

## СИСТЕМЫ КОНСТРУКТИВНОЙ ОГНЕЗАЩИТЫ СТАЛИ

Согласно Еврокоду 3 (ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010) к огнезащитным материалам относятся любые материалы или их сочетания, примененные в строительной конструкции с целью повышения ее огнестойкости [1]. Необходимым условием использования средств огнезащиты при расчетах огнестойкости и дальнейшем проектировании является требование, что огнезащитные материалы в условиях пожара должны не разрушаться, а оставаться сцепленными с основанием. Исходя из этого определения, помимо традиционно применяемых для огнезащиты стальных конструкций специальных средств, в качестве огнезащитных покрытий могут быть использованы обычные строительные материалы, которые сохраняют свою целостность и не отслаиваются от конструкции во время пожара.

В мировой практике испытаний огнезащитной эффективности стройматериалов – штукатурных смесей, каменных, бетонных, плитных изделий – накоплен довольно объемный практический материал [2–5], который позволил создать эффективную теоретическую базу для проведения расчетов пределов огнестойкости стальной конструкции различного сечения и конфигурации, защищенной от воздействия огня конструктивными способами.

К конструктивным способам огнезащиты относятся – обетонирование, обкладка кирпичом, оштукатуривание поверхности элементов конструкций, использование крупногабаритных листовых и плитных огнезащитных облицовок, применение огнезащитных конструктивных элементов, заполнение внутренних полостей конструкций и др. Обычные строительные материалы могут обеспечить огнестойкость строительных конструкций до 5–6 часов и в три-четыре раза дешевле специализированных одготипных материалов, предназначенных и сертифицированных как средство огнезащиты. Но, несмотря на такие предпочтения, способ огнезащиты строительными материалами практически не применяется во вновь возводимых зданиях и распространен при ремонтных и реставрационных работах с целью усиления конструкций, потерявших свои прочностные свойства вследствие длительной эксплуатации.



**Л.Н. Вахитова**

эксперт по вопросам огнезащиты Украинского Центра Стального Строительства, старший научный сотрудник ИнФУУ НАН Украины



**К.В. Калафат**

руководитель комитета огнезащиты Украинского Центра Стального Строительства, директор регионального испытательного центра «Донстройтест»

Пределы огнестойкости стальных конструкций, защищенных от огня материалами общестроительного назначения, определяются по результатам огневых испытаний согласно национальным стандартам (ДСТУ Б В.1.1-4-98\*, ДСТУ Б В.1.1-13:2007, ДСТУ Б В.1.1-14:2007 и ДСТУ Б В.1.1-17:2007), расчетными методами в соответствии со стандартами европейской линии проектирования согласно Еврокодам [1, 6], а также методиками, утвержденными или согласованными в установленном порядке.

Положения по расчету огнестойкости строительных конструкций изложены в частях 1–2 соответствующих Еврокодов, которые вступили в силу в Украине с 1 июля 2014 года, где рассмотрены общие действия на конструкции во время пожара. В качестве основных преимуществ системы проектирования согласно Еврокодам касательно пожарной безопасности можно отметить: ориентированность на расчетные методы; создание единого, постоянно актуализируемого подхода проектирования в Европейском Союзе; подробные и исчерпывающие расчетные нормы; весомый объем вспомогательной информации для проектирования огнезащиты строительных конструкций; огромный выбор программного обеспечения и шаблонов для расчетов.

Обзор методов расчета предела огнестойкости конструкций, защищенных строительными материалами, демонстрирует, что помимо расчетных моделей Еврокодов в мировой прак-

тике находит широкое применение метод эмпирических корреляций, который подробно изложен в Международных строительных нормах (МСН) [2] и использован нами для расчета пределов огнестойкости отечественного сортамента стальных колонн и балок.

Совпадение в пределах допустимых погрешностей расчетных пределов огнестойкости защищенных стальных колонн и балок, полученных с применением Еврокодов и эмпирических уравнений, приведенных в Международных строительных нормах, действующих в США, позволяет утверждать об адекватности расчетных моделей, предлагаемых мировой практикой противопожарной защиты и является стимулом к внедрению в Украине расчетных методов при проектировании огнезащиты стальных конструкций<sup>1</sup>.

**Расчет предела огнестойкости стальных конструкций по Еврокодам.** В соответствии с Еврокодом 3 [1] предел огнестойкости стальных конструкций определяют, используя упрощенные и уточненные методы расчета и испытания.

В Еврокоде 1 (ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010) рассмотрены тепловые и механические воздействия на строительные конструкции в условиях пожара [6]. Данный стандарт используется совместно с противопожарными частями стандартов ДСТУ-Н Б EN 1992 – ДСТУ-Н Б EN 1996 и ДСТУ-Н Б EN 1999, содержащими правила проектирования строительных конструкций с учетом обеспечения их огнестойкости. Стандарт определяет номинальные и параметрические (физически обоснованные) тепловые воздействия, устанавливает принципы и правила определения тепловых и механических воздействий, которые должны применяться совместно с другими Еврокодами.

Расчет предела огнестойкости стальных конструкций по Еврокоду 3, для которых в качестве огнезащиты применены конструктивные методы защиты (обетонирование, оштукатуривание, облицовывание), производится с использованием в расчетах теплофизических характеристик огнезащитных материалов. Метод расчета основан на определении прироста температуры  $\Delta\Theta_{a,t}$  за промежуток времени  $\Delta t$  для равномерного распределения температуры в попе-

речном сечении защищенной стальной конструкции:

$$\Theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\Theta_{g,t} - \Theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi / 3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta \Theta_{g,t} \quad (1)$$

при  $\Delta\Theta_{a,t} \geq 0$ , если  $\Delta\Theta_{g,t} > 0$ ,

$$\text{где } \phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p A_p / V; \quad (2)$$

$A_p / V$  – коэффициент сечения стальных конструкций, покрытых огнезащитными материалами ( $\text{м}^{-1}$ );

$A_p$  – площадь поверхности огнезащитного материала на единицу длины,  $\text{м}^2$ ;

$V$  – объем конструкций на единицу длины,  $\text{м}^3$ ;

$c_a$  – удельная теплоемкость стали,  $\text{Дж/кгК}$ ;

$c_p$  – удельная теплоемкость огнезащитного материала, не зависящая от температуры,  $\text{Дж/кгК}$ ;

$d_p$  – толщина огнезащитного материала,  $\text{м}$ ;

$t$  – промежуток времени, при этом  $\Delta t \leq 30$ ,  $\text{с}$ ;

$\Theta_{a,t}$  – температура стали в момент времени  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\Theta_{g,t}$  – температура среды (номинального пожара) в момент времени  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta\Theta_{g,t}$  – прирост температуры среды (номинального пожара) в момент времени  $\Delta t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\rho_a$  – плотность стали, равная  $7850$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности огнезащитной системы,  $\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}$ ;


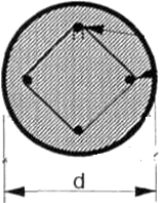
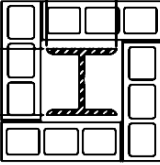

$\rho_p$  – плотность огнезащитного материала,  $\text{кг/м}^3$ .

**Расчет предела огнестойкости стальных конструкций по Международным строительным нормам.** Расчеты по эмпирическим уравнениям Международных строительных норм подтверждены действующей в США практикой огнезащиты путем множественных огневых испытаний согласно стандартам ASTM. Данные, накопленные при испытаниях самых разнообразных строительных конструкций на протяжении длительного времени, легли в основу международных стандартов по огнезащитной эффективности общестроительных материалов, таких как бетон, кирпичная кладка, керамическая плитка, гипсокартонные листы и различные штукатурные смеси. Эти обобщенные данные по огнезащите строительных конструкций зарегистрированы как строительные нормы, правила и стандарты и применяются при разработке проектов строительства в части огнезащитной обработки [7, 8].

<sup>1</sup> Использование уравнений, моделей и табличных данных не избавляют от необходимости проведения огневых испытаний и других процедур, предусмотренных законодательством Украины в области пожарной безопасности.

Таблица 1

**Уравнения для расчета пределов огнестойкости защищенных стальных конструкций\* [2]**

Способ огнезащиты	Уравнение для расчета
 <p>(а) Бетон</p>	$R = 1,22(W/P)^{0,7} + [0,0018(T_e^{16}/\lambda_c^{0,2})] \cdot [1,0 + 384\{(S/d_c T_e / (0,25\rho_c + T_e))^{0,8}\}] \quad (3)$ <p><i>R</i> – предел огнестойкости колонны, ч;  <i>W</i> – удельный вес стальной колонны, кг/м;  <i>P</i> – обогреваемый периметр стальной колонны, мм;  <i>T<sub>e</sub></i> – эквивалентная толщина бетонного покрытия, мм;  <i>λ<sub>c</sub></i> – коэффициент теплопроводности бетона, Вт/м·°С;  <i>S</i> – площадь поперечного сечения стальной колонны, мм<sup>2</sup>;  <i>d<sub>c</sub></i> – плотность бетона, кг/м<sup>3</sup>;  <i>ρ<sub>c</sub></i> – внутренний периметр бетонного покрытия, мм</p>
 <p>(б) Сталебетонные колонны</p>	$R = [a (f'_c + 20)/(L - 1000)] d^2(d/C)^{1/2} \quad (4)$ <p><i>R</i> – предел огнестойкости колонны, ч;  <i>a</i> – коэффициент, характеризующий бетонное наполнение, равный:                  0,07 – для колонн круглого сечения, заполненных силикатным бетоном,                  0,08 – для колонн круглого сечения, заполненных известковым бетоном,                  0,06 – для колонн квадратного и прямоугольного сечения, заполненных силикатным бетоном;  <i>f'<sub>c</sub></i> – сжимающая сила после 28 дней изготовления сталебетонной колонны, МПа;  <i>L</i> – длина колонн, м;  <i>d</i> – внешний диаметр для колонн круглого сечения и наименьший наружный размер для колонн квадратного и прямоугольного сечения, мм;  <i>C</i> – нагрузка на колонну, кН.                  Уравнение применимо для следующих условий:  <i>R</i> &lt; 2 ч; 20 МПа &lt; <i>f'<sub>c</sub></i> &lt; 40 МПа; 2 м &lt; <i>L</i> &lt; 4 м; 140 мм &lt; <i>d</i> &lt; 305 мм.</p>
 <p>(в) Кирпичи и камни строительные</p>	$R = 1,22(W/P)^{0,7} + [0,0018(d_p^{16}/\lambda_p^{0,2})] \cdot [1,0 + 384\{(S/d_c d_p / (0,25\rho_c + d_p))^{0,8}\}] \quad (5)$ <p><i>R</i> – предел огнестойкости колонны, ч;  <i>W</i> – удельный вес стальной колонны, кг/м;  <i>P</i> – обогреваемый периметр стальной колонны, мм;  <i>d<sub>p</sub></i> – толщина кирпичной кладки, мм;  <i>λ<sub>p</sub></i> – теплопроводность кирпича, Вт/м·°С;  <i>S</i> – площадь поперечного сечения стальной колонны, мм<sup>2</sup>;  <i>d<sub>c</sub></i> – плотность кирпичной кладки, кг/м<sup>3</sup>;  <i>ρ<sub>c</sub></i> – внутренний периметр кирпичной кладки, мм</p>
 <p>(г) Строительные штукатурки</p>	$R = [C_1(17W/p_s) + C_2] d_p/25,4 \quad (6)$ <p><i>R</i> – предел огнестойкости, мин;  <i>W</i> – удельный вес стальной колонны, кг/м;  <i>d<sub>p</sub></i> – толщина распыляемого материала, мм;  <i>P</i> – обогреваемый периметр стальной колонны, мм;  <i>C<sub>1</sub></i> и <i>C<sub>2</sub></i> – коэффициенты, характеризующие теплопроводность распыляемого материала.                  Для цементно-песчаных штукатурок – <i>C<sub>1</sub></i> = 69 и <i>C<sub>2</sub></i> = 31;                  для покрытий с минеральным волокном – <i>C<sub>1</sub></i> = 63 и <i>C<sub>2</sub></i> = 42;                  для легких цементно-перлитовых (вермикулитовых) штукатурок – <i>C<sub>1</sub></i> = 33 и <i>C<sub>2</sub></i> = 100</p>

\* Для критической температуры 538 °С

В таблице 1 приведены уравнения, по которым производится расчет предела огнестойкости стальной конструкции, защищенной строительными материалами.

**Примеры расчета эффективности конструктивной огнезащиты.** Расчеты предела огнестойкости защищенных стальных двутавров по уравнению (1) и уравнениям таблицы 2 позволяют определить минимальные толщины стро-

ительных материалов для обеспечения соответствующих пределов огнестойкости.

В таблице 3 представлены расчеты пределов огнестойкости стальных колонн, обетонированных по контуру ((а), табл. 1) легким и тяжелым бетоном. Приведенные расчетные величины минимальных толщин бетона (*d<sub>p</sub>*, мм) удовлетворительно совпадают при расчете по Еврокоду 3 (Ур.1) и по МСН (Ур. 3, табл. 1).

Таблица 2

Сравнение минимальной толщина бетона ( $d_p$ , мм) для обеспечения соответствующих пределов огнестойкости стальных двутавров<sup>1)</sup>, рассчитанных по Еврокоду 3 и МСН

Легкий бетон (ДСТУ Б В.2.7-176:2008), $\rho_p (d_c = 1800 \text{ кг/м}^3, \lambda_p (\lambda_c) = 0,70 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}^2, C_p = 840 \text{ Дж/кгК}$						
Коэффициент сечения профильный $A_m / V, \text{ м}^{-1}$	Метод расчета	Класс огнестойкости				
		R 60	R 90	R 120	R 150	R 180
345-243	Еврокод 3	40-42	51-62	65-73	76-84	87-90
	Ур. (3)	37-41	49-57	62-69	74-80	84-89
Тяжелый бетон (ДСТУ Б 8.2.7-176:2008), $\rho_p (d_c = 2500 \text{ кг/м}^3, \lambda_p (\lambda_c) = 1,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}^2, C_p = 1000 \text{ Дж/кгК}$						
Коэффициент сечения профильный $A_m / V, \text{ м}^{-1}$	Метод расчета	Класс огнестойкости				
		R 60	R 90	R 120	R 150	R 180
345-243	Еврокод 3	44-50	60-65	71-77	84-86	94-98
	Ур. (3)	41-46	57-62	71-74	83-87	93-98

<sup>1)</sup> Контурная защита ((а), табл. 1).  
<sup>2)</sup> Согласно уравнению (1) коэффициент теплопроводности огнезащитной системы зависит от температуры

Таблица 3

Сравнение минимальных толщин цементно-вермикулитовой штукатурки ( $d_p$ , мм) для обеспечения соответствующих пределов огнестойкости стальных колонн<sup>1)</sup>

Цементно-вермикулитовая штукатурка, $d_c = 600 \text{ кг/м}^3, \lambda_p (\lambda_c) = 0,10 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}^2, C_p = 1130 \text{ Дж/кгК}$						
Коэффициент сечения профильный $A_m / V, \text{ м}^{-1}$	Метод расчета	Класс огнестойкости				
		R 60	R 90	R 120	R 150	R 180
345-140	Еврокод 3	12-18	18-24	24-32	30-37	36-44
	Ур. (6)	12-16	18-22	24-29	30-35	35-41

<sup>1)</sup> Контурная защита ((г), табл. 1).  
<sup>2)</sup> Согласно уравнению (1) коэффициент теплопроводности огнезащитной системы зависит от температуры. Для расчетов учитывались данные полученные при испытаниях согласно ДСТУ Б В.1.1-17:2007

Такие же расчеты были проведены и для стальных колонн, оштукатуренных цементно-вермикулитовой смесью (табл. 3). Наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных величин толщин огнезащитной штукатурки, полученных при использовании альтернативных методов расчета (Еврокода 3 и Ур. (6), табл. 1), что подтверждает адекватность обоих подходов для оценки огнезащитной эффективности используемого материала.

**Общие рекомендации при использовании конструктивной огнезащиты.** Основное предназначение методов огнезащиты при применении теплоизоляционных строительных материалов состоит в уменьшении скорости теплопередачи стальным элементам во время огневого воздействия. При этом средства огнезащиты должны удовлетворять следующим характеристикам:

- невоспламеняемость, минимальное дымообразование и отсутствие выделения вредных веществ в условиях пожара;

- огнезащитная эффективность, подтвержденная огневыми испытаниями согласно действующим национальным стандартам для однотипных конструкций различных размеров или методиками расчета, согласованными в установленном порядке;
- соответствие используемого для огнезащиты материала нормативным документам (ТУ, ДСТУ, спецификациям и т.д.), в соответствии с которыми он производится;
- длительный срок эксплуатации, основанный на физико-химических характеристиках самого материала и прочности его сцепления с поверхностью стали (при использовании огнезащитных штукатурных покрытий);
- стойкость покрытия к действию окружающей среды в процессе эксплуатации.

Для предварительной оценки пределов огнестойкости конструкций при проектировании огнезащиты путем обетонирования, обли-



цовки, кирпичной кладки рекомендуется руководствоваться следующими положениями.

По признаку несущей способности:

- предел огнестойкости нагруженных конструкций уменьшается с увеличением нагрузки. Величину предела огнестойкости конструкций определяет, как правило, сечение с наибольшим значением напряжений, подверженное воздействию пламени и высоких температур;
- предел огнестойкости конструкции тем выше, чем больше значение приведенной толщины конструкции;
- предел огнестойкости статически неопределимых конструкций, как правило, выше предела огнестойкости аналогичных статически определимых конструкций за счет перераспределения усилий на менее напряженные и нагреваемые с меньшей скоростью элементы. При этом необходимо учитывать влияние дополнительных усилий, возникающих вследствие температурных деформаций.

По теплоизолирующей способности:

- предел огнестойкости слоистых ограждающих конструкций принимается равным сумме пределов огнестойкости отдельно взятых слоев. Увеличение числа слоев ограждающей конструкции (оштукатуривание, облицовка) повышает ее предел огнестойкости по теплоизолирующей способности;
- пределы огнестойкости ограждающих конструкций с воздушной прослойкой в сред-

нем на 10 % выше пределов огнестойкости тех же конструкций без воздушной прослойки. Эффективность воздушной прослойки тем выше, чем больше она удалена от обогреваемой поверхности;

- пределы огнестойкости ограждающих конструкций с несимметричным расположением слоев зависят от направленности теплового потока. С той стороны, где вероятность возникновения пожара выше, рекомендуется располагать негорючие материалы с низкой теплопроводностью;
- увеличение влажности конструкций способствует уменьшению скорости прогрева и повышению огнестойкости, за исключением тех случаев, когда увеличение влажности увеличивает вероятность разрушения материала.

При определении огнестойкости конструкций на основании перечисленных положений необходимо располагать достаточными сведениями о пределах огнестойкости конструкций, аналогичных рассматриваемым по форме, использованным материалам и конструктивному исполнению, а также сведениями об основных закономерностях их поведения при пожаре или огневых испытаниях. В случаях, когда приведенные в данной публикации пределы огнестойкости указаны для однотипных конструкций разного сечения, предел огнестойкости конструкции, имеющей промежуточный размер, допускается определять линейной интерполяцией.

[1] ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Еврокод 3. «Проектирование стальных конструкций. Часть 1–2. Основные положения. Расчет конструкций на огнестойкость» (EN 1993-1-2:2005, IDT).

[2] International Building Code. 2012 (Second Printing). Chapter 7 – Fire and Smoke Protection Features.

[3] Steel Buildings in Europe. Multi-Storey Steel Buildings. Part 6: Fire Engineering.

[4] Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-2.02-110-2008. Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости.

[5] Пособие П1-02 к СНБ 2.02.01-98 «Пределы огнестойкости строительных конструкций».

[6] ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Еврокод 1. «Воздействия на конструкции. Часть 1–2. Общие действия. Действия на конструкции во время пожара» (EN 1991-1-2:2002, IDT).

[7] Fire Resistance of Brick Masonry. TECHNICAL NOTES on Brick Construction 1850 Centennial Park Drive, Reston, Virginia 20191.

[8] ASCE/SEI/SFPE 29-05. Standard Calculation Methods for Structural Fire Protection (29-05).

Надійшла 12.05.20154 р.