

УДК 614.841.33:624.014

Касперов Г.И., Полевода И.И.

**Расчетно-экспериментальная методика оценки
огнестойкости строительных конструкций из
высокопрочного бетона**

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

G.Kasperov, I.Polevoda

**Design-experimental method of fire resistance assessment for building
constructions made of high-strength concrete.**

*Command and Engineering Institute of the Ministry for Emergency Situations
of the Republic of Belarus*

Решение проблемы оценки влияния состава бетонной смеси на огнестойкость строительных конструкций из высокопрочного бетона становится возможным при сочетании экспериментальных испытаний и теоретических расчетов. В статье приведена методика оценки для свободно опертых балок и центрально-сжатых колонн.

Ключевые слова: огнестойкость строительных конструкций, предел огнестойкости, расчетно-экспериментальный метод.

К определению пределов огнестойкости во многих государствах сложились единые подходы, основанные на проведении огневых испытаний (ISO 834, BS 476-10, CSN 730-851, DIN 4102-2, ГОСТ 30247). В таких испытаниях огневому воздействию подвергается конструкция с заданными геометрическими параметрами, при этом состав бетона испытываемой конструкции не фиксируется. Одним из выводов в подготовленном Комиссией экспертов ЕЕС докладе о перспективах развития строительства в Европе до 2025 года является необходимость внедрения в практику строительства прогрессивных высокопрочных и долговечных строительных материалов. С учетом об-

щемировых тенденций в СНБ 5.03.01 впервые включены высокопрочные бетоны (ВБ) классов $C^{55}_{/67}$ – $C^{90}_{/105}$. В месте с тем, при изготовлении ВБ производители путем введения в разных сочетаниях комплексных химических добавок (замедлителей и ускорителей твердения, воздухововлекающих и пеногасящих добавок, ускорителей процесса гидратации, микрокремнезема, активных минеральных добавок и модификаторов) все чаще прибегают к варьированию состава бетонной смеси при фиксированных значениях класса бетона. Спектр возможных добавок широк, при этом надежной теории учета их влияния на огнестойкость не разработано. Очевидно, что проводить

полномасштабные огневые испытания для исследования влияния каждой добавки на строительные конструкции экономически не эффективно. Использование аналитических методов расчета также не позволит решить поставленную задачу, поскольку большинство исследователей сходится во мнении, что определить расчетным путем теплофизические и механические характеристики бетонов с различным составом не представляется возможным.

Решение поставленной проблемы становится возможным при сочетании экспериментальных испытаний и теоретических расчетов

для оценки огнестойкости строительных конструкций из бетона. Возможность такого механизма анонсирована в ISO/TO 10158:1991 /Е/ "Принципы и логические обоснования, лежащие в основе методов расчета огнестойкости строительных элементов" и EN 1992: Eurocode 2: Design of concrete structures- Part 1-2: General rules- Structural fire design. Таким образом, решение проблемы сводится к разработке расчетно-экспериментальной методики, позволяющей корректировать приведенную в пособии [7] табличную информацию с учетом анализа состава бетонной смеси.

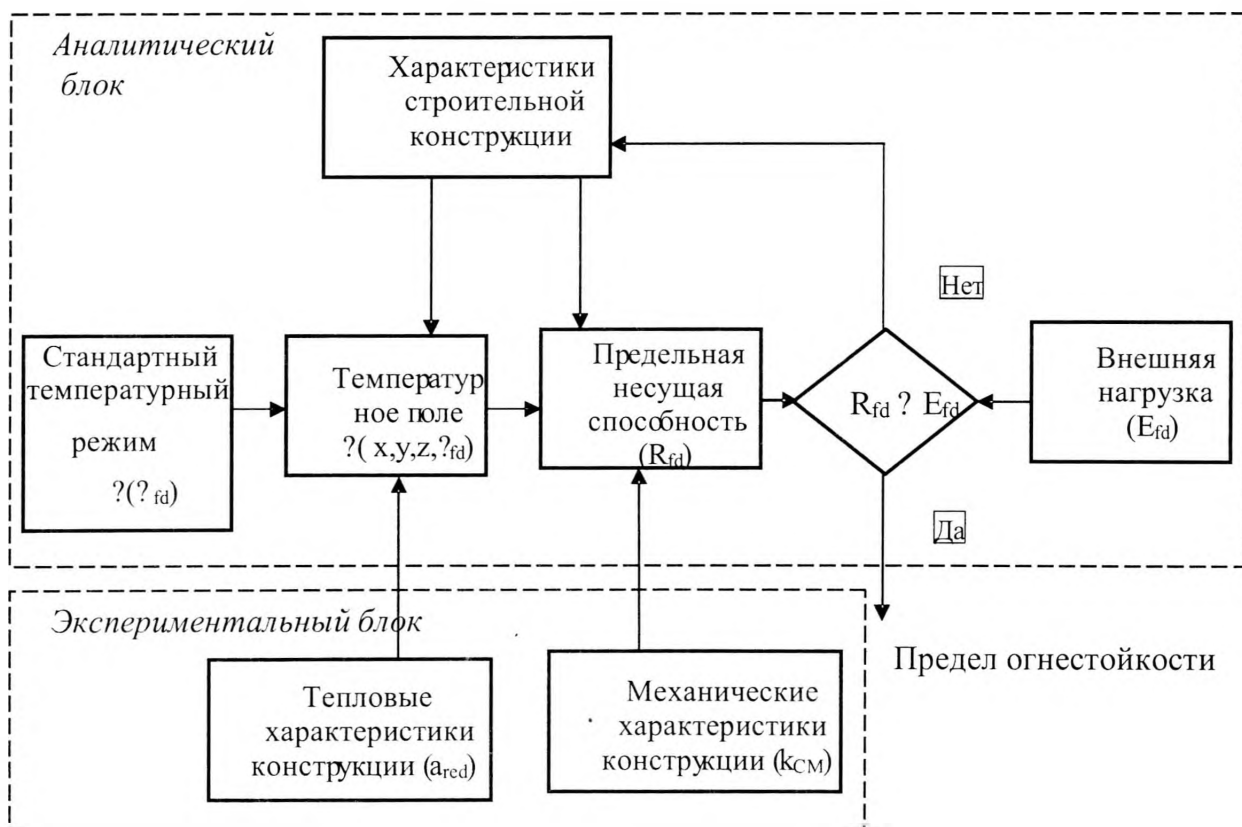


Рис.1. Методика расчета конструкций из бетона на огнестойкость.

В предлагаемой к использованию методике нашли отражение результаты научных исследований огнестойкости конструкций из бетона, заложенные в нормы проектирования и соответствующие рекомендациям [4–6]. В качестве базового принят алгоритм (рис.1), основанный на прочностных методах расчета всех видов железобетонных конструкций, а для проведения теплотехнической и статической частей расчета предела огнестойкости предусмотрено экспериментальное определение приведенного коэф-

фициента температуропроводности бетона (a_{red}) и коэффициента работы бетона конструкции при пожаре (k_{CM}) соответственно.

Для вывода коэффициента приведенной температуропроводности авторами использованы результаты исследований влияния структуры бетона на его теплотехнические показатели, изложенные в трудах Жукова В.В., Яковлева А.И., Милованова А.Ф., Заседателя И.Б., Петров-Денисова В.Г. [1–4,8]:

$$a_{red} = 0.00043 \cdot \rho_0^{1.13} \cdot (1 + 0.069 \cdot W), \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность сухого бетона, т/м³;

W – массовая эксплуатационная влажность бетона, %.

Значения влажности бетона на портландцементе с плотным заполнителем при В/Ц=0,5 и нормальной температуре приведены в табл.1. [2,5] или могут быть определены с приемлемой достоверностью по

формуле (2). При В/Ц 0.3 и 0.7 приведенные в табл.1 значения следует умножить на поправочные коэффициенты 0,57 и 1,3 соответственно.

Таблица 1

Расход цемента, кг/м ³	Равновесная влажность бетона W , %		
	Относительная влажность воздуха		
	RH=25%	RH=50%	RH=75%
300	1	1.3	2.5
400	1.5	2.1	3
500	2	2.7	3.8
700	3	3.9	5.4

$$W = 0.000267 \cdot RH \cdot B^{0.93} \cdot C^{0.2}, \quad (2)$$

где RH – относительная влажность воздуха, %;

B – масса воды на 1 м³ бетона, кг;

C – масса цемента на 1 м³ бетона, кг.

Следует отметить, что методика справедлива при отсутствии хрупкого разрушения при пожаре, возможность которого может быть констатирована, в случае превышения приведенного в табл.1 значения влажности критической величины, равной 3...3.5% [2,4,5].

Проведенные авторами расчеты показали, что величина приведенного коэффициента температуропроводности для тяжелых бетонов может колебаться в достаточно широких пределах:

$$0,00087 \text{ м/час} \leq a_{\text{red}} \leq 0,00171 \text{ м/час},$$

при этом относительное расстояние r [4,6] в интервалах времени от 0,5 до 2,5 часов и толщин прогреваемых слоев бетона от 0,01 до 0,25 метра по расчетам авторов может быть определено по формуле:

$$r = \frac{1}{\sqrt{\tau}} (0,28 + 3356 \cdot a_{\text{red}} \cdot x) + \frac{x - 0,03}{0,3}, \quad (3)$$

где x – расстояние от обогреваемой поверхности до рассматриваемой зоны, м;

τ – время, часов.

Для сравнения пределов огнестойкости конструкций, выполненных из бетонов с различными значениями приведенного коэффициента температуропроводности в качестве базовой величины принято $a_{\text{red}}=0,00133 \text{ м/час}$ [3,4,6,8]. Данная величина была использована при определении заложенных в пособие

пределов огнестойкости [7]. Проведенная авторами обработка численного массива в указанных интервалах времени и толщины обогреваемых слоев бетона позволила выявить зависимость коэффициента учета теплотехнических характеристик бетона (k_{ct}) от a_{red} :

$$k_{\text{ct}} = 0,052 \cdot a_{\text{red}}^{-0,445}, \quad (4)$$

Использование приведенной зависимости позволяет установить температуру прогрева бетона в стержневых конструкциях при пожаре (рис.2).

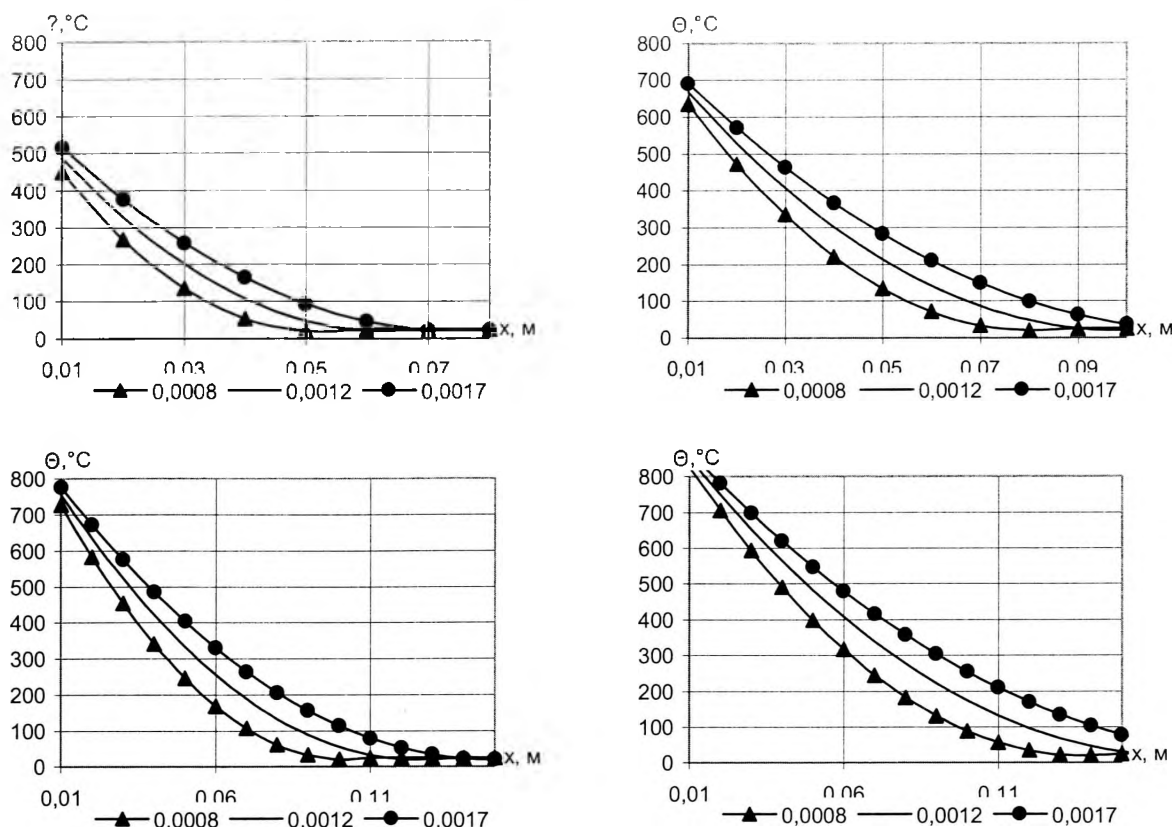


Рис.2. Влияние a_{red} на температуру прогрева стержневых конструкций при времени прогрева: а) 0,5 часа; б) 1 час; в) 1,5 часа; г) 2,5 часа

Основным предельным состоянием для стержневых строительных конструкций является потеря несущей способности, под которой понимается обрушение конструкции, обусловленное превышением внешней нагрузкой несущей способности, или возникновение предельных деформаций. При этом для изгибаемых железобетонных конструкций основное влияние на огнестойкость оказывают прочностные характеристики арматуры, а у бетона учитываются только теплотехнические показатели. Величина k_{sm} характеризует влияние прочностных характеристик арматуры на огнестойкость строитель-

ных железобетонных конструкций и обусловлена неодинаковым поведением различных арматурных сталей при высокотемпературном нагреве. Проведенный анализ позволил выделить четыре группы сталей в зависимости от особенностей их поведения при пожаре [7]. К первой группе относятся стали 35ГС, 25Г2С и 32Г2Рпс, не подвергнутые температурному упрочнению и холодной вытяжке. Арматура из данных видов сталей наиболее устойчива к высокотемпературному нагреву и, как следствие, следует применять коэффициент $k_{sm} = 1,1$ [7]. Ко второй группе относятся стали с нормативной прочно-

стью более 800 МПа классов S800, S1000, S1200 и холоднотянутая обычная проволока, для которых коэффициент $k_{sm}=0,95$. Для высокопрочной арматурной проволоки и канатов класса K7– $k_{sm}=0,9$. Четвертую группу формируют стали, которые обладают близкими и равными свойствами классов S240, S500 и, как следствие, были приняты за основу при проведении масштабных огневых испытаний. Для таких сталей использование поправочных коэффициентов не требуется ($k_{sm}=1$).

Таким образом, для свободноопертых изгибаемых железобетон-

ных конструкций в оценочных расчетах поправочный коэффициент к табличным значениям пределов огнестойкости, приведенных в пособии [7], по мнению авторов, может быть определен по формуле:

$$k_B = k_{ct} \cdot k_{sm}, \quad (5)$$

Учитывая равенство уровней нагружения и геометрических параметров сравниваемых конструкций, для оценочных расчетов поправочный коэффициент для оценки несущей способности центрально сжатого элемента может быть определен по формуле (6):

$$k_A = \frac{k_{CM} / k_{CF} + k_S(\Theta) \cdot \omega / k_{SF}}{k_{CT} / k_{CF} + k_{ST}(\Theta) \cdot \omega / k_{SF}}, \quad (6)$$

где k_{CM} – коэффициент работы бетона конструкции при пожаре;

k_{CT} – коэффициент работы конструкции из заложенного в нормы бетона;

$k_S(\Theta)$ – коэффициент работы арматуры при пожаре;

$k_{ST}(\Theta)$ – коэффициент работы арматуры класса S500 при пожаре;

k_{CF} , k_{SF} – коэффициенты безопасности для бетона и арматуры;

ω – доля расчетной нагрузки на конструкцию, воспринимаемая сжатой арматурой:

$$\omega = \mu \frac{f_{yd}}{\alpha \cdot f_{cd}}, \quad (7)$$

где μ – отношение площади сжатой арматуры к площади поперечного сечения сжатой зоны бетона;

αf_{cd} , f_{yd} – расчетные сопротивления бетона и арматуры.

Для арматуры классов S240, S500 коэффициент безопасности, определенный по СНБ 5.03.01, составляет $k_{SF}=0,91$, для классов S800, S1200, S1400 – $k_{SF}=0,83$. Расчетный коэффициент безопасности

для бетона (k_{CF}) принимается для классов $C^{8/10}$ – $C^{60/75}$ равным $k_{CF}=0,57$, – класса $C^{70/85}$ – $k_{CF}=0,51$, – классов $C^{80/95}$ – $C^{90/105}$ – $k_{CF}=0,49$.

Проведенная авторами обработка массива температур для раз-

личных стержневых конструкций, используя отечественные методические документы и рекомендации

[3,4,6,8], позволила определить значения коэффициента k_{CT} для бетона стандартного состава (табл.2).

Таблица 2

Ширина (диаметр) конструкции, мм	k_{CT}				
	R30	R45	R60	R90	R120
100	0,77	0,61	0,43	-	-
200	0,86	0,77	0,65	0,47	0,29
300	0,90	0,83	0,74	0,62	0,49
400	0,93	0,87	0,80	0,70	0,59
500	0,97	0,90	0,83	0,73	0,67

Величина коэффициента $k_s(\Theta)$ может быть определена по табл.3 [4].

Таблица 3

Коэффициент работы арматуры при пожаре

Класс арматуры	Температура нагрева, °C						
	100-200	300	400	500	600	700	800
S240, S500	1,00	1,00	1,00	0,85	0,50	0,25	0,15
S800, S1200, S1400	1,00	1,00	0,95	0,65	0,35	0,18	0,10
Проволока и подвергнутая термическому упрочнению арматура	1,00	0,90	0,70	0,45	0,20	0,10	0,05

Определение коэффициента k_{CM} наиболее эффективно с использованием "зонного" метода. Данный метод подразумевает деление 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.3). Величина коэффициента k_{CM} для стержневых конструкций с учетом коэффициента вариации температуры в каждой зоне может быть определена по формуле:

$$k_{CM} = \left(1 - \frac{0,2}{m}\right) \sum_{i=1}^n c_i k_c(\Theta_i), \quad (8)$$

где $K_c(\Theta_i)$ – коэффициент условий работы i зоны при температуре Θ ; $c_i = A_{ci}/A_c$ – доля площади i зоны (A_{ci}) от общей площади сечения бетона (A_c).

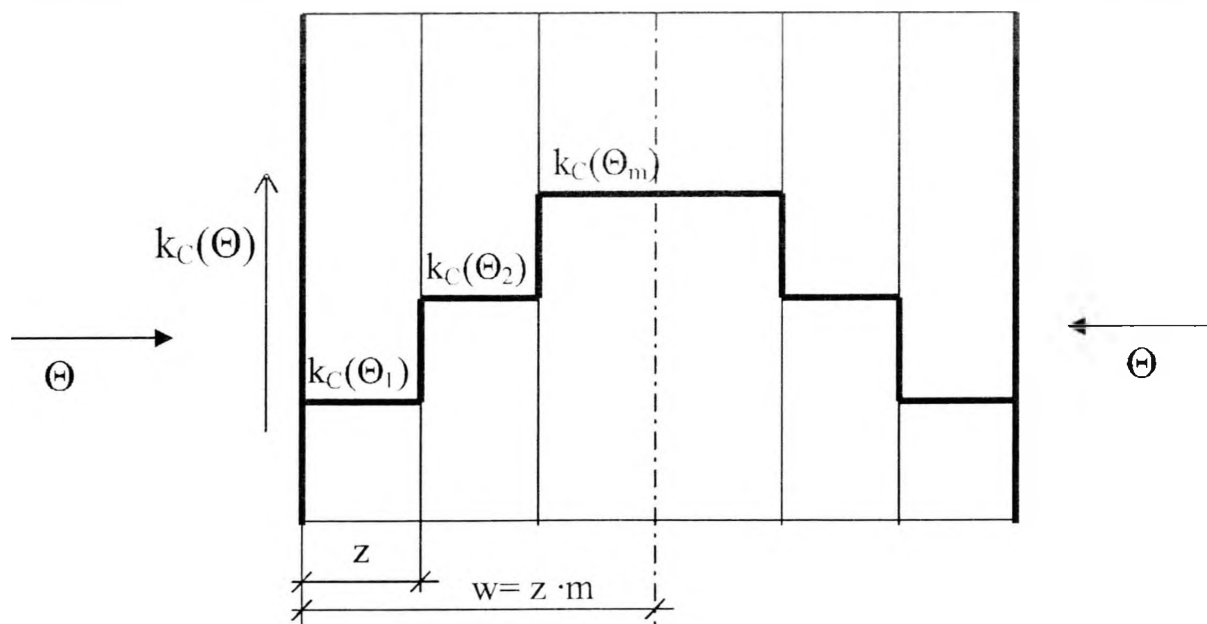


Рис. 3. Деление несущей стены толщиной $2w$ на m зон.

Исследования зависимости $K_c(\Theta_i)$ от температуры с приемлемой достоверностью рекомендуется проводить по методике НИИЖБ [3] на кубах размерами $100 \times 100 \times 100$ мм, которые подвергаются нагреву до 200, 400, 600 и 800 °С. Испытания для каждой температуры проводятся на 3–5 образцах-близнецах. Нагрев образцов осуществляется в муфельных печах, изготовленных из жаростойкого бетона с нихромо-

вым нагревателем. Заданные режимы обогрева поддерживаются с помощью трансформатора и потенциометра с точностью ± 2 °С. Скорость нагрева регламентируется в пределах 120–150 °С/ч. После достижения необходимой температуры образец выдерживается в течение 4 часов до равномерного прогрева бетона. У кубов перед нагревом и после него измеряются геометрические параметры и плотность.

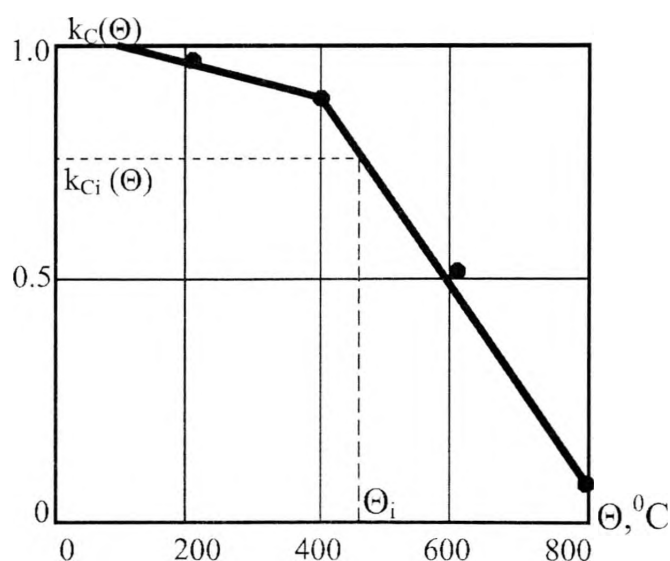


Рис.4. Механизм определения $k_c(\Theta_i)$ в зависимости от температуры Θ_i .

Влияние температуры на прочность определяется после нагрева в охлажденном состоянии по методике ГОСТ 10180:

$$k_c(\Theta) = \overline{f_c}(\Theta) / \overline{f_c}(20), \quad (9)$$

где $\overline{f_c}(\Theta)$ – средняя призмная прочность бетона для серии образцов при требуемой температуре нагрева;

$\overline{f_c}$ – средняя призмная прочность бетона в интервале рабочих температур от 10 до 30 °С.

По результатам испытаний строится график (рис.4) зависимости $k_c(\Theta)$ от температуры. В зависимости от определенной по формуле (1) величины приведенного коэффициента температуропроводности по рис. 2 определяется температура каждой зоны, на основании которой для каждой зоны по рис. 4 определяется $k_c(\Theta_i)$. Затем по формуле (8) определяется величина коэффициента работы бетона конструкции при пожаре ($k_{см}$). А затем

по формуле (6) находится величина поправочного коэффициента к табличным значениям предела огнестойкости сжатых железобетонных конструкций (k_A).

Предлагаемая методика позволяет без проведения полномасштабных огневых испытаний определять влияние на предел огнестойкости строительной конструкции вводимых в состав бетонной смеси добавок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *И.Б. Заседателев, В.Г. Петров-Денисов* Тепло-массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений. – М.: Стройиздат, 1973. – 168 с.
2. *В.В. Жуков, Э.Ф. Панюков* Термостойкость железобетонных конструкций. Киев.: Будэвельник. 1991. – 218 с.
3. *А.Ф. Милованов* Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. - М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
4. *МДС 21-2.2000* Огнестойкость и огнесохранность железобетонных конструкций.
5. *Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре.*
6. *Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций.*
7. *Справочное пособие по определению пределов огнестойкости строительных конструкций.*
8. *А.И. Яковлев* Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.