процессе твердения, аутогенную усадку, среднюю плотность и предел прочности при сжатии.

**Материалы и оборудование.** В качестве вяжущего использован портландцемент (ПЦ) завода Aalborg (Дания) СЕМ I-52,5N (активность 625 кгс/см<sup>2</sup>; нормальная густота 24,5 %); активной минеральной добавки – микрокремнезём (МК) Elkem Microsilica (Норвегия). Мелким заполнителем служил песок кварцевый (П) с показателем модуля крупности  $M_k=2,75$ . В качестве крупного пористого заполнителя использовали гравий керамзитовый (ГК) компании Leca (Дания) фракции 4–8 мм с округлой формой зёрен (насыпная плотность 385 кг/м<sup>3</sup>, средняя плотность зерна 710 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение в течение 24 часов – 28,6 %). В качестве суперпластификатора (СП) использована добавка Sika Viscocrete-2300 HE.

Было приготовлено четыре состава бетонов: состав № 1 – цементно-песчаный раствор с В/Ц отношением 0,25; в составах № 2, 3, 4 часть раствора (40% по объёму) была заменена пористым заполнителем в водонасыщенном состоянии (состав № 2), сухом состоянии (состав № 4), сухом состоянии, с гидрофобизированной поверхностью (состав № 3).

Согласно [18] количество воды в литрах на 1 м<sup>3</sup> бетона для внутреннего ухода можно определить по следующей формуле:

$$V_{\text{ват}} (\text{м}^3 \text{ воды} / \text{м}^3 \text{ бетона}) = \frac{C_f \cdot CS \cdot \alpha_{\text{max}}}{\rho} \quad (1)$$

где:  $C_f$  (кг/м<sup>3</sup>) – содержание цемента в смеси;  
 $CS$  (0,06 кг воды на 1 кг цемента) – химическая усадка цемента;  
 $\alpha_{\text{max}}$  – максимальная степень гидратации цемента (0-1);  
 $\rho$  – плотность воды (1000 кг/м<sup>3</sup>).

Для бетонов с В/Ц отношением ниже 0,40 цемент не гидратирует полностью, и максимальное значение степени гидратации можно определить как (В/Ц)/0,40 [18].

Согласно формуле (1) объём дополнительной воды для состава № 4 составляет 0,025 м<sup>3</sup>. Состав бетонных смесей представлен в таблице 1.

Технологические свойства бетонных смесей, в частности, подвижность и её потерю во времени, определяли по диаметру расплыва стандартного конуса Абрамса. Диаметр расплыва бетонной смеси измеряли каждые 20 минут после перемешивания на горизонтальной поверхности в двух перпендикулярных направлениях. За показатель подвижности принимали среднее значение.

Для определения механических свойств бетона, в частности предела прочности при сжатии, были изготовлены по девять образцов цилиндрической

Таблица 1. Состав бетонных смесей

№	Состав	ПЦ, кг/м <sup>3</sup>	МК, кг/м <sup>3</sup>	П, кг/м <sup>3</sup>	В, л/м <sup>3</sup>	ГК, кг/м <sup>3</sup>	СП, л/м <sup>3</sup>	Воздух, %
1	ГК 0 %	1113	167	779	250	—	13,4	4,5
2	ГК 40 % (водонасыщенный)	667	100	467	159	300	8,0	3,1
3	ГК 40 % (сухой, гидрофоб.)	667	100	467	159	300	8,0	3,1
4	ГК 40 % (сухой+15 % дополнит. воды)	667	100	467	159+25	300	8,0	4,3

формы размерами 60×120 мм для каждого состава. После 24 часов твердения образцы были расформованы и твердели при постоянной температуре +30 °С без обмена влагой с окружающей средой. Предел прочности при сжатии определяли в возрасте 1, 7 и 14 суток твердения согласно [19].

Кинетику изменения внутренней влажности бетонов определяли на станции Rotronic Hygrosopic DT в течение 14 суток твердения образцов без обмена влагой с окружающей средой при постоянной температуре +30 °С (рис. 2).

Аутогенная усадка измерялась с помощью автоматизированного дилатометра конструкции О.М. Йенсена и П.Ф. Хансена [20]. Бетонную смесь после перемешивания укладывали и уплотняли в гофрированную поливинилхлоридную трубу длиной 350 мм и внутренним диаметром 82 мм.

Образцы бетона твердели в бассейне с полигликолем в течение 14 суток при постоянной температуре +30 °С. (рис. 3). Измерения деформаций проводились с помощью электронного индикатора TRANSTEK серии 305 с точностью до 0,003 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Подвижность бетонной смеси

Показатель подвижности бетонных смесей и потерю её во времени исследовали в течение 60 минут после перемешивания. Как видно из рисунка 4, все бетонные смеси теряют подвижность в течение 60 минут. Состав № 2, в котором пористый заполнитель предварительно водонасыщен, характеризуется минимальным значением потери подвижности — около 7 %. Вода затворения не поглощается пористым заполнителем, и небольшая величина потери подвижности связана, вероятнее всего, с адсорбцией суперпластификатора на поверхности продуктов гидратации вяжущего вещества.

При введении дополнительного количества воды затворения в количестве 15 % (состав № 4) начальная подвижность бетонной смеси аналогична подвижности состава № 2. Однако потери подвижности через 60 минут составили 24 %. Это свидетельствует о значительном поглощении пористым заполнителем воды затворения. Теоретически, согласно кинетике



Рис. 2. Станция Rotronic Hygrosopic DT для измерения внутренней влажности бетонов



Рис. 3. Автоматизированный дилатометр для измерения аутогенной усадки бетонов

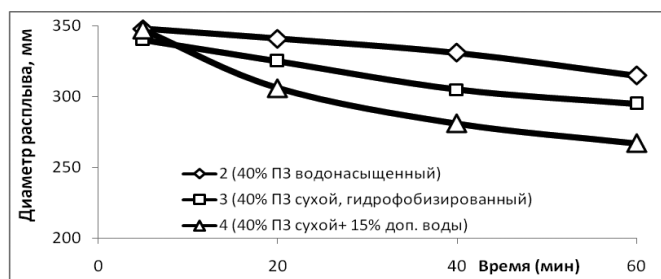


Рис. 4. Изменение подвижности бетонных смесей в процессе выдержки после приготовления

водопоглощения в течение 24 часов в воде пористый заполнитель за три часа (соответствует времени конца схватывания цементного теста) поглощает около 23 % воды. Следовательно, 300 кг пористого заполнителя способно поглотить 69 литров воды. Соответственно, объём дополнительной воды затворения в количестве 25 литров, необходимый для внутреннего ухода бетона, недостаточен для компенсации потерь подвижности бетонной смеси.

При введении сухого заполнителя с гидрофобизированной поверхностью (состав № 3) потери подвижности составляют 17 %, что указывает на то, что гидрофобная плёнка на поверхности зерна заполнителя не полностью блокирует проникновение влаги внутрь зерна.

#### Аутогенная усадка

Как видно из рисунка 5, значительное увеличение аутогенной усадки бетона состава № 1 (раствор) приходится на время твердения от 5 до 24 часов, когда деформации достигают значения 2200 мкм/м. В тот же период твердения наблюдается резкое падение значения внутренней влажности системы – от 100 до 93 % (рис. 6). Дальнейшее уменьшение внутренней влажности системы (период между 2 и 5 сутками) несколько стабилизируется. Однако в возрасте 14 суток величина внутренней влажности цементной

системы снижается до значения 80 %. Одновременно с уменьшением значения внутренней влажности происходит увеличение величины аутогенной усадки раствора до 2600 мкм/м. Таким образом, большая часть аутогенной усадки раствора, вызванной внутренним самовысыханием, развивается в течение первых семи суток гидратации.

Следовательно, можно предположить, что для предотвращения в конструкционных лёгких бетонах микротрещинообразования в раннем возрасте вследствие развития аутогенной усадки должны быть предприняты меры по уходу за бетоном, которые будут эффективными, по крайней мере, в течение первой недели твердения.

Как следует из данных рисунка 7, при замене части раствора пористым заполнителем во всех случаях в начальный период твердения (48 часов) происходит небольшое расширение системы с последующим развитием усадки и растягивающих напряжений в составах № 3 и № 4. Однако в составе № 2 при использовании предварительно водонасыщенного пористого заполнителя даже в возрасте 14 суток наблюдается расширение системы.

Следует отметить, что в этот период бетон сохраняет значение относительной влажности в пределах 97–96,6 % (рис. 8). В то время, когда механизм внутреннего ухода, способствующий снижению аутогенной усадки, достаточно хорошо известен, механизмы, приводящие к расширению твердеющей системы в раннем возрасте, изучены не так детально. Расширение, скорее всего, вызвано давлением кристаллов этtringита либо набуханием гелевидных продуктов гидратации, которые, как правило, рассматривают как основные причины расширения системы в раннем возрасте [21]. Таким образом, аутогенная усадка полностью предотвращается в конструкционном лёгком бетоне при использовании предварительно водонасыщенных пористых заполнителей.

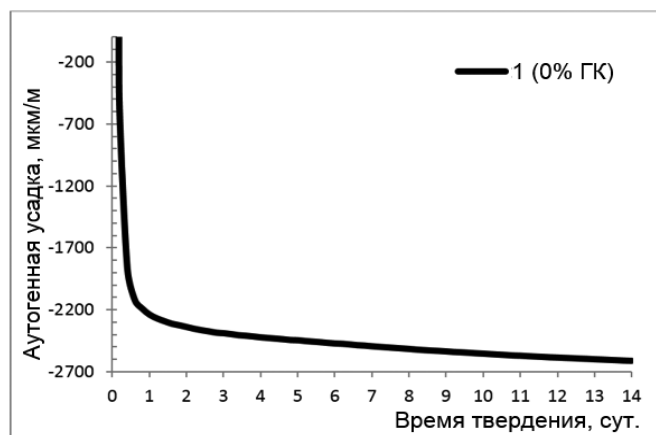


Рис. 5. Изменение аутогенной усадки бетона в процессе твердения

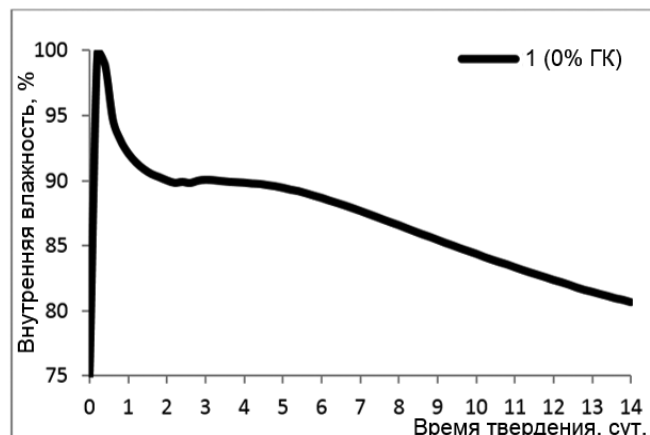


Рис. 6. Изменение внутренней влажности бетона в процессе твердения

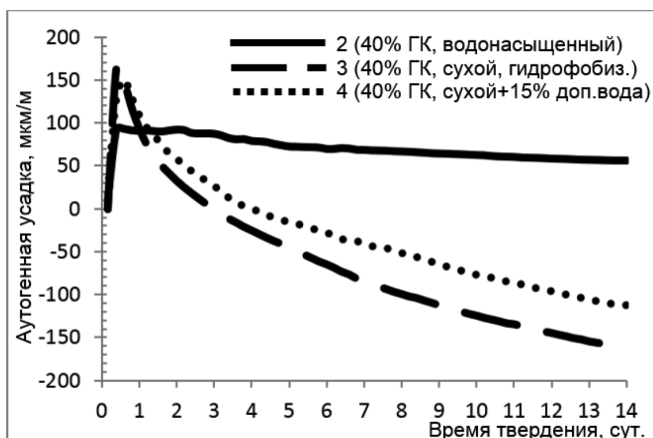


Рис. 7. Изменение аутогенной усадки бетона в процессе твердения

При замене части раствора сухим пористым заполнителем (составы № 3, 4) аутогенная усадка достигает значения 160 и 100 мкм/м, соответственно. Постепенное увеличение аутогенной усадки с 3 по 14 сутки твердения сопровождается уменьшением значения внутренней влажности бетонов в пределах от 93–95 до 81–83 %.

Гидрофобизация поверхности керамзитового гравия (состав № 3) не устраняет проблемы развития аутогенной усадки. С другой стороны, введение дополнительной воды затворения также не решает полностью эту проблему, однако величина аутогенной усадки  $\epsilon = -100 \times 10^{-6}$  не является критичной для развития раннего трещинообразования, вероятность которого является наибольшей, когда отношение усадочных напряжений к пределу прочности при растяжении цементного камня достигает максимума (12–36 часов) [22].

По данным РФА проб цементного камня, отобранных после механических испытаний бетона (составы № 1-4), отмечены изменения интенсивности дифракционных отражений минерала алита. Для проб цементного камня, соответствующих составу бетона с сухим пористым заполнителем (состав № 3) в сравнении с составом бетона, где использовался предварительно водонасыщенный (состав № 2) и сухой заполнитель, с дополнительной водой затворения для внутреннего ухода (состав № 4), можно отметить более характерное повышение интенсивностей основных линий алита:  $d=0,280; 0,277; 0,232; 0,183; 0,154$  нм (рис. 9, рис. 10, табл. 2).

Наряду с этим для бетона состава № 3 наблюдается повышение интенсивности дифракционных отражений, характерных для образующегося в процессе гидратации портландцемента минерала портландита:  $d=0,263; 0,193; 0,169$  нм. В то же время для бетонов, где пористый заполнитель используется как агент внутреннего ухода (составы № 2 и № 4), наблюдается повышение интенсивности дифракционных

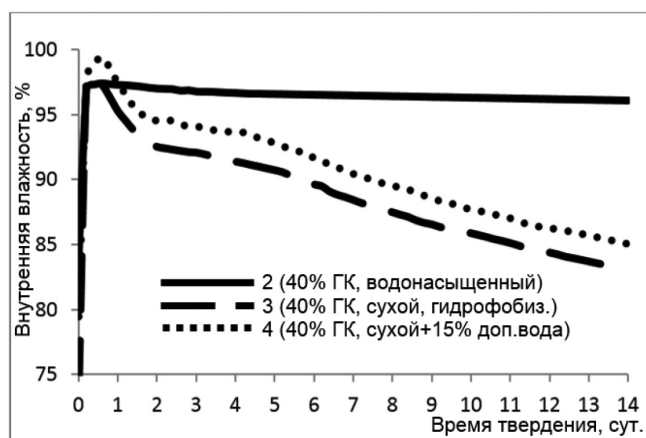


Рис. 8. Изменение внутренней влажности бетона в процессе твердения

отражений гидросиликатов кальция:  $C_3SH_2$ ,  $C_2SH_2$  и  $CSH(V)$ , что свидетельствует о более высокой степени гидратации цемента и более высокой

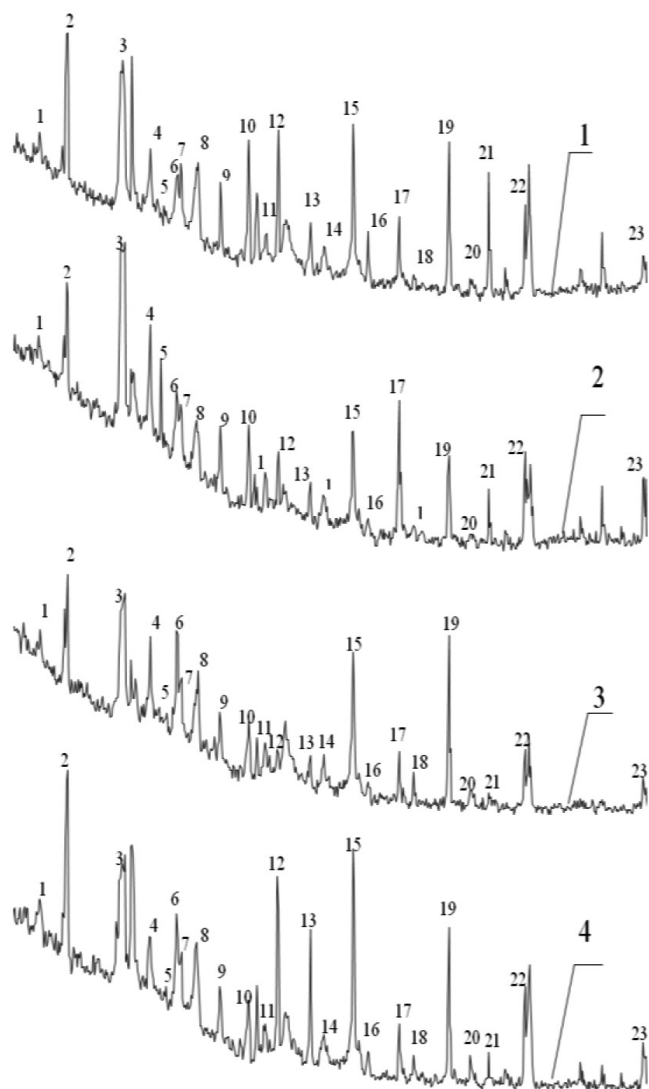


Рис. 9. Рентгенограммы образцов цементного камня в возрасте 14 суток твердения (обозначение см. табл. 2)

Таблица 2. Характеристика рентгенограмм проб цементного камня

№ реплики	2 $\theta$ , град.	d, нм	Интенсивность реплик для образцов бетона			
			Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4
$54\text{CaO} \cdot 16\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$						
5	30,11	0,297	12,5	49,8	33,9	14,8
6	31,77	0,280	66,5	64,4	156	74,9
7	32,13	0,277	71,8	56,8	90,2	46,1
9	36,21	0,245	49,1	44,2	77,7	41,7
10	39,07	0,232	113,3	61,5	83,3	39,8
11	40,86	0,218	28,9	32,3	38,9	11,8
15	49,81	0,183	147,4	98,6	182,6	136,12
16	51,31	0,176	48,8	15,7	21,6	17,6
18	56,01	0,162	16,8	16,3	24,2	11,8
19	59,6	0,154	123,5	82,6	160,6	82,3
20	61,82	0,149	14,4	12,5	25,6	13,3
$\text{Ca}(\text{OH})_2$						
8	33,87	0,263	84,8	50,2	106,6	70
14	46,84	0,193	35,1	31,3	53,1	24,6
17	54,11	0,169	61,2	93,7	44,2	29,5
21	64,01	0,145	95	38,1	16,8	12,6
CSH (B)						
4	29,01	0,307	77,2	102,4	54,8	107,7
12	42,98	0,210	58,7	23,6	39,6	99,7
23	79,55	0,122	25	51,6	36,9	26,4
$\text{C}_2\text{SH}_2$						
13	45,42	0,200	47,5	33,6	48,7	65,2
22	66,98	0,140	72,1	71,8	71	60,7
$\text{C}_3\text{SH}_2$						
1	17,65	0,502	35,6	42,7	21,1	31

интенсивности связывания оксида кальция CaO с микрокремнезёмом, который содержит в своём составе химически активный оксид кремния SiO<sub>2</sub>.

Для бетона состава № 3 отмечена также меньшая интенсивность некоторых линий, идентифицирующих минерал этtringит: d=0,441; 0,344 нм.

Таким образом, вышеприведённое описание рентгенограмм объясняет причину замедленного роста прочности бетона состава № 3 в ранние сроки твердения (рис. 11).

Частичная замена раствора (состав № 1) пористым заполнителем значительно снижает показатели предела прочности при сжатии бетона. Наибольшее значение предела прочности при сжатии лёгкого бетона наблюдается при введении предварительно водонасыщенного пористого заполнителя (состав № 2). Лёгкий бетон с дополнительной водой затвердения

(состав № 4) характеризуется более высокими значениями прочности в раннем возрасте.

Таким образом, введение дополнительной воды затвердения в бетон с сухим пористым заполнителем не предотвращает потери подвижности бетонной смеси в течение 60 минут после перемешивания, однако способно минимизировать развитие аутогенной усадки бетона, особенно в ранние сроки твердения. Предварительное водонасыщение пористых заполнителей способствует сохранению подвижности бетонной смеси в течение 60 минут, а также полностью предотвращает развитие аутогенной усадки как результат внутреннего уюда.

Степень гидратации цемента рассчитана путём определения химически связанной воды в возрасте 7 и 14 суток твердения при температуре +30 °С в замкнутых условиях, т. е. без обмена влагой с окружающей средой.

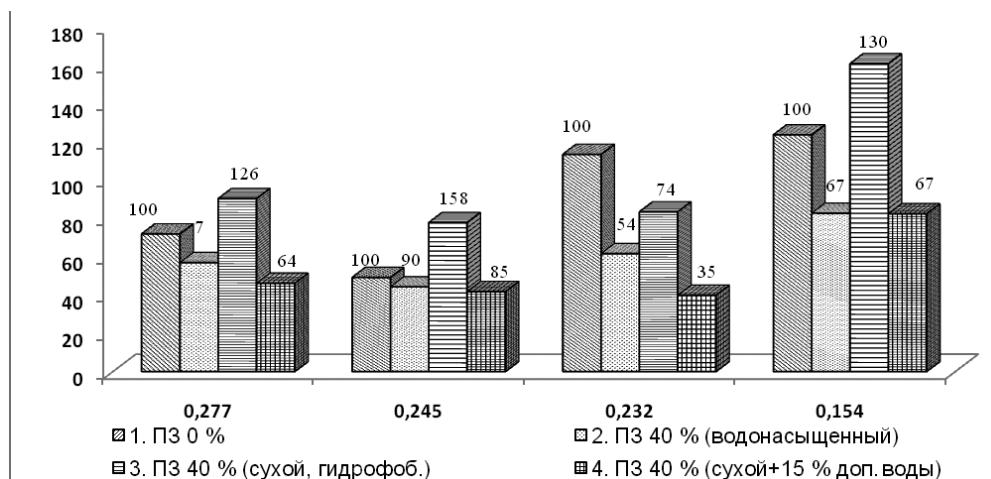


Рис. 10. Относительная интенсивность (%) основных линий алита

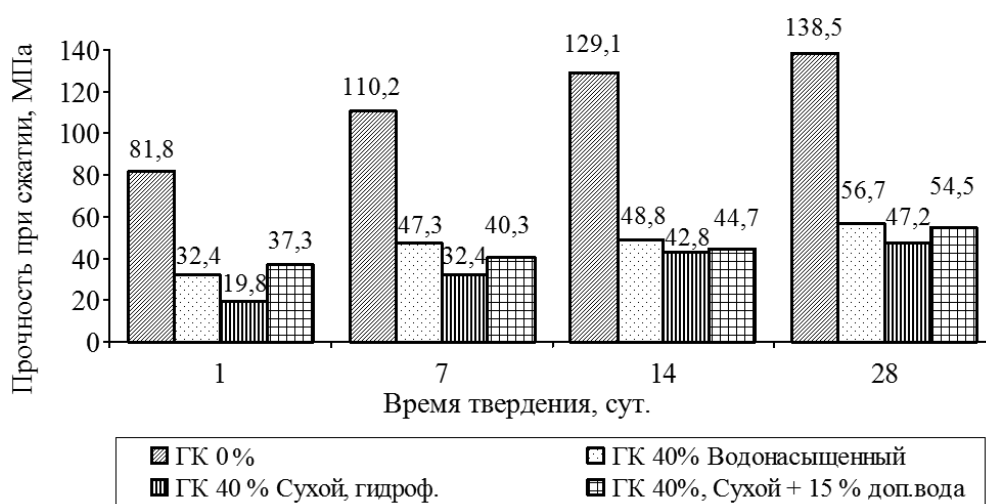


Рис. 11. Кинетика роста прочности при сжатии бетонов

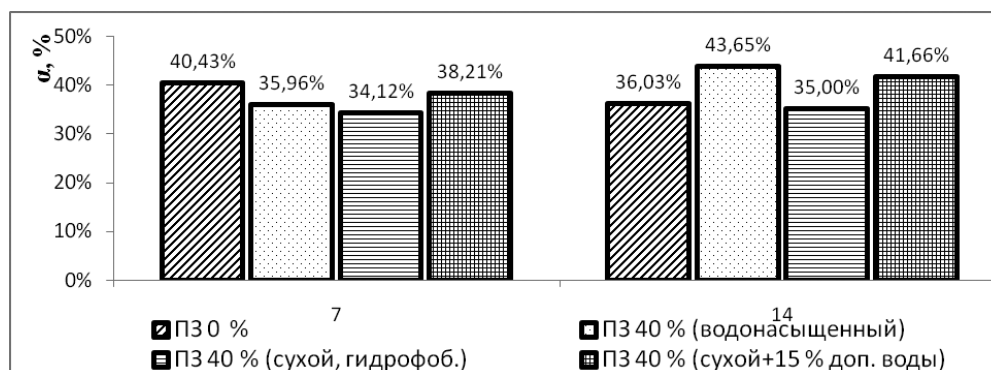


Рис. 12. Степень гидратации цемента при твердении 7 и 14 суток при температуре +30 °С

Степень гидратации цементного камня контрольного состава № 1 – цементно-песчаного раствора, в возрасте 14 суток составляет 36,03 % (рис. 12).

Предварительное водонасыщение пористого заполнителя (состав № 2) приводит к повышению степени гидратации цементного камня в 14-суточном возрасте до 43,65 %. При использовании сухого

пористого заполнителя с гидрофобизированной поверхностью (состав № 3) степень гидратации цементного камня на 7 суток составляет 34,12 %, к 14 суткам твердения составляет 35 %.

При введении дополнительной воды затворения, необходимой для внутреннего ухода (состав № 4), степень гидратации цемента в возрасте 7 суток



составляет 38,21 %, что выше на 2,25 %, чем степень гидратации цемента состава № 2 за аналогичный период, где использовался предварительно водонасыщенный керамзит. Эти данные объясняют более высокие значения показателя предела прочности при сжатии бетона с дополнительной водой затворения в раннем возрасте (рис. 9). Однако в возрасте 14 суток твердения степень гидратации цементного камня состава № 4 составляет 41,66 %, что на 2 % меньше показателя для бетона состава № 2 (рис. 12).

## ВЫВОДЫ

Разработаны составы конструкционных лёгких бетонов с показателями предела прочности при сжатии 54–56 МПа с внутренним уходом с целью снижения риска трещинообразования вследствие развития аутогенной усадки. Установлено, что введение дополнительной воды затворения в бетон с сухим пористым заполнителем не предотвращает потери подвижности бетонной смеси в течение 60 минут после перемешивания, однако способно минимизировать развитие аутогенной усадки бетона, особенно в ранние сроки твердения. Предварительное водонасыщение пористого заполнителя способствует повышению сохраняемости подвижности бетонной смеси в течение 60 минут, а также полностью предотвращает развитие аутогенной усадки как результат внутреннего ухода. По данным рентгенофазового и термогравиметрического анализов установлено, что внутренний уход за бетоном обеспечивает более высокую степень гидратации цементного камня, что иллюстрируется снижением интенсивностей дифракционных отражений алита ( $d=0,277; 0,232; 0,183; 0,154$  нм) и повышением интенсивности линий гидросиликатов кальция ( $d=0,301; 0,247; 0,208$  нм) в сравнении с образцами без внутреннего ухода. Установлено, что введение дополнительной воды затворения позволяет минимизировать аутогенную (собственную) усадку лёгкого бетона до величины  $\varepsilon_{ca} = -100 \times 10^{-6}$ , которая не является критичной для развития раннего трещинообразования. Это обеспечивается внутренним уходом с поддержанием влажности не менее 90 % в первые семь суток твердения.

## Библиографический список

1. Звездов, А.И. Высокопрочные лёгкие бетоны в строительстве и архитектуре / А.И. Звездов, В.П. Фаликман // Деловая слава России. – 2010. – № 4. – С. 106–109.
2. Shannag, M.J. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures / M.J. Shannag // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25. – pp. 658–662.

3. Bai, Y. Properties of light-weight concrete manufactured with fly ash, furnace bottom ash and Lytag / Y. Bai, R. Ibrahim, P.A.M. Basheer // Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. – Beijing, May 20–21, 2004. – pp. 77–88.
4. Sadrekarimi, A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete / A. Sadrekarimi // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2004. – Vol. 2, No 3. – pp. 409–417.
5. Subasi, S. The effects of using fly ash on high strength lightweight concrete produced with expanded clay aggregate / S. Subasi // Scientific Research and Essay. – Vol. 4 (4), April 2009. – pp. 275–288.
6. Hoff, G.C. The Use of Lightweight Fines for Internal Curing of Concrete / G.C. Hoff // Report prepared for Northeast Solite Corporation: Mississippi, Clinton: Hoff Consulting LLC. – August 20, 2002. – 44 pp.
7. Pease, B.J. The role of shrinkage-reducing admixtures on shrinkage, stress development, and cracking / Bradley J. Pease // Thesis for the Degree of Master of Science in Civil Engineering submitted to the Faculty of Purdue University, 2005. – 236 pp.
8. Project Summary Report 0-4098-S «Use of Innovative Materials to Control Restrained Shrinkage Cracking in Concrete Bridge Decks: A Summary» / K. Folliard, C. Smith, M. Brown, G. Sellers // the University of Texas at Austin: Center for Transportation Research. – October 2003.
9. Canpolat, F. SRAs – RECENT STUDIES. Report No. CBU-2003-50, REP-543 / F. Canpolat, T.R. Naik // the University of Wisconsin – Milwaukee: Department of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science. – December 2003.
10. RILEM Report 41. Internal curing of concrete – state of the art. In: Kovler K, Jensen O.M. editors. RILEM Publications S.A.R.L; 2007. – 161 pp.
11. Philleo, R. Concrete science and reality / R. Philleo // Material Science of Concrete II, American Ceramic Society. – 1991. – pp. 1–8.
12. Zhutovsky, S. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete / S. Zhutovsky, K. Kovler // Cement and Concrete Research. – 2012. – Vol. 42, No 2. – pp. 20–26.
13. Баженов, Ю.М. Технология бетона: [учебник] / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 528 с.
14. ACI 213R-03 (Reapproved 1999) «Guide for Structural Lightweight Concrete» (ACI 213R-03) Reported by ACI Committee 213. – Copyright 2003: American Concrete Institute. – 2003.
15. Gambhir, M.L. Concrete Technology: Theory and Practice: Fifth Edition / Murari Lal Gambhir – Tata McGraw-Hill Education, 2013. – 763 pp.
16. Craig, P. Another look at the drying of lightweight concrete: A comparison of drying times for normal weight and lightweight floors / P. Craig, B. Wolfe // Concrete international. – January 2012. – pp. 53–56.
17. Golias, M. The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing / M. Golias, J. Castro, J. Weiss // Construction and Building Materials. – Vol. 35. – 2012. – pp. 52–62.
18. Bentz, D.P. Protected paste volume in concrete. Extension to using saturated lightweight fine aggregate / D.P. Bentz, K.A. Snyder // Cement and Concrete Research. – 1999. – Vol. 29, No 3. – pp. 1863–1867.

19. ASTM C 39/C 39M – 03 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens // ASTM International – West Conshohocken Pennsylvania 19428-2959, United States 2007.
20. Jensen, O.M. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste / O.M. Jensen, P.F. Hansen // Materials and Structures. – Vol-181 (28). – 1995. – pp. 406–409.
21. Захезин, А.Е. Цементные дорожные бетоны с комплексными добавками на основе алифатических эпоксидных смол : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / А.Е. Захезин. – Челябинск: ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», 2010. – 19 с.
22. Sadrekarimi, A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete / A. Sadrekarimi // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2004. – Vol. 2, No 3. – pp. 409–417.

## ДЛЯ СТУДЕНТОВ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ И ИНЖЕНЕРОВ-СТРОИТЕЛЕЙ



**Модифицированные цементные бетоны для устойчивого развития.** – Уч. пособие. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 474 с.  
ISBN 978-5-4486-0132-3

В учебном пособии рассмотрены технология и строительно-технические свойства модифицированных химическими и минеральными добавками цементных бетонов различного назначения, в том числе специальных, отвечающих основным принципам устойчивого развития (долговечность, надёжность, ресурсосбережение и энергоэффективность). Отражены инновационные решения в технологии современных бетонов, вяжущих веществ и заполнителей. Представлена подробная характеристика минеральных добавок и химических модификаторов бетона мировых лидеров строительной химии (BASF, MAPEI, Sika, MC-Bauchemie, GRACE, CORTEC и др.). Приведены действующие нормативные документы (ДСТУ, ГОСТ, ASTM, EN BS), регламентирующие технические требования к бетонам и их компонентам.

По вопросам приобретения издания обращаться:  
E-mail: [izdat@iprmedia.ru](mailto:izdat@iprmedia.ru), [author@iprmedia.ru](mailto:author@iprmedia.ru)

**Центр испытаний строительных изделий и конструкций ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» проводит испытания строительных материалов и изделий:**

- ❖ **Заполнители бетона:** щебень, гравий, песок природные для общестроительных работ, бетонов, строительных конструкций, изделий, а также их смеси; щебень и песок из доменных, металлургических и сталеплавильных шлаков.
- ❖ **Вязущие вещества:** цементы общестроительного назначения; цемент сульфатостойкий; гипс; известь строительная.
- ❖ **Бетоны:** бетон тяжёлый, лёгкий, ячеистый; асфальтобетон дорожный и аэродромный.
- ❖ **Растворы** строительные.
- ❖ **Смеси:** смеси бетонные, асфальтобетонные.
- ❖ **Кровельные материалы:** листы асбестоцементные; черепица бетонная, керамическая; мастики кровельные и гидроизоляционные.
- ❖ **Битумы:** битумы нефтяные для дорог и покрытий; эмульсии битумные дорожные.
- ❖ **Строительные изделия:** изделия бетонные тротуарные; плиты из природного и декоративного камня; кирпич и камни стеновые бесцементные, силикатные, керамические, бетонные; плитка керамическая.



E-mail: [mailbox@donnasa.ru](mailto:mailbox@donnasa.ru)  
Свидетельство об аттестации № ИЛ-021/2017  
выдано 13.03.2017 ГП «Донецкстандартметрология»

