

УДК 691.332.5

**А.Д. Курзанов, В.А. Голубев**

**A.D. Kurzanov, V.A. Golubev**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

## **ДОЛГОВЕЧНОСТЬ АВТОКЛАВНОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА И СПОСОБЫ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ**

### **DURABILITY OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE AND METHODS OF ITS INCREASE**

Рассмотрены причины разрушения газобетона (вода, отрицательные температуры, углекислота воздуха) и факторы, влияющие на долговечность ячеистого бетона при эксплуатации в агрессивных средах. Указаны основные способы повышения долговечности бетона, в том числе объемная гидрофобизация материала.

**Ключевые слова:** автоклавный газобетон, долговечность, атмосферостойкость, морозостойкость, карбонизация, усадка.

This article examines the causes of the destruction of aerated concrete (water, negative temperature, carbon dioxide of air), and the factors affecting the durability of porous concrete for use in aggressive environments. Also, this article examines the main ways to improve it, including bulk hydrophobization of material.

**Keywords:** autoclaved aerated concrete, durability, weatherability, frost-resistance, carbonization, shrinkage.

Ячеистый бетон – современный строительный материал, появившийся в стране в 30-е гг. прошлого столетия и набирающий все большую популярность в наши дни. Низкая плотность и одновременно относительно высокая прочность ячеистого бетона обеспечивают возможность многоцелевого использования этого материала: его можно применять как в малоэтажном строительстве, так и в ограждающих конструкциях высотных зданий; как в качестве несущих стен, так и в качестве теплоизоляционного слоя стеновых конструкций.

Ячеистому бетону присущи экологичность, биологическая стойкость, пожаробезопасность, легкость в обработке – все это определяет широкий потребительский спрос на материал. Кроме того, благодаря достаточной паропроницаемости стен из ячеистого бетона обеспечивается благоприятный микроклимат в помещении.

Актуальная в настоящее время проблема снижения потребления энергетических ресурсов, затронувшая большинство сфер промышленности, коснулась и строительной отрасли. В начале 2000-х гг. на законодательном уровне были утверждены условия обеспечения эффективной защиты зданий и сооружений от теплопотерь. В нормативно-технической документации это отразилось в принятии СНиП 23-02–2003 «Тепловая защита зданий» и СП 23-101–2000 «Проектирование тепловой защиты зданий».

С учетом этих законодательных актов ячеистый бетон становится одним из немногих материалов, которые целесообразно применять в качестве однослойных стеновых конструкций. В основе этого вывода лежат результаты теплотехнического расчета необходимой толщины материала при обеспечении нормативной тепловой защиты здания (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ необходимой толщины кладки  
на основе различных материалов

Материал кладки	Теплопроводность кладки, Вт/м <sup>2</sup> ·°С	Расчетная толщина, мм	Примечание
Газобетон D500	0,148	504	На основе клея
Пустотелый кирпич	0,45	1531	На основе цементно-песчаного раствора
Легкий бетон D800	0,21	715	С керамзитовым заполнителем

*Примечание.* Расчет проведен для условий г. Перми – климатический район строительства 1 [1].

Устройство однослойной стены из пустотелого кирпича приводит к значительному увеличению материалоемкости конструкции (в отличие от ячеистого бетона) и удельной массы стены. Применение же наряду с кирпичом утеплителя (например, минераловатного) ведет к повышению трудоемкости возведения и удорожанию конструкции.

Необходимо также отметить недостатки ячеистого бетона, к которым относятся низкая прочность при растяжении и высокая хрупкость. Кроме того, по результатам натурных обследований сооружений из ячеистого бетона [2, 3] установлено, что в конструкциях, эксплуатирующихся более двух лет,

развиваются дефекты (трещины, сколы). Отмеченные дефекты не связаны с механической нагрузкой на конструкцию, они являются следствием изменения структуры бетона в результате атмосферных воздействий.

К наиболее существенным атмосферным факторам, негативно воздействующим на ячеистый бетон, следует отнести:

- попеременное замораживание и оттаивание конструкций во влагонасыщенном состоянии;
- углекислый газ, вступающий в реакции карбонизации с гидросиликатами новообразований;
- попеременное увлажнение и высушивание бетона.

Сопrotивление попеременному замораживанию и оттаиванию определяет морозостойкость изделий, два других фактора атмосферного влияния приводят к усадке материала, следовательно, к возникновению внутренних напряжений, появлению трещин. Сопrotивление усадке определяется трещиностойкостью.

Морозостойкость – единственный в настоящее время критерий долговечности, нормируемый ГОСТ 31359–2007 [4]. Опыт эксплуатации показал, что по сравнению с другими стеновыми материалами (например, кирпичом) ячеистобетонные изделия характеризуются повышенной морозостойкостью. Это объясняется в первую очередь характером пористой структуры материала. Экспериментально установлено [5], что при отношении объема пор с диаметром более 200 мкм к объему пор с диаметром 0,1–200 мкм более 0,09 материал будет иметь достаточную морозостойкость. Установлено, что данное отношение у ячеистого бетона больше 1. Кроме того, разобcценных пор гораздо больше сообщающихся, что также создает предпосылки высокой морозостойкости.

При исследовании влияния фазового состава новообразований на морозостойкость установлено, что низкоосновные гидросиликаты кальция, несмотря на меньшую их морозостойкость по сравнению с высокоосновными, гарантируют нормируемое количество циклов замораживания-оттаивания [6].

Более существенное влияние на морозостойкость оказывает напряженное состояние крупногабаритных изделий. Попеременное замораживание и оттаивание ведет к увеличению внутренних напряжений в структуре материала, что является причиной появления трещин и снижения несущей способности конструкций.

Величина влажностной усадки газосиликата согласно ГОСТ 31359–2007 не должна превышать 0,5–0,7 мм/м, в зависимости от применяемого кремнеземистого компонента. Влажностная усадка – уменьшение объема материала в результате перераспределения или удаления влаги. Экспериментально установлено, что при относительной влажности воздуха более 40 % удаляется

в основном капиллярная влага, а при меньшей влажности – адсорбированная влага. Удаление химически связанной влаги из структуры кристаллов возможно лишь при очень высоких температурах, недостижимых при работе материала в ограждающих конструкциях.

Влажностная усадка автоклавных ячеистых бетонов является практически полностью обратимым процессом. Необратимость усадки в ничтожных размерах проявляется лишь при относительной влажности воздуха менее 20 %. В бетонах нормального твердения между сблизившимися в результате усадки гидросиликатами образуются новые кристаллические сростки. В результате этого формируется видоизмененная кристаллическая матрица бетона, которая при обратном водонасыщении не возвращается в первоначальное состояние. Автоклавные бетоны характеризуются высокой степенью кристаллизованности, т.е. после окончания процесса запаривания реакции гидратации уже не протекают. Как следствие, после цикла высушивания-увлажнения материал возвращается в исходное состояние.

Другой причиной усадки автоклавного ячеистого бетона является его карбонизация. Карбонизация – взаимодействие углекислого газа с гидросиликатами кальция (ГСК), приводящее к появлению карбоната кальция, геля  $\text{SiO}_2$  либо к перекристаллизации ГСК одних видов в другие.

Ячеистый бетон вследствие высокоразвитой системы пор и капилляров легко поддается карбонизации и, в отличие от плотных бетонов, не препятствует ее глубокому проникновению. Скорость карбонизации в зависимости от средней плотности материала составляет в среднем 5–7 мм/год [2].

В настоящее время установлено, что карбонизационная усадка развивается в два этапа. Усадка на первом этапе, наблюдающаяся даже при повышенной влажности бетона, объясняется проявлением внутренних напряжений в материале. Хаотично возникающие в процессе гидратации кристаллы новообразований находятся в деформированном, растянутом или сжатом, состоянии (рис. 1), однако в целом система находится в равновесии. Углекислый газ воздуха действует в первую очередь на дефектные, т.е. деформированные, элементы структуры, разрушая срастания гидросиликатов. Растянутые элементы сжимаются, приводя к усадке всей системы.

Второй этап развития усадки начинается после завершения процесса карбонизации при уменьшении влагосодержания в материале, однако, в отличие от влажностной усадки, протекает необратимо и объясняется удалением воды из геля  $\text{SiO}_2$ .

Влияние концентрации  $\text{CO}_2$  в воздушной среде на усадку известково-кремнеземистых бетонов незначительно. Величина усадки  $\epsilon_k$ , мм/м, определяется полнотой карбонизации, т.е. отношением фактической степени карбонизации к максимально возможной для данного бетона, и может быть рассчитана по формуле

$$\epsilon_k = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot K^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot K + 3,8 \cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

где  $K$  – полнота карбонизации.

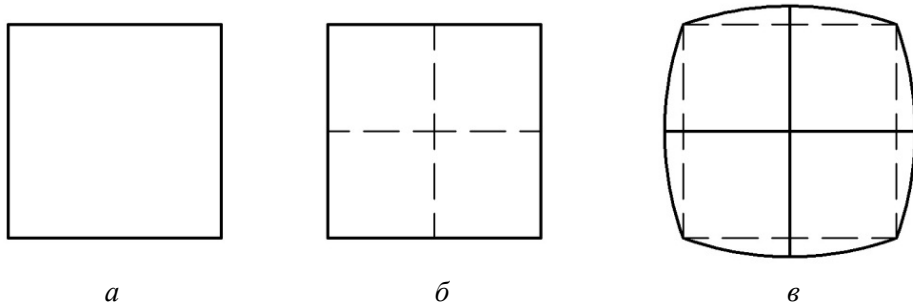


Рис. 1. Возникновение собственных напряжений в кристаллическом сростке: *a* – первичный сросток; *б* – появление вторичного сростка; *в* – возникновение кристаллического давления при срастании первичного и вторичного сростков

Карбонизация автоклавных материалов ведет не только к усадке, но и к существенному снижению прочности бетонов. Под воздействием атмосферного углекислого газа гидросиликаты кальция превращаются в карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) и гель кремнекислоты ( $\text{SiO}_2$ ), причем кристаллическая часть твердой фазы представлена только  $\text{CaCO}_3$ . Реакции карбонизации сопровождаются увеличением объема твердой фазы, тогда как изменение объема кристаллической части, его уменьшение или увеличение, определяется основностью разлагающихся гидросиликатов. При основности гидросиликатов более 1,7 кристаллическая часть увеличивается в объеме (за исключением  $\text{C}_2\text{SH}_2$ ), при основности менее 1,7 – уменьшается. Именно уменьшение объема кристаллической части ведет к снижению прочности материала [2]. Карбонизация свободной извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  также ведет к увеличению объема твердой фазы и ее кристаллической части.

Таким образом, воздухоустойкость автоклавных ячеистых бетонов обеспечивается при наличии высокоосновных ГСК и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . С другой стороны, технология производства автоклавных газосиликатов направлена на получение в качестве структурообразующих кристаллов низкоосновных гидросиликатов. В итоге материал характеризуется относительно высокой прочностью, но недостаточной воздухоустойкостью.

Для повышения стойкости ячеистого бетона к агрессивным воздействиям окружающей среды разработаны специальные меры защиты, общая классификация которых представлена на рис. 2.

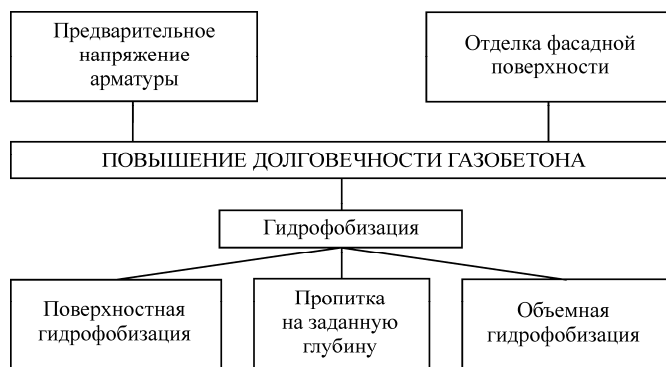


Рис. 2. Способы повышения долговечности ячеистого бетона

С целью повышения трещиностойкости ячеистобетонных крупногабаритных конструкций, по аналогии с железобетонными изделиями, возможно применение предварительно напряженной арматуры. Широкого распространения на практике предварительное напряжение не получило по ряду причин. С одной стороны, считается, что в условиях высокой усадки газобетона применение предварительного напряжения нецелесообразно из-за высоких его потерь. С другой стороны, закрепление растянутой арматуры в ячеистом теле бетона способами, применяющимися для плотных бетонов, нерационально. Вследствие невысокой величины сцепления арматуры с бетоном наблюдается «проскальзывание» напряженных стержней и их возвращение в исходное ненапряженное состояние.

Для защиты газосиликата от негативного воздействия окружающей среды выпускается декоративная отделка фасадной поверхности. Помимо эстетичности и долговечности, требования к которым предъявляются при отделке стен из кирпича и плотного бетона, отделка стен из ячеистого бетона должна обладать рядом специальных свойств. Во-первых, она должна быть водонепроницаемой, но в то же время иметь необходимую степень паропроницаемости. Во-вторых, ввиду высокой эксплуатационной деформативности ячеистого бетона и возможности отслоения отделочного слоя необходимо обеспечить достаточный уровень адгезии слоев друг к другу.

Незначительное повреждение фасадной отделки существенно снижает его защитные функции по отношению к ячеистому бетону. При разработке нового вида отделочного материала важна оценка его долговечности с целью проведения своевременного ремонта или замены.

В качестве отделочного слоя могут применяться различные краски, цементные покрытия, стеклянные, керамические, каменные материалы, возможно применение экранной (на отnose) отделки на основе металлических панелей, железобетонных и асбестоцементных тонкостенных изделий.

Существующие в настоящее время способы повышения гидрофобных свойств автоклавного газосиликата можно разделить на неизменяющие и изменяющие структуру пористости бетона. К первым относится покрытие поверхности бетона специальными составами, так называемая поверхностная гидрофобизация. В качестве гидрофобизаторов могут использоваться ГКЖ, силиконаты натрия, кумаронокаучуковые покрытия. Поверхностные гидрофобизаторы защищают материал при непосредственном контакте с водой, но не являются препятствием для проникновения водяных паров и газов в толщу материала.

Главным недостатком поверхностной гидрофобизации является возникновение напряжений в зоне контакта, обусловливаемых большими различиями структуры и свойств покрытия и бетона. Это в конечном итоге приводит к нарушению целостности покрытия и разрушению гидрофобной защиты.

Срок службы пленочных покрытий может достигать 15–17 лет, однако средняя продолжительность составляет 7–9 лет. Более того, у ряда покрытий отмечается снижение эффективности защиты при длительном контакте с водой.

Способы повышения гидрофобных свойств ячеистого бетона, изменяющие структуру материала, включают пропитку водоотталкивающими материалами на заданную глубину или объемную гидрофобизацию бетона. Пропитку в зависимости от воздухопроницаемости материала можно проводить либо путем вакуумирования пор бетона, либо воздействием внешнего давления на пропиточный состав.

Как и в случае применения поверхностной гидрофобизации, пропиточные составы не защищают от проникновения водяных паров в толщу бетона. Водяные пары, попавшие в конструкцию и адсорбированные на поверхности кристаллов, вызывают увеличение объема твердой фазы. Вследствие различия объемных деформаций пропитанной и непропитанной частей, на границе раздела возникают внутренние напряжения, приводящие к разрушению материала.

С целью снижения возникающих напряжений разработаны многокомпонентные пропиточные составы, состоящие из веществ с различной проникающей способностью. В структуре материала создается переходный слой с частично пропитанными порами, исключающий опасную концентрацию напряжений.

Метод объемной гидрофобизации заключается во введении в ячеистобетонную смесь специального компонента, придающего готовому изделию водоотталкивающие свойства. Добавка гидрофобизатора именно на стадии приготовления позволяет полностью модифицировать структуру бетона, а не только ее поверхностную часть.

Как отмечалось ранее, другие способы гидрофобизации не предотвращают попадание паров в материал. Под действием проникающей в структуру

бетона воды происходит растворение новообразований, в том числе малорастворимых. Установлено, что в первую очередь растворяются контакты отдельных кристаллов, соединившихся в единый кристаллический сросток. Растворенное вещество не удаляется из материала, а перераспределяется в нем, при этом при несущественной потере массы относительное снижение прочности будет иметь значительную величину [7].

Введение гидрофобизаторов позволяет получить более плотную структуру межпорового пространства за счет заполнения капилляров нерастворимыми в воде веществами.

Требуемую степень гидрофобизации для конкретного района строительства Е.С. Силаенков [2] предлагает определять как отношение влажностей газобетона, эксплуатирующегося во влажных и нормальных условиях, это отношение находится расчетным путем. Помимо степени гидрофобизации при разработке состава добавки необходимо оценивать ее водозащитную способность. Водозащитная способность гидрофобизатора определяется снижением показателей водопоглощения, капиллярного всасывания, сорбцией водяных паров, паропроницаемости.

Вопросы обеспечения долговечности ячеистых бетонов недостаточно изучены. Открытым остается вопрос, какой же способ защиты изделий является наиболее эффективным и перспективным. Однако достоверно установлено, что применение ячеистобетонных конструкций и изделий как в промышленном, так и в гражданском строительстве без дополнительной защиты нерационально.

Целью исследования является установление возможности получения долговечного автоклавного газобетона с заданными свойствами методом объемной гидрофобизации. Предполагается, что введение в ячеистобетонную смесь гидрофобизатора повлечет за собой существенное изменение свойств готовых изделий.

Эксперимент заключается в получении образцов газосиликата одинакового исходного состава, но с разными гидрофобизаторами и в разных условиях гидротермальной обработки. В дальнейшем у полученных образцов будут определяться различные эксплуатационные свойства (прочность, теплопроводность, усадка, морозостойкость и пр.). В основу определения рациональности применения различных гидрофобизирующих добавок будет положено сравнение эксплуатационных параметров модифицированного и немодифицированного газосиликата.

### **Список литературы**

1. СНиП 23-01-99. Строительная климатология [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vashdom.ru/snip/23-01-99>.



2. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. – М.: Стройиздат, 1986. – 176 с.
3. Жодзишский И.Л., Макаричев В.В. Крупнопанельные покрытия из ячеистых бетонов. – М.: Стройиздат, 1967. – 263 с.
4. ГОСТ 31359–2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия / Стандартиформ. – М., 2009. – 15 с.
5. Беркман А.С., Мельникова И.Г. Структура и морозостойкость стеновых материалов. – М.: Госстройиздат, 1962. – 165 с.
6. Бутт Ю.М., Куатбаев К.К. Долговечность автоклавных силикатных бетонов. – М.: Стройиздат, 1966. – 215 с.
7. Физико-химия флотационных процессов / П.А. Ребиндер [и др.]. – М.: Metallurgizdat, 1933. – 230 с.

Получено 15.11.2012

**Курзанов Александр Дмитриевич** – магистрант, ПНИПУ, СТФ, ПСК-11-1мо, e-mail: kurzanov\_sm\_st@mail.ru.

**Голубев Виктор Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, ПНИПУ, СТФ, e-mail: dekstf@pstu.ru.