

Появление бетонов ячеистой структуры в семействе бетонов – самой большой группы строительных материалов было в свое время обусловлено развитием строительных технологий. Именно из бетона возводили крупные массивные сооружения, особо прочные колонны-опоры, пространственные конструкции – оболочки. Ячеистая структура обеспечила бетонам новые ценные свойства. Поэтому в странах с развитой техникой совершенствование ячеистых бетонов продолжается многие десятилетия.

Журнал «Строительные материалы»<sup>®</sup> уже с первых лет издания знакомил читателей сначала с зарубежным опытом, затем сопровождал своими публикациями развитие отечественного производства изделий из ячеистых бетонов на предприятиях крупнопанельного домостроения.

В разные годы тенденции развития прогрессивного материала претерпевали изменения. В истории отрасли были как централизованные закупки импортного комплектного оборудования, так и строительство крупнейших заводов по разработкам научно-исследовательских институтов России, Белоруссии, Эстонии, Латвии.

В доперестроечный период Белоруссия была в числе лидеров по производству ячеистого бетона на душу населения. В наше время Республика Беларусь является бесспорным лидером на постсоветском пространстве. В год на 1 тыс. человек населения республики выпускается 150 м<sup>3</sup> ячеистого бетона, что сопоставимо с производством европейских стран (100–200 м<sup>3</sup>) и более чем в 10 раз превышает тот показатель для России. Ведется активная научно-исследовательская работа, на предприятиях модернизируют оборудование, показатели качества материала постоянно улучшаются, проектировщики и строители максимально используют преимущества ячеистого бетона в прогрессивных конструктивных решениях зданий.

Развитию различных направлений совершенствования ячеистых бетонов, изучению их свойств, использованию отходов промышленности для их производства, созданию новых видов оборудования и комплектных линий в России, Беларуси, Эстонии, Казахстане и др. посвящены статьи предлагаемой ниже подборки.

УДК 666.973.6

Н.П. САЖНЕВ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, технический директор по НИР, Н.К. ШЕЛЕГ, директор УПП ЗСК ОАО «Забудова», Н.Н. САЖНЕВ, инженер-технолог Минского комбината силикатных изделий (Республика Беларусь)

### Производство, свойства и применение ячеистого бетона автоклавного твердения

Современный метод изготовления ячеистого бетона автоклавного твердения был предложен в тридцатых годах прошлого века и в принципе практически не изменился, хотя за все прошедшие годы свойства материала неоднократно улучшались и расширялись области его применения. Для изготовления ячеистого бетона применяются широко распространенные местные материалы: песок; известь; цемент и вода. В смесь в небольшом количестве добавляется также алюминиевый порошок, способствующий образованию в массе воздушных ячеек и делающий материал пористым. После этого масса помещается в автоклав, где осуществляется в паровой среде ее твердение. Энергосберегающая технология не дает никаких отходов, загрязняющих воздух, воду и почву.

В конце XX века во всем мире годовой объем производства ячеисто-бетонных изделий находился в пределах 43–45 млн м<sup>3</sup>. Основной объем производства приходится на заводы, работающие по технологиям фирм «Хебель», «Итонг», «Верхан», «Маза-Хенке» (Германия), «Сипорекс» (Швеция, Финляндия), «Дюрокс-Калсилоркс» (Нидерланды), «Селкон» (Дания, Великобритания), «Униполь» (Польша) и др. [1]. В 45 странах мира (без учета стран СНГ) работает более 200 заводов ячеистого бетона. Наиболее распространенные пред-

приятия вышеперечисленных фирм имеют годовую производительность 160–200 тыс. м<sup>3</sup>.

В ряде стран (СНГ, Польша, Китай, Чехия, Словакия, Дания, Япония, Эстония и др.) имеются свои собственные разработки и технологии, в которых наряду с лицензионными действуют предприятия на основе собственной отечественной технологии. Эти технологии отличаются, как правило, способами подготовки (помолом), формования ячеисто-бетонной смеси и разрезки массивов на изделия заданных размеров.

В армированных изделиях фирмы «Хебель» отклонения от заданного размера по длине составляют  $\pm 4$  мм, высоте и толщине –  $\pm 3$  мм, а в неармированных –  $\pm 1$ – $1,5$  мм по всем направлениям.

В армированных изделиях фирмы «Дюрокс-Калсилоркс» отклонения от заданных размеров по длине, высоте, толщине соответственно  $\pm 4$  мм,  $\pm 3$  мм,  $\pm 2$  мм, неармированных –  $\pm 2$  мм,  $\pm 2$  мм,  $\pm 1$  мм.

Точные по размерам изделия выпускают фирмы «Итонг», «Верхан» и «Маза-Хенке», а также «Аэрок» и «Силбет» (последнее поколение резательных машин) – отклонения по всем направлениям соответственно  $\pm 1$ – $1,5$  мм.

В технологии фирмы «Итонг» и «Маза-Хенке» перед разрезкой на изделия заданных размеров ячеисто-бе-

тонный массив-сырец кантуется на 90° с формой на ее борт, а в фирме «Верхан» — на специально подставляемый под боковую поверхность «чужой» борт-поддон, на котором распалубленный массив подается на резательные машины (вертикальная продольная, горизонтальная продольная и вертикальная поперечная со съемом горбушки и нарезанием «карманов») и затем в автоклав. После автоклавной обработки массив подается на разборку, упаковку и далее на склад готовой продукции.

В технологии фирм «Хебель», «Дюрокс-Калсилоркс», «Аэрок» и «Силбет» массив распалубливается и переносится специальными захватами с плоскости поддона формы на стол резательной машины, разрезается, на решетках подается в автоклав, затем на упаковку и склад готовой продукции. В технологии фирмы «Сипорекс» распалубленный массив (борта формы поднимаются вверх) на своем шелевом поддоне разрезается, после чего борта формы опускаются на прежнее место, форма с массивом подается в автоклав и далее на упаковку и склад готовой продукции.

Гидротермальная обработка производится в тупиковых и проходных автоклавах диаметром 2,4–2,8 м, длиной до 40 м, при давлении не ниже 1,2 МПа.

Изделия, как правило, выпускаются плотностью 400–700 кг/м<sup>3</sup> и прочностью бетона при сжатии соответственно не менее 2–5 МПа. При поставке потребителю влажность ячеисто-бетонных изделий составляет около 30–35% по весу, что выше, чем у изделий, выпускаемых предприятиями Республики Беларусь, у которых она составляет не более 25%.

Следует отметить, что во время эксплуатации зданий, влажность ячеистого бетона в ограждающих конструкциях понижается до равновесной эксплуатационной и составляет примерно 2–3% по объему при средней плотности бетона 600 кг/м<sup>3</sup>.

Армированные изделия выпускаются длиной до 7,2 м, шириной до 0,75 м и толщиной до 0,375 м. При этом шаг изделий по длине составляет 5–25 мм и толщине 25–100 мм, а ширина изделий обычно бывает равной высоте формируемого массива. Длина армированных изделий зависит от их толщины и расчетных нагрузок.

На некоторых заводах доля армированных изделий составляет 80–85% и практически выпускается полный комплект изделий на дом из ячеистого бетона, особенно для малоэтажного строительства. Продукция выпускается по резательной технологии с высокой точностью геометрических размеров изделий, которые широко используются в жилищном, промышленном и сельскохозяйственном строительстве.

Всими фирмами накоплен опыт по применению ячеисто-бетонных изделий в строительстве. Кладка стен и перегородок из неармированных изделий осуществляется на клею или на нормальном или «легком» растворе. Армированные панели монтируются на элементы железобетонных или металлических каркасов, а кровельные плиты покрытия и плиты межэтажного перекрытия укладывают на железобетонные, металлические балки, фермы или на стены зданий через монолитные железобетонные пояса.

Наружные и внутренние стены выполняются из армированных панелей или из неармированных блоков. Блоки из ячеистого бетона являются, бесспорно, самым простым решением кладки стен зданий: жилых домов, сельскохозяйственных строений и небольших построек промышленного и складского назначения. Использование блоков не накладывает никаких ограничений на планировку зданий, его форму или высоту: из блоков может быть построено здание практически любого типа.

В мировой практике ячеистый бетон также широко используется при реконструкции старых зданий, особенно когда требуется дополнительное утепление

ограждающих конструкций и увеличение этажности зданий с сохранением существующих фундаментов. В индивидуальных домах типа коттедж ячеистый бетон используется от подвала до крыши, в том числе в ванных и туалетных помещениях. Огромные возможности использования ячеистого бетона низкой плотностью (150–200 кг/м<sup>3</sup>) открываются при тепловой модернизации старых зданий.

Кроме применения ячеистого бетона в строительстве накоплен большой опыт применения его в различных областях. Дробленый ячеистый бетон совместно с бесподстилочным навозом является эффективным удобрением, особенно для дерново-подзолистых почв. Дробленый бетон может эффективно использоваться в качестве подстилки и карбонатной добавки в корм на птицефабриках. С успехом применяется ячеистый бетон при производстве сухих растворов в качестве легкого заполнителя, при засыпке (утеплении) чердачных помещений, а также в качестве адсорбента для различных агрессивных сред.

В 1991 г. в странах СНГ было выпущено около 5,7 млн м<sup>3</sup> ячеисто-бетонных изделий, из них 1,37 млн м<sup>3</sup> армированных стеновых панелей, плит покрытий и перекрытий [1]. Наибольшую долю в общем выпуске составили мелкие ячеисто-бетонные блоки — 3,2 млн м<sup>3</sup> в год.

В Республике Беларусь в 1991 г. было выпущено 1,7 млн м<sup>3</sup> ячеисто-бетонных изделий, в том числе 0,34 млн м<sup>3</sup> армированных панелей для жилых, промышленных и общественных зданий. [2]. Однако за последние десять лет объем производства ячеисто-бетонных изделий в странах СНГ, за исключением Республики Беларусь, сократился примерно на 50%. В 2002 г. предприятия Республики Беларусь выпустили 1,5 млн м<sup>3</sup> ячеисто-бетонных изделий (блоков и армированных изделий).

На передовых предприятиях по производству ячеисто-бетонных изделий, например в Республике Беларусь, физико-механические показатели бетона не уступают зарубежным, а морозостойкость превосходит зарубежные аналоги. Однако на ряде предприятий внешний вид изделий (точность геометрических размеров) порой все еще уступает зарубежным аналогам.

В странах СНГ, как правило, используется ударная технология производства ячеистого бетона, в которой применяются смеси с низким количеством воды затворения.

В институте НИПИ силикатобетон в 1978–1991 гг. совместно с Рижским политехническим институтом был выполнен комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по исследованию и созданию ударной технологии формования ячеисто-бетонных изделий и разработке различных устройств для ее реализации [3]. Это принципиально новое направление технологии производства изделий из ячеистого бетона базируется на использовании в качестве динамических воздействий для разжижения смеси удара более эффективного, чем вибрация, на колебаниях ячеисто-бетонной смеси на основной собственной частоте и на эффекте остаточной тиксотропии, что обеспечивает получение высококачественной микро- и макроструктуры бетона.

Анализ производств ячеисто-бетонных изделий по традиционной, так называемой литевой технологии, особенно зарубежных фирм, достигших сравнительно высокого технико-экономических показателей производства ячеистого бетона, свидетельствует, что из-за большого количества воды затворения используются смеси с повышенным расходом вяжущих материалов (цемент и известь), высокой тонкостью помола песка (3000–3500 см<sup>2</sup>/г) и цемента (3500–4000 см<sup>2</sup>/г). При этом требуются повышенные затраты на автоклавную обработку (давление 1,2–1,4 МПа и продолжитель-

ность 14–16 ч) и очень высокое качество всех исходных материалов. Производство ячеисто-бетонных изделий характеризуется большой продолжительностью выдержки сырья до резки (3–6 ч) и автоклавной обработки, а также высокой влажностью изделий после автоклавной обработки, которая зависит в первую очередь от количества воды затворения.

Рассматривая межпоровый материал ячеистого бетона (микроструктура) с позиции основных законов бетоноведения, приходим к выводу об отрицательном влиянии на его свойства избыточного количества воды затворения. Формирование макроструктуры (ячеистой структуры) бетона определяется двумя обобщающими (для литевой и ударной технологий) характеристиками: объемом образующегося газа и реологическими свойствами раствора, кинетика изменения которых во времени зависит от исходного состояния смеси (щелочность, вязкость, температура, газообразующая способность раствора) и от интенсивности динамических воздействий в процессе формирования (вспучивания).

При литевой технологии процесс вспучивания смеси определяется только качеством и количеством исходных компонентов последней, и поэтому подбор исходного ее состояния является пассивным управлением процесса формирования. Использование динамических воздействий позволяет регулировать этот процесс с учетом изменения реологических свойств смеси.

Известно, что если во время формирования вязкость ячеисто-бетонной смеси ниже оптимальной, то нарушается баланс газовой фазы, то есть газообразователь полностью не используется и происходит недовспучивание или осадка смеси. Если вязкость выше оптимальной, процесс вспучивания изделий замедляется и ячеисто-бетонный массив не достигает заданной высоты. При этом резко увеличивается давление в ячейках, вызывающее в конечном итоге появление трещин в межпоровом материале и расслоение в бетоне. Отклонения вязкости смеси от оптимальной в обоих случаях приводят к разрушению микроструктуры и низкому качеству бетона.

Для нормального проектирования процесса вспучивания смеси необходимо обеспечить, как уже отмечалось выше, оптимальную вязкость, в данном случае понизить ее, например за счет тиксотропного разжижения смеси. Явление тиксотропии заключается в разрушении слабых коагуляционных структур с помощью динамических воздействий и в переводе зацементированной (иммобилизованной) и частично адсорбированной воды в свободное состояние.

Кроме того, динамические воздействия в начале процесса гидратации разрушают коагуляционную структуру, разжижают смесь, а позднее обеспечивают уплотнение межпорового вещества, содействуют преодолению энергетического барьера между частицами и способствуют образованию кристаллизационной структуры (микроструктуры). Таким образом, задача состоит в выборе способа динамических воздействий на смесь – интенсивности, частоты и продолжительности.

Исследование причин разрушения пористой структуры при формировании, теоретическая оценка скорости движения газовой поры при динамическом воздействии на смесь во время ее вспучивания, а также оценка влияния частоты, амплитуды и продолжительности динамических воздействий на механизм вспучивания смеси показали преимущества использования низкочастотного циклического формирования, и в частности формирования ячеисто-бетонной смеси с применением низкочастотных ударных воздействий.

Проведенные исследования основных закономерностей ударного способа формирования, в том числе экспериментальное определение структурно-механических и акустических параметров смеси, убедительно под-

твердили правильность выбора нового способа формирования и устройств для его реализации.

Сравнительная оценка качества макроструктуры ячеистого бетона, полученного по ударной технологии, показывает, что оно находится на уровне, соответствующем оптимальной структуре бетона. [4]. Макроструктура равномерна, без расслоений и трещин. Например, относительное количество ячеек с дефектными пористенками межпорового материала составляет 6, а показатель изотропности и бездефектности ячеистой структуры бетона ( $K_6$ ) равен 0,66. Средняя величина  $K_6$  бетона для оптимальной структуры – 0,64. Коэффициент равноосности ячеек (средняя округлость ячеек), который наиболее четко характеризует качество макроструктуры бетона, особенно при вертикально направленном динамическом воздействии, совпадающем с направлением движения газовых пузырьков и вспучивания смеси, находится в пределах 0,85–0,87.

Известно, что прочностные и особенно эксплуатационные свойства ячеистого бетона связаны со структурой межпорового пространства, главным образом с распределением капиллярных пор по размерам. Было изучено [5] распределение пор в радиусе более 50 и менее 0,01 мкм, характеризующее состояние микроструктуры ( $r < 0,01$  мкм), от 0,01 до 0,1 мкм (состояние переходных пор) и от 0,1 до 500 мкм (состояние более мелкой части микропор).

Установлено, что независимо от способа формирования смеси (ударная или литевая технология) и вида вяжущего общая пористость ячеистого бетона изменяется в пределах 68,7–79,9%, а объем капиллярных пор радиусом не менее 0,01–50 мкм колеблется в пределах 361,3–562,5 мм<sup>3</sup>/г, возрастая для материалов с пониженной плотностью за счет увеличения переходных пор в интервале радиусов 0,1–0,01 мкм. Объем этих пор, обладающих высокой удельной поверхностью 11,5–27,4 м<sup>2</sup>/г, составляет для образцов ячеистого бетона ударной технологии 39,9–51,4% против 57,7–62,6% для ячеистого бетона литевой технологии.

Анализ показал, что для получения повышенной прочности ячеистого бетона необходимо стремиться к уменьшению объема пор радиусом 0,1–0,01 мкм. Максимальную прочность имели образцы ячеистого бетона, водопоглощение которых изменялось в пределах 30,2–33,2%, а объем переходных пор ( $r = 0,01–0,1$  мкм) составлял 165–225 м<sup>3</sup>/гр.

При одной и той же плотности в зависимости от величины объема, образованного порами радиусом 0,1–0,01 мкм, морозостойкость изменяется в широких пределах, повышаясь с увеличением плотности.

Таким образом, использование ударных воздействий при формировании ячеисто-бетонной смеси приводит к перераспределению объема пор радиусом менее 0,01 и 50 мкм. Для ячеистого бетона, полученного по ударной технологии по сравнению с литевой, характерно снижение доли «опасных» переходных пор радиусом 0,01–0,1 мкм при практически одинаковой его плотности и возрастание объема пор радиусом 0,1–50 мкм, то есть принципиально следует стремиться к максимально возможному снижению капиллярной пористости путем сокращения количества воды затворения.

Например, при одинаковой плотности, равной 460 кг/м<sup>3</sup>, ячеистый бетон, изготовленный по ударной технологии, имеет прочность при сжатии 4,23 МПа, а по литевой – 3,86 МПа; водопоглощение составляет соответственно 34,1 и 45,7% и морозостойкость 35 и 15 циклов.

За рубежом в производстве ячеистого бетона также наблюдается тенденция по снижению количества воды затворения смеси (уменьшение В/Т) за счет применения динамических воздействий во время вспучивания ячеис-

то-бетонной смеси, что в конечном итоге обеспечивает уменьшение влажности бетона после автоклавной обработки, количества форм и постов созревания массива.

Например, ячеистый бетон, изготавливаемый на заводе фирмы «Маза-Хенке» (г. Лаусснитц), имеет более низкую влажность по сравнению с ячеистым бетоном фирм «Хебель», «Итонг», «Сипорекс», «Селкон» и «Верхан». Весовая влажность ячеистого бетона вышеуказанных фирм, производящих ячеистый бетон по так называемой литьевой технологии (В/Г — 0,6—0,7), составляет 35—40%.

По данным Испытательного центра ОАО «Забудова», весовая влажность ячеистого бетона вышеуказанного завода фирмы «Маза-Хенке» составляет 27,2%. Низкая влажность бетона по сравнению с названными фирмами обусловлена тем, что при вспучивании ячеисто-бетонной смеси, по аналогии с известной отечественной ударной технологией (патенты РФ 1058187, РФ 1049250, РФ 669588) и применяемой на ряде предприятий Республики Беларусь и стран СНГ, используются односторонние кратковременные вертикально направленные динамические воздействия. Поэтому В/Г смеси находится в пределах 0,55—0,57 и при этом, например при плотности бетона 500 кг/м<sup>3</sup>, время выдержки сырца до его кантования на 90° и разрезки на изделия заданных размеров составляет не более 3 ч. За счет сокращения сроков выдержки сырца уменьшается количество форм и производственной площади. Кроме того, за счет понижения на 15% количества воды затворения смеси уменьшается на 5—7% расход тепловой энергии при автоклавной обработке.

Завод выпускает также ячеисто-бетонные изделия плотностью 350 кг/м<sup>3</sup> и классом по прочности не ниже В1. Учитывая положительный опыт кантования формы с массивом-сырцом ячеистого бетона плотностью 350 кг/м<sup>3</sup>, по-видимому, есть все предпосылки для кантования массива-сырца с более низкой плотностью бетона, например с плотностью 200—250 кг/м<sup>3</sup>. Формы фирм «Итонг» и «Маза-Хенке», из-за того что у них только один подвижный элемент — продольный борт, на который кантуют массив-сырец, а остальные элементы формы (борта и поддон) выполнены в виде неподвижной, цельной, жесткой конструкции, статически и особенно динамически более жесткие по сравнению с формами фирмы «Верхан», у которой все элементы формы подвижные. При кантовании сырца-массива в форме последняя воспринимает все деформации от кручения и на массив-сырец практически они не передаются.

Выполненный нами ранее комплекс НИР и ОКР по транспортировке массива-сырца захватом своими и чужими бортами — аналогия технологии фирм «Хебель» и «Дюррок-Калсилос» — показал, что минимальная плотность сырца ячеистого бетона составляет 300—350 кг/м<sup>3</sup>, как уже выше отмечалось, есть все предпосылки изготавливать изделия плотностью 200—250 кг/м<sup>3</sup> по технологиям фирм «Итонг» и «Маза-Хенке».

Далее следует отметить, что наряду с высокими свойствами изделий огромное значение имеет долговечность ограждающих конструкций зданий из ячеистого бетона. Многочисленными ранее проведенными исследованиями в Эстонии (НИПСиликатобетон, НИИ Строительства) и России (НИИСтройфизики, УралНИИСтромпроект, МИСИ-МГСУ, НИИЖБ и др.) было установлено, что в наружных ограждающих конструкциях зданий из ячеистого бетона, отделанных полимерминеральным покрытием, в материале одновременно происходят деструктивные процессы, приводящие к ухудшению свойств материала, и структурообразующие процессы, обеспечивающие повышение его прочности.

Поэтому при оценке долговечности защитно-декоративных покрытий, нанесенных на ячеистый бетон, следует учитывать интенсивность процессов влагогазообмена



Здание посольства Великобритании в Москве

и карбонизации, которые вызывают градиенты деформации в поверхностных слоях и влияют на трещиностойкость системы. В момент нанесения покрытий весовая влажность бетона находится в пределах 25—30%, а степень карбонизации в пределах 30—40%. Через два года эксплуатации весовая влажность бетона составляет 5—6%, а степень карбонизации зависит от газопроницаемости покрытия и может достигать величины 50—70% при глубине карбонизации около 80—100 мм.

Влажностная усадка автоклавных ячеистых бетонов в условиях эксплуатации вызывается действием капиллярных сил и, по-видимому, в некоторой степени удалением физико-химически связанной влаги. Минимальная влажностная усадка ячеистого бетона достигается за счет уменьшения количества воды затворения смеси и, естественно, повышения при этом плотности межпорового материала.

Влажностная усадка ячеистого бетона плотностью 500—700 кг/м<sup>3</sup> составляет 0,3—0,5 мм/м. Карбонизационная усадка вызывается разложением новообразований углекислотой и удалением из цементного камня физико-химической влаги, которая выделяется в свободном виде или в составе геля кремнекислоты. Карбонизационная усадка ячеистого бетона 500—700 кг/м<sup>3</sup> на известково-цементном вяжущем составляет 0,8—1 мм/м. Из изложенного следует, что минимальная полная эксплуатационная усадка бетона оптимальной структуры составляет в среднем 1,3 мм/м. Таким образом, защитно-декоративное покрытие должно иметь такие же, как и бетон, предельные деформации, чтобы обеспечить длительную совместную работу системы покрытие — бетон.

Более высокие показатели по усадке могут быть у ячеистых бетонов с отклонениями макро- и микроструктур от оптимальных показателей, например при использовании смесей с повышенным количеством воды затворения (производство по литьевой технологии) и при недостаточной степени кристаллизации новообразований во время гидротермальной обработки.

В последнее время в странах СНГ, особенно в России и Украине, начало интенсивно развиваться производство пенобетонов, в том числе неавтоклавных бетонов, у которых повышенная влажностная усадка из-за большого количества воды затворения при приготовлении пенобетонной смеси по сравнению с газобетонной смесью. Карбонизационная усадка у пенобетонов автоклавного твердения на одном виде вяжущего при прочих равных условиях, по-видимому, остается на уровне, как и у газобетонов автоклавного твердения. Известно, что пенобетоны имеют пониженную в 1,5—2 раза трещиностойкость [6]. Для неавтоклавных ячеистых бетонов, и в первую очередь для пенобетонов, полная эксплуатационная усадка увеличивается практически в несколько раз. Например, неавтоклавный пенобетон имеет влажностную усадку, в 2—4 раза превышающую этот показа-

тель у автоклавного ячеистого газобетона, а структурная прочность автоклавного бетона на один-два класса (15–25%) выше, чем у неавтоклавного пенобетона [7].

По нашему мнению, вряд ли на сегодня имеется реальное покрытие из сухих смесей, выдерживающее такие деформации, то есть практически невозможно защитить безавтоклавный пенобетон от атмосферных воздействий. Из-за разных деформаций бетона и покрытия в последнем в период эксплуатации появляются микротрещины, и при дальнейшем их раскрытии появляется вероятность попадания влаги и в конечном итоге уменьшения долговечности.

За последние десять лет в Республике Беларусь наряду с повышением объемов производства ячеисто-бетонных изделий, как уже выше отмечалось, проводился комплекс работ по повышению их качества. В 1997 г. в ОАО «Забудова» (п. Чисть) по технологии фирмы «Хебель» в составе домостроительного комбината (заводы по производству сухих строительных смесей, цементно-песчаной черепицы, извести, оконных и дверных блоков) введен в промышленную эксплуатацию завод по производству ячеисто-бетонных изделий и конструкций [8]. Проектная мощность УПП «ЗСК» ОАО «Забудова» 200 тыс. м<sup>3</sup> армированных и неармированных изделий в год. В 2002 г. завод выпустил 226 тыс. м<sup>3</sup>. В настоящее время совместно с фирмой «Маза-Хенке» ведутся работы по наращиванию мощностей до 330 тыс. м<sup>3</sup> изделий в год. Из общего объема продукции 50% составляет производство бетона плотностью 400 кг/м<sup>3</sup>.

Фирмой «Хебель» по проекту (контракту) были заложены требования к исходным сырьевым материалам, особенно к цементу и извести (содержание оксида кальция, кинетика гидратации, тонкость помола, сроки схватывания, минералогический состав и др.), которые превышают порой требования по ГОСТ, СТБ, то есть в республике и странах СНГ практически не производятся такие цемент и известь. Например, сырье месторождения «Колядичи», применяемое для производства цемента на ОАО «Красносельскцемент», и существующая технология производства клинкера с короткими вращающимися печами не позволяют получить клинкер с коэффициентом насыщения выше 0,9 и цемент с содержанием алита 60–62%. Предприятия строительной индустрии республики не выпускают известь с содержанием оксида кальция более 80%, и кинетика гидратации извести не отвечает требованиям DIN 1060.

Специалистами инженерно-технического центра ОАО «Забудова» и УПП «ЗСК» в ходе проведения комплекса экспериментальных работ были разработаны рецептуры ячеисто-бетонной смеси для плотностей бетона 350–700 кг/м<sup>3</sup> применительно к сырьевой базе Республики Беларусь. Внедрено в производство более 30 рецептур, позволяющих производить ячеисто-бетонные изделия и конструкции различной плотности и прочности: D 350, B1; D 400, B1–1,5; D 500, B1,5–2; D 600, B2,5–3; D 700, B3,5–5.

Завод производит из ячеистого бетона по стандартам Республики Беларусь (СТБ) полный комплект материалов на дом: неармированные блоки (СТБ 1117–98), плиты покрытия и перекрытия (СТБ 1034–96), перемычки лотковые и арочные (СТБ 1332–2002), стеновые панели (СТБ 1185–99), элементы лестниц (СТБ 1330–2002). На продукцию имеются сертификаты соответствия Республики Беларусь, России, Литвы, Латвии и др. Производство ячеистого бетона сертифицировано по Международной системе качества – ISO-9001. В 2002 г. УПП «ЗСК» ОАО «Забудова» присуждена Премия Правительства Республики Беларусь за достижения в области качества.

Из ячеистого бетона производства УПП «ЗСК» ОАО «Забудова» строятся жилые, общественные и социаль-

но-бытовые здания. Например, в Минске коттеджами из ячеистого бетона застроены два микрорайона «Большая Слепянка» и проспект Газеты «Известия», в Москве – экспериментальные микрорайоны Куркино, Митино, «Эдем» и др. Ячеистый бетон так же широко используется в ограждающих конструкциях многоэтажных зданий. В Минске, Москве, в других регионах России, а также в странах Балтии построен целый ряд высотных зданий, в том числе в Москве комплекс жилых домов по улице Мосфильмовская и здание посольства Великобритании.

Учитывая высокие технические характеристики изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения по сравнению с другими строительными материалами аналогичного функционального назначения, «Основными направлениями развития материально-технической базы строительства Республики Беларусь на период 1998–2015 гг.» ячеисто-бетонные изделия определены главным стеновым материалом. К 2015 г. существующие мощности по его производству должны быть увеличены в 2,1 раза.

Изучив и критически проанализировав мировой опыт производства ячеистого бетона автоклавного твердения, а также учитывая отечественный опыт производства, а именно использование ударной технологии, для модернизации заводов ячеистого бетона и наращивания объемов производства в Республике Беларусь используется комплект технологического оборудования, в первую очередь смесительного, резательного и упаковочного, ведущих немецких фирм «Маза-Хенке», «Верхан», «Хебель» и др. В настоящее время ведутся работы по модернизации заводов ячеистого бетона в городах Могилев, Сморгонь, Гродно, Орша, Минск, поселке Чисть и других и при этом, как правило, используется отечественная ударная технология совместно с резательной технологией указанных фирм.

#### Список литературы

1. Бильдюкевич В.Л., Сажнев Н.П., Бородовский Ю.Ф. Состояние и основные направления развития производства ячеисто-бетонных изделий в СНГ и за рубежом // Строит. материалы. 1992. № 9. С. 5.
2. Моисеевич А.Ф., Бильдюкевич В.Л., Сажнев Н.П. Производство ячеисто-бетонных изделий в Республике Беларусь // Строит. материалы. 1992. № 9. С. 2.
3. Сажнев Н.П., Домбровский А.В., Новаков Ю.Я., Поньель Э.В. Ударная технология формирования. Сб. материалов и информации постоянной комиссии СЭВ по сотрудничеству в области строительства. ИСИ, 1983. № 2 (73).
4. Горяйков К.Э., Домбровский А.В., Грюнер Г.Ф., Сажнев Н.П. Исследования макро- и микроструктуры ячеистого бетона, полученного по ударной технологии. Сб. трудов НИПСИ силикатобетон «Производство и применение силикатных бетонов» Таллинн, 1981. № 15.
5. Сажнев Н.П., Гончарик В.Н., Гарнашевич Г.С., Соколовский Л.В. Производство ячеисто-бетонных изделий. Минск, 1999.
6. Силаенков Е.С. Повышение трещиностойкости изделий из ячеистых бетонов. Сб. «Долговечность конструкций из автоклавных бетонов». Таллинн, 1975.
7. Удачкин И.Б. Ключевые проблемы развития производства пенобетона // Строит. материалы. 2002. № 3. С. 8.
8. Сажнев Н.П., Шелег Н.К. Производство ячеисто-бетонных изделий на УПП «ЗСК» ОАО «Забудова» по технологии фирмы «Хебель» // Нові технології в будівництві. 2002. К. № 1 (3).

В.И. ПЕСЦОВ, К.А. ОЦОКОВ, кандидаты техн. наук (Госстрой России),  
В.П. ВЫЛЕГЖАНИН, В.А. ПИНСКЕР, кандидаты техн. наук,  
Центр ячеистых бетонов (Санкт-Петербург)

## Эффективность применения ячеистых бетонов в строительстве России

Возросшие в последние годы инвестиционные возможности как отдельных фирм (предприятий), так и самого населения привели к повышению спроса на эффективные стеновые и другие строительные материалы. Увеличению спроса способствует и повышение за последние годы требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, что вызвало необходимость использования эффективных стеновых материалов. При этом использование однослойных стен из кирпича, дерева, керамзитобетона и других легких бетонов на пористых заполнителях уже не обеспечивает требуемых показателей и экономически не оправданно.

Возникла необходимость использования в стеновых конструкциях эффективных материалов. Одним из таких материалов, позволяющим делать однослойные и долговечные стены, является ячеистый бетон во всех своих многочисленных разновидностях (пенобетон, газобетон, пеносиликат, газосиликат, пеногазошлакобетон и т. д.) как в сборном, так и в монолитном вариантах строительства.

Ячеистые бетоны имеют ряд характеристик, отличающих их от многих традиционных строительных материалов. Изделия из них наилучшим образом адаптированы к сложному климату и экономическим условиям и имеют ряд важных достоинств: невысокую плотность, низкую теплопроводность, пониженное водопоглощение, стойкость при пожаре, высокие санитарно-гигиенические свойства стенового ограждения.

Ячеистый бетон прошел проверку временем в сложных природно-климатических условиях. Жилые дома со стенами (наружными и внутренними) из автоклавного газобе-

тона стоят в Санкт-Петербурге с 1960 г. без разрушения материала, несмотря на сложные климатические условия (число переходов температуры через 0°C в Прибалтике максимально). Общая площадь домов с газобетонными стенами в городе более 15 млн м<sup>2</sup>. В Риге стоят дома со стенами из газобетонных камней, не защищенных отделкой, уже в течение 70 лет без трещин, отслоений и шелушения кладки. В Норильске и Ангарске (условия повышенной сейсмичности) значительное количество жилья представлено пятиэтажными зданиями из неавтоклавного газозлобетона по проектам ЛенЗНИИЭПа и успешно эксплуатируются уже более 40 лет.

Таким образом, ячеистый бетон является долговечным надежным материалом, который можно изготавливать как из существующего местного сырья, так и с использованием различных отходов. Из разведанных месторождений песков более 70% составляют мелкие и очень мелкие пески, использование которых позволяет получать изделия из ячеистого бетона с высокими характеристиками.

В ряде регионов страны имеется значительное количество местных материалов и техногенных отходов в виде различных песков, отсевов камнедробления, керамзитовой пыли, которые не нашли широкого применения при производстве стеновых блоков из ячеистого бетона. Широкое использование этих материалов сдерживается из-за их неоднородности, отсутствия данных по составу, свойствам, а также по влиянию их на структуру и эксплуатационные свойства ячеистого бетона.

В России в настоящее время работает 40 заводов по производству изделий из автоклавных ячеистых бетонов общей мощностью 2 млн м<sup>3</sup>

в год, выпускающих 1,4 млн м<sup>3</sup> изделий. На более чем 200 установках по производству неавтоклавного ячеистого бетона, в основном пенобетона, производится около 0,6 млн м<sup>3</sup> материала как для монолитного, так и сборного строительства (преимущественно в виде камней по ГОСТ 21520–89). На 1 тыс. человек населения России производится всего 13 м<sup>3</sup>, в то время как в Республике Беларусь – 150 м<sup>3</sup>, а в Германии, Франции, Англии, Швеции, Польше, Чехии, Словакии – 100–200 м<sup>3</sup>. В Эстонии даже здания высшей категории ответственности и капитальности (гостиница «Олимпия», здание ЦК КПЭ и др.) построены со стенами из сланцецеольного газобетона (газокукермита), изготовленного из отходов промышленности (вяжущее – зола-унос от сжигания горючих сланцев, кремнеземистый компонент – отходы комбината «Фосфорит»).

В настоящее время разработаны и функционируют различные технологии и виды оборудования, позволяющие получать ячеистые бетоны различной плотности с высокими характеристиками.

Интерес представляют технологии быстрого возведения зданий и сооружений с использованием монолитных ячеистых бетонов, использование которых приводит к снижению энергетических и трудовых затрат при строительстве, к сокращению продолжительности инвестиционного цикла.

Во многих регионах производство изделий организовано на мобильных установках, максимально приближенных к районам застройки, что во много раз уменьшает транспортные расходы, позволяет обеспечить работой местное население, активизировать жилищное строительство.

Ячеистый бетон, млн м <sup>3</sup>	Годы						
	2003	2004	2006	2008	2010	2015	2020
Автоклавный	1,4	1,9	2,5	4,1	6,1	10,1	15,1
Неавтоклавный	0,6	0,8	1,2	1,8	2,6	5,1	8,1
Производство на 1 тыс. человек, м <sup>3</sup>	13	18	25	40	58	100	155

Ячеистый бетон применяется и в сборном и монолитном вариантах как эффективный материал для утепления чердачных перекрытий, кровель, мансард, наружных и внутренних стен, теплоизоляции трубопроводов, для применения в виде стеновых блоков, панелей наружных стен, перекрытий.

Для решения строительных проблем России, в первую очередь резко обострившейся проблемы дешевого и высококачественного жилья, необходимо всемерно наращивать производство ячеистых бетонов в нашей стране, которое позволит резко снизить ресурсоемкость строительства и эксплуатации.

Прогнозируемые темпы прироста объемов производства ячеистых бетонов (млн м<sup>3</sup>) в России приведены в таблице.

Для реализации поставленных задач в решении научно-технического совета Госстроя России от 27 ноября 2003 г., посвященного основным направлениям развития стеновых материалов из ячеистых бетонов, рекомендовано научно-исследовательским, проектным и промышленным организациям развернуть свою работу в следующих направлениях.

- Развитие новых путей получения изделий из ячеистых бетонов с плотностью ниже 400 кг/м<sup>3</sup> для широкого применения их в

строительном производстве и с плотностью 150–300 кг/м<sup>3</sup> для использования в качестве теплоизоляционных материалов.

- Совершенствование производства ячеистого бетона с целью получения стеновых изделий с плотностью 400–500 кг/м<sup>3</sup>.
- Разработка комплектов оборудования для заводов автоклавного газобетона мощностью 20–40 тыс. м<sup>3</sup>, а также 200–400 тыс. м<sup>3</sup> в год.
- Исследования по повышению прочности, снижению усадки и ускорению твердения изделий.
- Разработка и внедрение ячеистых бетонов, дисперсно-армированных неметаллическими волокнами.
- Совершенствование аппаратного оформления производства пенобетона с целью создания автоматизированной установки мощностью 10 тыс. м<sup>3</sup> в год и технологических линий мощностью 20 и 30 тыс. м<sup>3</sup> год по резательной технологии.
- Совершенствование новых методов испытаний материалов, в том числе на основе современных достижений физики и химии.
- Разработка и организация производства низкотеплопроводных малоклинкерных и бесклинкерных композиционных вяжущих для теплоизоляционных ячеистых бетонов.

- Создание широкой гаммы химических добавок, в том числе ускорителей твердения, противоморозных добавок, суперпластификаторов для полифункционального действия, позволяющих отказаться от вибрации при укладке и уплотнении бетона для ускорения набора прочности, повышающих его стойкость и долговечность.
- Создание мини-заводов по производству блоков из неавтоклавного ячеистого бетона.

В 2001 г. на заседании научно-технического совета Госстроя России было внесено предложение о создании Центра ячеистых бетонов для координации работ по совершенствованию нормативной документации, проектирования, обмена информацией и др.

В 2003 г. НТС Госстроя РФ подтвердил целесообразность активизации работы такого центра и дал соответствующие рекомендации по его деятельности.

Развитие производства и применения ячеистых бетонов позволит существенно снизить стоимость строительства, трудоемкость, энергозатратность при одновременном повышении долговечности, качества и экологичности домов в суровых и разнообразных природно-климатических условиях страны.

Т.А. УХОВА, канд. техн. наук, ГУП «НИИЖБ» (Москва)

## К вопросу о терминологии ячеистых бетонов

В последние годы в связи со значительным повышением требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций жилых и общественных зданий одной из немногих разновидностей бетонов, из которых возможно возведение теплоэффективных ограждающих конструкций приемлемой толщины (не более 50 см), являются ячеистые бетоны.

Ячеистые бетоны в последние годы получили второе рождение. Значительно вырос объем выпуска изделий, особенно из ячеистых бетонов пониженной плотности. Возрождено производство монолитного ячеистого бетона, а также освоено производство изделий из неавтоклавного ячеистого бетона, характеризующегося достаточно высокими показателями физико-технических свойств.

Производством и применением ячеистых бетонов в настоящее вре-

мя занимается новое поколение ученых, проектировщиков и производителей. Поэтому представляется актуальным уточнение терминологии многообразных видов ячеистых бетонов.

В настоящей статье в порядке обсуждения предлагается терминология ячеистых бетонов.

**Бетон ячеистый** — искусственный камневидный пористый строительный материал с равномерно распределенными воздушными ячейками (порами) диаметром 0,1–3 мм, занимающими от 20 до 90% объема бетона, получаемый в результате затвердевания смеси из вяжущего, кремнеземистого компонента, порообразователя, воды, химических добавок или без них.

**Газобетон** — разновидность ячеистого бетона, получаемая из смеси вяжущего, кварцевого песка, воды,

химических добавок (или без них) и газообразователя (преимущественно алюминиевой пудры). Порообразованье создается в результате химической реакции между алюминиевой пудрой и щелочным компонентом, содержащимся в вяжущем или специально вводимым в сырьевую смесь.

**Пенобетон** — разновидность ячеистого бетона, получаемая из смеси вяжущего, кремнеземистого компонента, воды и предварительно приготавливаемой пены на основе пенообразователя и воды, которую перемешивают с бетонной смесью.

**Поробетон** — разновидность ячеистого бетона, получаемая в результате перемешивания в скоростном смесителе смеси вяжущего, кремнеземистого компонента, пенообразователя и воды без предварительного приготовления пены.

**Газо-, поро-, пеносиликат** – разновидности ячеистого бетона, у которого в качестве вяжущего применяют негашеную известь или смешанное вяжущее (цементное, шлаковое, зольное и т. д.), содержащее известь в количестве 50% и более.

**Ячеистый золобетон (газозолобетон, пенозолобетон, порозолобетон)** – разновидности ячеистого бетона, у которого в качестве кремнеземистого компонента применяют кислые золы ТЭС.

**Автоклавный ячеистый бетон** – бетон, твердение которого происходит в среде насыщенного водяного пара при давлении выше атмосферного (преимущественно 8–14 атм).

**Неавтоклавный ячеистый бетон** – бетон, твердение которого происходит

в естественных условиях при электропрогреве или в среде насыщенного водяного пара при атмосферном давлении.

**Теплоизоляционные ячеистые бетоны** (марок по средней плотности D400 и менее) предназначены для утепления различных конструкций жилых и промышленных зданий (стен, покрытий, перекрытий, трубопроводов и т. д.).

**Конструкционно-теплоизоляционные ячеистые бетоны** (марок по средней плотности D500–D900, класс по прочности B1,5–B5) предназначены для самонесущих ограждающих конструкций жилых и общественных зданий.

**Конструкционные ячеистые бетоны** (марок по средней плотности

D900–D1200, класс по прочности B5–B20) предназначены для изготовления конструкций, несущих большие нагрузки (внутренние несущие перегородки, перекрытия, перемычки).

Наименование ячеистых бетонов включает как основные, так и специфические признаки, назначение, условия твердения, способ порообразования, вид вяжущего и кремнеземистого компонента. Например, конструкционно-теплоизоляционный автоклавный газосиликат, неавтоклавный теплоизоляционный пенобетон, конструкционный порозолобетон.

Некоторые термины применяются для оценки качества ячеистых бетонов (см. таблицу).

Показатель качества	Пояснение
Нормируемая прочность ячеистого бетона	Прочность затвердевшего ячеистого бетона (класс бетона), заданная в государственных стандартах или нормативно-технической документации, утвержденной в установленном порядке (проектная марка)
Фактическая прочность	Прочность затвердевшего ячеистого бетона, определяемая по результатам испытания контрольных образцов или образцов, взятых непосредственно из конструкций
Текучесть ячеисто-бетонной смеси	Способность ячеисто-бетонной смеси растекаться под действием собственного веса
Водоудерживающая способность	Способность ячеисто-бетонной смеси удерживать в своем составе воду
Прочность	Свойство затвердевшего ячеистого бетона, не разрушаясь, воспринимать различные виды нагрузок и воздействий
Деформативность	Свойство податливости затвердевших бетонов к изменению первоначальной формы и размеров
Усадка	Уменьшение линейных размеров и объема затвердевшего бетона вследствие потери им влаги, гидратации, карбонизации и других процессов
Набухание	Увеличение объема затвердевшего ячеистого бетона вследствие поглощения им из окружающей среды жидкости или пара
Теплопроводность	Способность ячеистого бетона передавать количество теплоты от более нагретой поверхности к менее нагретой
Теплоемкость	Количество тепла, поглощаемого ячеистым бетоном при его нагревании на 1°С
Морозостойкость	Способность затвердевшего ячеистого бетона в увлажненном состоянии сопротивляться разрушающему воздействию попеременного замораживания и оттаивания
Водотвердое отношение	Характеристика состава ячеисто-бетонной смеси, обеспечивающего получение необходимой текучести ячеисто-бетонной смеси, влияющего не только на прочность, но и на морозостойкость ячеистого бетона
Автоклавная обработка	Заключительная стадия производства ячеисто-бетонных изделий при автоклавной обработке при давлении 0,8–1,6 МПа и температуре водяного пара 175–200°С. При автоклавной обработке происходит химическое взаимодействие между кремнеземом и окисью кальция, в том числе находящегося в портландцементе с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция, и ускоренное превращение силикатной массы в каменный материал
Средняя плотность	Отношение массы к объему ячеистого бетона