УДК 624.012.35:620.19
DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-4-26-34

© *С. М. Воронцов*, канд. техн. наук, доцент
(ООО «Гарант»,
Архангельск, Россия)
E-mail: s.m.vorontsov@yandex.ru

© *S. M. Vorontsov*, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(LLC «Garant»,
Arkhangelsk, Russia)
E-mail: s.m.vorontsov@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННЫХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННО-ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ БЕТОНОВ

THE INFLUENCE OF ELEVATED AND HIGH TEMPERATURES ON THE STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF STRUCTURAL AND INSULATING CONCRETE

На примере керамзитобетона, шунгизитобетона и вермикулитобетона без применения жаростойких добавок показано влияние повышенных и высоких температур на прочностные и деформационные характеристики. Представлены зависимости, отражающие снижение прочностных и деформационных свойств бетонов для режимов кратковременного, длительного нагрева и остывания после нагрева. Температурный диапазон воздействия на стандартные образцы составил от 20 °С до 700 °С включительно. Представлены данные по изменению коэффициента поперечных деформаций (коэффициента Пуассона). По результатам испытаний бетоны исследованных составов рекомендуются к применению в конструкциях с термической стойкостью И7 при соответствующем конструктивном исполнении.

Ключевые слова: конструкционно-теплоизоляционный бетон, повышенные и высокие температуры, кратковременный нагрев, длительный нагрев, прочность бетона.

Using the example of expanded clay concrete, shungizite concrete, and vermiculite concrete without heat-resistant admixtures, the effect of elevated and high temperatures on strength and deformation properties is demonstrated. Dependencies are presented reflecting the reduction in strength and deformation properties of concrete for short-term and long-term heating and cooling after heating. Temperature effects on standard samples ranged from 20 °C to 700 °C inclusive. Data on changes in the transverse deformation coefficient (Poisson's ratio) are presented. Based on the test results, concretes of the studied compositions are recommended for use in structures with a thermal resistance rating of I7, provided they are appropriately designed.

Keywords: structural thermal insulating concrete, elevated and high temperatures, short-term heating, long-term heating, concrete strength.

Введение

Железобетонные конструкции из конструкционно-теплоизоляционных бетонов применяются в малой энергетике (котельные, цеха малой мощности, мини-котельные и т. д.), где подвергаются воздействию повышенных и высоких температур, при этом изменяются прочностные и деформационные характеристики бетона конструкций, поэтому важно иметь сведения об этих изменениях для учета в расчетах и при конструировании.

Большому классу зданий и инженерных сооружений свойственна работа в условиях совместных силовых и температурных воздействий. Авторами исследований [1, 2, 5, 7, 8] отмечалось, что воздействие повышенных температур оказывает существенное влияние на характеристики прочностных и деформационных свойств бетона и арматуры, на напряженно-деформированное состояние конструкций. Получение достоверных значений характеристик бетонов в условиях температурных воздействий будет способ-

ствовать развитию перспективного метода расчета прочности и деформаций железобетонных конструкций при температурных воздействиях — метода расчета по нелинейной деформационной модели.

Цель работы — установить закономерности изменения прочностных и деформационных характеристик конструкционно-теплоизоляционных бетонов при кратковременном и длительном нагреве до 700 °С, а также в остывшем после нагрева состоянии.

Методы

Экспериментально-теоретические исследования выполнены на лабораторных образцах. Количество образцов в соответствии с коэффициентом Стьюдента принято равным шести по ГОСТ 8.207–76 (приложение 2). Образцы изготавливались из конструкционно-теплоизоляционных бетонов (керамзитобетона, шунгизитобетона, вермикулитобетона) классов В12,5 и В15 на кварцевом песке и крупном заполнителе с размерами гранул 5…10 мм без применения жаростойких добавок. Твердение бетона образцов осуществлялось в лабораторных пропарочных камерах. Размеры образцов для испытаний на осевое растяжение составили 100×100×400 мм. Образцы имели анкерные стержни с траверсой для фиксации в разрывной машине. Призменная прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона бетонов определялись по ГОСТ 24452–80. Перед бетонированием в опалубке устанавливали хромель-алюмелевые термопары для замера температуры по высоте сечения (в пяти уровнях) и по длине (в трех точках), а также штыри для замера деформаций бетона по высоте сечения. Образцы нагревали со скоростью 10 °С в час и испытывали при изотермическом температурном воздействии, остывшие образцы — при температуре 20 °С. Испытания проводились 180 сут с нагревом. При этом контроль температурных параметров в печи осуществлялся с помощью автоматического потенциометра КСПз-11-1300. Температура в печи измерялась с помощью потенциометров типа ЭПВ2-11А, оснащенных платино-родиевыми термопарами. Деформации определялись специализированными тензодатчиками с базой 50 мм, применяемыми для исследования конструкций. Имелись компенсационные датчики, установленные в температурном поле.

Результаты

Изменение прочностных и деформационных характеристик применяемых бетонов для железобетонных конструкций в условиях воздействия повышенных и высоких температур учитывается коэффициентами условий работы γ_{bt} (прочность при сжатии), γ_{tt} (прочность при растяжении), β_b (упругость) и коэффициентом $\nu_{b.p}$ (полная поперечная деформация).

Призменная прочность бетона на сжатие $R_{b,tem}$ при кратковременном и длительном нагреве выражается через прочность бетона при нормальной температуре:

$$R_{b,tem} = R_b \cdot \gamma_{bt}, \qquad (1)$$

где γ_{bt} — коэффициент условий работы бетона при сжатии.

Результаты экспериментальных исследований прочности бетона при сжатии представлены полученными аналитическими зависимостями в табл. 1. Влияние температуры нагрева на изменение призменной прочности бетонов при сжатии показано на рис. 1.

Наблюдается устойчивое снижение призменной прочности бетонов с повышением температуры нагрева. Отдельными опытами в ограниченном количестве при 200 °С была зафиксирована ниспадающая ветвь зависимости «σ_b – ε_b». Исследования показали, что участок ниспадающей ветви составлял от 3 до 5 % от максимальных деформаций.

Испытания показали, что при кратковременном нагреве призменная прочность конструкционно-теплоизоляционных бетонов снижается при 400 °С: для керамзитобетона — на 10 %, для шунгизитобетона —

Таблица 1

Изменение коэффициента γ_{bt} в зависимости от температуры и продолжительности нагрева конструкционно-теплоизоляционных бетонов

Тип бетона	Коэффициент γ_{bt}		
	Кратковременный нагрев	Длительный нагрев	Остывшие образцы
Керамзитобетон	$\gamma_{bt} = 1,063 - 0,137\left(\frac{t}{t_0}\right)$	$\gamma_{bt} = 1,00 - 0,0199\left(\frac{t}{t_0}\right)$	$\gamma_{bt} = 1,00 - 0,0166\left(\frac{t}{t_0}\right)$
Шунгизитобетон	$\gamma_{bt} = 1,057 - 0,0156\left(\frac{t}{t_0}\right)$	$\gamma_{bt} = 1,00 - 0,0164\left(\frac{t}{t_0}\right)$	$\gamma_{bt} = 1,00 - 0,137\left(\frac{t}{t_0}\right)$
Вермикулитобетон	$\gamma_{bt} = 1,00 - 0,0108\left(\frac{t}{t_0}\right)$	$\gamma_{bt} = 1,00 - 0,0201\left(\frac{t}{t_0}\right)$	$\gamma_{bt} = 1,00 - 0,0112\left(\frac{t}{t_0}\right)$

Примечание. t — температура нагрева; t_0 — начальная температура, t_0 = 20 °С.

на 18 %, для вермикулитобетона — на 22 %, в то время как по данным [1–5] при 400 °С прочность тяжелого бетона снижается на 30 %, керамзитобетона — не снижается.

При длительном нагреве призменная прочность конструкционно-теплоизоляционных бетонов снижается при 400 °С: для керамзитобетона — на 30 %, для шунгизитобетона — на 32 %, для вермикулитобетона — на 37 %; по данным [1–5] для тяжелого бетона наблюдается снижение при этой температуре на 52 %, для керамзитобетона с шамотной добавкой — на 75 %.

Исследованиями также получены функциональные зависимости призменной прочности бетонов от температуры нагрева для образцов в остывшем состоянии после температурного воздействия. Результаты опытов согласуются с данными Н. А. Ильина [1, 6].

Необходимость учета режимов нагрева и нагружения конструкций отмечена в работе [7]. Полученные данные позволят оценивать несущую способность конструкций в периоды эксплуатации и технологических остановок работы тепловых агрегатов.

Прочность бетона на растяжение $R_{bt,tem}$ при кратковременном и длительном нагреве также выражается через прочность бетона при нормальной температуре:

$$R_{bt,tem} = R_{bt} \cdot \gamma_{tt}, \quad (2)$$

где γ_{tt} — коэффициент условий работы бетона при растяжении, зависит от температуры и продолжительности нагрева.

Результаты экспериментальных исследований прочности бетона при растяжении представлены полученными аналитическими зависимостями в табл. 2. Влияние температуры нагрева на изменение прочности бетонов при осевом растяжении показано на рис. 1.

При нагреве наблюдается снижение прочности бетонов на осевое растяжение. При кратковременном нагреве прочность на растяжение конструкционно-теплоизоляционных бетонов снижается при 400 °С: для керамзитобетона — на 40 %, для шунгизитобетона — на 57 %, для вермикулитобетона — на 59 %; по данным [1–3, 8] для тяжелого бетона — на 84 %, для керамзитобетона с шамотной добавкой — на 37 %. Отсутствуют сведения о снижении прочности обычного тяжелого бетона при растяжении для температур от 400 до 700 °С.

При длительном нагреве прочность на растяжение конструкционно-теплоизоляционных бетонов снижается при 400 °С: для керамзитобетона — на 40 %, для шунгизитобетона — на 57 %, для вермикулитобетона — на 59 %; по данным [1–3, 8] для тяже-

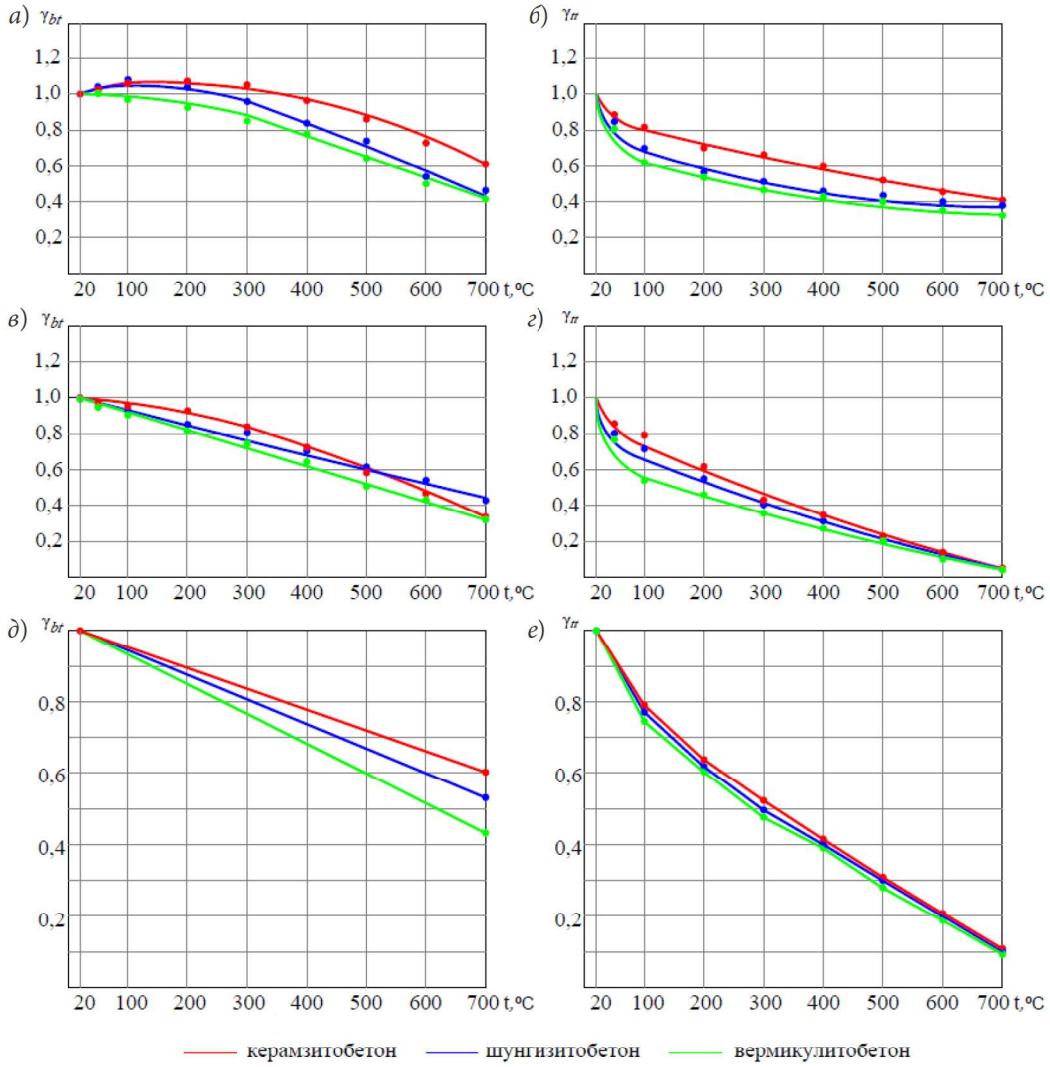

Рис. 1. Влияние нагрева на призменную прочность бетонов: *а* — кратковременный нагрев, сжатие; *б* — кратковременный нагрев, растяжение; *в* — длительный нагрев, сжатие; *г* — длительный нагрев, растяжение; *д* — остывший бетон, сжатие; *е* — остывший бетон, растяжение

Таблица 2

Изменение коэффициента γ_{tt} в зависимости от температуры и продолжительности нагрева конструкционно-теплоизоляционных бетонов

Тип бетона	Коэффициент γ_{tt}		
	Кратковременный нагрев	Длительный нагрев	Остывшие образцы
Керамзитобетон	$\gamma_{tt} = 1,00 - 0,086\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,54}$	$\gamma_{tt} = 1,00 - 0,111\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,62}$	$\gamma_{tt} = 1,00 - 0,072\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,70}$
Шунгизитобетон	$\gamma_{tt} = 1,00 - 0,111\left(\text{—}\right)^{0,54}$	$\gamma_{tt} = 1,00 - 0,112\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,60}$	$\gamma_{tt} = 1,00 - 0,049\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,70}$
Вермикулитобетон	$\gamma_{tt} = 1,00 - 0,119\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,54}$	$\gamma_{tt} = 1,00 - 0,122\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,60}$	$\gamma_{tt} = 1,00 - 0,092\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,70}$

Примечание. t — температура нагрева; t_0 — начальная температура, t_0 = 20 °С.

лого бетона — на 84 %, для керамзитобетона с шамотной добавкой — на 85 %.

В остывшем состоянии образцы бетонов также показали снижение его прочности как при сжатии, так и при растяжении, аналогично сведениям из источников [9–14].

Модуль упругости бетона. Влияние температуры нагрева на изменение модуля упругости бетона учитывают умножением начального модуля упругости бетона при нормальной температуре (t_0 = 20 °С) на коэффициент β_b:

$$E_{bt} = E_b \cdot \beta_b, \quad (3)$$

где β_b — коэффициент снижения начального модуля упругости в зависимости от температуры и продолжительности нагрева.

Модуль упругости для каждого образца бетона определялся при уровне нагрузки, составляющем 30 % от разрушающей.

Результаты экспериментальных исследований модуля упругости бетонов представлены полученными аналитическими зависимостями в табл. 3. Влияние температуры нагрева на изменение модуля упругости бетонов показано на рис. 2.

Модуль упругости конструкционно-теплоизоляционных бетонов снижается при 400 °С: для керамзитобетона — на 42 %, для шунгизитобетона — на 49 %, для вермикулитобетона — на 54 %; по данным [1–4, 8] для тяжелого бетона — на 56 %, для керамзитобетона с шамотной добавкой — на 15 %. Таким образом, в условиях нагрева имеет место снижение модуля упругости у всех видов бетона.

Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона). При решении ряда практических задач, связанных с учетом пространственного деформирования конструкций, необходимы сведения о коэффициенте поперечной деформации бетонов как при сжатии, так и при растяжении. Данных в литературе о коэффициенте $\nu_{b.p}$ мало, и строгое нормирование этого коэффициента не обозначено.

Коэффициент полной поперечной деформации $\nu_{b.p}$ представляет собой отношение относительных поперечных деформаций ε_{bp} к продольным деформациям ε_b:

$$\nu_{b.p} = \frac{|\varepsilon_{bp}|}{|\varepsilon_b|}. \quad (4)$$

Коэффициент полной поперечной деформации $\nu_{b.p}$ определялся для каждого образца бетона при уровне нагрузки, составляющей 60 %. Методически опыты ориентировались на исследования Н. А. Ильина [6]. Это значение условно соответствует эксплуатационной нагрузке.

Полученные экспериментальные данные для указанных бетонов, режимов нагрева

Таблица 3

Изменение коэффициента β_b в зависимости от температуры и продолжительности нагрева конструкционно-теплоизоляционных бетонов

Тип бетона	Коэффициент β_b	
	Кратковременный и длительный нагрев	Остывшие образцы
Керамзитобетон	$\beta_b = 1,00 - 0,021\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,92}$	$\beta_b = 1,00 - 0,0242\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,92}$
Шунгизитобетон	$\beta_b = 1,00 - 0,0212\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,89}$	$\beta_b = 1,00 - 0,0225\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,92}$
Вермикулитобетон	$\beta_b = 0,45 - 0,0139\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,89}$	$\beta_b = 1,00 - 0,0235\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,92}$

Примечание. t — температура нагрева; t_0 — начальная температура, t_0 = 20 °С.

и нагружения аппроксимированы выражениями, приведенными в табл. 4. Изменение коэффициента поперечных деформаций при нагреве представлено на рис. 2.

Коэффициент $\nu_{b.p}$ с повышением температуры уменьшается.

Верхняя граница процесса микротрещинообразования в структуре бетона харак-

Таблица 4

Аналитические зависимости коэффициента поперечных деформаций для конструкционно-теплоизоляционных бетонов без жаростойких добавок

Тип бетона	Коэффициент $\nu_{b.p}$	
	Кратковременный и длительный нагрев	Остывшие образцы
Керамзитобетон	$\nu_{b.p} = 0,26 - 0,012\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,65}$	$\nu_{b.p} = 0,26 - 0,026\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,60}$
Шунгизитобетон	$\nu_{b.p} = 0,26 - 0,026\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,65}$	$\nu_{b.p} = 0,26 - 0,028\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,60}$
Вермикулитобетон	$\nu_{b.p} = 0,26 - 0,023\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,65}$	$\nu_{b.p} = 0,26 - 0,029\left(\frac{t}{t_0}\right)^{0,60}$

Примечание. t — температура нагрева; t_0 — начальная температура, t_0 = 20 °С.

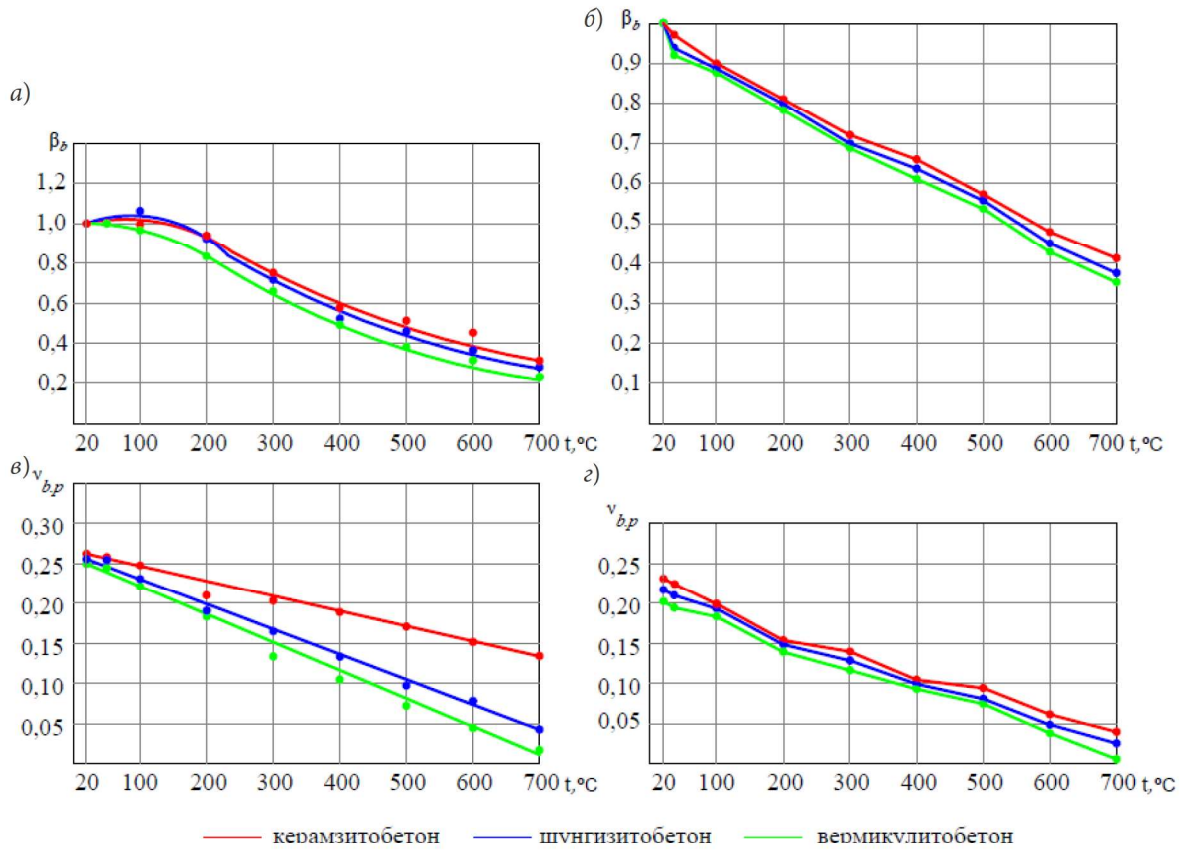

Рис. 2. Влияние нагрева на коэффициенты: *а* — β_b (кратковременный и длительный нагрев); *б* — β_b (остывший бетон; *в* — $\nu_{b.p}$ (кратковременный и длительный нагрев); *г* — $\nu_{b.p}$ (остывший бетон)

теризуется достижением значений $\nu_{b.p}$ = 0,5. Коэффициент полных поперечных деформаций $\nu_{b.p}$ конструкционно-теплоизоляционных бетонов с повышением температуры нагрева снижается и составляет при 20 °С — от 0,25 до 0,26 (при затрудненном влагообмене); при 400 °С — от 0,14 до 0,20; при 700 °С — от 0,02 до 0,14. Более точные данные можно получить по формулам, указанным в табл. 4. Имеются сведения о влиянии вида заполнителя на изменение значений коэффициента Пуассона [13, 16].

Обсуждение

Применение конструкционно-теплоизоляционных бетонов без жаростойких добавок в железобетонных конструкциях, предназначенных для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур, ранее не обозначалось в нормах проектирования ввиду отсутствия необходимости использования искусственных пористых заполнителей в качестве теплоизоляционных материалов. В действующих нормах проектирования СП 27.13330.2017 сведения о перечисленных бетонах без применения жаростойких добавок малочисленны.

В табл. 5.1 СП 27.13330.2017 данные по указанным видам бетона без применения жаростойких добавок отсутствуют. Для керамзитобетона и керамзитобетона с вермикулитобетоном с жаростойкими добавками присутствуют сведения для кратковременного нагрева до 700 °С, для длительного нагрева до 500 °С. Для высоких температур шаг изменения составляет 200°. Значительная часть железобетонных конструкций в малой энергетике эксплуатируется при температурах от 200 до 580 °С. Такой широкий шаг изменения температуры при существенном изменении характеристик бетонов малоприемлем. Здесь следует отметить, что свойства бетонов с жаростойкими добавками отличаются от бетонов без применения жаростойких добавок, особенно для температур свыше 600 °С.

Сведения о значениях коэффициента поперечных деформаций бетонов имеются в источниках [6, 9, 13–15]. В указанной литературе сообщается, что коэффициент поперечной упругой деформации тяжелого бетона примерно равен 0,13…0,22. С. В. Александровским был представлен анализ значений коэффициента полных поперечных деформаций [9], где автор поясняет, что вопрос о поперечной деформации бетона еще не исследован в должной мере. Коэффициент полной поперечной деформации тяжелого бетона может зависеть от зрелости бетона. Г. А. Бужевич [14] отмечал, что коэффициент Пуассона при сжатии зависит от отношения σ_b/R_b и может иметь значения от 0,15 до 0,3. По информации Ю. П. Горлова [15], для конструкционно-теплоизоляционных бетонов при нагрузке в 20 % от разрушающей начальный коэффициент поперечной деформации составлял 0,12…0,28. Для керамзитобетона [6, 13] коэффициент Пуассона при сжатии и свободном высыхании составляет 0,2…0,22, при сжатии и отсутствии влагообмена — 0,23…0,27.

В проведенных исследованиях влагообмен частично отсутствовал, что соответствует конструкциям в реальных условиях, где влагообмен ограничен. В помещении лаборатории влажность составляла от 62 до 75 %, что повлияло на полученные значения коэффициента Пуассона: с увеличением температуры нагрева он уменьшается с 0,25…0,26 при 20 °С до 0,02…0,14 при 700 °С для разных видов бетона.

Опытные данные публикуются впервые.

Выводы

1. Воздействие повышенных и высоких (до 700 °С) температур на конструкционно-теплоизоляционный бетон приводит к снижению коэффициента условий работы бетона при сжатии γ_{bt} при кратковременном нагреве на 49–56 %, при длительном нагреве — на 58–69 %; коэффициента условий работы бетона при растяжении γ_{tt} при кра-

тковременном нагреве — на 52–61 %, при длительном нагреве — на 93–94 %; коэффициента начального модуля упругости β_b — на 69–75 %, коэффициента полной поперечной деформации $\nu_{b.p}$ — на 39–44 %.

2. Получены аналитические зависимости для определения коэффициентов условий работы γ_{bt}, γ_{tt}, β_b, коэффициента $\nu_{b.p}$, что позволяет осуществлять учет изменений прочностных и деформационных свойств исследованных бетонов при проектировании и дает возможность обоснованного применения таких бетонов в конструкциях с термической стойкостью И7.

Библиографический список

1. *Ильин Н. А.* Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. М.: Стройиздат, 1979. 128 с.

2. *Милованов А. Ф.* Железобетонные температуростойкие конструкции. М.: НИИЖБ, 2005. 234 с.

3. *Милованов А. Ф., Камбаров Х. У., Зенков Н. И.* Прочностные и деформативные свойства керамзитобетона при нагреве // Бетон и железобетон. 1977. № 4. С. 27–29.

4. *Милонов В. М., Демчук Л. И.* Механические свойства легких жаростойких бетонов при сжатии с нагревом // Бетон и железобетон. 1979. № 5. С. 12–15.

5. *Некрасов К. Д., Масленникова М. Г.* Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1982. 152 с.

6. *Ильин Н. А.* Влияние высоких температур нагрева на прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона и на сцепление его со стержневой арматурой: дис. … канд. техн. наук. Минск, 1971. 171 с.

7. *Корсун В. И.* Развитие методов расчета железобетонных конструкций зданий и сооружений на температурно-влажностные воздействия // Поведение бетонов и железобетонных конструкций при наличии нагрузок и тепловлажностных воздействий различной длительности: электронный сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. Макеевка, 20–21 октября 2020 г. Макеевка: ДОННАСА, 2020. С. 2–14.

8. *Милованов А. Ф.* Расчет жаростойких железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1975. 232 с.

9. *Александровский С. В.* Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести). М.: Стройиздат, 1966. 444 с.

10. *Загоруйко Т. В.* Структурные изменения композиционных материалов в условиях термических воздействий // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20, № 10. С. 8–10.

11. *Леонович С. Н., Литвиновский Д. А., Будревич Н. А.* Оценка стойкости бетона к воздействию высокой температуры на основе ГОСТ 29167–2020 // Бетон и железобетон. 2021. № 3. С. 14–18.

12. *Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Карпенко Н. И., Селютин Н. М., Моисеенко Г. А., Безгодов И. М.* Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся лёгких бетонов на искусственных и природных пористых заполнителях // Бетон и железобетон. 2025. № 3 (628). С. 52–68.

13. *Горин В. М., Шиянов Л. П.* Керамзит и керамзитобетон в жилищном строительстве и коммунальном хозяйстве // Строительные материалы. 2007. № 10. С. 98–100.

14. *Мешкаускас Ю. И.* Конструктивный керамзитобетон. М.: Стройиздат, 1977. 87 с.

15. *Бужевич Г. А.* Легкие бетоны на пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1970. 272 с.

16. *Васильков С. Г., Онацкий С. П., Элинзон М. П., Виноградов Б. Н. и др.* Искусственные пористые заполнители и легкие бетоны на их основе / под ред. проф. Ю. П. Горлова. М.: Стройиздат, 1987. 304 с.

17. *Philleo R.* Some physical properties of concrete at high temperatures // Journal of the American Concrete Institute. 1958. Vol. 29 (10). Pp. 857–864.

References

1. Il'in N. A. *Posledstviya ognevogo vozdeystviya na zhelezobetonnye konstruktsii* [Consequences of the fire impact on reinforced concrete structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 128 p.

2. Milovanov A. F. *Zhelezobetonnye temperaturostoykie konstruktsii* [Reinforced concrete temperature-resistant structures]. Moscow, NIIZhB Publ., 2005, 234 p.

3. Milovanov A. F., Kambarov Kh. U., Zenkov N. I. *Prochnostnye i deformativnye svoystva keramzitobetona pri nagreve* [Strength and deformation properties of expanded clay concrete during heating]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete,* 1977, no. 4, pp. 27–29.

4. Milonov V. M., Demchuk L. I. *Mekhanicheskie svoystva legkikh zharostoykikh betonov pri szhatii s nagrevom* [Mechanical properties of light heat-resistant concretes under compression with heating]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 1979, no. 5, pp. 12–15.

5. Nekrasov K. D., Maslennikova M. G. *Legkie zharostoykie betony na poristykh zapolnitelyakh* [Light

heat-resistant concretes on porous aggregates]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 152 p.

6. Il'in N. A. *Vliyanie vysokikh temperatur nagreva na prochnostnye i deformativnye kharakteristiki keramzitobetona i na stseplenie ego so sterzhnevoy armaturoy. Diss. kand. tekhn. nauk* [Influence of high heating temperatures on strength and deformation characteristics of expanded clay concrete and on its adhesion to reinforcement bars. PhD in Sci. Tech. diss.]. Minsk, 1971, 171 p.

7. Korsun V. I. *Razvitie metodov rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy na temperaturno-vlazhnostnye vozdeystviya* [Development of methods for calculating reinforced concrete structures of buildings and structures for temperature and humidity effects]. *Povedenie betonov i zhelezobetonnykh konstruktsiy pri nalichii nagruzok i teplovlazhnostnykh vozdeystviy razlichnoy dlitel'nosti: elektronniy sb. nauch. tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Makeevka, 20–21 oktyabrya 2020 g.* [Behavior of concrete and reinforced concrete structures subjected to loading and heat and moisture effects of various durations. Online Proceedings of the International scientific-technical conf. Makeevka, October 20-21, 2020]. Makeevka, DONNASA Publ., 2020, pp. 2–14.

8. Milovanov A. F. *Raschet zharostoykikh zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Calculation of heat-resistant reinforced concrete structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975, 232 p.

9. Aleksandrovskiy S. V. *Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy na temperaturnye i vlazhnostnye vozdeystviya (s uchetom polzuchesti)* [Calculation of concrete and reinforced concrete structures for temperature and humidity effects (taking Calculation of concrete and reinforced concrete structures for temperature and humidity effects (taking creep into account)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1966, 444 p.

10. Zagoruyko T. V. *Strukturnye izmeneniya kompozitsionnykh materialov v usloviyakh termicheskikh vozdeystviy* [Structural changes of composite materials under thermal effects]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 10, pp. 8–10.

11. Leonovich S. N., Litvinovskiy D. A., Budrevich N. A. *Otsenka stoykosti betona k vozdeystviyu vysokoy temperatury na osnove GOST 29167–2020* [Assessment of concrete resistance to high temperature based on GOST 29167-2020]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2021, no. 3, pp. 14–18.

12. Kaprielov S. S., Sheynfel'd A. V., Karpenko N. I., Selyutin N. M., Moiseenko G. A., Bezgodov I. M. *Prochnostnye i deformatsionnye kharakteristiki vysokoprochnykh samouplotnyayushchikhsya legkikh betonov na iskusstvennykh i prirodnykh poristykh zapolnitelyakh* [Strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting light concretes on artificial and natural porous aggregates]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2025, no. 3 (628), pp. 52–68.

13. Gorin V. M., Shiyanov L. P. *Keramzit i keramzitobeton v zhilishchnom stroitel'stve i kommunal'nom khozyaystve* [Light expanded clay aggregate and expanded clay concrete in housing and utilities]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2007, no. 10, pp. 98–100.

14. Meshkauskas Yu. I. *Konstruktivniy keramzitobeton* [Construction expanded clay concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977, 87 p.

15. Buzhevich G. A. *Legkie betony na poristykh zapolnitelyakh* [Light sorts of concrete on porous aggregates]. Moscow, Stroyizdat Publ.,1970, 272 p.

16. Vasil'kov S. G., Onatskiy S. P., Elinzon M. P., Vinogradov B. N., et al. *Iskusstvennye poristye zapolniteli i legkie betony na ikh osnove* [Artificial porous aggregates and light concretes based on them]. Ed. by Professor Gorlov Yu. P. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987, 304 p.

17. *Philleo R.* Some physical properties of concrete at high temperatures. *Journal of the American Concrete Institute*, 1958, vol. 29 (10), pp. 857–864.