

УДК 614.841.332:691.33

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТОЙКОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО, МОДИФИЦИРОВАННОГО И ЦЕНТРИФУГИРОВАННОГО БЕТОНОВ ПРИ ПОЖАРЕ

И. И. Полевода¹, Д. С. Нехань²

¹К.т.н., доцент, начальник государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», Минск, Беларусь, e-mail: ip@uscр.by

²К.т.н., доцент кафедры пожарной безопасности государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», Минск, Беларусь, e-mail: denis_nechany@mail.ru

Реферат

Для железобетонных конструкций предел огнестойкости является показателем, определяющим область их применения в строительстве и характеризующим промежуток времени, при котором конструкция сохраняет свои несущие и ограждающие функции при пожаре. Для теоретического определения предела огнестойкости необходимо знать основные характеристики материалов в нормальных условиях и характер их изменения при высокотемпературном нагреве, в частности при решении прочностной задачи огнестойкости – физико-механические свойства.

В настоящей статье представлена теоретическая модель стойкости высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов при пожаре, использование которой позволяет прогнозировать поведение конструкций из него при пожаре и оценить их предел огнестойкости. Указанная модель разработана на основании проведенного комплекса лабораторных и теоретических исследований высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов при высокотемпературном нагреве.

Ключевые слова: стойкость бетона при пожаре, прочность бетона на сжатие, высокотемпературный нагрев, коэффициент условий работы бетона при пожаре, высокопрочный бетон, модифицированный бетон, центрифугированный бетон.

THEORETICAL MODEL OF RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH, MODIFIED AND SPUN CONCRETE IN FIRE

I. I. Palevoda, D. S. Nekhan

Abstract

For reinforced concrete structures the fire resistance is an indicator that determines the area of their application in construction and characterizes the period of time when the structure retains its load-bearing and enclosing functions in case of fire. For theoretical determination of the fire resistance it is necessary to know the main characteristics of materials in normal conditions and the nature of their changes during high-temperature heating, in particular, when solving the strength problem of fire resistance – physical and mechanical properties.

This paper presents a theoretical model of high-strength, modified and spun concrete resistance in fire, the use of which allows to predict the behavior of structures made of it in fire and to estimate their fire resistance. This model was developed on the basis of a set of laboratory and theoretical studies of high-strength, modified and spun concrete under high-temperature heating.

Keywords: fire resistance of concrete, compressive strength of concrete, high-temperature heating, coefficient allowing for decrease of characteristic strength of concrete, high-strength concrete, modified concrete, spun concrete.

Введение

При пожаре в железобетонных конструкциях происходит необратимое снижение прочности бетона вследствие нагрева, что оказывает существенное влияние на рабочие функции конструкций в нагретом или охлажденном состоянии [1–3]. Знание основных характеристик материалов в нормальных (начальных) условиях и характер их изменения при высокотемпературном нагреве – необходимые условия для теоретической оценки огнестойкости строительных конструкций. Для оценки свойств бетона, влияющих на огнестойкость выполненных из него конструкций, используется понятие стойкости бетона при пожаре. При этом стойкость бетона при пожаре как нормируемый показатель не задается, а оценивается через предел огнестойкости строительных конструкций, выполненных из него.

Для конструкций из высокопрочного бетона отсутствуют обоснованные данные для расчета в части влияния его прочности на сжатие, состава бетонной смеси, добавок на поведение при пожаре, для центрифугированного бетона – обоснованные данные для расчета прочности бетона на сжатие по сечению при пожаре (с учетом технологии его получения). Существующий ряд проблем требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных

исследований с доработкой действующих правил расчета пределов огнестойкости. Поэтому актуальным сегодня является изучение стойкости высокопрочного, модифицированного, центрифугированного бетонов при пожаре, под которой в данном контексте понимается совокупность прочностных свойств бетона, способствующих обеспечению нормируемой огнестойкости железобетонных конструкций.

Основы стойкости бетонов при пожаре

Приведенные в настоящей работе исследования стойкости бетона при пожаре являются частью комплексного эксперимента, рассмотренного в работах [1, 4–10], и служат основой для оценки огнестойкости железобетонных конструкций.

Термин «стойкость бетона при пожаре» в настоящей работе принимается эквивалентным термину «стойкость при кратковременном высокотемпературном нагреве», поскольку деструктивное воздействие вследствие высокой температуры при пожаре существенно превосходит эффект от воздействия других факторов пожара. Под высокотемпературным нагревом понимается нагрев конструкций свыше 200 °С от огневого воздействия, а также нагрев материалов до таких температур с использованием электрокамер-

ной печи. Температуры в интервале от 50 °С до 200 °С являются повышенными. Кратковременным высокотемпературным нагревом считается воздействие пожара (температур в печи) на конструкцию (материал) продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов [11].

За основу для исследований приняты высокопрочный, модифицированный [4, 5] и центрифугированный бетоны [10]. В качестве характеристики стойкости бетона при пожаре принят коэффициент условий работы при пожаре $k_c(\theta)$. Данный параметр носит комплексный характер и применяется для интегральной модели стойкости бетона при пожаре. Коэффициент условий работы бетона при пожаре $k_c(\theta)$ учитывает изменение прочности бетона на сжатие при увеличении температуры. Он характеризует стойкость бетона к нагреву и показывает долю оставшейся прочности бетона на сжатие при заданной температуре от начальной [12, 13]. На основе исследований изменений характеристик бетона при высокотемпературном нагреве представляется возможным разработать теоретическую модель стойкости бетонов при пожаре, применение которой позволит расчетным путем определять значение коэффициента условий работы бетона при пожаре $k_c(\theta)$ при заданной температуре нагрева в зависимости от состава бетонной смеси, технологии его получения, а также рассчитывать поправочные коэффициенты для указанного коэффициента при введении добавок.

Для определения значений коэффициента условий работы бетона при пожаре $k_c(\theta)$ были проведены лабораторные исследования порядка 2200 бетонных образцов [1, 5, 10]. Полученная совокупность экспериментальных данных в дальнейшем была использована для разработки аналитической зависимости, позволяющей на базе анализа состава бетонной смеси определять коэффициент $k_c(\theta)$, а также аналитической зависимости $k_c(\theta)$ для центрифугированного бетона при пожаре от температуры и координаты от центра тяжести поперечного сечения изделия, – что позволило разработать теоретическую модель стойкости высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов при пожаре и методику расчета коэффициента условий работы бетона при пожаре на ее основе.

Для удовлетворения требований по безопасности следует назначать такие начальные показатели качества конструкции, чтобы с назначенной степенью надежности не происходило ее разрушение любого характера при самых неблагоприятных сочетаниях воздействий. Значения характеристик бетона, в частности прочности на сжатие, определяются с учетом их статистической изменчивости [14, 15]. На этапе изготовления железобетонных и бетонных конструкций в заводских условиях статическая изменчивость прочности бетона учитывается коэффициентом вариации, на основании чего ему присваивается соответствующий класс. При проектировании зданий и сооружений вводятся дополнительные коэффициенты безопасности к свойствам бетона и арматуры, а также принятым силовым нагрузкам. В расчетах огнестойкости принимается воздействие на строительные конструкции стандартного пожара, являющегося редким явлением, который представляет с точки зрения нагрева строительных конструкций один из наиболее неблагоприятных случаев. Таким образом, назначение коэффициентов, устанавливаемых в зависимости от опасности достижения предельных состояний, является одним из основных направлений обеспечения безопасности железобетонных конструкций.

Расчетная прочность бетона на сжатие f_{cd} при нормальных условиях определяется путем умножения характеристической прочности бетона на сжатие f_{ck} на коэффициент безопасности k_{CF} , принимающий значения менее 1. Коэффициент k_{CF} в рассматриваемом случае обратно пропорционален частному коэффициенту безопасности для бетона [16], учитывающему возможность отклонения в геометрических размерах сечений и разницу между прочностями бетона на опытных образцах и в конструкции, и прямо пропорционален коэф-

фициенту, учитывающему длительное действие силовой нагрузки и неблагоприятный способ ее приложения, а в случае применения высокопрочных бетонов – прямо пропорционален коэффициенту безопасности, учитывающему их хрупкий характер разрушения [14].

Рассчитанные значения коэффициента безопасности k_{CF} при $\eta_{fi} = 0,7$ для бетонов классов $C^8/10 \dots C^{90}/105$ находятся в диапазоне 0,31...0,40 (с повышением класса бетона k_{CF} уменьшается) [1].

Сравнительная оценка коэффициентов k_{CF} и $k_c(\theta)$ проводится с использованием зонного метода [13], который подразумевает деление сечения конструкции на элементарные зоны, в пределах которых бетон равномерно нагрет до одной температуры и обладает, соответственно, одинаковыми физико-механическими свойствами. Условие безопасности по огнестойкости, заключающееся в том, что остаточное расчетное предельное усилие, воспринимаемое конструкцией при пожаре, должно быть выше расчетного значения результата воздействия при пожаре [13], с учетом рассмотрения стойкости бетона при пожаре, допустимо записать следующим образом:

$$k_c(\theta) \geq k_{CF} \cdot \eta_{fi} \quad (1)$$

Анализ неравенства (1) показывает, что пластическое разрушение элементарной зоны при заданных граничных условиях не может произойти, пока величина коэффициента условий работы бетона при пожаре выше произведения коэффициента безопасности k_{CF} (для нормальных условий эксплуатации) и уровня нагрузки при пожаре η_{fi} , что позволяет установить критическую температуру θ_{cr} , соответствующую моменту пластического разрушения конструкции при пожаре (рисунок 1).

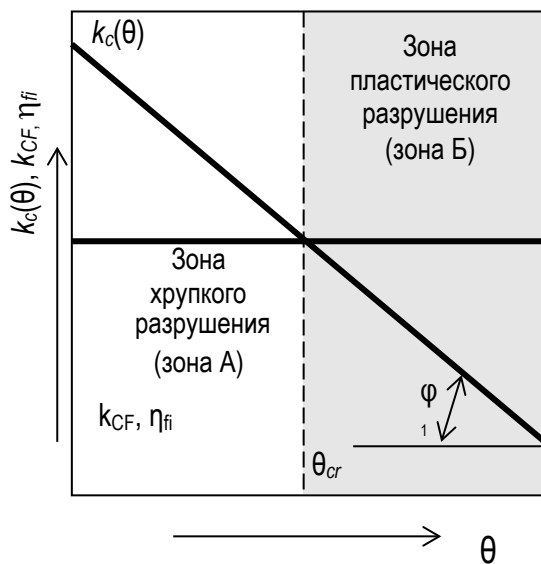


Рисунок 1 – Принципиальная зависимость $k_c(\theta)$ и k_{CF} от температуры нагрева θ

Определенные с использованием формулы (1) значения критических температур при значениях коэффициента $k_c(\theta)$, заложенных в Eurocode 2 [13], RakMK B4 [17], ТКП 45-2.02-110 [18], «Рекомендации...» [19] представлены в таблице 1 [1, 5].

Таблица 1 – Критическая температура (θ_{cr} , °C)

Класс бетона	Eurocode 2	ТКП 45-2.02-110	Рекомендации...	RakMK B4
C ⁸ / ₁₀ – C ⁶⁰ / ₇₅	520	600	485	750
C ⁷⁰ / ₈₅ – C ⁹⁰ / ₁₀₅	420	640	525	500

Таким образом, пластическое разрушение бетона при самом неблагоприятном сочетании коэффициентов невозможно при температурах нагрева бетона менее 400 °C (таблица 1). Анализ результатов исследований коэффициента условий работы бетонов при пожаре [1, 5, 10] показывает, что при 800 °C бетон сохраняет в среднем 5–20 % от первоначальной прочности, что приводит к разрушению конструкции. Следовательно, наиболее вероятный интервал критических температур нагрева 400–800 °C.

Закономерности влияния состава бетонной смеси на стойкость бетона при пожаре

Наибольшее влияние на снижение прочности бетона оказывает температура нагрева, свойства составляющих его материалов и протекающих структурообразующих и деструктивных процессов [1, 20]. Проблема анализа состава бетонной смеси затруднена сложностью происходящих при нагревании процессов, поскольку для различных температурных интервалов значимость влияния составных элементов композиций меняется [20]. Анализ свойств высокопрочных бетонов при нагреве [1] показал, что можно условно выделить две зоны изменения прочностных свойств бетона (рисунок 1) в зависимости от температуры нагрева: от 20 до 400 °C (зона А) и от 400 до 800 °C (зона Б).

В зоне А образцы бетона, как правило, сохраняют свои свойства не ниже начальных. Разрушение может проходить только хрупко. Процессы в данном интервале температур обусловлены влиянием цементного камня (далее – ЦК), а именно обезвоживанием и уплотнением гидросиликатной фазы, образованием новых структурных связей в контактной зоне и увеличением объема твердой фазы. Изменение $k_c(\theta)$ в пределах зоны А целесообразно определять с учетом изначального накопления дефектов структуры бетона. Введем коэффициент α_k , учитывающий накопленные дефекты структуры бетона при температуре 400 °C, с целью математического описания $k_c(\theta)$. С учетом результатов исследований, представленных в работе [5], α_k может быть представлен как произведение трех составляющих:

$$\alpha_k = \alpha_{в/ц} \cdot \alpha_{ТВО} \cdot \alpha_A, \tag{2}$$

где $\alpha_{в/ц}$ – коэффициент учета влияния водоцементного отношения для температуры 400 °C; $\alpha_{ТВО}$ – коэффициент учета температуры изотермического нагрева при тепловлажностной обработке (далее – ТВО) для температуры 400 °C; α_A – коэффициент учета влияния добавок для температуры 400 °C.

Увеличение температуры выше 400 °C (зона Б) приводит к усилению деструктивных процессов в бетоне. Процессы, происходящие в данной зоне, в первую очередь, обусловлены влиянием величин температурных деформаций ЦК и заполнителей, а также дегидратацией клинкерных минералов цементного камня и характеризуются нарастающей скоростью деструктивных процессов.

С учетом вышеописанных процессов в зоне Б введем коэффициент интенсивности деструктивных процессов ξ с целью математического описания $k_c(\theta)$ в интервале температур 400–800 °C. Аналогично α_k коэффициент ξ записывается как произведение трех компонентов:

$$\xi = \xi_G \cdot \xi_{ТВО} \cdot \xi_A, \tag{3}$$

где ξ_G – коэффициент учета объемных концентраций компонентов для температур 400–800 °C; $\xi_{ТВО}$ – коэффициент учета температуры изотермического нагрева при ТВО для температур 400–800 °C; ξ_A – коэффициент учета добавок для температур 400–800 °C.

Результаты эксперимента [5] показывают, что коэффициент учета накопленных дефектов α_k практически не зависит от относительной массы цементного камня $m_{цк}$ и соотношения мелкого и крупного заполнителей; n_G . Однако прослеживается связь указанных параметров с коэффициентом интенсивности деструктивных процессов ξ (рисунки 2 и 3).

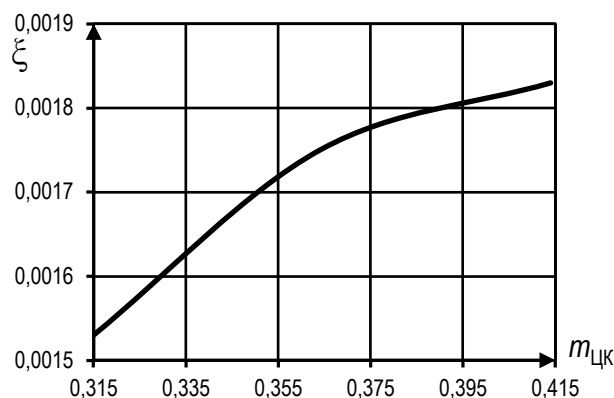


Рисунок 2 – Зависимость ξ от $m_{цк}$

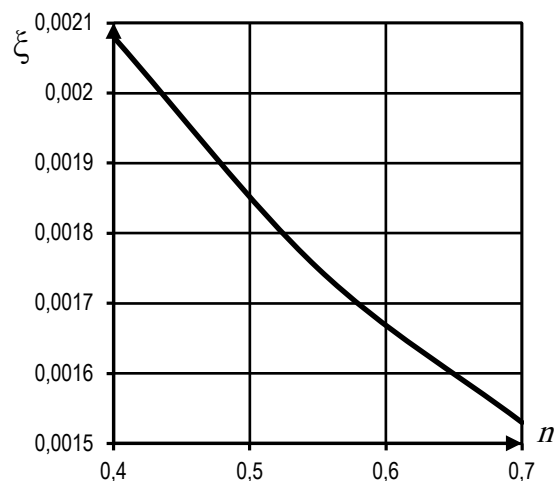


Рисунок 3 – Зависимость ξ от n_G

Проведенная обработка экспериментальных данных позволила при других фиксированных параметрах (при $\xi_{ТВО} = 1$ и $\xi_A = 1$) [5] вывести зависимости коэффициента интенсивности деструктивных процессов от относительного содержания цементного камня $m_{цк}$ и соотношения мелкого и крупного заполнителей n_G :

$$\xi = \xi_G = -0,0292m_{цк}^2 + 0,0243m_{цк} - 0,0032; \tag{4}$$

$$\xi = \xi_G = 0,0005 - 0,0005 \ln n_G \quad (5)$$

Исходя из специфики процессов, происходящих при нагреве в бетоне, не представляется возможным рассматривать влияние указанных компонентов ($m_{цк}$ и n_G) по отдельности. Оба параметра не оказывают существенного негативного влияния на коэффициент α_k . Вместе с тем результаты испытаний образцов 1-й (варьируемым параметром является $m_{цк}$) и 6-й (варьируемым параметром является класс бетона) серий [1, 5] показали, что ξ однозначно возрастает с увеличением суммы

относительной массы цементного камня $m_{цк}$ и крупного заполнителя $m_{кз}$ в бетоне, выраженной величиной Φ_0 :

$$\Phi_0 = m_{цк} + m_{кз} = \frac{1 + m_{цк} n_G}{1 + n_G} \quad (6)$$

Результаты испытаний показали, что варьирование параметра Φ_0 в достаточно широком диапазоне (от 0,68 до 0,78) значительно не отражается на величине ξ_G , которая составляет 0,00187 (таблица 2).

Таблица 2 – Значения Φ_0 и ξ_G для температур 400–800 °С

Серия	Состав [1]	$m_{цк}$	$m_{кз}$	$m_{мз}$	Φ_0	ξ_G
1	1-1	0,315	0,429	0,257	0,744	0,00153
	1-2	0,363	0,398	0,239	0,761	0,00175
	1-3	0,414	0,364	0,222	0,778	0,00183
2	2-1	0,369	0,372	0,259	0,741	0,00153
	2-2	0,369	0,408	0,223	0,777	0,00175
	2-3	0,369	0,450	0,181	0,819	0,00208
3	3-1	0,369	0,408	0,223	0,777	0,00187
	3-2	0,599	0,000	0,401	0,599	0,00153
	3-3	0,481	0,000	0,519	0,481	0,00153
6	6-1	0,239	0,448	0,313	0,686	0,00187
	6-2	0,314	0,433	0,252	0,748	0,00187
	6-3	0,310	0,411	0,279	0,721	0,00187
	6-4	0,352	0,417	0,230	0,770	0,00187
	6-5	0,356	0,417	0,227	0,773	0,00187
	6-6	0,351	0,420	0,229	0,771	0,00187

Примечание: составы бетонной смеси подобраны исходя из варьируемого параметра бетонной смеси [1]. Так, для составов 1-ой серии варьируемым параметром является $m_{цк}$, 2-ой серии – n_G , 3-ей серии – вид композиционного материала (далее – ВКМ); 6-ой серии – прочность бетона, обусловленная его классом.

В интервале температур 400...800 °С могут иметь место более низкие скорости деструктивных процессов, что характерно для составов 1-1, 1-2, 2-1, 2-2 (таблица 2). Анализ показал, что данные результаты в интервале $0,68 \leq \Phi \leq 0,78$ носят во многом случайный характер. При этом результаты испытания образцов 6-ой серии указывают на однозначное снижение скорости деструктивных при $\Phi_0 \leq 0,68$, что подтверждается при анализе результатов 3-ей серии. Таким образом, для $\Phi_0 \leq 0,68$ коэффициент интенсивности деструктивных процессов может быть принят $\xi_G = 0,00153$. В целях получения гарантированного результата использована практика «аналогичного худшего случая» по ISO/TR 10158, в соответствии с которой в интервале $0,68 \leq \Phi_0 \leq 0,78$ принимается $\xi_G = 0,00187$.

Анализ результатов 2-ой серии показал, что увеличение суммы относительной массы ЦК и крупного заполнителя свыше 0,78 негативно сказывается на процессах, протекающих в бетоне при пожаре, увеличивая скорость деструктивных процессов [1]. Проведенная обработка экспериментальных данных для составов с $\Phi_0 > 0,78$ позволила вывести следующую зависимость коэффициента ξ_G от Φ_0 :

$$\xi_G = 0,0032 \Phi_0^{2,13} \quad (7)$$

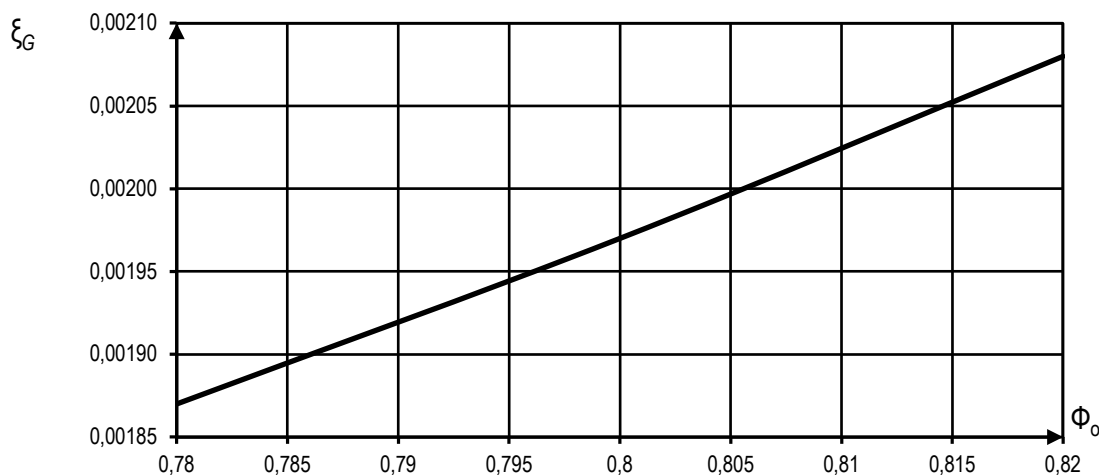


Рисунок 4 – Зависимость ξ_G от Φ_0 при $\Phi_0 > 0,78$

Таким образом, для бетонов с $\Phi_o < 0,68$ $\xi_G = 0,00153$; для интервала $0,68 \leq \Phi_o \leq 0,78$ $\xi_G = 0,00187$. Для $\Phi_o > 0,78$ необходимо использовать формулу (7).

Экспериментально также установлено, что при $V/C \geq 0,35$ величина водоцементного отношения практически не оказывает влияния на значение коэффициента $k_c(\theta)$ во всем интервале температур нагрева [1, 5] (рисунок 5). Однако снижение водоцементного отношения ниже 0,35 приводит к росту коэффициента α_k (рисунок 5).

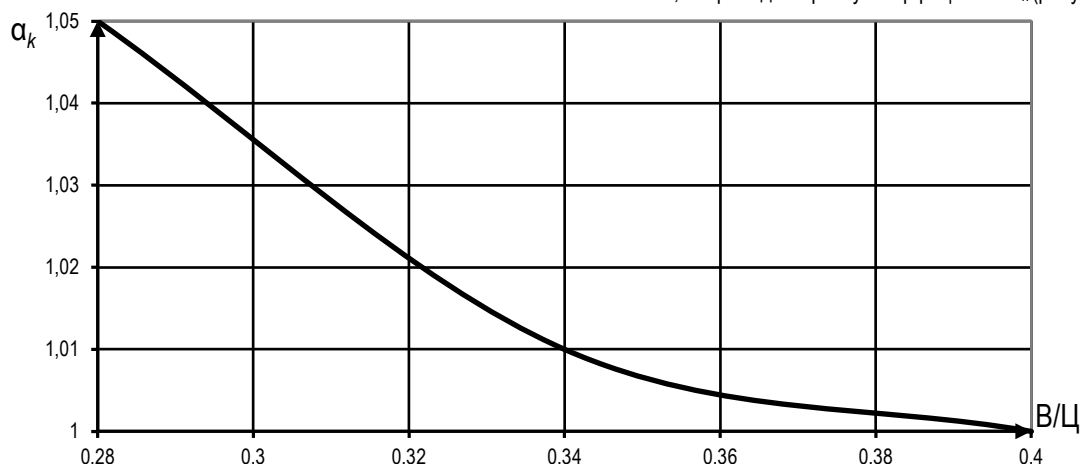


Рисунок 5 – Зависимость α_k от водоцементного отношения

В интервале $V/C < 0,35$ получена следующая зависимость уточняющего коэффициента $\alpha_k = \alpha_{V/C}$ при других фиксированных значениях ($\alpha_{TBO} = 1$, $\alpha_A = 1$) от водоцементного отношения (испытания образцов 4-ой серии [1, 5]):

$$\alpha_{V/C} = 0,79 \cdot \left(\frac{V}{C} \right)^{-0,22}, \quad (8)$$

Таким образом, значение коэффициента учета влияния водоцементного отношения при $V/C \geq 0,35$ принимается равным $\alpha_{V/C} = 1$, а при $V/C < 0,35$ определяется по формуле (8). Зависимость коэффициента ξ от водоцементного отношения не прослеживается во всем интервале температур нагрева.

Величина температуры изотермического нагрева при ТВО в интервале температур до 60 °С практически не сказывается на расчетных коэффициентах α_k , ξ . Результатом повышения температуры изотермического нагрева до 80–100 °С является повышение прочности бетона при нагреве до 400 °С на 16 % и увеличение интенсивности деструктивных процессов на 22 %. Следует отметить,

что проведение ТВО увеличивает также вероятность хрупкого взрывообразного разрушения бетона [21]. В целом, проведение ТВО не является перспективным методом повышения огнестойкости, поскольку приводит к накоплению структурных дефектов на стадии изготовления, что впоследствии приводит к снижению долговечности таких конструкций. При температуре изотермического нагрева до 60 °С коэффициент учета ТВО принимается равным $\xi_{TBO} = 1,03$ и $\alpha_{TBO} = 1$, а выше указанной температуры – $\xi_{TBO} = 1,22$ и $\alpha_{TBO} = 1,16$ [1].

Закономерности влияния модифицирующих добавок на стойкость бетона при пожаре

Результаты экспериментальных исследований [1, 5] позволили выявить положительный эффект от введения в композиции бетона добавок микрокремнезема и доломитового утяжелителя. Полученные поправочные коэффициенты α_d и ξ_d представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Экспериментальные исследования модифицирующих добавок [1]

Состав	Вид добавки	Расход добавки, кг/м ³	α_d	ξ_d
6-5	МК	55	1,03	0,83
6-6	МК	75	1,07	0,79
7-1	ПВК+СЗ	6	1,00	1,17
7-2	Суперпластификатор СЗ	5,4	1,01	1,00
7-3	Пластификатор СПС	5,4	0,93	1,00
8-1	ДУ	75	1,11	1,14
8-2	ДУ	150	1,18	1,22
8-3	ПКМ	305	0,90	0,42
8-4	ПСМ 1 (Ц;П;Щ;Дн)	113	1,05	1,07
8-5	ПСМ 2 (Ц;П;Дн)	122	1,18	1,15
8-6	ПСМ 3 (Ц;Дн)	135	1,29	1,33
8-7	Состав на цементе НЦ-30		1,40	1,14

Примечание: ДУ – доломитовый утяжелитель; Ц – цемент; П – песок, Щ – щебень; Дн – добавка (тонкодисперсный наполнитель); ПВК – полиметаллический водный концентрат; НЦ – напрягающий цемент; ПСМ – полые микросферы на основе стекла; ПКМ – полые микросферы на основе керамики.

При введении в состав на 1 м^3 бетонной смеси 55 кг МК полученные коэффициенты $\alpha_d = 1,03$ и $\xi_d = 0,83$, а при введении 75 кг МК – $\alpha_d = 1,07$ и $\xi_d = 0,79$ соответственно. При этом следует отметить, что происходит не только рост прочности при $400 \text{ }^\circ\text{C}$, но и снижается интенсивность деструктивных процессов при более высоких температурах нагрева. Эксперимент показал, что положительный эффект возрастает с увеличением концентрации МК. Поскольку расход АМД ограничен 10–15 % от массы вяжущего ввиду снижения прочности высокопрочного бетона при дальнейшем увеличении дозировки [22, 23], то примененная в составе 6-б концентрация является предельно допустимой, исходя из условий нормальной эксплуатации. Для дальнейшего практического использования указанных коэффициентов при промежуточных концентрациях МК следует линейную интерполяцию.

При введении 75 кг ДУ на 1 м^3 бетонной смеси $\alpha_d = 1,11$ и $\xi_d = 1,14$, а при введении 150 кг соответственно – $\alpha_d = 1,18$ и $\xi_d = 1,22$. Приводя к более значительному, чем МК, увеличению прочности при $400 \text{ }^\circ\text{C}$, ДУ увеличивает интенсивность деструктивных процессов при более высоких температурах нагрева.

Для получения жаростойкого бетона количество тонкомолотой добавки должно быть не менее 30 % веса смешанного вяжущего при ограниченном водоцементном отношении. В противном случае при нагреве наблюдается резкое снижение прочности, вызванное нарушением структуры ЦК парами уходящей влаги [15]. Поскольку примененная концентрация ниже требуемой, изначально бетон как жаростойкий не рассматривается.

Применение полых микросфер позволило получить положительный эффект [1]. Мелкозернистые бетоны с полной заменой песка на ПСМ и ПКМ обладают более высокими значениями $k_c(\theta)$ по сравнению с обычными бетонами. Использование ПКМ позволяет получить бетон с характеристиками близкими к огнеупорам ($\xi_d = 0,42$). Более высокие характеристики бетонов с добавками ПКМ объясняются тем, что по составу и дисперсности они близки к микрокремнезему. В относительных величинах эффект от введения ПСМ больше, чем от других добавок ($\alpha_d = 1,29$).

Бетонные образцы на цементе НЦ-30 при высокотемпературном нагреве показали значения $\alpha_d = 1,4$ и $\xi_d = 1,14$. Анализ показывает, что в бетонах на цементах с наличием расширяющих добавок при нагреве до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ практически исключается усадка ЦК, что способствует уплотнению структуры композита и исключает разнозначные деформации, способствующие росту трещин в бетоне. Подобное явление позволяет бетону сохранять при нагреве до $550 \text{ }^\circ\text{C}$ прочность не ниже начальной. Происходящие при дальнейшем нагреве деструктивные процессы идут со скоростью на 14 % выше, чем для бетонов на портландцементе без расширяющих добавок. Но сделанный в начальной стадии нагрева задел позволяет сохранить при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ примерно 40 % от начальной прочности [5]. В целом, процессы в интервале температур нагрева $200 \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$ протекают по стандартной схеме без существенных отличий.

Закономерности влияния центрифугирования бетонной смеси на стойкость бетона при пожаре

В работах [1, 10] было установлено влияние центрифугирования бетонной смеси на стойкость бетона при пожаре. Эксперимент подтвердил неоднородность физико-механических свойств центрифугированного бетона в поперечном сечении изделия: средняя плотность бетона в образцах наружного слоя оказалась выше на 8 %, чем в образцах внутреннего слоя, а прочность на сжатие – на 34 % [24]. В результате исследований прочности бетона на сжатие на образцах, послойно выпиленных из центрифугированной бетонной стойки толщиной 160 мм, была установлена эмпирическая закономерность ее изменения по толщине стенки в нормальных условиях [24]. С учетом того что уменьшение толщины центрифугированной железобетонной конструкции влечет повышение ее однородности, зависимость изменения прочности центрифугированного бетона по толщине поперечного сечения имеет следующий вид [24]:

$$f_c(\delta, b) = f_{c0} \cdot (0,975 - 2,36b + 4,6b\delta), \quad (9)$$

где индекс «0» соответствует прочности бетона на сжатие в конструкции в целом; b – толщина стенки центрифугированного изделия, м; δ – относительное расстояние (отношение расстояния от внутренней поверхности центрифугированного изделия до рассматриваемой точки к толщине его стенки).

Результаты исследований [1, 8] показали, что стойкость центрифугированного бетона к высокотемпературному нагреву изменяется от наружной к внутренней поверхности готового изделия. Установление физико-химических процессов, происходящих с центрифугированным бетоном на различных температурных интервалах ($20 \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$) [10], позволили математически описать закономерность влияния центрифугирования бетонной смеси на $k_c(\theta)$. За основной параметр, оказывающий влияние на стойкость центрифугированного бетона при пожаре, принят δ , поскольку в нем заключены особенности распределения бетонной смеси вследствие центрифугирования по толщине стенки изделия. Далее был построен график в координатах « $k_c(\theta)\delta$ » с соответствующими аппроксимирующими прямыми [10] и установлен характер изменения $k_c(\theta)$ для центрифугированного бетона (рисунок 6) в конструкции толщиной 160 мм, исследованной в работе [10]. Описание изменения $k_c(\theta)$ представлено тангенсом угла φ наклона аппроксимирующих прямых $k_c(\theta)$ к оси абсцисс δ . Значения $\text{tg}\varphi$ показывают скорость изменения $k_c(\theta)$ по поперечному сечению центрифугированного изделия при заданной температуре нагрева. Обработка экспериментальных данных коэффициента $k_c(\theta)$ для центрифугированного бетона, полученных при температурах $20 \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$, позволила математически описать $\text{tg}\varphi$ в зависимости от температуры нагрева [1]:

$$\text{tg}\varphi(\theta) = 4,4 \cdot 10^{-12} \theta^4 - 3,8 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 5,0 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 0,004\theta - 0,079. \quad (10)$$

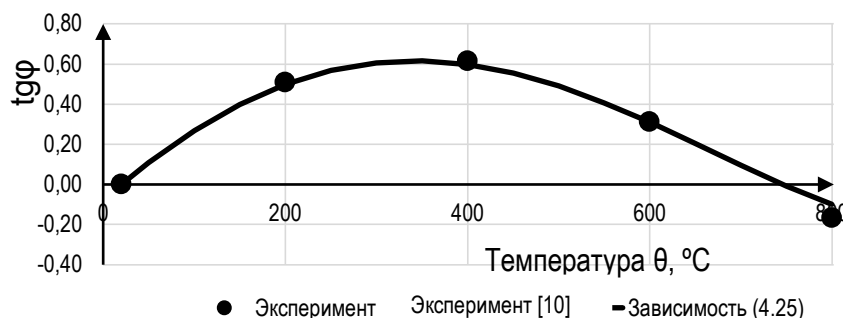


Рисунок 6 – Зависимость скорости изменения $k_c(\theta)$ по толщине поперечного сечения конструкции (толщиной 160 мм) от температуры нагрева

С повышением температуры наблюдается увеличение значений $tg\varphi$ и, как следствие, разницы в значениях $k_c(\theta)$ по сечению (рисунок 6). При температурах 300–400 °С, соответствующих максимальному набору прочности на сжатие бетоном периферийных слоев конструкции, $tg\varphi$ достигает предельных значений [10]. Тангенс угла наклона аппроксимирующих прямых $tg\varphi$ (рисунок 6) составляет более 0,6. После 400 °С из-за более высокой интенсивности деструктивных процессов в бетоне наружных слоев центрифугированной конструкции, чем внутренних, уменьшение $tg\varphi$ более стремительное. При температуре около 750 °С полученные кривые пересекают ось абсцисс (рисунок 6), что свидетельствует о равенстве $k_c(\theta)$ по сечению конструкции. После пересечения кривыми оси абсцисс значения $tg\varphi$ продолжают уменьшаться, что говорит о более высоких значениях относительной прочности бетона на сжатие для внутренних слоев конструкции. При температуре 800 °С $tg\varphi \approx -0,2 \dots -0,1$. Дальнейшее повышение температуры будет увеличивать его значение до нуля, поскольку прочность бетона на сжатие у наружного слоя исчерпана [10], а внутреннего будет уменьшаться из-за проходящих в его структуре процессов, ведущих к полному разрушению [2, 17]. Для конструкций толщиной отличной от 160 мм изменение $tg\varphi$ следует принимать с учетом повышения однородности центрифугированной конструкции при уменьшении ее толщины.

Методика расчета коэффициента условий работы бетона при пожаре

При разработке методики расчета коэффициента условий работы при пожаре основной задачей является определение аналитического описания стойкости высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов в зависимости от температуры нагрева, состава бетонной смеси и технологии его изготовления. По результатам эксперимента предлагается описать $k_c(\theta)$ в интервале от 20 до 400 °С и в интервале от 400 до 800 °С следующими зависимостями:

$$k_c(\theta) = 1 - 0,00263 \cdot (\theta - 20) \cdot (1 - 0,88 \cdot \alpha_k); \tag{11}$$

$$k_c(\theta) = 0,88\alpha_k - \xi \cdot (\theta - 400), \tag{12}$$

где α_k – коэффициент, определяемый по формуле (2);
 ξ – коэффициент, определяемый по формуле (3).

Определенные расчетные значения α_k , ξ в зависимости от состава бетонной смеси [1, 5] представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Коэффициенты α_k и ξ

Состав [1]	Варьируемый параметр	Значение	α_k	ξ
1-1	Относительное содержание цементного камня ($m_{цк}$)	0,315	1,00	0,00153
1-2		0,364	1,00	0,00175
1-3		0,414	1,00	0,00183
2-1	Соотношение концентраций мелкого и крупного заполнителей (n_G)	0,40	1,00	0,00208
2-2		0,55	1,00	0,00175
2-3		0,70	1,00	0,00153
3-1	Вид композиционного материала (ВКМ)	Бетон	1,00	0,00187
3-2		Раствор	1,00	0,00153
3-3		ЦК	0,76	0,00150
4-1	Водоцементное отношение (В/Ц)	0,40	1,00	0,00187
4-2		0,34	1,01	0,00187
4-3		0,28	1,05	0,00187
5-1	Температура изотермического нагрева при ТВО ($\theta_{из}$, °С)	нет	1,00	0,00187
5-2		40	1,00	0,00193
5-3		60	1,00	0,00193
5-4		80	1,16	0,00228
5-5		100	1,16	0,00228
6-1	Прочность бетона, обусловленная его классом	C ¹⁶ /20	1,00	0,00187
6-2		C ²⁵ /30	1,00	0,00187
6-3		C ⁴⁵ /55	1,00	0,00187
6-4		C ⁶⁰ /75	1,00	0,00187
6-5		C ⁷⁰ /85	1,03	0,00155
6-6		C ⁸⁰ /95	1,07	0,00148

Анализ полученных в работе [10] значений $k_c(\theta)$, определенных на образцах из центрифугированного бетона, схож с характером изменения $k_c(\theta)$ для вибрированных бетонов, в том числе приведенных в ТНПА. Из этого следует, что для оценки огнестойкости центрифугированных железобетонных конструкций допустимо использование значений $k_c(\theta)$, определенных по формулам (11), (12), с введением поправочного коэффициента k_{cor} .

При определении значений коэффициента k_{cor} исходили из того, что указанный коэффициент должен учитывать влияние переменной прочности бетона на сжатие в поперечном сечении конструкции. Для рассматриваемой элементарной зоны (слоя), в пределах которых бетон равномерно нагрет до одной температуры, определим следующую зависимость k_{cor} :

$$k_{cor} = k_t \cdot k_p, \tag{13}$$

где k_t – коэффициент, учитывающий различие $k_c(\theta)$ по толщине поперечного сечения конструкции с ростом температуры, определяемый по формуле [25]:

$$k_t = 1 + 6,25b \cdot (\delta - 0,5) \cdot tg\varphi; \tag{14}$$

k_p – коэффициент, учитывающий различие прочности центрифугированного бетона на сжатие в поперечном сечении конструкции в начальных условиях, численно равный $f_c(\delta, b)/f_{c0}$ и определяемый из уравнения (9):

$$k_p = 0,975 - 2,36b + 4,6b\delta. \tag{15}$$

Полученные с учетом k_{cor} зависимости прочности бетона на сжатие для слоев (зон) с $\delta = 0,31$, $\delta = 0,50$ и $\delta = 0,69$ в конструкции с $b = 0,16$ м от температуры показали удовлетворительное соответствие экспериментальным значениям (рисунок 7).

Численные значения коэффициентов k_{cor} , k_t , k_p для центрифугированных железобетонных колонн с толщиной стенки 55 и 160 мм, рассчитанные по формуле (13) приведены в таблице 5.

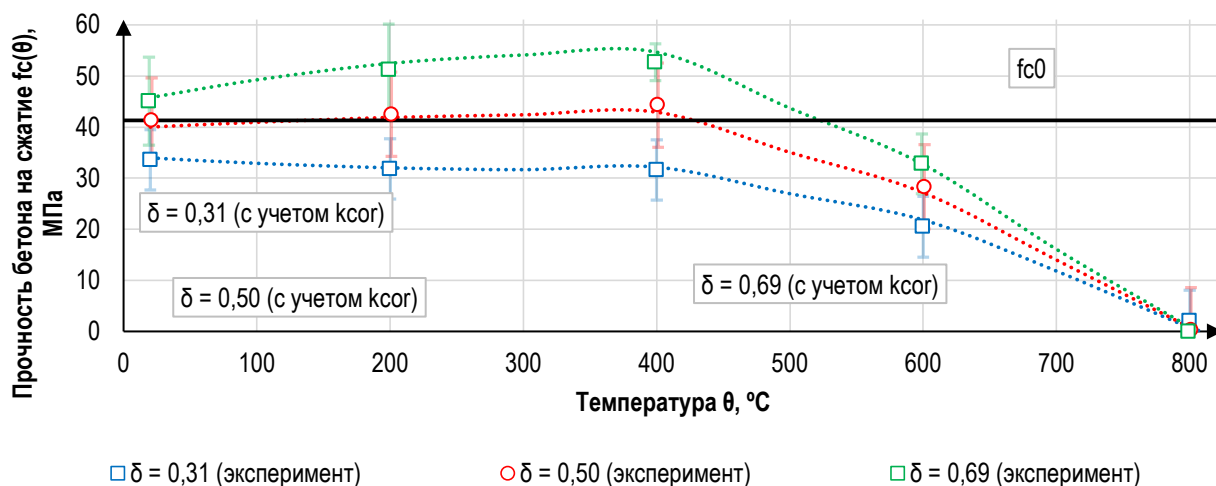


Рисунок 7 – Зависимость прочности бетона на сжатие от температуры для различных слоев центрифугированной конструкции

Таблица 5 – Коэффициенты k_{cor} , k_t , k_p для центрифугированного бетона

Температура θ , °C	$\delta = 0,0$		$\delta = 0,2$		$\delta = 0,4$		$\delta = 0,6$		$\delta = 0,8$		$\delta = 1,0$	
	Толщина стенки конструкции b , мм											
	55	160	55	160	55	160	55	160	55	160	55	160
Коэффициент k_t												
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,91	0,75	0,95	0,85	0,98	0,95	1,02	1,05	1,05	1,15	1,09	1,25
400	0,90	0,70	0,94	0,82	0,98	0,94	1,02	1,06	1,06	1,18	1,10	1,30
600	0,95	0,86	0,97	0,92	0,99	0,97	1,01	1,03	1,03	1,08	1,05	1,14
800	1,04	1,11	1,02	1,07	1,01	1,02	0,99	0,98	0,98	0,93	0,96	0,89
Коэффициент k_p												
–	0,85	0,60	0,90	0,75	0,95	0,90	1,00	1,04	1,05	1,19	1,10	1,34
Поправочный коэффициент k_{cor}												
20	0,85	0,60	0,90	0,75	0,95	0,90	1,00	1,04	1,05	1,19	1,10	1,34
200	0,77	0,45	0,85	0,64	0,93	0,85	1,02	1,09	1,10	1,37	1,19	1,67
400	0,76	0,42	0,84	0,62	0,93	0,84	1,02	1,10	1,11	1,40	1,21	1,73
600	0,81	0,52	0,87	0,69	0,94	0,87	1,01	1,07	1,08	1,29	1,15	1,52
800	0,88	0,67	0,92	0,80	0,95	0,91	0,99	1,02	1,02	1,11	1,06	1,19

Примечание: значения коэффициентов k_{cor} , k_t , k_p при промежуточных значениях толщины стенки конструкции и температуры определяются линейной интерполяцией.

Анализ значений k_{cor} (таблица 5) показывает, что прочность центрифугированного бетона на сжатие при высокотемпературном нагреве в наружных слоях конструкции при прочих равных условиях оказывается выше, чем во внутренних. Таким образом, как в нормальных условиях, так и при пожаре, они будут воспринимать основную нагрузку. Вместе с тем нагрев наружных слоев до критических температур будет вызывать перераспределение нагрузки на внутренние слои, которые, как оказалось, обладают более высоким относительным снижением прочности на сжатие при нагреве.

Следует также отметить, что при проведении расчетов с целью недопущения понижения уровня безопасности, задаваемого соответствующими коэффициентами безопасности на этапах изготовления и проектирования железобетонных конструкций, в расчетах по оценке пределов огнестойкости железобетонных конструкций коэффициент $k_c(\theta)$ необходимо принимать равным 1, если определенные значения $k_c(\theta)$ с учетом коэффициента k_{cor} превышают 1.

Заключение

По результатам исследований разработана теоретическая модель стойкости бетонов при пожаре, учитывающая его прочность, состав бетонной смеси, в том числе наличие добавок, условия изготовления и позволяющая с использованием коэффициента условий работы бетона при пожаре $k_c(\theta)$ объективно проводить прочностной расчет строительных конструкций из высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов при оценке их огнестойкости. При этом установлено, что разрушение железобетонных конструкций при пожаре происходит при исчерпании соответствующих коэффициентов безопасности, устанавливаемых в зависимости от опасности достижения предельных состояний.

Экспериментальные данные позволили определить влияние на $k_c(\theta)$ относительного содержания цементного камня, отношения крупного и мелкого заполнителей, вида композиционного материала, водоцементного отношения, прочности бетона, вида применяемых пластификаторов, ускорителей твердения, микрозаполнителей и добавок, а также технологии изготовления. Каждый из указанных компонентов учитывается в теоретической модели соответствующими поправочными коэффициентами.

На основании обработки экспериментальных данных выведены расчетные зависимости коэффициентов учета накопленных дефектов и интенсивности деструктивных процессов в зависимости от состава бетонной смеси, в том числе наличия модифицированных добавок. Использование указанных коэффициентов позволяет расчетным путем определять значение коэффициента $k_c(\theta)$ при заданной температуре нагрева в зависимости от состава бетонной смеси.

Получена зависимость изменения прочности центрифугированного бетона на одноосное сжатие по толщине поперечного сечения конструкции, учитывающая ее физико-механические и геометрические характеристики. Установлена зависимость скорости изменения коэффициента условий работы центрифугированного бетона при пожаре по толщине поперечного сечения конструкции от температуры нагрева. На основе указанных зависимостей определены значения поправочного коэффициента k_{cor} для значений $k_c(\theta)$ вибрированных бетонов, в том числе приведенных в действующих ТНПА, который учитывает неоднородность прочности центрифугированного бетона на сжатие по толщине поперечного сечения конструкций заданной толщины в начальных условиях и при нагреве.

Список цитированных источников

- Огнестойкость современных строительных конструкций из железобетона : монография / И. И. Полева, С. М. Жамойдик, Н. В. Зайнудинова, Д. С. Нехань : под ред. И. И. Полевы. – Минск : Ун-т гражданской защиты, 2023. – 420 с.
- Яковлев, А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А. И. Яковлев. – М. : Стройиздат, 1988. – 143 с.
- Милованов, А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А. Ф. Милованов. – М. : Стройиздат, 1998. – 304 с.
- Касперов, Г. И. Расчетно-экспериментальная методика оценки огнестойкости строительных конструкций из высокопрочного бетона / Г. И. Касперов, И. И. Полева // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2003. – № 4 (14). – С. 24–32.
- Касперов, Г. И. Оценка факторов, влияющих на прочность бетонов классов В20–В100 при пожаре / Г. И. Касперов, И. И. Полева, М. Н. Рыскин // Вестн. Белорусского нац. техн. ун-та. – 2003. – № 2. – С. 17–21. – DOI: 10.21122/2227-1031-2003-0-2-17-21.
- Полева, И. И. Результаты натурных огневых испытаний центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения / И. И. Полева, Д. С. Нехань // Вестн. Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 142–159. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142. – EDN: ASBKFB.
- Полева, И. И. Огнестойкость железобетонных колонн с конструктивной огнезащитой / И. И. Полева, С. М. Жамойдик, Д. С. Нехань // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – № 2. – С. 67–81. – DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81.
- Полева, И. И. Огнестойкость центрифугированных железобетонных колонн / И. И. Полева, Д. С. Нехань // Вестн. Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 139–158. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.139
- Полева, И. И. Огнестойкость изгибаемых железобетонных конструкций из высокопрочного бетона / И. И. Полева // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2004. – № 5. – С. 65–78.
- Полева, И. И. Поведение центрифугированного бетона при пожаре / И. И. Полева, Д. С. Нехань, Д. С. Батан // Вестн. Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 455–469.
- Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности : СП 468.1325800.2019. – Введ. 11.06.20. – М. : Стандартинформ, 2020. – 86 с.
- Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона : ГОСТ 24452-80. – Введ. 01.01.1982. – М. : Стандартинформ, 2005. – 14 с.
- Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости : ТКП EN 1992-1-2:2009 (02250). – Введ. 01.01.10. – Минск : Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 96 с.
- Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования: курс лекций для студентов строительных специальностей / Н. П. Блещик [и др.] ; под ред. Т. М. Пецольда и В. В. Тура. – Брест : БГТУ, 2003. – 380 с.
- Неверович, И. И. Железобетонные конструкции / И. И. Неверович. – Минск : МИПК и ПК БНТУ, 2013. – 211 с.
- Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020 – Введ. 01.07.03 (с отменой на территории Респ. Беларусь СНиП 2.03.01-84 и СНБ 5.03.01-02). – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 244 с.
- Phan, L. T. Code provisions for high strength concrete strength-temperature relationship at elevated temperatures / L. T. Phan, N. J. Carino // Material and Structures. – 2003. – Vol. 36 (256). – P. 91–98.
- Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Введ. 01.01.09 (с отменой на территории Респ. Беларусь П1-02 к СНБ 2.02.01-98). – Минск : Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2008. – 135 с.
- Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ. – М. : Стройиздат, 1986. – 40 с.
- Жуков, В. В. Основы стойкости бетона при действии повышенных и высоких температур : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / В. В. Жуков. – М., 1981. – 437 л.
- Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре / НИИЖБ. – М. : Стройиздат, 1979. – 21 с.
- Зенков, Н. И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара / Н. И. Зенков. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1974. – 174 с.
- Разработка основ структурной теории прочности и деформативности бетона : Отчет НИР (заключит.) / БГПА; Рук. темы Н. П. Блещик. – № ГР 19991004 (шифр ГБ 99-19). – Минск, 2000. – 134 с.
- Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона / И. И. Полева [и др.] // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 4. – С. 319–329. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329.

25. Нехань Д. С. Решение статической задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн / Д. С. Нехань, И. И. Полевода // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Серия F. – 2021. – № 8. – С. 94–106.
- References**
- Ognestojkost' sovremennyh stroitel'nyh konstrukcij iz zhelezobetona : mono-grafiya / I. I. Polevoda, S. M. Zhamojdik, N. V. Zajnudinova, D. S. Nekhan' : pod red. I. I. Polevody. – Minsk : Un-t grazhdanskoj zashchity, 2023. – 420 s.
 - Yakovlev, A. I. Raschet ognestojkosti stroitel'nyh konstrukcij / A. I. Yakovlev. – M. : Strojizdat, 1988. – 143 s.
 - Milovanov, A. F. Stojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri pozhare / A. F. Milovanov. – M. : Strojizdat, 1998. – 304 s.
 - Kasperov, G. I. Raschetno-eksperimental'naya metodika ocenki ognestojkosti stroitel'nyh konstrukcij iz vysokoprochnogo betona / G. I. Kasperov, I. I. Polevoda // Chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidaciya. – 2003. – № 4 (14). – S. 24–32.
 - Kasperov, G. I. Ocenka faktorov, vliyayushchih na prochnost' betonov klassov V20–V100 pri pozhare / G. I. Kasperov, I. I. Polevoda, M. N. Ryskin // Vestn. Belorusskogo nac. tekhn. un-ta. – 2003. – № 2. – S. 17–21. – DOI: 10.21122/2227-1031-2003-02-17-21.
 - Polevoda, I. I. Rezultaty naturnyh ognevnyh ispytaniy centrifugirovannyh zhelezobetonnyh kolonn kol'cevogo secheniya / I. I. Polevoda, D. S. Nekhan' // Vestn. Un-ta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi. – 2020. – T. 4, № 2. – S. 142–159. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142. – EDN: ASBKFB.
 - Polevoda, I. I. Ognestojkost' zhelezobetonnyh kolonn s konstruktivnoj ogneza-shchitoy / I. I. Polevoda, S. M. Zhamojdik, D. S. Nekhan' // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. – 2022. – № 2. – S. 67–81. – DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81.
 - Polevoda, I. I. Ognestojkost' centrifugirovannyh zhelezobetonnyh kolonn / I. I. Polevoda, D. S. Nekhan' // Vestn. Un-ta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi. – 2021. – T. 5, № 2. – S. 139–158. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.139
 - Polevoda, I. I. Ognestojkost' izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij iz vysokoprochnogo betona / I. I. Polevoda // Chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidaciya. – 2004. – № 5. – S. 65–78.
 - Polevoda, I. I. Povedenie centrifugirovannogo betona pri pozhare / I. I. Polevoda, D. S. Nekhan', D. S. Batan // Vestn. Un-ta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi. – 2018. – T. 2, № 1. – S. 455–469.
 - Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Pravila obespecheniya ognestojkosti i ognesohrannosti : SP 468.1325800.2019. – Vved. 11.06.20. – M. : Standartinform, 2020. – 86 s.
 - Betony. Metody opredeleniya prizmennoj prochnosti, modulya uprugosti i koef-ficienta Puassona : GOST 24452-80. – Vved. 01.01.1982. – M. : Standartinform, 2005. – 14 s.
 - Evrokod 2. Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij. CHast' 1-2. Obshchie pravila opredeleniya ognestojkosti : TKP EN 1992-1-2-2009 (02250). – Vved. 01.01.10. – Minsk : Min-vo arhitektury i str-va Resp. Belarus', 2010. – 96 s.
 - Zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovy teorii, rascheta i konstruirovaniya: kurs lekcij dlya studentov stroitel'nyh special'nostej / N. P. Bleshchik [i dr.] ; pod red. T. M. Pecol'da i V. V. Tura. – Brest : BGTU, 2003. – 380 s.
 - Neverovich, I. I. Zhelezobetonnye konstrukcii / I. I. Neverovich. – Minsk : MIPK i PK BNTU, 2013. – 211 s.
 - Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 5.03.01-2020 – Vved. 01.07.03 (s otmenoj na territorii Resp. Belarus' SNIp 2.03.01-84 i SNB 5.03.01-02). – Minsk : Min-strojarhitektury, 2020. – 244 s.
 - Phan, L. T. Code provisions for high strength concrete strength-temperature relationship at elevated temperatures / L. T. Phan, N. J. Carino // Material and Structures. – 2003. – Vol. 36 (256). – P. 91–98.
 - Stroitel'nye konstrukcii. Poryadok rascheta predelov ognestojkosti: TKP 45-2.02-110-2008 (02250). – Vved. 01.01.09 (s otmenoj na territorii Resp. Belarus' P1-02 k SNB 2.02.01-98). – Minsk : Min-vo arhitektury i str-va Resp. Belarus', 2008. – 135 s.
 - Rekomendacii po raschetu predelov ognestojkosti betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij / NIIZHB. – M. : Strojizdat, 1986. – 40 s.
 - Zhukov, V. V. Osnovy stojkosti betona pri dejstvii povyshennyh i vysokih temperatur : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.05 / V. V. Zhukov. – M., 1981. – 437 l.
 - Rekomendacii po zashchite betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij ot hrupkogo raz-rusheniya pri pozhare / NIIZHB. – M. : Strojizdat, 1979. – 21 s.
 - Zenkov, N. I. Stroitel'nye materialy i povedenie ih v usloviyah pozhara / N. I. Zenkov. – M. : VIPTSH MVD SSSR, 1974. – 174 s.
 - Razrabotka osnov strukturnoj teorii prochnosti i deformativnosti betona : Otchet NIR (zaklyuchit.) / BGPA; Ruk. temy N. P. Bleshchik. – № GR 19991004 (shifr GB 99-19). – Minsk, 2000. – 134 s.
 - Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svojstv centrifugirovannogo betona / I. I. Polevoda [i dr.] // Nauka i tekhnika. – 2019. – T. 18, № 4. – S. 319–329. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329.
 - Nekhan' D. S. Reshenie staticheskoj zadachi ognestojkosti centrifugirovannyh zhelezobetonnyh kolonn / D. S. Nekhan', I. I. Polevoda // Vestn. Polockogo gos. un-ta. Seriya F. – 2021. – № 8. – S. 94–106.

Материал поступил 12.07.2023, одобрен 18.07.2023, принят к публикации 18.07.2023