

УДК 614.841.33:624.014

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ "ЗОННОГО" МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТА ПРЕДЕЛОВ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

Касперов Г.И., к.т.н., доцент,
Полева И.И., к.т.н.

Применение метода "Изотермы 500°C" для расчета пределов огнестойкости железобетонных конструкций из высокопрочного бетона приводит к переоценке их огнестойкости. В статье приведены возможные варианты решения поставленной проблемы. Проанализированы условия и результаты применения "зонного" метода и метода "Изотермы 400°C". Изложен алгоритм учета состава бетонной смеси в расчетах пределов огнестойкости строительных конструкций из высокопрочного бетона.

СНБ 5.03.01 позволяет использовать для изготовления железобетонных конструкций высокопрочный бетон (ВБ) классов $C^{55}/_{67}$ - $C^{90}/_{105}$ [1], экспериментальная оценка огнестойкости которых в нашей республике затруднена [2]. В такой ситуации особое значение приобретают расчетные методы. Предел огнестойкости – это время от начала стандартного огневого испытания до разрушения конструкции или достижения ею предельных деформаций. Основным расчетным методом долгое время при определении огнестойкости являлся метод "изотермы 500°C", сущность которого заключается в том, что слои бетона нагретые до критической температуры 500°C в расчете не учитываются (рис.1).

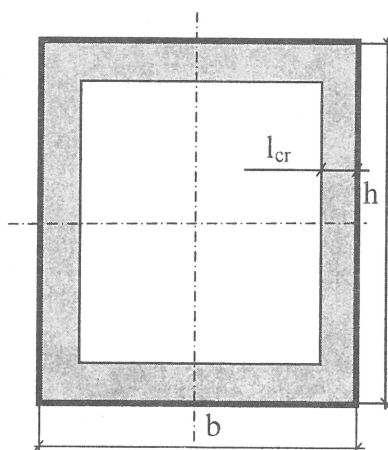


Рис.1. Метод "изотермы 500°C"

Вместе с тем, в ряде зарубежных публикаций с целью обеспечения возможности применения указанного метода для железобетонных конструкций из высокопрочного бетона предлагается критическую температуру

откорректировать до 400°C [2,3]. Однако такой подход не устраняет основного недостатка указанного метода. Фактически нивелируются индивидуальные особенности состава бетонной смеси, поскольку в расчетах критическая температура принимается фиксированной для всех бетонов на гранитном заполнителе. Для устранения указанного недостатка предлагается использовать преимущества "зонного" метода. Сущность, которого заключается в делении сечения подвергнутой высокотемпературному нагреву конструкции на равные по ширине (z) параллельные элементарные зоны, в пределах которых бетон равномерно нагрет до одной температуры и обладает соответственно одинаковыми физико-механическими свойствами (рис.2).

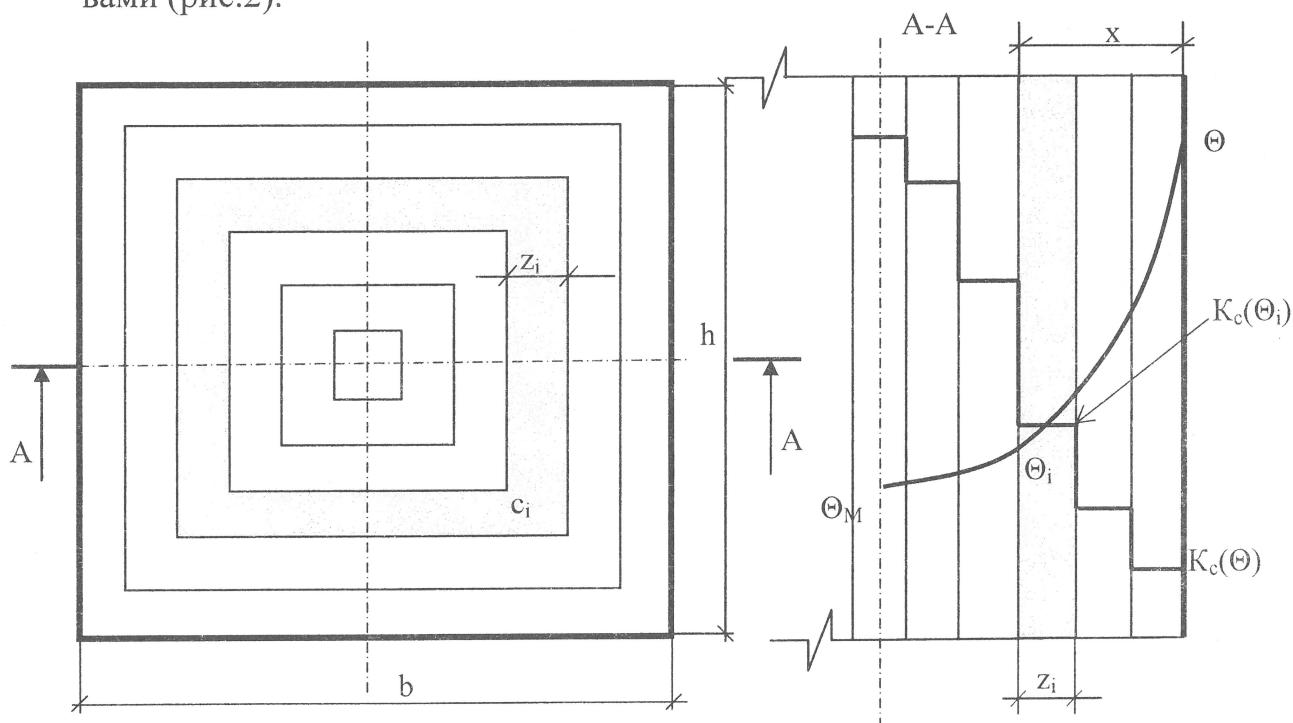


Рис. 2. Деление колонны на m зон

Для сравнения указанных методов в работе принят вариант конструкции, позволяющий наиболее полно оценить влияние характеристик высокопрочного бетона при нагреве - центрально-сжатая бетонная колонна. Оценить несущую способность, которой при пожаре можно по формуле [4-6]:

$$N_{cd} \leq \varphi \cdot (f_{cd}(\Theta) A_{red} + f_{yd}(\Theta) A_s), \quad (1)$$

где N_{cd} - расчетное значение нагрузки;

φ - коэффициент продольного изгиба (табл.7.1 [1]);

$f_{cd}(\Theta)$, $f_{yd}(\Theta)$ - расчетные сопротивления бетона и арматуры при пожаре;

A_{red} , A_s - площади сечения приведенной зоны бетона и рабочей арматуры;

Θ – температура нагрева при пожаре.

В соответствии с положениями норм [1] расчетное сопротивление бетона на сжатие (f_{cd}) при нормальной температуре ($\Theta < 50^\circ\text{C}$) определяется по формуле:

$$f_{cd} = f_{ck} \frac{\alpha \cdot \lambda}{\gamma_c} = f_{ck} k_{CF}, \quad (2)$$

где f_{ck} – нормативное сопротивление бетона осевому сжатию;
 γ_c – частный коэффициент безопасности для бетона;
 α – коэффициент, учитывающий длительное действие нагрузки и неблагоприятный способ ее приложения;
 λ – дополнительный коэффициент для высокопрочных бетонов;
 k_{CF} – коэффициент безопасности для бетона.

Величина коэффициента безопасности для бетона (k_{CF}) принимается максимально возможной по нормам 0,57. Для арматуры соответственно $k_{SF}=0,91$ [1]. Определение расчетного сопротивления бетона и арматуры для определения предела огнестойкости производится путем умножения нормативного сопротивления при начальной температуре на коэффициенты условий работы при пожаре бетона $k_c(\Theta)$ (19) и арматуры $k_s(\Theta)$ (табл.2) [4,5]:

$$f_{cd}(\Theta) = f_{ck} \cdot k_c(\Theta); \quad (3)$$

$$f_{yd}(\Theta) = f_{yk} \cdot k_s(\Theta). \quad (4)$$

В отечественной и зарубежной практике A_{red} принимается равным площади, ограниченной изотермой 500°C (400°C – предлагается для ВБ). Вместе с тем, по мнению авторов, приемлемым может быть определение приведенной площади бетона по формуле:

$$A_{red} = A_c \cdot k_{CM}, \quad (5)$$

где k_{CM} – коэффициент работы бетона конструкции при пожаре;
 A_c – площадь сечения бетона.

Величина коэффициента k_{CM} с учетом коэффициента вариации температуры в каждой зоне может быть определена по формуле:

$$k_{CM} = \left(1 - \frac{0,2}{m}\right) \cdot \sum_{i=1}^m c_i \cdot k_c(\Theta_i), \quad (6)$$

где m – количество зон;

$c_i = A_{ci}/A_c$ – доля площади i зоны от общей площади сечения бетона:

$$c_i = \frac{2 \cdot z \cdot (b + h - 2 \cdot z \cdot [2 \cdot i - 1])}{b \cdot h}, \quad (7)$$

где z – ширина зоны, принимается наиболее близкой диаметру арматуры в интервале от 1 до 3 см;

b, h – длина и ширина поперечного сечения колонны;

i – номер рассматриваемой зоны.

Доля расчетной нагрузки на конструкцию (ω), воспринимаемая сжатой арматурой, может быть определена по формуле:

$$\omega = \frac{f_{yd} \cdot A_s}{f_{cd} \cdot A_c} = \mu \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}, \quad (8)$$

где μ – отношение площади арматуры к площади поперечного сечения бетона.

Коэффициент, учитывающий величину нагрузки при пожаре (η_{fi}) может быть определен по формуле:

$$\eta_{fi} = \frac{N_{cd}}{f_{cd} \cdot A_c \cdot (1 + \omega)}, \quad (9)$$

Таким образом, для практических расчетов формула (1) с учетом формул (2-8) в безразмерных величинах примет вид:

$$\eta_{fi} \cdot (1 + \omega) \leq \frac{k_s(\Theta)_i}{k_{SF}} \omega + \frac{1}{k_{CF}} \sum_{i=1}^n c_i k_c(\Theta_i). \quad (10)$$

Для сравнительных расчетов принимается $\omega = 0$. Тогда формула (10) примет вид:

$$\eta_{fi} \leq \eta_{fi}(\Theta) = 1,75 \cdot \sum_{i=1}^n c_i k_c(\Theta_i). \quad (11)$$

С использованием отношения переменной нагрузки к постоянной $L = \Sigma Q_k / \Sigma G_k$ и коэффициентов $\mu_1 = Q_{k,l} / (Q_{k,l} + \Sigma Q_{k,i})$ и $\mu_2 = 1 - \mu_1$, показывающих долю доминирующей переменной нагрузки в расчетных комбинациях,

предельное значение коэффициента η_{fi} может быть определено по формуле (12):

$$\eta_{fi} = \frac{1 + L \cdot (\mu_1 \cdot \psi_1 + \mu_2 \cdot \psi_2)}{\gamma_G + L \cdot (\mu_1 \cdot \gamma_Q + \mu_2 \cdot \gamma_Q \cdot \psi_0)}, \quad (12)$$

где ψ_0, ψ_1, ψ_2 - коэффициенты сочетания переменных нагрузок;
 γ_G, γ_Q - частные коэффициенты безопасности для постоянных и переменных нагрузок.

Анализ формулы показывает, что в отечественной практике величина нагрузки для расчетов огнестойкости не может быть принята более 74% от величины определенного по расчетным сопротивлениям материалов предельного усилия, которое способна воспринимать конструкция при нормальных условиях.

Проведенный авторами анализ [6] показывает, что при отсутствии хрупкого разрушения наиболее вероятный температурный интервал критических температур, при которых происходит пластическое разрушение ВБ- 400–800°C. Анализ полученных экспериментально значений коэффициента $k_C(\Theta)$ в указанном интервале показал, что изменение прочности бетона при пожаре описывается функцией, близкой к линейной. Подобный вид функции используется в Eurocode-2 и может быть с приемлемой долей погрешности применен для аналитической оценки изменения прочности тяжелых бетонов при пожаре. Изменение $k_C(\Theta)$ может быть представлено при помощи двух линейных участков от 100-400°C и 400-800°C (рис.3).

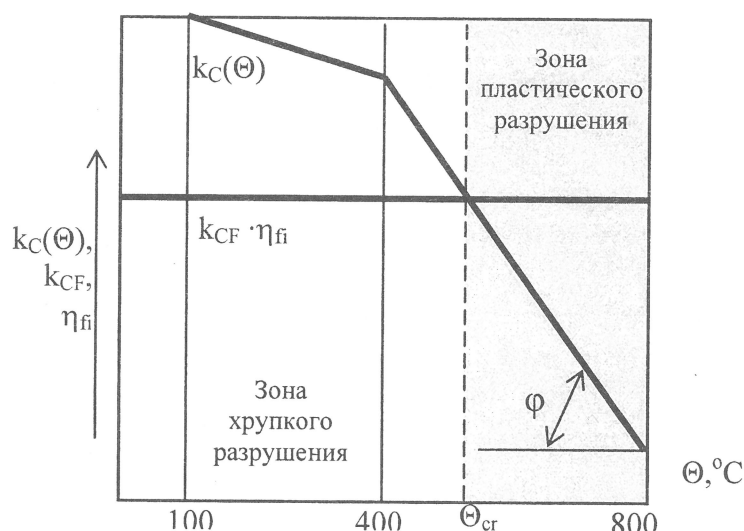


Рис.3. Зависимость коэффициентов $k_C(\Theta)$, k_{SF} и η_{fi} от температуры (Θ) для элементарной зоны бетона

Проведенные авторами экспериментальные исследования коэффициента $k_C(\Theta)$ с использованием данных [8] показали, что в интервале от 400 до 800°C его можно описать формулами:

$$k_C(\Theta) = 1 - 0,00263 \cdot (\Theta - 20) \cdot (1 - 0,88 \cdot \alpha_k) \quad \text{от } 100^\circ\text{C до } 400^\circ\text{C}; \quad (14)$$

$$k_C(\Theta) = \alpha_k \cdot 0,88 - \xi \cdot (\Theta - 400) \quad \text{от } 400^\circ\text{C до } 800^\circ\text{C}; \quad (15)$$

$$\alpha_k = \alpha_{W/C} \cdot \alpha_{TBO} \cdot \alpha_A; \quad (16)$$

$$\xi = \xi_{TBO} \cdot \xi_G \cdot \xi_A, \quad (17)$$

где α_k – коэффициент учета накопленных дефектов при $\Theta = 400^\circ\text{C}$;
 $\xi = \text{tg}\varphi$ – коэффициент интенсивности деструктивных процессов;
 Θ – температура нагрева бетона при пожаре;
 $\alpha_{W/C}$ – коэффициент учета влияния водоцементного отношения;
 α_{TBO} , ξ_{TBO} – коэффициенты учета температуры изотермического прогрева при ТВО;
 ξ_G – коэффициент учета объемных концентраций компонентов;
 α_A , ξ_A – коэффициент учета добавок.

Значение коэффициента учета влияния водоцементного отношения (W/C) при значении $W/C \geq 0,35$ принимается равным $\alpha_{W/C} = 1$, а для интервала $W/C < 0,35$ определяется по формуле:

$$\alpha_{W/C} = 0,79 \cdot (W/C)^{-0,22}. \quad (18)$$

При температуре изотермического прогрева до 60°C коэффициенты учета ТВО принимаются равными $\alpha_{TBO} = 1$, $\xi_{TBO} = 1,03$, для температур более 80°C $\alpha_{TBO} = 1,16$, $\xi_{TBO} = 1,22$. Проведенные авторами исследования показали, что наибольшее влияние на коэффициент интенсивности деструктивных процессов оказывает величина Φ , равная сумме объемных концентраций цементного камня ($m_{ЦК}$) и крупного заполнителя ($m_{КЗ}$), которая может быть определена по формуле:

$$\Phi = \frac{1 + m_{ЦК} \cdot n_G}{1 + n_G}, \quad (19)$$

где $m_{ЦК}$ – объемная концентрация цементного камня [9];
 $n_G = \Pi/\Psi$ – отношение мелкого (Π) и крупного (Ψ) заполнителей.

Если значение Φ менее 0,68 коэффициент $\xi_G=0,00153$, в интервале $0,68 \leq \Phi \leq 0,78$ $\xi_G=0,00187$, для $\Phi > 0,78$ коэффициент ξ_G определяется по формуле:

$$\xi_A = 0,0032 \cdot \Phi^{2,13} \quad (20)$$

Отдельные значения поправочных коэффициентов (α_A, ξ_A) приведены в табл.1.

Таблица 1

Вид добавки	Дн, кг	α_A	ξ_A
Микрокремнезем	55	1,03	0,83
Микрокремнезем	75	1,07	0,79
Доломитовый утяжелитель	75	1,11	1,14
Доломитовый утяжелитель	150	1,18	1,22
Полые керамические микросферы (ПКМ)	305	0,90	0,42

При проведении расчетов при помощи методов "изотермы" использованы положения "Рекомендаций по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций". Учитывая, что огнестойкость считается по нормативным сопротивлениям бетона коэффициент, показывающий долю бетона, способного сохранять свои первоначальные функции при пожаре, равен $\eta_{fi}(\Theta) = 1,75 \cdot A_{red}/A_c$.

Представленные результаты исследований дают возможность сравнительной оценки подходов к расчету огнестойкости колонн из высокопрочного бетона. Расчеты произведены для бетонов классов $C^{55}/_{67}$, $C^{90}/_{105}$ и бетона класса $C^{50}/_{60}$ с добавкой полых керамических микросфер ($\alpha_A=0,9$, $\xi_A=0,42$). Результаты представлены в табл.2

Таблица 2

Метод	Со- став бетона	Коэффициент $\eta_{fi}(\Theta)$ при длительности пожара, ч					Предел огне- стойко- сти, мин
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	
ширина 200 мм							
"Зонный"	$C^{55}/_{67}$	1,430	1,087	0,697	0,478	-	R60
	$C^{90}/_{105}$	1,163	0,661	0,452	0,292	-	R45
	ПКМ	1,460	1,199	1,026	0,899	0,795	R150
"Изотермы 500°C"	-	1,273	0,918	0,685	0,515	-	R60
"Изотермы 400°C"	-	1,103	0,719	0,480	0,316	-	R45

Продолжение табл. 2

ширина 300 мм							
"Зонный"	C ⁵⁵ / ₆₇	1,546	1,276	1,076	0,880	0,740	R150
	C ⁹⁰ / ₁₀₅	1,349	1,030	0,802	0,629	0,494	R90
	ПКМ	1,555	1,379	1,246	1,132	1,035	R150
"Изотермы 500°C"	-	1,370	1,117	0,941	0,804	0,692	R90
"Изотермы 400°C"	-	1,251	0,968	0,775	0,629	0,513	R75
ширина 400 мм							
"Зонный"	C ⁵⁵ / ₆₇	1,601	1,403	1,236	1,105	0,989	R150
	C ⁹⁰ / ₁₀₅	1,446	1,195	1,015	0,869	0,739	R120
	ПКМ	1,615	1,469	1,363	1,275	1,199	R150
"Изотермы 500°C"	-	1,420	1,224	1,084	0,973	0,880	R150
"Изотермы 400°C"	-	1,329	1,106	0,948	0,825	0,724	R120

Вывод. Проведенный анализ результатов расчетов (табл.2) показывает на недопустимость применения метода "Изотермы 500°C" для расчета пределов огнестойкости железобетонных конструкций из высокопрочного бетона. Вместе с тем использование метода "Изотермы 400°C" позволяет рассмотреть гарантированного наихудший вариант поведения конструкции из ВБ при пожаре и является приемлемым для большинства расчетных комбинаций. Основным преимуществом "зонного" метода в представленной интерпретации является возможность учета влияния состава бетонной смеси, которое может носить как положительный, так и отрицательный характер. Поэтому к нему следует обращаться при использовании для изготовления железобетонных конструкций индивидуальных составов бетонных смесей, характеризующихся комплексным применением добавок и модификаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНБ 5.03.01-02. Железобетонные и бетонные конструкции. Нормы проектирования.
2. NISTTR 6890. Fire resistance determination and performance prediction research Needs Workshop: Proceedings. Grosshandler W. – Gaithersburg, MD: U.S. Department of commerce. NIST, 2002. – 145 p.
3. Phan L.T., Carino N.J. Code provisions for high strength concrete strength-temperature relationship at elevated temperatures // Material and Structures. – 2003.-36, №256.- P. 91-98.
4. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. - М.: Стройиздат, 1998. - с.304.
5. МДС 21-2.2000 Огнестойкость и огнесохранность железобетонных конструкций. - М.: ГУП "НИИЖБ", 2000. - с.92.

6. EN 1992: Eurocode 2: Design of concrete structures- Part 1-2: General rules-Structural fire design. November 2001.
7. Полевода И.И. Огнестойкость изгибаемых железобетонных конструкций из высокопрочного бетона // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2004.- №5(15).- С.65-78.