

Мордич Михаил Михайлович, магистр техн. наук, научный сотрудник, Научно-исследовательская испытательная лаборатория бетонов и строительных материалов, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ТВЕРДЕНИЯ КЕРАМЗИТОПЕНОБЕТОНА В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ И ПРИ ПРОГРЕВЕ

© РУП «Институт БелНИИС», 2019
Institute BelNIIS RUE, 2019

АННОТАЦИЯ

Керамзитопенобетон – конгломератный материал, получаемый с использованием в качестве связующего пенобетонной смеси и заполнителя – керамзитового гравия. В статье представлены результаты экспериментальных исследований и дано обоснование различных режимов твердения пенобетона – связующего – и керамзитопенобетона, обеспечивающих им требуемые физико-механические и теплотехнические свойства. С использованием стандартизированных и вариативных (авторских) методик исследованы закономерности кинетики роста прочности керамзитопенобетона в различных температурных условиях в диапазоне температуры среды от 0 °С до 20 °С (при «естественном» твердении) и при прогреве, с нагревом среды до 60...80 °С.

Выявлены закономерности «саморазогрева» твердеющего керамзитопенобетона за счет аккумуляции теплоты экзотермии цемента как фактора, способствующего повышению темпа роста прочности керамзитопенобетона при «естественном» твердении и в условиях прогрева, применительно как к монолитному строительству, так и к изготовлению сборных изделий.

Полученные результаты важны с учетом того обстоятельства, что как в нормативной, так и в технической литературе отсутствуют выверенные и однозначно рекомендуемые режимы

твердения пенобетона (и тем более керамзитопенобетона) в монолитном строительстве. В действующих нормативах на применение пенобетона приводятся общие рекомендации для введения работ в теплый период года (то есть – сезонно, при положительной температуре окружающей среды), предназначенные и относящиеся к конкретным условиям производства работ. С целью разработки различных режимов твердения керамзитопенобетона были проведены исследования на образцах (размерами 600x1200x2400 мм), изготовленных в формах из ламинированной влагостойкой фанеры ($\delta = 20$ мм), имитирующих как вариант опалубки (для монолитного строительства), так и форму для заводского изготовления штучных изделий. В исследованиях использовали усредненный (по критерию средней плотности из диапазона марок D300...D800) состав керамзитопенобетона марки D500 с оптимальным расходом керамзитового гравия 0,8 м³ в 1 м³ бетона. В материалах статьи приведены результаты экспериментального обоснования рекомендуемых режимов твердения керамзитопенобетона в условиях «естественного» твердения и с использованием тепловой обработки.

Ключевые слова: пенобетон, керамзитопенобетон, условия твердения, режим твердения, кинетика твердения, прочность, свойства.

Для цитирования: Мордич, М. М. Особенности режимов твердения керамзитопенобетона в естественных условиях и при прогреве / М. М. Мордич // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 189–204. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-12>

Mikhail Mordzich, Master in Engineering Science, Researcher, Research and Testing Laboratory of Concrete and Building Materials, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

FEATURES OF EXPANDED CLAY FOAM CONCRETE HARDENING REGIMES IN NATURAL CONDITIONS AND WARMING

ABSTRACT

Expanded clay foam concrete is a conglomerate material produced using expanded clay gravel, as a binder foam concrete mixture and filler. The article presents the results of experimental research and provides the justification for the various modes of hardening of the foam concrete - binder, and expanded clay foam concrete, providing them with the required physical-mechanical and thermal properties. Using standardized and variable (author's) techniques, the patterns of kinetics of growth of expanded clay foam concrete strength in different temperature conditions in the range of the temperature of the environment from 0 °C to 20 °C (with "natural" firmness) and warming up, with temperature increasing up to (60... 80) °C were investigated.

The regularities of "self-warming" of solid expanded clay foam concrete are due to the accumulation of heat exothermy of cement as a factor contributing to the increase of the growth rate of expanded clay foam concrete in "natural" hardening and in the conditions of warming are applied to both monolithic construction and prefabricated products.

The results are important in fact of the lack of verified and unequivocally recommended hardening modes for the foam concrete (and especially expanded clay foam concrete) in monolithic construction in both regulatory and technical literature. Current standards for the use of foam concrete provide general recommendations for works in the warm period of the year (i.e. - seasonally, at a positive temperature of environment), intended and related to specific conditions of works. To develop various hardening modes, expanded clay foam concrete tests were carried out on samples (sizes 600 x 1200 x 2400 mm) made in forms of laminated moisture-resistant plywood (z 20 mm), simulating a formwork variant (for monolithic construction), and the form for the factory manufacturing of piece goods. The studies used an averaged (medium

density criterion from the D300 range... D800) composition of the D500 expanded clay foam concrete with the optimal consumption of expanded clay gravel 0.8 m^3 in m^3 of concrete. The article contains the results of the experimental justification of the recommended hardening regimes of expanded clay foam concrete in conditions of “natural” hardening and using the thermal treatment.

Keywords: foam concrete, expanded clay foam concrete, firming conditions, firmness mode, hardening kinetics, strength, properties.

For citation: Mordzich M. Features of expanded clay foam concrete hardening regimes in natural conditions and warming. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 11. 2019. pp. 189–204. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-12> (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Основным фактором, предопределяющим темп твердения (то есть темп роста прочности во времени) и уровень прочности керамзитопенобетона, является кинетика твердения связующего – пенобетона. Своеобразие этого материала заключается, во-первых, в высокой степени насыщения его объема газообразной фазой, объемное расширение которой на $\sim 1...2$ порядка превышает таковое для жидкой фазы (воды), и твердой фазы (цемента), составляющих цементное тесто. А во-вторых, поризация цементного теста обеспечивается пеной, в состав которой входят поверхностноактивные вещества (ПАВ), замедляющие процессы взаимодействия клинкерных минералов цемента с водой затвердения, становления и упрочнения структуры цементного камня в стенках пор и, соответственно, замедляющих темп роста прочности пенобетона и керамзитопенобетона.

Процесс формирования и упрочнения структуры твердеющего связующего – пенобетона – непосредственно связан с явлением тепло- и массообмена во влажном пористо-капиллярном теле и с напряжениями, которые вызываются температурным расширением

входящих в состав материалов. Несмотря на то, что этим проблемным вопросам в научно-технической литературе уделено большое внимание [1–4], задача поиска рациональных режимов твердения пенобетона (и тем более менее изученного керамзитопенобетона) по-прежнему актуальна. В материале настоящей статьи отражено решение этой задачи применительно к разрабатываемому материалу – керамзитопенобетону марок по средней плотности D300...D800, предназначенному к использованию в монолитном строительстве и при изготовлении сборных изделий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

При экспериментальном обосновании режимов твердения керамзитопенобетона использованы материалы со следующими характеристиками.

Вяжущее. В исследованиях применены портландцементы марок ПЦ 500-Д0, ПЦ 500-Д20 производства ОАО «Красносельскстройматериалы» и ОАО «Кричевцементошифер». Испытания по определению исходных физико-механических свойств цемента вели по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 310.1-76, ГОСТ 310.3-76 и ГОСТ 310.4-81. Химический анализ портландцементов проводили по общепринятой методике ГОСТ 5392-91. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики цемента

Завод-изготовитель	Марка	Активность цемента, МПа	Группа эффек. при пропаривании	Кнг	Сроки схватывания, ч., мин.	
					Начало	конец
Красно-сельскстрой-материалы	500-Д0	52	1	0,265	235	355
Кричев-цементно-шифер	500-Д20	49	2	0,250	302	352

Использование портландцементов более низких марок (соответственно – активности) при изготовлении пенобетона и

керамзитопенобетона не рационально. Это обусловлено необходимостью формирования достаточно прочной и устойчивой структуры ячеистобетонной массы за короткий период, предшествующий началу разрушения «пузырьков» пены, учитывая, что вещество пенообразователя замедляет процесс схватывания цемента.

Керамзитовый заполнитель. В качестве заполнителя использовали керамзитовый гравий производства ОАО «Новолукомский завод керамзитового гравия», отвечающий требованиям СТБ 4.211-94 с характеристиками, приведенными в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики керамзитового гравия

Наименование показателя	Керамзитовый гравий фракции 10...16 мм
А. «Новолукомский завод керамзитового гравия»	
Насыпная плотность, кг/м ³	340...370
Прочность при раздавливании в цилиндре, МПа	1,8...1,9
Водопоглощение по массе, %	6,9

Пенообразователь. В качестве порообразующей добавки (после предварительных оценочных испытаний разных веществ) использовали пенообразователь белкового происхождения типа «Laston» (Италия), данные о котором приведены в таблице 3.

Таблица 3

Характеристики пенообразователей

Наименование показателя	«Laston»
Плотность при температуре 20–25 °С, кг/м ³	1070
Водородный показатель (рН) пенообразователя	9,50
Устойчивость пены, с	720

Вода. Для затворения бетона использовали воду водопроводную, удовлетворяющую требованиям СТБ 1114-98.

Приготовление керамзитопенобетона вели по разработанной в настоящих исследованиях трехстадийной технологии. На первой стадии готовили цементное тесто; одновременно осуществляли приготовление пены (с кратностью 10...14) в пеногенераторе путем подачи сжатого воздуха через компрессор высокого давления. На второй стадии при непрерывном перемешивании в смесителе принудительного принципа действия в цементное тесто вводили готовую пену, смешивая в течение предварительно установленного оптимального времени (90 секунд). Экспериментально установлено, что за это время формируется однородная пенобетонная масса, характеризующаяся минимальной осадкой пены под действием динамических нагрузок, возникающих во время ее приготовления (осадка пены составляет 2...3 %). На третьей стадии готовили керамзитопенобетон путем введения в приготовленную пенобетонную смесь предварительно увлажненного заполнителя при непрерывном смешивании в течение 60...90 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТВЕРДЕНИЯ КЕРАМЗИТОПЕНОБЕТОНА

Методика и условия выполнения экспериментов. Анализ данных первоисточников, относящихся к кинетике роста прочности пенобетона во времени, показал, что в варианте естественного твердения (то есть без подвода тепла извне) температура среды должна быть не ниже 7...10 °С [4–6]. С целью ускорения процесса набора прочности при заводском изготовлении изделий используют автоклавирование и разного рода прогревы (строительные нормы СН 277-80 (2001 г.)). Учитывая направленность исследований на получение эффективного «безавтоклавного» материала для заводского производства изделий из керамзитопенобетона интерес представляет прогрев изделий с использованием наиболее распространенных в технологии их производства тепловых устройств – ямных камер. При этом, согласно положениям СН 277-80 (2001 г.), рекомендуемый режим прогрева изделий в формах с наибольшей толщиной слоя бетона в 600 мм включает подъем температуры до 85 ± 5 °С за 3 ч., изотермическую выдержку

при указанной температуре – 12 ч., остывание камеры – 2 ч. и остывание изделий в формах до распалубки – 2 ч., то есть ~ 19 ч. Этот режим не устанавливает время предварительной выдержки, несмотря на то, что высокая степень поризации (то есть содержание газообразной фазы) бетона и «тормозящий» эффект от ПАВ пены предполагают увеличение ее продолжительности. В частности, согласно положениям П1-99 к СНиП 3.09.01-85, в данном случае предварительную выдержку следует увеличить до 4...6 ч., чтобы избежать деструктивных явлений в керамзитопенобетоне при последующем подъеме температуры.

При использовании пенобетона в монолитном строительстве выверенные и однозначно рекомендуемые режимы его твердения в строительных конструкциях практически отсутствуют. Приводятся общие рекомендации для введения работ в теплый период года (то есть – сезонно, при положительной температуре окружающей среды), предназначенные и относящиеся к конкретным условиям производства работ.

В связи с этим были произведены соответствующие исследования и определены необходимые температурно-временные условия режимов твердения керамзитопенобетона для его применения в монолитных конструкциях и при изготовлении сборных изделий. С этой целью были использованы образцы из керамзитопенобетона, изготовленные в формах размерами 600x1200x2400 мм из ламинированной влагостойкой фанеры ($\delta = 20$ мм) и имитирующие как вариант опалубки (для монолитного строительства), так и форму для заводского изготовления штучных изделий. В исследованиях применен усредненный (по критерию средней плотности из диапазона марок D300... D800) состав керамзитопенобетона марки D500 с расходом керамзитового гравия $0,8 \text{ м}^3$ (установленный [7] как оптимальный при рациональном от $0,7 \text{ м}^3$ до 1 м^3). Керамзитопенобетонную смесь готовили по разработанной трехстадийной технологии, включающей отдельное приготовление цементного теста и пены (на основе пенообразователя «Laston») в пеногенераторе, затем поризацию цементного теста пеной (приготовление связующего – пенобетона), и на третьей стадии – введение керамзитового гравия [7]. Смесь (характеризовалась расплывом конуса

32...38 см) подавали и укладывали в формы (высотой до 600 мм) за один прием, без уплотнения, заглаживали рейкой и укрывали полиэтиленовой пленкой.

Во всех случаях формы с отформованными образцами находились в ямной пропарочной камере. При проведении экспериментов (осуществлены в весенне-летний период 2017 г.) в ряде их температура среды в камере (и наружной среды) равнялась 10 ± 1 °С, т. е. была не ниже рекомендуемого по имеющимся литературным данным [1–4] уровня; в других случаях – при средней температуре, равной 20 ± 2 °С. Отдельно (в зимний период 2017 г.) были выполнены эксперименты при температуре окружающей среды (и в камере твердения) в 0 °С, а также с паропрогревом керамзитопенобетона. Во всех случаях бетон твердел с укрытием пленкой верхней грани образцов.

Оценка «саморазогрева» керамзитопенобетона. С целью слежения за температурой твердеющего керамзитопенобетона в геометрический центр формуемого бетона устанавливали термодатчики, что позволило оценить уровень температуры «саморазогрева» керамзитопенобетона (при твердении без подвода тепла) и дополнительного разогрева при тепловой обработке (рисунок 2). На этом рисунке графические зависимости № 1 и № 2 отражают изменение температуры керамзитопенобетона в центре «массива» при естественном твердении (в условиях гидроизоляции поверхности) в среде при температуре 10 ± 1 °С и 20 ± 2 °С соответственно. В этих экспериментах исходная температура отформованной керамзитопенобетонной смеси также соответствовало указанному уровню, т. е. ~ 10 °С (график № 1) и ~ 20 °С (график № 2).

График № 3 отражает изменение температуры керамзитопенобетона при паропрогреве образца после предварительной выдержки в течение 5 часов (начальная температура смеси ~ 12 °С) при температуре среды 10 ± 1 °С с последующим подъемом температуры среды в камере со скоростью 10...15 °С/час до температуры 70...75 °С. Превышение температуры среды в камере над температурой бетона, отраженное показаниями датчика, составляло в среднем ~ 10 ...12 °С. Начало подвода тепла на рисунке 1 соответствует точке начала координат (то есть «0»).

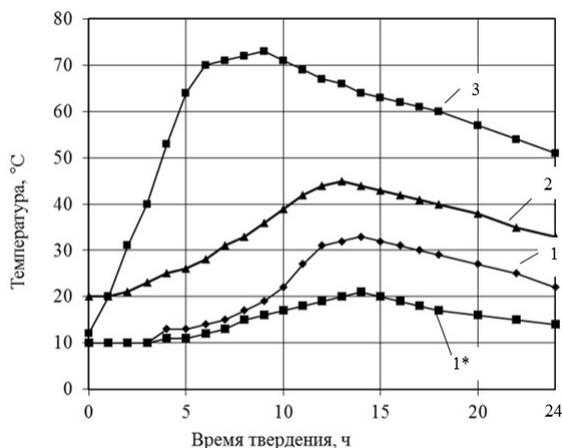


Рисунок 1. Изменение температуры керамзитопенобетона в процессе твердения

Экспериментальные данные, отраженные графиком № 1 для среды твердения и керамзитопенобетонной смеси при $t = 10 \pm 1$ °С, показывают, что в начальный период (~до 3 ч.) температура в керамзитопенобетоне не изменялась, а затем стала закономерно повышаться как следствие тепловыделения гидратирующегося цемента и на максимуме (через 12...15 часов твердения керамзитопенобетона) превысила начальную на 20...22 °С.

Эта же тенденция проявляется с небольшими отличиями и в зависимости, отраженной графиком № 2. В частности, повышение начальной температуры керамзитопенобетона зафиксировано через 2 ч. от начала его твердения, и она раньше (через 10,5 ч.) приблизилась к наибольшей. Несколько выше и максимум саморазогрева бетона, составивший ~ 25 °С от начальной его температуры.

В целом же эти данные отражают общую тенденцию и свидетельствуют о том, что твердеющий керамзитопенобетон, отформованный из смеси при $t \sim 10...20$ °С, за счет низкой теплопроводности (как керамзитового гравия, так и формирующейся пористой структуры связующего – пенобетона) способен накапливать теплоту экзотермии гидратирующегося вяжущего. В результате имеет место «саморазогрев» керамзитопенобетона до температуры, на 20...25 °С превышающей начальную.

Выявленная закономерность в целом подтверждается графической зависимостью № 1*, данные которой отражают изменения температуры твердеющего в камере при температуре окружающей среды $\sim 0...3$ °С керамзитопенобетона, отформованного из смеси, характеризовавшейся температурой ~ 10 °С. Даже в этом варианте твердения саморазогрев керамзитопенобетона достиг ~ 13 °С сверх начальной температуры, а температура в «массиве» составила $20...23$ °С, что обеспечивает необходимые условия для твердения цемента и керамзитопенобетона.

Кроме изложенного, способность твердеющего керамзитопенобетона накапливать в своем объеме теплоту экзотермии цемента подтверждают данные графика № 3, отражающего изменение температуры прогреваемого образца. Очевидно, что после прекращения подвода тепла через 5 часов подъема температуры в ямной камере и разогрева при этом бетона до ~ 60 °С его температура возросла и (через 7 ч. твердения в условиях «горячего» термоса) к максимуму достигала $70...73$ °С, что должно способствовать ускоренному росту прочности керамзитопенобетона, обеспечивая эффективность его применения в производстве сборных изделий.

Контроль прочности твердеющего керамзитопенобетона. Кинетику твердения (рост прочности) керамзитопенобетона для варианта *монолитного бетонирования* оценивали испытанием на сжатие образцов-кубов ($100 \times 100 \times 100$ мм), отобранных из верхней части образцов ($2400 \times 1200 \times 600$ мм), твердевших в естественных условиях при температуре среды твердения $0...3$ °С, 10 ± 1 °С, 20 ± 2 °С под укрытием из полиэтиленовой пленки.

Для варианта заводского изготовления изделий прочность прогреваемого керамзитопенобетона (по ранее приведенному режиму – предварительная выдержка, нагрев и последующее выдерживание в тепловом устройстве) оценивали испытанием аналогичных образцов-кубов сразу после тепловой обработки, а также хранившихся в нормально-влажностных условиях (по ГОСТ 18105-2010) до проектного (28 сут.) возраста. Результаты испытаний приведены в таблице 6.

**Прочность керамзитопенобетона в зависимости
от условий и времени твердения**

№ режима	Режим твердения (температура воды затворения)	Прочность на сжатие, МПа в возрасте, сут.:			
		1	3	7	28
1	Естественное твердение при $t_{cp} \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t_b \sim 10 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,5	1,2	1,8	2,5
2	Естественное твердение при $t_{cp} \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t_b \sim 10 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,4	1,1	1,7	2,4
3	Естественное твердение при $t_{cp} \sim 0...3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t_b \sim 10 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,2	0,7	1,0	1,6
4	Естественное твердение при $t_{cp} \sim 0...3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t_b \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,8	1,2	1,5	2,3
5	Разогрев до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ при твердении в тепловом устройстве без подвода тепла	1,4	1,8	2,1	2,6
6	Прогрев по рекомендуемому СН 277-80 (2001 г.) режиму: $t \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ (5+3+12+2+2), ч.	1,9	2,1	2,3	2,4
Примечание – температура воды затворения $t_b \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ принята, во-первых, в соответствии с общим ограничением температуры бетонной смеси на выходе из смесителя ТКП 45-1.03-314-2018; во-вторых, при более высокой температуре воды ускоренно снижается пластичность цементного теста, что непредсказуемо влияет на порообразование при его смешивании с пеной, а также при последующем приготовлении керамзитопенобетона, подаче и укладке смеси в форму (опалубку).					

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, подтверждаются данные литературных источников [1–4] о том, что температура среды при естественном твердении пенобетона (а в нашем случае – керамзитопенобетона, для которого пенобетон является связующим) не должна быть ниже $7...10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Понижение температуры среды твердения в наших экспериментах до $0...3 \text{ }^\circ\text{C}$ сопровождалось резким снижением темпа роста керамзитопенобетона, затворенного холодной водой (режим № 3, таблица 6). Восстанавливать темп роста прочности позволяет затворение цемента на стадии приготовления цементного теста подогретой до $35 \text{ }^\circ\text{C}$ водой (режим № 4). При этом ускоряются реакции гидратации вяжущего и процесс становления и упрочнения структуры стенок пор, что при последующем твердении при

низкой положительной температуре обеспечивает достаточно стабильный рост прочности керамзитопенобетона.

Во-вторых, очевидна эффективность предлагаемого режима тепловой обработки при изготовлении сборных изделий (режим № 5) в сравнении с рекомендуемым по строительным нормам СН 277-80 (2001 г.) режимом № 6. Она складывается из снижения затрат на прогрев керамзитопенобетона за счет понижения температуры и времени подачи пара (с 3 + 12 = 15 ч. по режиму № 6, до 5 ч. по режиму № 5). Здесь следует отметить, что высокотемпературная обработка по режиму № 6 сопровождается снижением прочности керамзитопенобетона в проектном (28 сут.) возрасте на (2,6 - 2,4) : 2,6 x 100 % ~ 7...8 %.

Результаты экспериментов показали, что все исследованные режимы твердения керамзитопенобетона (за исключением режима № 3, то есть при температуре среды 0...3 °С и затворении керамзитопенобетона холодной водой) обеспечивают требуемую в проектном возрасте прочность на уровне класса не менее В2 при соответствующей марке по средней плотности D500.

По совокупности накопленных экспериментальных данных установлены *рекомендуемые режимы твердения* керамзитопенобетона (в зависимости от области применения), приведенные в таблице 7.

Таблица 7

Режимы твердения керамзитопенобетона в зависимости от области его применения

Область применения керамзитопенобетона	Характеристики режима твердения керамзитопенобетона	
	Температура среды, t, °С	Время твердения до распалубочной прочности
1	2	3
Монолитное строительство: возведение вертикальных (наклонных) конструкций в несъемной опалубке	рекомендуемая $t \geq 10$; допускаемая $t \geq 0$	Не требуется
- то же в съемной опалубке	$t \geq 10$	2...3 сут. при $t_n \sim 10$ °С; 1 сут. при $t_n \sim 35$ °С

Область применения керамзитопенобетона	Характеристики режима твердения керамзитопенобетона	
	Температура среды, t , °C	Время твердения до распалубочной прочности
- устройство элементов покрытий (перекрытий)	рекомендуемая $t \geq 10$; допускаемая $t \geq 0$	Не требуется
Производство сборных изделий: при естественных условиях твердения	рекомендуемая $t \geq 20$; допускаемая $t \geq 10$	1...2 сут. при $t_b \sim 20$ °C; 1 сут. при $t_b \sim 35$ °C
- при прогреве в ямных камерах и иных устройствах	рекомендуемая t до 60...70 после предварительной выдержки 4...6 часов	20...24 часа при $t_b \sim 10$ °C; 16...20 ч. при $t_b \sim 35$ °C
Примечание – t_b – температура воды затворения при приготовлении цементного теста с использованием цемента при температуре ≥ 10 °C; с понижением температуры цемента соответственно повышают температуру воды затворения, что устанавливается экспериментально строительной лабораторией, исходя из условия, что температура приготовленного цементного теста не должна превышать 30 °C.		

ВЫВОДЫ

Экспериментально обоснованы рекомендуемые режимы твердения керамзитопенобетона при его применении в монолитном строительстве и для изготовления сборных изделий в вариантах естественного твердения и с тепловой обработкой. Установлено, что достаточную для распалубки керамзитопенобетонных сборных изделий прочность за 24 ч. обеспечивает режим, включающий предварительную выдержку (4...6 ч.), подъем до ~ 60 °C температуры бетона за ~ 5 ч. со скоростью ≤ 10 °C/ч., термостатическую выдержку в тепловом устройстве без подвода тепла в течении 10...12 ч.

Время «естественного» твердения керамзитопенобетона в съемной опалубке составляет 24...48 ч. при меньшем значении в случае затворения цемента на стадии приготовления цементного теста подогретой до ~ 35 °C водой, а также при температуре среды твердения $\sim 20 \pm 2$ °C, то есть при работе в летний период. Твердение при пониженной до 10 ± 1 °C и до 0...3 °C температуре

среды требует увеличения времени выдержки до 2 и 3 суток соответственно. В варианте работы с несъемной опалубкой время выдержки не ограничивается.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Киселев, Д. П. Поризованные легкие бетоны / Д. П. Киселев, А. А. Кудрявцев. – М. : Стройиздат, 1966. – 83 с.
2. Шахова, Л. Д. Ускорение твердения пенобетонов / Л. Д. Шахова, Е. С. Черноситова // Строительные материалы. – 2005. – № 5. – С. 1–8.
3. Кравченко, И. В. О структуре цементного камня при пропаривании / И. В. Кравченко, М. Т. Власова // Науч. сообщ. / Гос. всесоюз. науч.-исслед. ин-т цемент. пром-сти. – М., 1960. – № 8. – С. 13–18.
4. Способ изготовления теплоизоляционных изделий : а.с. SU 1392061 / А. П. Меркин, Б. М. Румянцев, Т. Е. Кобидзе, Е. А. Зудяев. – Оpubл. 30.04.1988.
5. Сандан, А. С. Совершенствование технологии поэтапного внесения тепла в керамзитопенобетонную смесь при устройстве ограждающих конструкций: на примере Республики Тыва : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08 / А. С. Сандан ; С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2009. – 18 с.
6. Сандан, А. С. Методы ускорения твердения бетонов и их влияние на структуру бетона // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2013. – 2013/3 – С. 40–46.
7. Мордич, М. М. Технология и физико-механические свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства / М. М. Мордич // Наука и техника. – Минск, 2019. – № 18 (4). – С. 292–302.

Статья поступила: 14.11.2019

REFERENCES

1. Kiselev D. P., Kudryavtsev A. A. *Porizovannyye legkiye betony* [Porous lightweight concrete]. Moscow: RIF «Stroyisdat». 1966. 83 p. (rus)
2. Shakhova L. D., Chernostova E. S. *Stroymaterialy*. 2005. No. 5. pp. 1-8. (rus)
3. Kravchenko I. V., Vlasova M. T. *O structure tsementnogo kamnya pri proparivanii* [On the structure of cement stone during steaming]. Science messages. NIICement. Moscow. 1960. No 8. pp. 13-18. (rus)
4. Merkin A. P., Rumyantsev B. M., Kobidze T. E., Sudayev E. A. *Sposob izgotovleniya teploizolyacionnykh izdeliy* [Method of making insulation products]. Patent № SU 1392061. Opubl. 30.04.1988. (rus)
5. Sandan A. S. *Sovershenstvovaniye tekhnologii poetapnogo vneseniya tepla v keramzitopenobetonnyuyu smes pri ustroystve ograzhdayushchikh konstrukciy na primere Respubliki Tyva* [Improving the technology of phased introduction of heat into expanded clay-concrete mixture when building walling: the example of the Republic of Tyva]. Dissertation abstract. Sciences: 05.23.08. Saint-Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 2009. 18 p. (rus)
6. Sandan A. S. *Vestnik of Tyva State University. Technical sciences, physical and mathematical sciences*. 2013. No. 2013/3. pp. 40-46. (rus)
7. Mordzich M. M. *Science and Technique*. 2019. No. 18 (4). pp. 292-302. (rus)

Received: 14.11.2019