

Научная статья
УДК 536.1
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.24.17.017

Построение номограммы огнестойкости металлических конструкций на основе теплотехнического расчета

Людмила Владимировна Медведева¹
Николай Николаевич Романов²
Марина Александровна Симонова³

^{1,2}Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹<https://orcid.org/0000-0001-8891-0620>

²<https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>

³<https://orcid.org/0000-0003-2716-0349>

Автор ответственный за переписку: Медведева Людмила Владимировна, lavlmed@mail.ru

Аннотация. Предложен автоматизированный способ построения номограмм огнестойкости стальных конструкций на основе теплотехнического расчета при воздействии различных видов «стандартного режима пожара» для разных значений критической температуры и приведенной толщины.

Ключевые слова: предел огнестойкости, критическая температура, стандартный режим пожара, приведенная толщина, номограмма, металлическая конструкция, профиль

Для цитирования. Медведева Л.В., Романов Н.Н., Симонова М.А. Построение номограммы огнестойкости металлических конструкций на основе теплотехнического расчета // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 1 (28). С. 30-37. <http://10.34987/vestnik.sibpsa.2023.24.17.017>.

Construction of a nomogram of fire resistance of metal structures on the basis of thermal engineering calculation

Ludmila V. Medvedeva¹
Nicolai N. Romanov²
Marina A. Simonova³

^{1,2}St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint-Petersburg, Russia

³St. Petersburg Polytechnical University of Petr's Grate, Saint-Petersburg, Russia

¹<https://orcid.org/0000-0001-8891-0620>

²<https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>

³<https://orcid.org/0000-0003-2716-0349>

Corresponding author: Ludmila V. Medvedeva, lavlmed@mail.ru

Abstract. An automated method of constructing nomograms of fire resistance of steel structures on the basis of thermal engineering calculation under the influence of different types of "standard fire mode" for different values of critical temperature and reduced thickness has been proposed.

Key words: предел огнестойкости, критическая температура, стандартный режим пожара, приведенная толщина, номограмма, металлическая конструкция, профиль

For citation: Medvedeva L.V., Romanov N.N., Simonova M.A. Construction of a nomogram of fire resistance of metal structures on the basis of thermal engineering calculation // Siberian Fire and Rescue Bulletin 2023. № 1 (28). p. 30-37. (In Russ.) [http: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.24.17.017](http://10.34987/vestnik.sibpsa.2023.24.17.017).

На стадии проектировании строительных конструкций различного функционального назначения чрезвычайную значимость имеют результаты расчета огнестойкости несущих элементов. Однако получение достоверных результатов инженерного расчета осложняется следующими причинами:

- трудоемкостью теоретического алгоритма расчета;
- разнообразием металлических профилей современных строительных конструкций [1-7];
- зависимостью теплофизических свойств несущих металлических элементов конструкций и систем огнезащиты от температуры [8].

Исходя из этого, использование инженерных методов расчетов, основанных на простых расчетных формулах не позволит получить необходимые для практики результаты с требуемой точностью.

Одним из вариантов решения указанной проблемы, особенно, в условиях, при которых проведение огневых испытаний становится невозможным, является расчет характеристик огнестойкости несущих элементов на основе численного моделирования теплофизических процессов в строительной конструкции. Следует отметить, что расчетный метод более экономичен и дает возможность оперативной проверки различных вариантов решения [9].

В основе этого расчетного метода лежит решение двух задач: статической (прочностной) и теплотехнической.

Основным результатом решения статической (прочностной) задачи является расчет критической температуры ($t_{кр}$), при которой сопротивление несущего металлического элемента нагрузке прекращается. Исходными данными решения статической задачи являются величина нормативной нагрузки, а также условия использования, физические и геометрические характеристики металлического элемента (марка стали, вид профиля, геометрия, способ крепления) [10].

Результатом решения теплотехнической задачи является расчет режима прогрева несущего элемента конструкции, а результатом оперативной оценки предела огнестойкости – определение времени прогрева элемента до критической температуры.

На рис. 1 представлен принципиальный алгоритм оперативной оценки предела огнестойкости.



Рис.1 Принципиальный алгоритм оперативной оценки предела огнестойкости

Среднеобъемная температура прогрева элемента при огневом воздействии в стандартном («целлюлозном») температурном режиме [4]:

$$t_f(\tau) = 345 \cdot \text{Lg}(8 \cdot \tau + 1) + t_0,$$

где t_0 – начальная температура, °С.

τ – текущее время, мин;

Следует отметить, что на практике возникает необходимость учета особенностей пожара, обусловленных существенными расхождениями со стандартным температурным режимом. В этих случаях для оценки пределов огнестойкости несущих элементов строительных конструкций используют альтернативные температурные режимы:

- углеводородный (пожары с высокой скоростью распространения и высокой температурой);
- наружный (требования к конструкциям в здании более высокие, чем требования к строительной конструкции здания);
- тлеющий (пожарную нагрузку составляют материалы, которые поддерживают тлеющий режим).

Уравнения для расчета среднеобъемной температуры продуктов горения в альтернативных температурных режимах представлены в таблице 1 [11].

Уравнения нестационарной теплопроводности для металлической конструкции (твёрдого тела) без огнезащиты и с огнезащитой представлены в табл. 2.

Табл. 1. Уравнения для расчета среднеобъемной температуры продуктов горения в альтернативных температурных режимах

Вид (условия)	Уравнения
Углеводородный	$t_f(\tau) = 1080 \cdot [1 - 0.325 \cdot e^{-0.167\tau} - 0.675 \cdot e^{-2.5\tau}] + t_0$
Наружный	$t_f(\tau) = 660 \cdot [1 - 0.687 \cdot e^{-0.32\tau} - 0.313 \cdot e^{-3.8\tau}] + t_0$
Тлеющий	$0 < \tau \leq 21 \quad t_f(\tau) = 154 \cdot \tau^{0.25} + t_0;$ $\tau > 21 \quad t_f(\tau) = 345 \cdot \text{Lg}[8 \cdot (\tau - 20) + 1] + t_0.$

Табл. 2. Уравнения нестационарной теплопроводности для металлической конструкции (незащищенной и с огнезащитой)

металлическая конструкция	
без огнезащиты	с огнезащитой
$\alpha(t) \cdot \rho \cdot \delta_{np} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha(\tau) \cdot [t_f(\tau) - t(\tau)]$	$c(t) \cdot \rho \cdot \delta_{np} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{t_f(\tau) - t(\tau)}{R(\tau)}$
Здесь: $R(\tau) = \frac{1}{\alpha(\tau)} + R_2(t); \quad R_2(t) = \delta_2 / \lambda_2(t); \quad t_f(\tau) = 345 \cdot \text{Lg}(8 \cdot \tau + 1) + t_0; \quad \delta_{np} = S/U;$	
$\alpha(\tau) = 29 + 5,67 \cdot \varepsilon_{np} \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_f(\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T(\tau)}{100} \right)^4}{T_f(\tau) - T(\tau)} \right]; \quad \varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$	

В формулах табл. 2:

$R(\tau)$ – термическое сопротивление между греющей средой и металлической конструкцией;

$\alpha(\tau)$ – коэффициент теплообмена между конструкцией и продуктами горения [12], Вт/(м²·°С);

$t_f(\tau)$ – среднеобъемная температура продуктов горения (значение зависит от вида стандартного температурного режима), °С;

$c(t), t(\tau)$ – соответственно теплоемкость материала (Дж/(кг·°C)) и температура металлической конструкции в момент времени τ , °C;

S, ρ, U – соответственно площадь поперечного сечения (м²), плотность материала (кг/м³), и обогреваемый периметр сечения металлической конструкции, м;

$\delta_z, \lambda_z(t)$ – соответственно толщина и коэффициент теплопроводности огнезащиты;

$T(\tau) = t(\tau) + 273$; $T_r(\tau) = t_r(\tau) + 273$ – температуры соответственно металлической конструкции и продуктов горения в момент времени τ ;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты соответственно греющей среды ($\varepsilon_1=0,85$); и обогреваемой поверхности конструкции.

На рис. 2 показаны кривые «температура-время» для стандартного и альтернативных температурных режимов пожара.

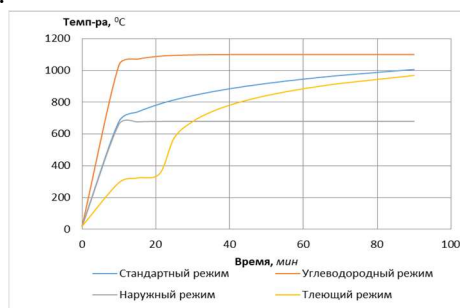


Рис.2. Графики зависимости «температура-время» различных температурных режимов

Теплотехнический расчет по представленной выше методике определения динамики изменения температуры нагрева металлической конструкции осуществляется с помощью метода конечных разностей по неявной схеме.

Применение данного метода возможно для любых неоднородных тел с переменными теплофизическими свойствами.

По полученной зависимости изменения температуры определяется время достижения прогрева τ до соответствующей критической температуры $t_{кр}$, то есть предел огнестойкости.

Для подтверждения валидности предложенного способа оценки огнестойкости стальных конструкций на основе теплотехнического расчета при воздействии различных видов «стандартного» режима используются эмпирические значения собственных пределов огнестойкости стальных конструкций, приведенных в таблице 1 [8].

В табл. 3 также приведены результаты численных экспериментов при различных значениях приведенной толщины $\delta_{пр}$ в диапазоне от 3 до 60 мм.

Табл. 3. Результаты расчетов собственного предела огнестойкости несущих элементов в эмпирических и численных экспериментах

Приведенная толщина металла, мм	Собственный предел огнестойкости, мин	
	Эмпирические данные	численный эксперимент
3	7	7
5	9	9
10	15	14
15	18	16
20	21	20
30	27	25
40	34	31
60	43	40

Расхождение расчетных значений и эмпирических данных с позиций теории погрешностей является допустимым (не более 10%), что позволяет сделать вывод

о валидности предложенного автоматизированного способа расчета изменения температуры металлической конструкции.

Таким образом, на основе полученных по представленной схеме при различных значениях приведенной толщины $\delta_{пр}$ металла температурных кривых прогрева, может быть построена номограмма огнестойкости металлических конструкций для конкретных значений $t_{кр}$.

Численная реализация представленного выше способа построения номограммы огнестойкости металлической конструкции была осуществлена с помощью модульного программного продукта, разработанного с применением Visual Basic for Applications в среде Microsoft Office Excel.

На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты использования разработанного программного продукта при построении номограммы огнестойкости незащищенных стальных конструкций.



Рис. 3. Огнестойкость незащищенных стальных конструкций при $t_{кр} = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Рис.4. Огнестойкость незащищенных стальных конструкций при $t_{кр} = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Стальные строительные конструкции имеют значения собственных пределов огнестойкости, которые не превышают 15 минут. Следовательно, на практике возникает задача обеспечения их огнезащиты, которую решают, в том числе с применением огнезащитных материалов и тонкослойных покрытий, что позволяет увеличить тепловое сопротивление конструкций к температурному воздействию. [13-15].

На рис. 5 и рис. 6 представлены результаты применения разработанного программного продукта для построения номограмм огнестойкости защищенных стальных конструкций. Огнезащиту стальных конструкций обеспечивает огнезащитный, базальтовый, рулонный, фольгированный материал, кашированным алюминиевой фольгой с одной стороны (МБОР-Ф), который выпускается толщиной 5, 8, 10, 13, 16, 18, 20, 23 и 26 мм.

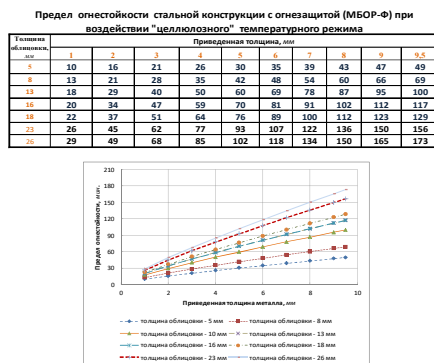


Рис. 5. Огнестойкость защищенных МБОР-Ф стальных конструкций при $t_{кр} = 500^{\circ}\text{C}$

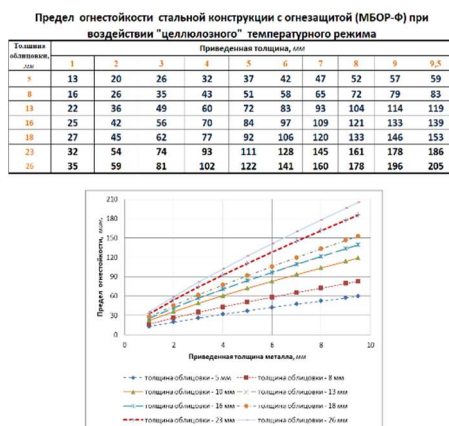


Рис. 6. Огнестойкость защищенных МБОР-Ф стальных конструкций при $t_{кр} = 600^{\circ}\text{C}$

Коэффициент теплопроводности материала МБОР-Ф является величиной, зависящей от температуры: при $t=20^{\circ}\text{C}$ – $\lambda=0.035$ Вт/(м·К); при $t=120^{\circ}\text{C}$ – $\lambda=0.052$ Вт/(м·К); при $t\geq 300^{\circ}\text{C}$ – $\lambda=0.09$ Вт/(м·К).

Таким образом, применение разработанного автоматизированного построения номограмм огнестойкости стальных конструкций на основе теплотехнического расчета, позволяет на стадии проектирования строительных конструкций при воздействии различных видов «стандартного режима пожара» для требуемого предела огнестойкости оперативно выбрать оптимальный профиль металлической конструкции при минимальной толщине огнезащиты (с известной зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры).

Список источников

1. ГОСТ ЕН 1363-1-2009. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 1. Общие требования. – 41 с.
2. Гравит М.В., Недрышкин О.В., Вайтицкий А.А., Шпакова А.М., Нигматуллина Д.Г. Пожарно-технические характеристики строительных материалов в европейских и российских нормативных документах. Проблемы гармонизации методов исследования и классификации. //Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 10. С. 16-29.
3. Еналеев Р.Ш. Огнестойкость элементов конструкций при пожарах на предприятиях нефтегазового комплекса / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш.Теляков, О.А. Тучкова, Л.Э. Осипова // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 11-12. – С.23 – 34.
4. Заикин, С.В. Огневые испытания огнезащиты для технологического оборудования объектов добычи, переработки, транспортировки и хранения нефти и газа [Текст] / С.В. Заикин, В.Л. Страхов, В.Л. Карпов // Материалы международной научн.-практ. конф.: Актуальные проблемы пожарной безопасности. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2008. – Ч. 1. – С. 210–214.

5. Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. Огнестойкость строительных конструкций. – М.: Спецтехника, 2001 г. – 482 с.
6. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 стр.
7. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций / под ред. Ю. А. Кошмарова. // М.: Информационно-издательский центр "ТИМР", 2000. – 433 с.
8. Гравит М.В., Дмитриев И.И. Огнестойкость легких стальных тонкостенных конструкций. Монография. – СПб.: Издательско-полиграфический центр Политехнического университета. – 2020. – 215 с.
9. Федоров А.В., Романов Н.Н., Кузьмин А.А., Минкин Д.А. Метод оценки эффективности огнезащиты стальных конструкций на объектах нефтегазового комплекса в условиях открытого пожара // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». - № 2 – 2017 г. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V92/6.pdf> (дата обращения: 01.02.2018)
10. Медведева Л.В., Романов Н.Н. Методика оперативной оценки огнестойкости стальных элементов несущих конструкций. //Безопасность жизнедеятельности. 2022. № 5 (257). С. 31-41
11. ГОСТ ЕН 1363-2-2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы. – 13 с.
12. Зайцев А.М., Бологов В.А. Численное моделирование прогрева строительных конструкций для определения коэффициента теплоотдачи при пожарах. Вестник воронежского института ГПСМЧС России. № 1 2015 с.19-26.
13. ГОСТ Р 53295-2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071913> (дата обращения: 20.02.2018). – 30 с.
14. Дринберг А.С., Гравит М.В., Зыбина О.А. Огнезащита конструкций интумесцентными лакокрасочными материалами при углеводородном режиме пожара. //Лакокрасочные материалы и их применение. 2018. № 1-2. С. 44-49.
15. Пожнин А.П., Шиняева Т.Б. Огнезащитные покрытия для металлических конструкций на основе минерального сырья // Труды ЛИСИ (Строительные материалы и изделия из техногенного сырья) Л.: ЛИСИ, 1991. – 25 с.

List of sources

1. GOST EN 1363-1-2009. Konstrukcii stroitel'ny'e. Ispytaniya na ognestojkost'. Chast' 1. Obshhie trebovaniya. – 41s.
2. Gravit M.V., Nedry'shkin O.V., Vajtczkij A.A., Shpakova A.M., Nigmatullina D.G. Pozharno-texnicheskie karakteristiki stroitel'ny'x materialov v evropejskix i rossijskix normativny'x dokumentax. Problemy' garmonizacii metodov issledovaniya i klassifikacii. //Pozharovzry'vobezопасnost'. 2016. T. 25. № 10. S. 16-29.
3. Enaleev R.Sh. Ognestojkost' elementov konstrukcij pri pozharax na predpriyatiyax neftegazovogo kompleksa / R.Sh. Enaleev, E'.Sh. Telyakov, O.A. Tuchkova, L.E'. Osipova // Izvestiya VUZov. Problemy' e'nergetiki. – 2010. – № 11-12. – S.23 – 34.
4. Zaikin, S.V. Ognevy'e ispy'taniya ognezashhity' dlya texnologicheskogo oborudovaniya ob'ektov doby'chi, pererabotki, transportirovki i xraneniya nefti i gaza [Tekst] / S.V. Zaikin, V.L. Straxov, V.L. Karpov // Materialy' mezhdunarodnoj nauchn.-prakt. konf.: Aktual'ny'e problemy' pozharnoj bezопасnosti. – М.: VNIPO MChS Rossii, 2008. – Ch. 1. – S. 210–214.
5. Mosalkov I.L., Plyusnina G.F., Frolov A.Yu. Ognestojkost' stroitel'ny'x konstrukcij. – М.: Spechtexnika, 2001 g. – 482 s.
6. Rojtmán V.M. Inzhenerny'e resheniya po ocenke ognestojkosti proektiruemy'x i rekonstruiruemy'x zdaniy. – Associaciya «Pozharnaya bezопасnost' i nauka», 2001. – 382 s.

7. Straxov V.L., Krutov A.M., Davy`dkin N.F. Ognезashhita stroitel`ny`x konstrukcij / pod red. Yu. A. Koshmarova. // M.: Informacionno-izdatel`skij centr "TIMR", 2000. – 433 s.
8. Gravit M.V., Dmitriev I.I. Ognestojkost` legkix stal`ny`x tonkostenny`x konstrukcij. Monografiya. – SPb.: Izdatel`sko-poligraficheskij centr Politexnicheskogo universiteta. –2020. – 215 s.
9. Fedorov A.V., Romanov N.N., Kuz`min A.A., Minkin D.A. Metod ocenki e`ffektivnosti ognезashhity` stal`ny`x konstrukcij na ob`ektax neftegazovogo kompleksa v usloviyax otkry`togo pozhara // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii». - № 2 – 2017 g. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V92/6.pdf> (data obrashheniya: 01.02.2018)
10. Medvedeva L.V., Romanov N.N. Metodika operativnoj ocenki ognestojkosti stal`ny`x e`lementov nesushhix konstrukcij. //Bezopasnost` zhiznedeyatel`nosti. 2022. № 5 (257). S. 31-41
11. GOST EN 1363-2-2014. Konstrukcii stroitel`ny`e. Ispy`taniya na ognestojkost`. Chast` 2. Al`ternativny`e i dopolnitel`ny`e metody`. – 13 s.
12. Zajcev A.M., Bologov V.A. Chislennoe modelirovanie progreva stroitel`ny`x konstrukcij dlya opredeleniya koe`fficienta teplootdachi pri pozharax. Vestnik voronezhskogo instituta GPSMChS Rossii. № 1 2015 s.19-26.
13. GOST R 53295-2009 «Sredstva ognезashhity` dlya stal`ny`x konstrukcij. Obshhie trebovaniya. Metod opredeleniya ognезashhitnoj e`ffektivnosti». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071913> (data obrashheniya: 20.02.2018). – 30 s.
14. Drinberg A.S., Gravit M.V., Zy`bina O.A. Ognезashhita konstrukcij intumescenny`mi lakokrasochny`mi materialami pri uglevodorodnom rezhime pozhara.//Lakokrasochny`e materialy` i ix primenenie. 2018. № 1-2. S. 44-49.
15. Pozhnin A.P., Shinyaeva T.B. Ognезashhitny`e pokry`tiya dlya metallicheskih konstrukcij na osnove mineral`nogo sy`r`ya // Trudy` LISI (Stroitel`ny`e materialy` i izdeliya iz texnogenogo sy`r`ya) L.: LISI, 1991. – 25 s.

Информация об авторах

Л.В. Медведева – доктор педагогических наук, профессор

Н.Н. Романов – кандидат технических наук, доцент

М.А. Симонова – кандидат технических наук, доцент

Information about the author

L.V. Medvedeva – Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science)
in Pedagogic Sciences, Professor

N.N. Romanov – Ph.D. of Engineering Sciences, docent

M. A. Simonova – Ph.D. of Engineering Sciences, docent

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.01.2023; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 21.02.2023.

The article was submitted 23.01.2023; approved after reviewing 15.02.2023; accepted for publication 21.02.2023.