

Введение

Отечественный строительный комплекс решает с настоящее время три основные задачи: преодоление кризисных явлений, развитие сегмента жилья экономкласса и продвижение передовых энергоэффективных технологий, создающих минимальную нагрузку на окружающую среду [10; 16; 31].

Изделия из ячеистых бетонов оптимально сочетают такие базовые свойства, как прочность, теплопроводность, морозостойкость, звукоизоляция, средняя плотность, экологическая безопасность и разумная цена [9; 26]. Развитие производства и применения ячеистых бетонов позволяет существенно снижать стоимость строительства, трудоемкость, энергозатратность при одновременном повышении долговечности конструкций и комфортности жилых помещений. Отметим, что происшедший в 2007—2009 гг. экономический кризис, вызвавший спад производства большинства строительных материалов (цемента, железобетонных изделий и конструкций, кирпича, нерудных и др.), практически не коснулся производства сухих строительных смесей и ячеистых бетонов, даже прибавивших за это время 25—30 % [13; 14]. Это позволяет предполагать, что и новый современный виток кризиса незначительно скажется на производителях ячеистого бетона.

В технологии ячеистых бетонов в качестве приоритетных можно выделить следующие направления [4; 19]:

- развитие новых путей получения изделий из ячеистых бетонов с плотностью ниже 400 кг/м^3 для широкого применения их в строительном производстве и с плотностью $150—300 \text{ кг/м}^3$ для использования в качестве теплоизоляционных материалов;
- совершенствование производства ячеистого бетона с целью получения стеновых изделий с плотностью $400—500 \text{ кг/м}^3$ повышенной прочности и минимальной усадкой. Создание мини-заводов по производству блоков из неавтоклавного ячеистого бетона;
- интеграция в технологию химических добавок, в том числе ускорителей твердения, противоморозных добавок, суперпластификаторов полифункционального действия, позволяющих отказаться от вибрации при укладке и уплотнении бетона, обеспечивающих ускорение набора прочности, повышающих стойкость и долговечность материала.

Практическая реализация приоритетных направлений может быть основана на использовании внутреннего напряженного состояния, в том числе с применением компонентов (высокопористых, волокнистых), являющихся структурной основой смеси и, следовательно, готового изделия [4; 15; 34]. Все эти технологические решения разработаны на кафедре технологии композиционных материалов и прикладной химии (ранее — технологии отделочных и изоляционных материалов, еще ранее — технологии теплоизоляционных материалов) МГСУ. В качестве инструментов для исследования технологических процессов выступают методики комплексного анализа, структурного моделирования и аналитической оптимизации, которые, как и созданные программы для ЭВМ, являются продуктами кафедральной разработки и интеллектуальной собственности МГСУ.

Технологические приемы, сопровождающиеся формированием внутреннего напряженного состояния, рассматриваются на примерах ячеистого неавтоклавного газобетона, пенополистиролбетона и пенобетона. Пенополистирол может использоваться так же, как высокопористый структурный компонент. Технологические особенности применения волокон в системах с сопутствующим напряженным состоянием малой интенсивности рассмотрены на примере ячеистого бетона, армированного базальтовой фиброй.

Глава 1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И СВОЙСТВ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

1.1. Технологические решения в производстве ячеистого бетона

1.1.1. Анализ производства ячеистых бетонов

Ячеистые бетоны (пенобетон, газобетон, пеносиликат, газосиликат, пеногазошлакобетон, пенополистиролбетон, полистиролпенобетон, поробетон и т. д.) имеют невысокую плотность, низкую теплопроводность, пониженное водопоглощение, стойкость к воздействию открытого пламени, высокие санитарно-гигиенические свойства и технологичны при изготовлении [27; 28; 29].

В России в настоящее время работает более 40 заводов по производству изделий из автоклавных ячеистых бетонов общей мощностью 2 млн м³ в год, выпускающих 1,4 млн м³ изделий. На более чем 200 установках по производству неавтоклавного ячеистого бетона, в основном пенобетона, производится около 0,6 млн м³ материала как для монолитного, так и для сборного строительства (преимущественно в виде камней по ГОСТ 21520—89). На 1 тыс. человек населения России производится всего 13 м³, в то время как в Республике Беларусь — 150 м³, а в Германии, Франции, Англии, Швеции, Польше, Чехии, Словакии — 100—200 м³.

В технологиях ячеистого бетона выделилось два магистральных направления [5]: заводы с высокой производительностью, ориентированные на выпуск автоклавного газобетона, и предприятия, выпускающие неавтоклавные газобетон и пенобетон. Отдельное технологическое направление — литой ячеистый бетон, изготавливаемый непосредственно на строительной площадке и применяемый в монолитных конструкциях.

Первое направление представлено заводами мощностью от 500 тыс. м³ в год с использованием автоклавной обработки. В этом тысячелетии введен ряд новых производств. Технологии компании «MASA-HENKE Maschinenfabrik GmbH» (Германия) реализованы на Дмитровском ЗГИ и Костромском ЗСМ, выпускающих газосиликат. На немецкой линии по технологии Wehrhahn выпускает продукцию Воскресенский ГК. Газосиликатные блоки EuroBlock производятся на Клинцовском силикатном заводе в Брянской области. Технология Hebel внедрена на Липецком ЗИД [12; 19; 20].

Технология Aeroc International внедрена в государствах Балтии. Завод по производству газобетонных блоков автоклавного твердения YTONG введен в эксплуатацию в Можайске. Особенностью технологии YTONG является безвибрационное приготовление смесей и их вспучивание [13].

Эти технологии позволяют получать продукцию высокого качества, но требуют больших капитальных вложений. Стоимость молотого песка шаровыми (трубными) мельницами приближается к стоимости цемента, а расход электроэнергии достигает 100 кВт/ч на 1 т песка. Тепловлажностная обработка в автоклавах требует большого расхода энергии на получение насыщенного водяного пара с температурой 180—200 °С, а также затрат тепла на обогрев камер предварительного твердения (форкамер) для набора сырцом начальной (резательной) прочности.

Второе направление представлено десятками технологий, реализуемых в условиях средних и малых производств (табл. 1). НИИЖБ при участии АО НПиА «Стройпрогресс» разработана технология изготовления изделий (блоки, теплоизоляция, панели) из безавтоклавного ячеистого бетона на основе немолотых кремнеземистых компонентов и отходов промышленного производства. Газобетонные и пенобетонные изделия изготавливаются на одном и том же технологическом оборудовании без применения пеногенераторов и вибрационных или ударных площадок.

Во ВНИИжелезобетон создана формовочная линия изготовления блоков из неавтоклавного газобетона системы «Униблок ВА». Изделия отвечают по свойствам установленным требованиям, а сама технология ориентирована на использование тонкодисперсных компонентов, в том числе и отвалных зол [20].

Большая работа по совершенствованию заводских способов производства пенобетона осуществляется ВНИИСТРОМ им. П.П. Будникова. Технология и комплект оборудования, разработанные этим институтом, позволяют изготавливать пенобетон плотностью от 120 кг/м³ и легкий заполнитель «ПЕНОРИТ». Основными сырьевыми компонентами служат цемент, обычный кварцевый песок и пенообразователь. В качестве наполнителя могут быть использованы карбонатные пески, золошлаковые отходы. Могут вводиться красители, ускорители твердения и пластификаторы, армирующие средства. В основу технологии положена механоактивация минеральных компонентов в стержневом смесителе, приготовление пены в пеногенераторе и приготовление пенобетонной массы в

пенобетоносмесителе путем введения пены в смесь минеральных компонентов. Институт проводит исследования различных синтетических пенообразователей и разработку технологических приемов их использования при производстве пенобетона [2].

В Московском строительном университете (МГСУ) разработан комплекс технологических приемов для изготовления пенобетона и пеногипсовых изделий, получивший название «сухой минерализации». Технология реализована в серии установок для приготовления пенобетона в заводских условиях и на стройплощадке (передвижной механизированный комплекс). На основе принципа «сухой минерализации» Восточно-Сибирским ГТУ разработана технология пенобетона из перлита-известково-гипсового (ПИГ) вяжущего [23].

АОЗТ «Строминноцентр» предлагает баротехнологию изготовления пенобетона на мобильных установках. Этот прием заключается в перемешивании пены и вяжущего в герметическом смесителе, допускающем создание внутреннего избыточного давления, например, от компрессора. Смесь пневмоподачей перекачивают к формам, при этом смеситель работает как камерный насос. Усовершенствованной модификацией баротехнологии является способ ООО «Экостройматериалы», позволяющий получать пенобетон средней плотностью от 250 кг/м³.

Таблица 1

Технические данные мини-заводов ячеистого бетона

Технология (предприятие или учреждение)	Производительность, м ³ /ч	Расход электроэнергии, кВт/м ³	Масса оборудования, т	Персонал, чел.
Механоактивация и турбулентное пенообразование (ВНИИСТРОМ)	4,0—10,0	16,0—30,0	5,3	6—8
Сухая минерализация (МГСУ)	4,0—6,0	14,5	от 7,5	6—8
Героторные механизмы (ЦНКБ, установка УПТБ)	1,6—4,0	10,0	1,0—4,0	4—6
Технология ЭНПФ «Рубин»	1,0—4,0	от 5	0,5—5,0	4—8
Баротехнология (компании Строминноцентр, «СІС», «УПМБ»)	2,0—8,0	1,5-4,0	0,18—7,5	4—5
То же (ООО «Экостройматериалы»)	1,2—5,0	15,7	0,2—7,0	5—6

ТОО «ЭМИТ» создана пеногенераторная установка для изготовления пенобетона, плитного пенополимергипсового утеплителя «ГИЗОЛ» и облегченных плит внутренних перегородок. ЗАО «Фибробетон» предлагает мини-заводы по изготовлению мелкопористого пенобетона (Пеномонолит 500) из масс, приготавливаемых одностадийным турбулентно-кавитационным перемешиванием. Процесс включает гомогенизацию (при малой скорости вращения вала), когда происходит загрузка всех компонентов, и поризацию (при высокой скорости вращения вала). Получаемая пеномасса характеризуется стойкостью при транспортировке и нерасслаиваемостью при укладке в монолитные конструкции, возможностью ее транспортирования пневмо- и шнековыми насосами.

Близкими по свойствам и области применения к пено- и газобетону являются поризованные бетоны (поробетоны). Основная масса их изготавливается на цементно-известковом и цементном вяжущем и песке. Особенно эффективен поробетон при монолитном строительстве для устройства стен первого этажа. Поризованные бетоны могут быть как автоклавного твердения, так и твердения в естественных условиях. В МГСУ разработана технология, обеспечивающая достижение неавтоклавным поробетоном качественного уровня автоклавного при одинаковой средней плотности.

Воронежской ГАСА разработана строительная система «Монопор», с использованием которой возможно получать поризованный бетон средней плотностью от 400 кг/м^3 . Центральной частью этой системы является автономная мобильная станция со специально разработанным аппаратом — порогенератором. Предварительно приготовленная бетонная смесь перекачивается по трубопроводу в порогенератор, в нем происходит поризация бетонной смеси с последующей укладкой ее в формы или конструкцию.

Пенополистиролбетоны являются композиционными материалами и по своему функциональному назначению близки к ячеистым бетонам. Гранулы вспененного (подвспененного) полистирола выполняют функции легкого заполнителя. Минеральная матрица может состоять из портландцемента, цементнопесчаной (в том числе и на пористых песках) смеси, гипса; в некоторых случаях используют полимерные или поризующие добавки. Известны разработки концерна «BASF AG», системы «Rastra» (Австрия) и «Юникон» (ВНИИжелезобетон), предложения НИИЖБ и МГСУ — МИСИ («самоуплотняющиеся массы»). Наличие минеральной ма-

трицы способствует полному или частичному разъединению гранул полистирола, что, очевидно, снижает его огнеопасность и повышает прочностные характеристики конструкций, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к стенам малоэтажных зданий.

В АО «Теплопроект» проводились исследования и получены положительные результаты по композиционному материалу, получившему условное название ДИПБЕТОН. Он представляет собой композицию, состоящую из пенобетона, образующего непрерывный каркас, и гранул пенополистирола, заполняющих заданный объем в каркасе. Плотность ДИПБЕТОНА может изменяться от 300 до 900 кг/м³. Прочность при сжатии при этом изменяется соответственно от 1,0 до 5,0 МПа. Теплопроводность — от 0,065 до 0,15 Вт/(м·К). В зависимости от содержания гранул пенополистирола, ДИПБЕТОН может быть отнесен к негорючим или слабогорючим материалам. Изготовление этого материала не требует большого парка форм, поскольку распалубку можно производить через 20—30 мин после формования.

Производство пенобетонов на основе неавтоклавной технологии в настоящее время получает все более широкое распространение благодаря тому, что эта технология малоэнергоемка и позволяет получать материалы с хорошими строительно-техническими свойствами. Появление пенобетонов связано с развитием органической химии. Принцип их получения основан на введении в цементное тесто пенообразователей, являющихся в основном продуктами органического происхождения. Первый патент на получение пенобетона относится к 1925 г. и принадлежит Байеру [2]. Исследования по пенобетону проводились школами под руководством профессоров Г.П. Сахарова и Б.М. Румянцева (Москва), У.М. Махамбетовой (Казахстан), Л.Б. Сватовской (Санкт-Петербург), М.С. Гаркави (Магнитогорск), А.С. Коломацкого (Белгород) и др. [7].

Примером использования теплоизоляционного пенобетона в мировой практике является опыт немецкой фирмы «НЕОПОР» [13], которая с 1975 г. внедрила свою технологию пенобетона в 40 странах мира. Эта и подобная ей технологии получили распространение в таких странах, как Германия, Швеция, США, Южная Корея и др.

Производство неавтоклавного ячеистого бетона осуществляется как в стационарных условиях, так и на мобильных мини-заводах. Интерес к производству изделий на мобильных установках обу-

словлен тем, что максимально приближен к районам застройки, а это во много раз уменьшает транспортные расходы, позволяет обеспечить работой местное население, активизировать жилищное строительство. Немаловажным являются и сравнительно небольшие капитальные вложения в организацию небольших производств, их быстрое введение в эксплуатацию, возможность использования небольших крытых площадок или пустующих производственных корпусов.

Ячеистый бетон применяется и в сборном, и в 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 [12; 22]. Темпы прироста ячеистых бетонов показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Прирост объемов производства ячеистых бетонов, млн м³
(фактические данные и прогноз)**

Ячеистый бетон, млн м ³	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 ³	13	18	25	40	58	100	155

Практика получения неавтоклавных ячеистых бетонов показывает, что существенные трудности возникают при получении материала с плотностью от D500 и ниже. Эти трудности связаны в первую очередь с усадочными явлениями в процессе схватывания свежеприготовленной ячеистобетонной массы. Другим недостатком является неравноплотность изделий в массиве.

Специфика технологии ячеистых бетонов (в том числе неавтоклавного газобетона) требует повышенного расхода цемента, что связано с увеличением расхода воды. При гидратации и твердении газобетона в естественных условиях или при пропаривании конечная прочность изделия формируется за счет высокого химического потенциала системы цемент—вода. Высокая усадка является следствием низкой степени гидратации цемента в составе газобетонной смеси [17; 24].

Снизить усадочные деформации можно при использовании приемов, повышающих пластичность смеси, — вибрации, добавок пластификаторов и пр.

Одним из перспективных методов улучшения качества газобетона гидратационного твердения, при котором ему придаются повышенные прочность и влагостойкость, является использование в качестве наполнителя отходов, содержащих аморфный кремнезем, глинозем и готовый двухкальцевый силикат, который сам является медленно твердеющим вяжущим. Все эти заполнители, вступая в химическое взаимодействие с гидроокисью кальция, выделяющейся в процессе твердения цемента, образуют с ней гидросиликаты и гидроалюминаты кальция. Последние придают изделию более высокие прочностные характеристики (например, при плотности D500 позволяют получить класс бетона по прочности B2,5), а также, обладая пуццолановой активностью, связывают известь в труднорастворимые соединения, что придает изделиям повышенную водостойкость [35].

1.1.2. Существующий опыт оптимизации структуры высокопористых материалов

Структура ячеистого бетона на макро- и микроуровнях является одной из основ, формирующих свойства этого материала [10; 23]. В понятие макроструктуры входят, во-первых: вариация по плотности самого ячеистобетонного массива. Во-вторых, характеристика ячеек (макропор): средний размер (условно «диаметр») ячеек, распределение ячеек по размерам, геометрическая форма ячеек (условно «эллиптичность», оцениваемая по соотношению большой и малой осей эллипса). В-третьих, наличие видимых соединений между ячейками, каверн и крупных пустот. Микроструктуру определяют капиллярные и гелевые поры в минеральной матрице (цементно-песчаном каркасе) ячеистого бетона, характер внутренней поверхности пор и ячеек, наличие трещин, обусловленных усадочными деформациями и карбонизационными процессами в условиях эксплуатации изделий [21; 25].

Вопросам оптимизации структур высокопористых материалов и управления структурированием посвящены работы Ю.М. Баженова, Б.Г. Скрамтаева, И.А. Рыбьева, А.П. Меркина, Б.М. Румянцева, Ю.П. Горлова, В.Н. Сокова, Е.М. Чернышева, Р.З. Рахимова, Е.В. Королева, В.П. Селяева, Е.И. Шмидько и др. [5; 12; 17].

При видимой простоте технологии процесс формирования макроструктуры ячеистого бетона трудно поддается управлению и регулированию. Это связано с необходимостью контролирования большого числа технологических параметров: качества и количества сырьевых компонентов, расхода газообразователя, водотвердого отношения, температуры и рН среды, изменяющихся в процессе изготовления и твердения изделий. Поэтому реальные условия структурообразования ячеистых бетонов часто отклоняются от оптимальных, что приводит к возникновению дефектов в структуре [6].

На «феномен нестабильности вспучивания» влияет множество трудно учитываемых факторов: реологические свойства смеси, температура сырья и окружающей среды, сотрясение формы, щелочность и экзотермичность вяжущего, колебания атмосферного давления, сквозняки и др. Величину этого показателя строго регламентируют нормативные документы, в том числе ГОСТ 27005—86 «Бетоны легкие и ячеистые. Правила контроля средней плотности». Отклонение от вычисляемой статистическими методами [1] так называемой требуемой плотности бетона приводит к снижению качества изделий и не позволяет проводить рациональный расчет термического сопротивления системы [3].

Нестабильность характеристик бетона привела к появлению термина «требуемая прочность бетона». Для ячеистого бетона (и в частности для газобетона) требуемая прочность R_T может быть определена по следующей формуле в ГОСТ 18105—86 «Бетоны. Правила контроля прочности»:

$$R_T = 1,1B_{\text{норм}}/0,7,$$

где $B_{\text{норм}}$ — нормируемое значение прочности бетона.

Из этого выражения следует, что нестабильность характеристик вынуждает более чем в полтора раза завышать прочность бетона. Завышенная прочность требует либо применения более качественных сырьевых материалов, либо повышенного расхода вяжущих, либо интенсификации режимов тепловой обработки.

Ситуация усугубляется тем, что показатели газобетона искусственно (условно) снижают в отношении всех его эксплуатационных характеристик. При оценке прочности полагают, что она близ-

ка к минимальной, а при назначении расчетной теплопроводности считают, что плотность газобетона соответствует значениям, близким к максимальным для данного интервала, т.е. условно считают, что газобетон более тяжелый и более холодный. В любом случае для нормируемых характеристик принимают не фактические и не средние значения, а наименее выгодные безопасные показатели. Отсюда следует чрезвычайная важность уменьшения интервала плотности (разноплотности) газобетона.

Выделяющийся водород H_2 поризует (вспучивает) смесь и создает ячеистую структуру газобетона, а над бортами формы образует так называемую горбушку высотой 2—8 см. Наличие горбушки — серьезный недостаток технологии газобетона. На ее создание расходуется до 10 % сырьевых материалов, включая цемент и алюминиевую пудру. Срезка и удаление горбушки требуют значительных затрат ручного труда (утилизация горбушки экономически оправдана только на больших, полностью механизированных заводах, а на предприятиях небольшой производительности она обычно идет в отвалы, загрязняя окружающую среду). Объем выделившегося газа зависит от трех веществ — извести, воды и алюминия. В газобетонной смеси меньше всего алюминия (сотые доли процента), а других реагентов всегда в избытке. Следовательно, точность дозировки алюминия должна заметно влиять на степень вспучивания газобетонной смеси и высоту горбушки.

Снизить, и весьма существенно, интервал плотности газобетона, исключить потери ресурсов и времени на срезку горбушки возможно. Для этого достаточно заливать в форму строго определенное количество газобетонной смеси и обеспечить ее вспучивание до заранее заданного ограниченного объема. Метод формования газобетонных изделий под крышкой был предложен еще в 1959 г. [18] и впоследствии получил название *автофреттаж*. В процессе изучения этого метода было обнаружено интересное явление: после заполнения вспучивающейся смесью всего объема через зазоры между элементами формы из смеси отжимается прозрачная вода.

Несмотря на все преимущества автофреттажа, в свое время он не получил широкого промышленного применения. Попытки внедрить его на нескольких заводах позволили выявить основные причины отрицательного результата. Это повышение металлоемкости форм, увеличение высоты форм и связанная с этим меньшая за-

полняемость камер тепловой обработки, необходимость дополнительной производственной площади для складирования крышек, увеличение ручного труда при распалубке, чистке, смазке, транспортировании крышки, ее установке и закреплении. Главным же недостатком было то, что длительность установки и крепления крышки оказалась сопоставимой со временем вспучивания газобетонной смеси, так что закрепить крышку не всегда успевали. Однако за последние десятилетия предложены такие новые технические решения, которые устраняют практически все перечисленные недостатки технологии автофреттажа. Разработаны приемы, обеспечивающие установку и закрепление, а также снятие крышки в течение одной секунды без применения ручного труда и, возможно, без крана.

Проблема ускорения твердения бетона может быть решена химическим путем — с помощью соответствующих катализаторов [1; 4]. Применение инноваций в производстве ячеистых бетонов может снизить их себестоимость с 1000—1200 р/м³ до 400—500 р/м³, уменьшить энергоемкость и металлоемкость в 2-3 раза, повысить качество изделий и производительность действующих заводов.

1.2. Закономерности формирования свойств ячеистых бетонов

1.2.1. Неавтоклавный ячеистый бетон

Практика получения ячеистых бетонов по неавтоклавной схеме показывает, что существуют значительные трудности получения ячеистых бетонов с низкой плотностью, начиная от D500 и ниже. Эти трудности связаны в первую очередь с усадочными явлениями в процессе схватывания свежеприготовленной ячеистобетонной смеси. В то же время получение среднеплотных ячеистых бетонов (D600—800 и выше), как правило, не вызывает затруднений, которые являются причиной осложнений при получении ячеистых бетонов низкой плотности. Специфика технологии ячеистых бетонов (в том числе неавтоклавного газобетона) предполагает повышенный расход цемента. Сравнительно высокая усадка является следствием низкой степени гидратации цемента в составе газобетонной смеси [8; 9].

Нестабильность вспучивания является вторым, наиболее серьезным недостатком технологии газобетона, поскольку она приводит к вариации его плотности. Эта нестабильность обусловлена множеством трудно учитываемых факторов: реологическими свойствами смеси, температурой смеси и окружающей среды, сотрясением формы, щелочностью и экзотермичностью вяжущего, колебаниями атмосферного давления, сквозняками и др.

Неприятным следствием нестабильности вспучивания является вынужденное искусственное снижение практически всех эксплуатационных характеристик газобетона. От плотности любого поризованного материала зависят все его показатели, включая прочность, теплопроводность, стойкость, усадку и др. Например, прочность газобетона является кубической функцией его плотности, т.е. снижение плотности в два раза приводит к восьмикратному падению прочности.

Показатели газобетона искусственно (условно) снижают в отношении всех его эксплуатационных характеристик. При оценке прочности полагают, что она близка к минимальной, а при назначении расчетной теплопроводности считают, что плотность газобетона соответствует значениям, близким к максимальным для данного интервала, т.е. условно считают, что газобетон более тяжелый и более холодный. В любом случае для нормируемых характеристик принимают не фактические и не средние значения, а наименее выгодные безопасные показатели.

Существуют различные способы и приемы, интенсифицирующие процессы изготовления и оптимизирующие свойства строительных материалов: отдельные технологии приготовления и формирования изделий, механоактивация компонентов, формирование напряженного состояния (экструзия, прессование при нагреве) и др. [1]. Формование изделий в условиях напряженного состояния позволяет снизить влажность минеральной матрицы и, следовательно усадку изделия, повысить его однородность и прочностные характеристики [2].

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что минимизация вариации по плотности возможна. Это реализуется в технологии легких бетонов при безвибрационном вспучивании в замкнутом объеме (газобетон), или в процессе формирования напряженного состояния в результате теплового воздействия (пенополистирол-

бетон). Аналогичными технологическими приемами обеспечивается и снижение усадочных деформаций.

Вспенивание в замкнутом перфорированном объеме формирует в материале напряженное состояние, под действием которого уплотняется минеральная матрица и отжимается избыток воды, что позволяет получать однородный прочный и легкий материал. В технологии пенополистиролбетона тепловое воздействие необходимо, так как оно инициирует вспенивание уплотняющего компонента, что является основой технологического процесса. Способ создания внутреннего напряженного состояния в результате прогрева материала получил названия способа «самоуплотняющихся масс», «силового формования», а также формования в условиях «вариотропии» давлений и «среднеинтенсивного напряженного состояния». Применительно к технологии ячеистого бетона температурное воздействие является вторичным (необязательным). Вспучивание же смеси в замкнутом объеме не позволяет эффективно контролировать процесс.

Применение гранул подвспененного полистирола в качестве компонента, формирующего напряженное состояние, позволяет достигать в уплотняемом объеме значительных давлений, что дает возможность формировать действительно высококачественные изделия (марка по плотности D200, D300), но предполагает использование жестких и материалоемких форм.

Существует и другой способ формирования напряженного состояния, который позволяет достичь желаемого эффекта (уплотнения минеральной матрицы и отжатия из нее влаги) при меньших давлениях. В данном случае в качестве газообразователя используется алюминиевая паста или комплекс, включающий алюминиевую пудру, пластифицирующую и минеральную добавки, а процесс вспучивания протекает в «стесненных» условиях при сохранении смесью необходимой пластичности.

1.2.2. ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

В МГСУ (МИСИ им. В.В. Куйбышева) под руководством проф. В.Н. Сокова создано направление технологии строительных материалов (различного функционального назначения), получившее название «самоуплотняющиеся массы» [15]. Направление реализовано в технологии пенополистиролбетона и монолитно-слоистых

изделий. Суть способа заключается в том, что гранулы пенополистирола используются как активный компонент смеси, способный регулировать структуру материала, а следовательно, и свойства изделий.

Вспенивание полистирола в замкнутом перфорированном объеме формирует в материале напряженное состояние, под действием которого уплотняется минеральная матрица и отжимается избыток воды, что позволяет получать однородный прочный и легкий материал. Применительно к технологии ячеистого бетона способ создания внутреннего напряженного состояния получил названия способа «теплосилового воздействия», «силового формования», а также формования в условиях «вариотропии давлений» [7]. Тепловое воздействие осуществляется электропрогревом. Это и активизирует гранулы пенополистирола, и модифицирует процессы структурообразования в минеральной матрице [32].

Искусственное создание напряженного состояния в условиях электропрогрева применялось также и в технологии ячеистого бетона. Технологическая направленность предлагаемого подхода была основана на гипотезе гидротеплосилового воздействия на формуемые системы. Литые системы, используемые в предлагаемых технологиях, позволяют обходиться без таких приемов формования, как вибрация, внешнее давление, и использовать формы любой конфигурации.

Отжатие воды — весьма позитивный процесс, поскольку по условиям реологии газобетонная смесь содержит существенный избыток воды затворения, который полезен для вспучивания, но вреден для набора прочности. Определяющим при данном подходе является конечное водосодержание, так как предлагаемый метод позволяет удалять избыточную влагу на этапе формования, оставляя необходимую долю для гидратации или формирования структуры.

Удаление избытка воды, а также схватывание бетона под давлением способствуют дополнительному повышению его прочности, сокращению длительности обязательной выдержки изделия перед тепловой обработкой, возможности применения более жестких режимов обработки.

Создание ячеистого бетона с оптимизированными свойствами основано на научном обосновании параметров технологии, которое невозможно без создания модели процессов переноса в материале.

Исследования по изучению влияния одновременных воздействий температур и давлений на перенос вещества и формирование структуры материалов на основе минеральных вяжущих (портландцемента, гипсоцементно-пуццоланового вяжущего) позволили сформулировать общие представления о сущности изучаемых явлений. Основой для создания системы дифференциальных уравнений стал математический аппарат, разработанный А.В. Лыковым [12] для переноса тепла и вещества в капиллярно-пористо коллоидных системах, к которым и относится минеральная матрица на основе гидравлического вяжущего.

От традиционных способов тепловой обработки бетона предлагаемый способ отличается тем, что тепло выделяется в самом объеме (электропрогрев), а влага фильтруется в пористой (капиллярно-пористо коллоидной) среде в основном в виде жидкости и в меньшей степени как паровоздушная смесь. В этом случае определяющую роль играет такая характеристика массопроводности среды, как коэффициент фильтрации, напрямую зависящий от объема пор и характера пористости.

Из всех интенсивных величин, характеризующих рассматриваемый процесс, в наибольшей степени проявляются градиенты давлений, создающиеся в объеме (за счет расширения уплотняющего компонента, в качестве которого могут быть использованы гранулы подвспененного полистирола) и напрямую зависящие от температуры его электропрогрева. По сути, речь может идти о едином пространстве (в пределах уплотняемого объема), процессы в котором обусловлены взаимодействием полей влажности, температур и давлений, объединенных общим понятием гидротеплосилового поля (ГТСП).

Электропрогрев смеси, состоящей из минерального вяжущего и подвспененного полистирола (пенополистиролбетонной смеси), условно можно представить состоящим из двух этапов: активного массопереноса (при удалении физически связанной влаги) и формирования начальной структуры (при стабилизации влагуудаления). Установлено, что максимальная степень гидратации вяжущего зависит от температуры прогрева и от давления, создаваемого в уплотняемом объеме.

Общие закономерности тепло-массопереноса, математический аппарат описания которого разработан А.В. Лыковым, сохраняются и для ГТСП, но характер взаимосвязи интенсивных параметров

в условиях ГТСП приобретает новый физический смысл. Роль поля температур в условиях гидротеплосилового воздействия проявляется двояко: во-первых, в процессах, связанных непосредственно с теплопереносом и генерированием (удалением) тепла внутренними источниками ϵ_t ; во-вторых, — в формировании поля давлений. Дифференциальное уравнение переноса тепла, выведенное из условия, что изменение теплосодержания объема, подвергаемого воздействию поля, в единицу времени равно сумме дивергенции плотности потока энергии из объема и энергии, создаваемой (удаляемой) в самом объеме, имеет вид

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{c_p} (\nabla q_t + \epsilon_t).$$

Поток энергии имеет две составляющие: кондуктивную, характеризующую перенос энергии за счет теплопроводности, и массовую, характеризующуюся плотностью суммарного потока влаги q_m и ее энтальпией i :

$$q_t = \lambda \nabla t + i q_m.$$

Принимая среду в уплотняемом объеме как квазиоднородную, имеющую теплоемкость c и плотность ρ , и рассматривая реальный процесс как переход через бесконечное число равновесных состояний, представляем дифференциальное уравнение переноса тепла в виде

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 t + \frac{i}{c\rho} \nabla q_m + \frac{1}{c\rho} \epsilon_t. \quad (1)$$

Внутренними источниками (стоками) тепла ϵ_t при самоуплотнении являются эндо- и экзотермические реакции, локальные фазовые переходы (в том числе и на границах раздела), выделение тепла за счет экзотермических реакций или при электропрогреве. Плотность потока электричества (электрический ток) в этом случае обусловлена градиентом потенциалов электрического поля на границах уплотняемого объема $\nabla\phi$ и переносом зарядов движущейся жидкой фазой:

$$q_j = \rho_j \nabla\phi + i' q_m.$$

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru