

В. И. Голованов, Т. В. Шкутова

(Академия ГПС МЧС России; e-mail: tanyushkashkutova@mail.ru)

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ СИЛИКАТНЫХ ПЛИТ PROMATECT-H В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

На основании результатов огневых испытаний и решения обратной задачи теплопроводности были получены зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости новых огнезащитных плит Promatect-H в диапазоне температур от 20-500 °C.

Ключевые слова: огнезащита, теплопроводность, теплоёмкость, плитные материалы, стальные конструкции, стандартный температурный режим.

Стальные несущие конструкции находят широкое применение при возведении жилых, общественных и производственных зданий и сооружений. Эти конструкции надёжны, обладают высокими прочностными качествами, обеспечивают высокие темпы изготовления и возведения, благодаря высокой прочности они экономичны по затрате материала, транспортабельны и долговечны. Вследствие этого потребление металла в народном хозяйстве очень велико и возрастает вместе с ростом строительства.

Однако во время пожара в результате нагрева стальных конструкций несущая способность резко снижается и происходит их обрушение. Применение стальных конструкций, выполненных без учёта требований огнестойкости, может привести к человеческим жертвам и значительному материальному ущербу.

Обрушение несущих стальных конструкций при воздействии на них температурного режима "стандартного пожара" может происходить через 10-15 мин после начала пожара [1].

Для достижения требуемой огнестойкости несущих стальных конструкций, участвующих в обеспечении общей устойчивости зданий, решающую роль играет огнезащита этих конструкций.

Увеличить пределы огнестойкости стальных конструкций до нормируемых значений возможно применяя теплоизоляцию металла плитными материалами. Этот способ огнезащиты позволяет проводить работы без использования мокрых процессов, обеспечивать огнезащиту при отрицательных температурах и проводить работы не только при возведении новых объектов, но и при реконструкции производственных зданий, не нарушая технологического процесса.

Новым, ранее не изученным эффективным огнезащитным плитным материалом является плита Promatect-H – силикатная плита на цементном вяжущем, влагостойкая, крупноформатная и обладающая хорошими прочностными характеристиками.

При разработке проекта огнезащиты из плит Promatect-H с целью обеспечения нормируемого предела огнестойкости стальных конструкций необходимо проведение расчёта оптимальной толщины огнезащитного материала и решение теплотехнической задачи. Для расчёта прогрева стального элемента необходимо использовать данные по изменению коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости огнезащиты при температурном режиме стандартного пожара. Значения теплофизических характеристик стали при нагреве получены более ранними исследованиями и определяются из справочной литературы.

Материалы, используемые для огнезащиты стальных конструкций, должны обладать хорошей теплоизоляционной способностью, которая оценивается коэффициентом температуропроводности:

$$\bar{\alpha} = \frac{\lambda_t}{\rho_0 c_t}, \text{ м}^2/\text{с},$$

где λ_t – теплопроводность, Вт/м·К;

c_t – теплоёмкость, Дж/кг·К;

ρ_0 – плотность, кг/м³.

При нагреве до высоких температур коэффициент температуропроводности огнезащитных материалов изменяется в зависимости от их состава и температуры.

Одним из основных этапов определения пределов огнестойкости конструкций с огнезащитными материалами является этап определения их **теплофизических характеристик (ТФХ)**.

Традиционные методы определения ТФХ материалов (методы регулярного и монотонного нагревов и др.), как правило, не позволяют найти зависимости ТФХ теплоизоляционных материалов в широком диапазоне температур от 20 до 500 °С и более. Согласно ГОСТ Р 54855-2011¹, эти методы действительны для расчётных температур окружающей среды от 0 до + 60 °С. В связи с этим, для определения ТФХ применяемых огнезащитных материалов используется метод решения обратной задачи теплопроводности, устанавливающий связь между пространственными изменениями температуры опытного образца и временем воздействия на него источника теплоты. Решение обратной задачи теплопроводности осуществляется приближённо методом подбора. Так как температурное поле тела зависит от его теплофизических характеристик, то по известному изменению температуры в одной или нескольких точках нагреваемого материала можно рассчитать его коэффициенты теплопроводности и теплоёмкости.

Аналитические зависимости изменения коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости плитных материалов при нагреве, используемых для огнезащиты стальных конструкций, позволяют проводить дальнейший расчёт по определению минимальной толщины огнезащитного покрытия в зависимости от требуемого предела огнестойкости конструкции.

¹ ГОСТ Р 54855-2011 "Материалы и изделия строительные. Определение расчётных значений теплофизических характеристик"

Исследования по определению теплофизических характеристик материала при нагреве обычно проводятся после проведения обязательной сертификации огнезащитного материала по ГОСТ Р 53295-2009² и идентификации материала методами термического анализа.

Целью исследования авторов является определение теплофизических характеристик огнезащитного покрытия Promatect-H при нагреве. Теплофизические характеристики плитных материалов получены на основе огневых испытаний и решения обратной задачи теплопроводности.

Для получения экспериментальных показателей изменения температуры на необогреваемой поверхности образца были проведены огневые испытания [2] согласно ГОСТ Р 53295-2009². Для проведения испытаний использовались: огневая печь, опытный образец с силикатной плитой Promatect-H, измерительные устройства, оборудование для фотосъёмок. В огневой камере испытательной печи поддерживался стандартный температурный режим, характеризуемый следующей зависимостью:

$$t_b = 345 \cdot \lg(0,133\tau + 1) + t_n,$$

где t_b – температура "стандартного режима" в огневой камере, K;

t_n – начальная температура в огневой камере, K;

τ – время, с.

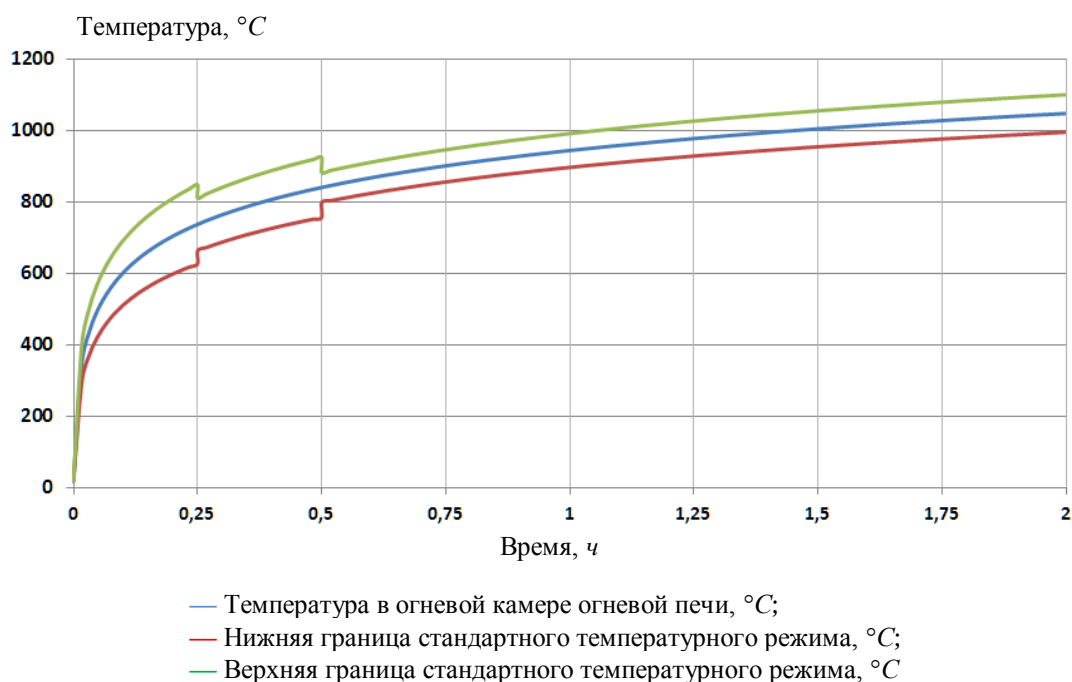


Рис. 1. Стандартная температурная кривая

Образец для испытания – стальная пластина размером 600×600×5 мм, огнезащищённая плитой Promatect-H толщиной 15 мм в два слоя (общая толщина 30 мм) (рис. 2). На поверхности стальной пластины установлены три термодатчики (рис. 3).

² ГОСТ 53295-2009 " Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности";

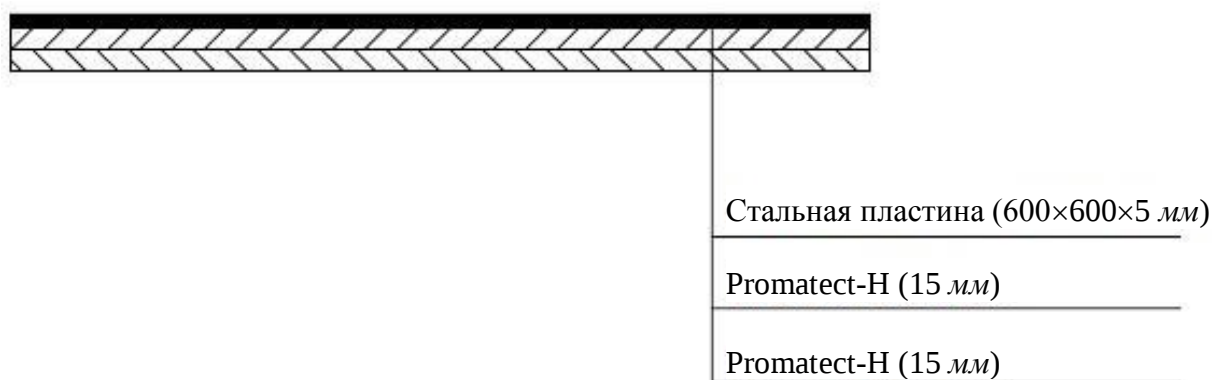


Рис. 2. Схема устройства конструктивной огнезащиты стальной пластины

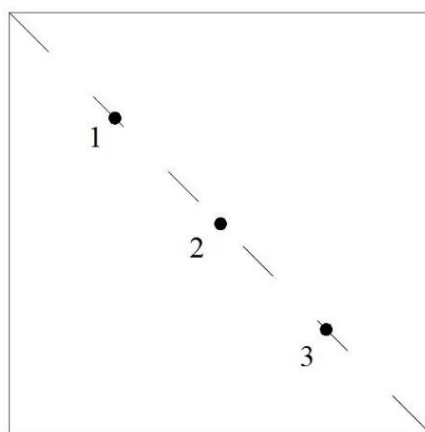


Рис. 3. Схема расстановки термопар на стальной пластине

С использованием комплекса вычислительных программ "КОКОН"³, предназначенного для расчёта теплового состояния произвольных двумерных конструкций, были получены расчётные кривые прогрева стальной пластины.

Для расчёта температурных полей в произвольных конструкциях, подверженных воздействию любых тепловых нагрузок, в программном комплексе используется метод конечных элементов. В его основе лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций [3, 4].

В математическое описание нагрева различных конструкций входят: дифференциальное уравнение, описывающее распространение тепла в твёрдом теле с известными теплофизическими свойствами, а также начальные и граничные условия. Будем считать, что материалы обладают изотропными теплофизическими свойствами и внутренние источники отсутствуют.

Для расчёта прогрева стальной пластины с облицовкой [4] используется уравнение Фурье для одномерного температурного поля:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

где x – координата сечения, m .

³ разработан в ВНИИПО МЧС России

При стандартном температурном режиме пожара изменение коэффициента теплопередачи α от нагревающей среды к поверхности конструкции вычисляется по формуле:

$$\alpha = 29 + 5,67 S_{\text{пр}} \frac{\left(\frac{t_{\text{в}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_0}{100}\right)^4}{t_{\text{в}} - t_0}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $S_{\text{пр}}$ – приведённая степень черноты системы "огневая камера – поверхность конструкции";

$t_{\text{в}}$ – температура "стандартного режима", К;

t_0 – температура на обогреваемой поверхности образца, К;

Исходные параметры: степень черноты – 0,86; влажность – 5 %; плотность плиты Promatect-H – 870 кг/м³; теплопроводность, заявленная производителем при 20 °С – 0,175 Вт/м·К.

В рассматриваемом авторами случае объект (стальная пластина с огнезащитной плитой) разбивался на 66 конечных элементов в виде сетки, имеющей 84 узла (рис. 4), в каждом из которых рассчитывались значения температуры в зависимости от времени.



Рис. 4. Конечно-элементная конструкция в программе "КОКОН"

За счёт корректировки коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости расчётные кривые прогрева сопоставлялись с экспериментальными (рис. 5). Изменения коэффициентов корректируются с целью, чтобы расчётные температуры прогрева не отличались от экспериментальных более чем на 15 %.

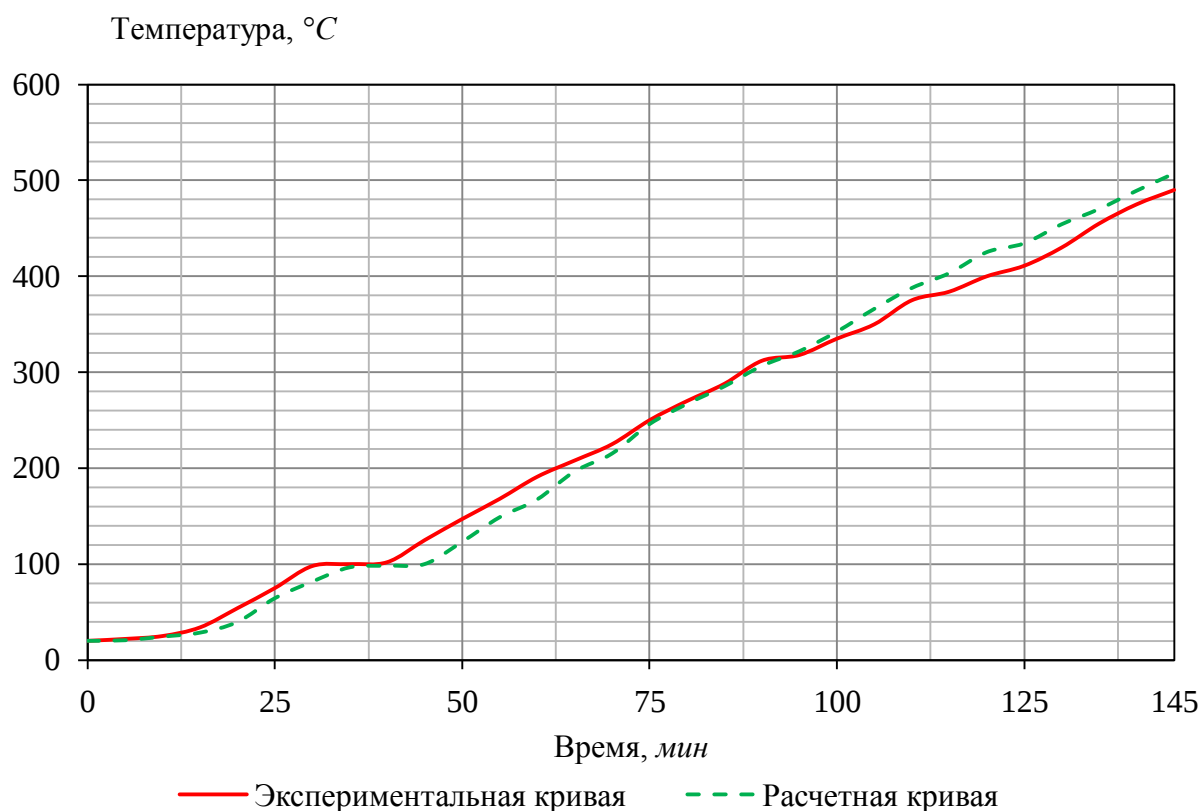


Рис. 5. Расчётные и экспериментальные кривые прогрева стальной пластины с огнезащитой плитой Promatect-H

Анализ экспериментальных зависимостей температуры от времени в местах установки термопар показывает наличие горизонтальных участков в диапазоне 90-100 °C. Это объясняется дегидратацией и испарением содержащейся в силикатной плите физически связанной влаги.

Для определения коэффициентов теплопроводности λ_t и теплоёмкости C_t использовались прямолинейные зависимости от температуры t :

$$\lambda_t = A + B t;$$

$$C_t = C + D t.$$

Начальные коэффициенты теплопроводности A и теплоёмкости C , соответствующие объёмному весу огнезащитной плиты, получены из документации фирмы-производителя. При наличии экспериментальных данных путём решения обратной задачи теплопроводности с использованием ранее разработанной компьютерной программы были определены теплофизические характеристики (коэффициенты теплопроводности и теплоёмкости) плитного материала Promatect-H при повышенных температурах.

По результатам проделанной авторами работы были получены следующие зависимости:

$$\lambda_t = 0,154 + 0,000072 t;$$

$$c_t = 1585 + 2,5 t.$$

По результатам численного решения обратной задачи теплопроводности, сформулированной выше, установлено, что вся совокупность полученных экспериментальных данных по изменению во времени температуры на поверхности исследуемого образца аппроксимируется расчётными зависимостями с точностью не ниже 15 %. Сходимость расчётных и экспериментальных данных говорит о достоверности полученных результатов и позволяет использовать зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости для решения теплотехнической части расчёта огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из силикатных плит Promatect-H.

Теплофизические характеристики облицовки, полученные в результате анализа экспериментальных данных, были использованы для построения зависимостей (номограмм) огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из плит Promatect-H при различных толщинах облицовки (рис. 6).

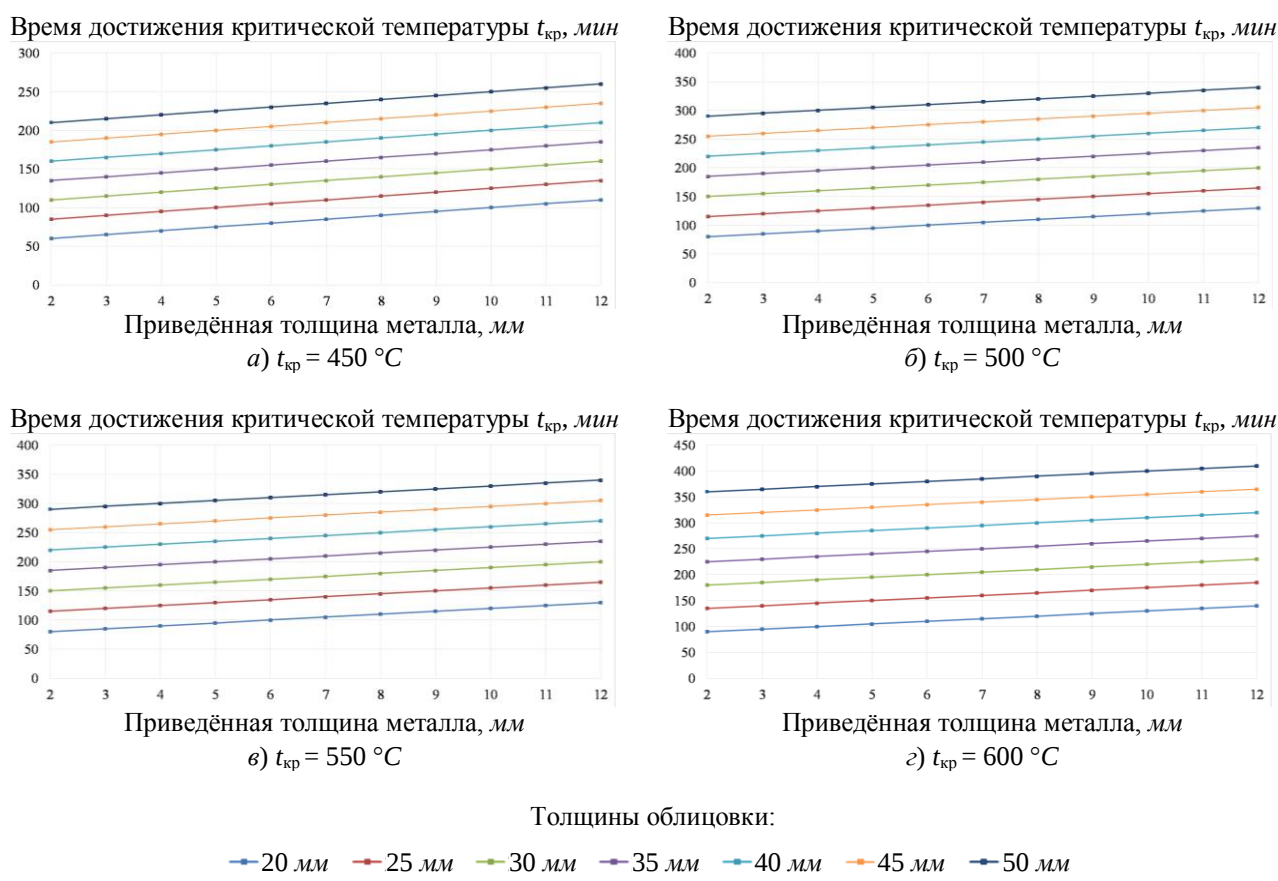


Рис. 6. Огнестойкость стальных конструкций с конструктивной огнезащитой из плит Promatect-H при стандартном температурном режиме

Построенные номограммы в сочетании с расчётным методом позволяют провести оценку огнестойкости стальных конструкций любой конфигурации при различных толщинах облицовок из плит, а также использоваться при решении обратных задач.

Выводы

Получены новые данные по изменению коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости огнезащитного материала Promatect-H при температурном режиме стандартного пожара.

Полученные аналитические зависимости влияния нагрева на теплофизические характеристики материала Promatect-H позволяют проводить расчёты прогрева стальных конструкций с выбранным видом огнезащиты. Построенные номограммы огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из плит могут быть использованы при проектировании пассивных противопожарных систем на строительных объектах. Результаты поведённой авторами работы позволяют сократить расходы огнезащитного материала при устройстве облицовки и тем самым повысить экономическую эффективность огнезащиты данного типа.

Литература

1. Голованов В. И., Кузнецова Е. В. Эффективные средства огнезащиты для стальных и железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 82-90.
2. Отчёт об испытаниях на пожарную опасность "Испытания на огнестойкость стальных конструкций с огнезащитным покрытием "Promatect®-H" при стандартном температурном режиме. М.: ВНИИПО МЧС России, 2013. 19 с.
3. Фокин В. Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 131 с.
4. Яковлев А. И. Расчёт огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 144 с.
5. Хасанов И. Р., Гравит М. В., Косачев А. А., Пехотилов А. В., Павлов В. В. Гармонизация европейских и российских нормативных документов, устанавливающих общие требования к методам испытаний на огнестойкость строительных конструкций и применению температурных режимов, учитывающих реальные условия пожара // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 3. С. 49-57.
6. Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотилов А. В. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER T // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 11. С. 8-16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16.
7. Филимонов В. П. Тенденции развития рынка материалов для пассивной огнезащиты // Пожаровзрывобезопасность. 2013. № 4. С. 49-55. <https://cyberleninka.ru/article/v/tendentsii-razvitiya-rynka-materialov-dlya-passivnoy-ognezashchity>.

Материал поступил в редакцию 18 декабря 2017 г.

Для цитирования: Голованов В. И., Шкутова Т. В. Теплофизические характеристики огнезащитных силикатных плит Promatect-H в условиях высоких температур // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 2 (78). – 2018 – С. 10-18. DOI: 10.25257/TTS.2018.2.78.10-18.

V. I. Golovanov, T. V. Shkutova

THERMAL CHARACTERISTICS OF PROMATECT-H FIREPROOF SILICATE PLATES AT HIGH TEMPERATURES

A new efficient flame retardant plate material – Promatect-H plate (a Silicate plate for cement binder, water-resistant, large format and with good strength characteristics) is considered. The aim of this work was to determine the thermophysical characteristics of the above-described fire-retardant coating when heated from 20 to 500 °C. Thermophysical properties of the materials are obtained on the basis of fire tests and the solution of the inverse problem of heat conduction. To obtain the experimental indicators of temperature changes on the surface of a sample a fire test at the temperature range of "standard fire" was conducted. When using a complex of computer programs "KOKON" the calculated warm-up curves were determined. For the calculation of the finite element method is used. The obtained dependences of thermal conductivity and heat capacity with increasing temperature make it possible to calculate the heating of steel structures with the selected type of fire protection at standard temperature and to calculate the limit of fire resistance of bearing steel structures with this type of fire protection.

Key words: fire protection, thermal conductivity, heat capacity, plate materials, steel structures, standard temperature condition.

References

1. Golovanov V. I., Kuznetsova E. V. Effective Means of Fire Protection for Steel and Concrete Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo / Industrial and civil engineering*, 2015, no. 9, pp. 82-90 (in Russian).
2. *Ispytaniya na ognestojkost' stal'nyh konstrukcij s ognезashchitnym pokrytiem "Promatect®-H" pri standartnom temperatur-nom rezhime* [Fire resistance tests of steel structures with fire-retardant coating "Promatect®-H" under standard temperature conditions]. *Otchyot ob ispytaniyah na pozharную opasnost* [Test report on fire danger]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2013, 19 p.
3. Fokin V. G. *Metod konechnyh ehlementov v mekhanike deformiruемого tvyordogo tela* [The finite element method in the mechanics of a deformable solid body]. Samara, Samara State Technical University Publ., 2010, 131 p.
4. Yakovlev A. I. *Raschyot ognestojkosti stroitel'nyh konstrukcij* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow, Strojizdat Publ., 1988, 144 p.
5. Khasanov I.R., Gravit M.V., Kosachev A.A., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Harmonization of european and russian regulatory documents establishing general requirements for fire-resistance test methods of building constructions and the use of temperature curves that take into account real fire conditions. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 49-57 (in Russian).
6. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Fire protection of steel structures with slab material PYRO-SAFE AESTUVER T. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 11, pp. 8-16 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16.
7. Filimonov V. P. *Tendenciya razvitiya rynka materialov dlya passivnoj ognезashchity* [Tendency of development of the market of materials for passive fire protection]. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, no. 4, pp. 49-55. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/tendentsii-razvitiya-rynka-materialov-dlya-passivnoj-ognезashchity>.

For citation: Golovanov V. I., Shkutova T. V. Thermal characteristics of Promatect-H fireproof silicate plates at high temperatures. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti // Technology of technosphere safety*, vol. 2 (78), 2018, pp. 10-18 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2018.2.78.10-18.