



## Методика управления пожарной безопасностью социальных объектов на основе анализа и расчета огнестойкости строительных конструкций.

### Часть 1.

*Е.Ю. Черкасов, А.А. Воронцова, Д.Ю. Минкин, Ю.Е. Актерский, Ф.А. Дали,  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России*

**Аннотация:** В статье рассматриваются особенности численного моделирования пределов огнестойкости конструкций при воздействии стандартного и углеводородного температурных режимов. После проведения оценки с помощью коэффициента пропорциональности необходимо проведение поверочного расчёта конструкции, испытанной при стандартном температурном режиме пожара, и при совпадении полученных результатов, расчёт конструкции при углеводородном режиме.

**Ключевые слова:** огнестойкость бетонных строительных конструкций, стандартный температурный режим пожара, углеводородный режим пожара, огнестойкость.

Железобетон является одним из самых распространенных строительных материалов. К настоящему времени подавляющее число огневых испытаний строительных железобетонных конструкций проведено при стандартном температурном режиме пожара (СТРП) [1,2].

Температурные режимы, учитывающие реальные условия пожара, могут существенно отличаться от режима СТРП, используемого при испытаниях строительных конструкций по требованиям (ГОСТ 30247.0-94). При оценке пределов огнестойкости строительных конструкций может возникнуть необходимость выбора температурного режима, который при огневых испытаниях позволил бы сравнивать поведение различных испытуемых объектов в условиях, максимально приближенных к условиям реального пожара (наружного, тлеющего или углеводородного) (ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014).

В последние десятилетия происходит освоение арктической зоны Российской Федерации и интенсивное строительство объектов топливно-энергетического комплекса, которым лучше всего соответствует углеводородный температурный режим пожара (УТРП). Поскольку

---

проведение испытаний конструкции занимает значительное время, становится актуальным вопрос о возможной численной зависимости между пределами огнестойкости конструкций при воздействии СТРП и УТРП [3-5].

В данной статье приведены результаты численного эксперимента для уточнения возможности применения такого соотношения при оценке пределов огнестойкости железобетонных конструкций. СТРП, при котором производят расчетные испытания строительных конструкций, определяется в виде следующей зависимости:

$$T = T_0 + 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1), \quad (1)$$

где  $T_0$  – начальная температура;  $\tau$  – время с момента начала испытаний, мин.

Для нефтехимической промышленности и на морских нефтяных платформах используется УТРП (ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014):

$$T = T_0 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167\tau} - 0,675 \cdot e^{-2,5\tau}), \quad (2)$$

В работе [6,7] предложено эмпирическое соотношение:

$$t_h = K \cdot t_s, \quad (3)$$

где  $K$  - коэффициент, равный 0,6 для бетонной плиты, а  $t_h$  и  $t_s$ - время достижения одной и той же температуры для СТРП и УТРП.

Для проверки эмпирического соотношения применительно к железобетонным конструкциям были проведены расчёты времени прогрева до температур 450, 500, 550, 600 °С при СТРП и УТРП при разных толщинах защитного слоя бетона арматуры и толщинах железобетонных плит [8,9].

Расчет распределения температуры в поперечном сечении конструкции производился путем численного решения уравнения теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик материалов от температуры:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}T), \quad (4)$$

где  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность материала.

Граничные условия задачи описывались уравнением лучистого и конвективного теплообмена между внутренней поверхностью конструкции и окружающей средой [10]:

$$-\lambda \operatorname{grad}T = \alpha_k (T_{\Gamma} - T_{\Pi}) + \varepsilon_{np} \cdot \sigma \left( (T_{\Gamma} + 273)^4 - (T_{\Pi} + 273)^4 \right), \quad (5)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена для обогреваемой поверхности,  $\alpha_k = 29 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты системы обогревающая среда – поверхность конструкции,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $T_{\Pi}$ ,  $T_{\Gamma}$  – температура соответственно поверхности конструкции и газовой фазы, °С. Плотность бетона  $\rho$  принята  $2350 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Коэффициент теплопроводности  $\lambda_{bt}$  (СТО 36554501-006-2006):  $\lambda_{bt}=1,2-0,00035\cdot T \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{°С}^{-1}$ . Теплоёмкость  $C_{bt}$  составляет [6,7]:  $C_{bt}=710+0,83\cdot T \text{ КДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{°С}^{-1}$ . Степень черноты поверхности железобетонной плиты принята  $\varepsilon=0.63$ .

Результаты расчёта времени прогрева арматуры до критической температуры приведены в таблице 1, времени нагрева необогреваемой поверхности железобетонной плиты на  $140 \text{ °С}$  – таблице 2. В крайней правой колонке приведено отношение времени достижения критической температуры при СТРП и УТРП.

Табл. № 1

Время прогрева железобетонной конструкции  
до критической температуры арматуры

$T_{кр}, \text{°С}$	Толщина железобетонной плиты, мм	Толщина защитного слоя арматуры, мм	Стандартный режим пожара S, сек	Углеводородный режим пожара H, сек	$K = \frac{H}{S}$
	80	20	2280	1140	0,50
	80	30	3540	2150	0,61
	80	40	4670	3300	0,71



$T_{кр},$ °C	Толщина железобетонной плиты, мм	Толщина защитного слоя арматуры, мм	Стандартный режим пожара S, сек	Углеродородный режим пожара H, сек	$K = \frac{H}{S}$
450	100	20	2280	1140	0,50
	100	30	3620	2160	0,60
	100	40	5150	3540	0,69
	120	20	2280	1140	0,50
	120	30	3640	2170	0,60
	120	40	5260	3590	0,68
	140	20	2280	1140	0,50
	140	30	3650	2170	0,59
	140	40	5280	3600	0,68
	160	20	2280	1140	0,50
	160	30	3650	2170	0,59
	160	40	5300	3600	0,68
	200	20	2280	1140	0,50
	200	30	3640	2170	0,60
200	40	5300	3600	0,68	
500	80	20	2740	1380	0,50
	80	30	4140	2610	0,63
	80	40	5330	3850	0,72
	100	20	2760	1380	0,50
	100	30	4320	2640	0,61
	100	40	6020	4320	0,72
	120	20	2760	1350	0,49
	120	30	4380	2660	0,61
	120	40	6280	4420	0,70
	140	20	2760	1380	0,50
	140	30	4380	2660	0,61
	140	40	6340	4440	0,70
	160	20	2760	1380	0,50
	160	30	4380	2660	0,61
	160	40	6360	4440	0,70
	200	20	2760	1380	0,50
	200	30	4380	2660	0,61
	200	40	6360	4440	0,70
550	80	20	3290	1680	0,51
	80	30	4810	3080	0,64
	80	40	6060	4490	0,74
	100	20	3320	1680	0,51
	100	30	5180	3270	0,63
	100	40	6960	5200	0,75
	120	20	3330	1680	0,50
	120	30	5260	3290	0,63
	120	40	7440	5460	0,73
	140	20	3330	1680	0,50
	140	30	5280	3290	0,62
	140	40	7590	5520	0,73
	160	20	3330	1680	0,50
	160	30	5280	3290	0,62
	160	40	7620	5560	0,73

$T_{кр},$ °C	Толщина железобетонной плиты, мм	Толщина защитного слоя арматуры, мм	Стандартный режим пожара S, сек	Углеродородный режим пожара H, сек	$K = \frac{H}{S}$
	200	20	3330	1680	0,50
	200	30	5280	3290	0,62
	200	40	7650	5560	0,73
600	80	20	3930	2060	0,52
	80	30	5570	3780	0,68
	80	40	6900	5210	0,76
	100	20	4020	2060	0,51
	100	30	6120	4080	0,67
	100	40	8040	6200	0,77
	120	20	4030	2020	0,50
	120	30	6330	4130	0,65
	120	40	8760	6780	0,77
	140	20	4040	2060	0,51
	140	30	6360	4140	0,65
	140	40	9060	6960	0,77
	160	20	4040	2060	0,51
	160	30	6390	4140	0,65
	160	40	9150	7020	0,77
	200	20	4040	2060	0,51
	200	30	6390	4140	0,65
200	40	9180	7020	0,76	

Как можно видеть из результатов проведенных расчетов, при расчёте времени прогрева арматуры до критической температуры соотношение для СТРП и УТРП меняется от 0,49 до 0,77. Значение 0,6 находится практически посередине указанного интервала. Следовательно, при проведении предварительных оценок предела огнестойкости железобетонных плит по несущей способности по прогреву арматуры, предлагаемым соотношением пользоваться можно.

Таблица № 2

Время нагрева необогреваемой поверхности  
железобетонной плиты на 140 °C

Толщина железобетонной плиты, мм	Стандартный режим пожара S, сек	Углеродородный режим пожара H, сек	$K = \frac{H}{S}$
80	3300	2590	0,78
100	4770	3920	0,82
120	6510	5400	0,83
140	8520	7440	0,87
160	10800	9630	0,89
200	16140	14880	0,92

При расчёте нагрева необогреваемой поверхности железобетонной плиты на 140 °С соотношение для СТРП и УТРП меняется от 0,78 до 0,92. Применение значения коэффициента  $K$ , равного 0,6, даст систематический существенно заниженный результат предела огнестойкости железобетонной плиты по теплоизолирующей способности при воздействии УТРП.

После проведения оценки с помощью коэффициента пропорциональности видится необходимость проведения поверочного расчёта конструкции, испытанной при СТРП, и при совпадении полученных результатов, расчёт конструкции при УТРП. Следует также отметить отсутствие критериев оценки хрупкого разрушения бетона при воздействии УТРП, что может сделать некорректными попытки оценки пределов огнестойкости железобетонной конструкции при УТРП расчётно-аналитическим методами.

### Литература

1. Актерский Ю.Е., Лимонов Б.С., Шидловский Г.Л., Дали Ф.А. Устойчивость зданий и сооружений при пожаре: учебное пособие. – СПб.: Издательство ООО «НПО ПБ АС», 2019. – 280 с.
2. Дали Ф.А., Джафаров Э.А., Столяров С.О., Куянов А.В. Проблемные вопросы обеспечения требуемых пределов огнестойкости объектов защиты // Пожарная безопасность объектов капитального строительства: нормативы, проектирование, устройство и эксплуатация. сборник статей научно-технической конференции. 2021. С. 52-54.
3. Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н. Взаимосвязь величин температуры строительных конструкций при стандартном и углеводородном температурных режимах пожара. Пожарная безопасность 2017 №2 С. 46-49.

4. Shebeko Y.N., Shebeko A.Y. Conditions of fire and explosion safety at a determination of operation parameters of industrial facilities. Science and Technology of Energetic Material. - 2011. - Vol. 72, No. 2. - P. 57-61.
5. Yang Y., Fu F. Fire resistance of steel beam to square CFST column composite joints using RC slabs: Experiments and numerical studies Fire Safety Journal. - 2019. - Vol. 104. - P. 90-108.
6. Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара. Пожарная безопасность 2019 №28 С. 29-34.
7. Хасанов И. Р., Голованов В. И. Обеспечение огнестойкости несущих строительных конструкций // Юбилейный сборник трудов ФГБУ ВНИИПО МЧС России. - М.: ВНИИПО, 2012. - С. 81-101.
8. Белолипецкая В.А., Кривошапов А.М., Весова Л.М. Особенности применения различных звукоизолирующих материалов в монолитном строительстве. Инженерный вестник Дона, 2022, №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7635](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7635)
9. Данилов А.И. Управление поведением несущих конструкций с применением упругоподатливых соединений // Инженерный вестник Дона, 2022, №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7643](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7643)
10. McGrattan K. B., McDermott R. J., Weinschenk C. G., Forney G. P. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide (version 6.1) / NIST Special Publication-1018. - Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2013. p. 320.

### References

1. Akterskiy Y.Y., Limonov B.S., Shidlovskiy G.L., Dali F.A. Ustoychivost' zdaniy i sooruzheniy pri pozhare: uchebnoye posobiye [Sustainability of buildings and structures in case of fire]. SPb.: Izdatel'stvo OOO «NPO PB AS», 2019. pp. 280.

2. Dali F.A., Dzhafarov E.A., Stolyarov S.O., Kuyanov A.V. Problemnyye voprosy obespecheniya trebuyemykh predelov ognestoykosti obyektov zashchity [Problematic issues of ensuring the required fire resistance limits of protection objects]. Pozharnaya bezopasnost' obyektov kapitalnogo stroitelstva: normativy, proyektirovaniye, ustroystvo i ekspluatatsiya. sbornik statey nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2021, pp. 52-54.
3. Shebeko A.J., Shebeko J.N. Pozharnaya bezopasnost' 2017 №2. pp. 46-49.
4. Shebeko Y. N., Shebeko A. Y. Science and Technology of Energetic Material. 2011.Vol. 72, No. 2. pp. 57-61.
5. Yang Y., Fu F.. Fire Safety Journal. 2019. Vol. 104. pp. 90-108.
6. Shebeko A.J., Shebeko J.N. Pozharnaya bezopasnost' 2019 №28 pp. 29-34.
7. Hasanov I. R., Golovanov V. I Jubilejnyj sbornik trudov FGBU VNIPO MChS Rossii. M.: VNIPO, 2012. pp. 81-101.
8. Belolipeckaja V.A., Krivoschapov A.M., Vesova L.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7635](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7635)
9. Danilov A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7643](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7643)
10. McGrattan K. B., McDermott R. J., Weinschenk C. G., Forney G. P. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide (version 6.1), NIST Special Publication 1018. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2013. p. 320.