

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-1.20>

УДК 614.841.332:624.94.014.2

ПРОГРЕВ СТЕРЖНЕВЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ЧАСТИЧНОЙ И ПОЛНОЙ ОГНЕЗАЩИТОЙ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОГНЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Олесиук Н.М.

Цель. На основе экспериментальных исследований и теоретических данных определить теплофизические характеристики вспучивающегося огнезащитного состава и оценить прогрев стержневых стальных конструкций с частичной (трехсторонней) и полной огнезащитой наружной поверхности в условиях воздействия высоких температур в сопоставлении с результатами огневых испытаний.

Методы. Экспериментальные исследования, моделирование в системе конечно-элементного анализа.

Результаты. На основе серии экспериментальных и теоретических исследований в системе конечно-элементного анализа ANSYS решена теплотехническая задача огнестойкости стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности. Экспериментальные исследования использованы для оценки эффективных значений теплофизических характеристик вспучивающегося состава (Sika Unitherm ASR) путем решения обратной задачи теплопроводности для расчетной конечно-элементной модели с использованием методов параметрической оптимизации. Полученные теплофизические характеристики позволили оценить прогрев стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности в условиях воздействия высоких температур и сопоставить с результатами огневых испытаний.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы для решения задач огнестойкости стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

Ключевые слова: огнестойкость, вспучивающаяся огнезащита, теплофизические характеристики, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, экспериментальные исследования, обратная задача теплопроводности, стандартный температурный режим, стальные конструкции, метод конечных элементов.

(Поступила в редакцию 5 февраля 2020 г.)

Введение

Огнестойкость – способность зданий, сооружений и строительных конструкций сохранять свои функции при пожаре. Основными задачами огнестойкости являются обеспечение эвакуации и спасение людей, обеспечение для прибывших подразделений безопасных условий для ликвидации пожара¹. Поэтому обеспечение требуемой огнестойкости конструкций – важная и актуальная задача.

Предел огнестойкости строительных конструкций является показателем, соответствующим интервалу времени от начала стандартного огневого воздействия до наступления одного из нормируемых для данной конструкции признаков предельных состояний². Предел огнестойкости строительных конструкций должен соответствовать нормативному значению, и, как правило, варьируется от 15 до 150 мин (с шагом 15 мин).

Стальные конструкции в настоящее время широко применяются при строительстве зданий, однако без применения огнезащиты их предел огнестойкости редко превышает

¹ Технический регламент Республики Беларусь. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность. – 4-е изд.: ТР 2009/013/ВУ. – Введ. 31.12.2009 г. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2015. – 28 с.

² СТБ 11.0.03-1995. Система стандартов пожарной безопасности. Пассивная противопожарная защита. Термины и определения. – Введ. 16.03.1995 г. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2010. – 25 с.

15 мин. Одним из наиболее распространенных способов огнезащиты стальных конструкций для обеспечения предела огнестойкости от 15 до 60 мин является нанесение вспучивающихся составов.

Принцип действия огнезащитных вспучивающихся составов основан на эффекте увеличения толщины исходного тонкого слоя (толщиной от 0,2 до 2,0 мм) до 65 раз [1–3]. Толщина защитного слоя увеличивается за счет интенсивных процессов пиролиза и коксования огнезащитного состава, создавая пористый термоизоляционный слой с относительно низкой теплопроводностью. Впоследствии пористый термоизоляционный слой может частично уменьшиться в процессе термической деструкции.

Оценка пределов огнестойкости стальных конструкций со вспучивающейся огнезащитой проводится в рамках стандартных испытаний. Однако ввиду сложности испытания стержневых несущих стальных конструкций в настоящее время их огнестойкость оценивается либо косвенными методами (оценкой огнезащитной эффективности средств по металлу), либо путем проведения модельных/натурных испытаний.

Оценка результатов экспериментальных исследований [3] показала наличие устойчивой взаимосвязи между толщиной исходной огнезащиты и огнестойкости стальной конструкции, поэтому актуальным направлением является разработка расчетных методов огнестойкости стальных строительных конструкций со вспучивающейся огнезащитой.

Подходы к расчету стальных строительных конструкций с огнезащитой или без нее изложены в нормативных документах Европейского союза, внесенных с 2010 г. в систему технического нормирования Республики Беларусь, так называемых Еврокодах^{3,4}. Согласно положениям Еврокодов оценка огнестойкости стальных конструкций может быть произведена общим и (или) упрощенным методами расчета. Общий метод расчета предполагает использование реалистичных моделей конструкций и теплового воздействия, в том числе с учетом нелинейных свойств. Упрощенный метод расчета предполагает использование готовых алгебраических решений для распространенных случаев.

Нередки ситуации, когда часть поверхности стальной конструкции вынужденно остается без огнезащиты ввиду сложности проведения технологических операций нанесения (восстановления) покрытия (рис. 1). В настоящее время отсутствуют систематизированные научные данные по огнестойкости таких конструкций, поэтому исследование огнестойкости стержневых стальных конструкций с частичной огнезащитой также является актуальным направлением.

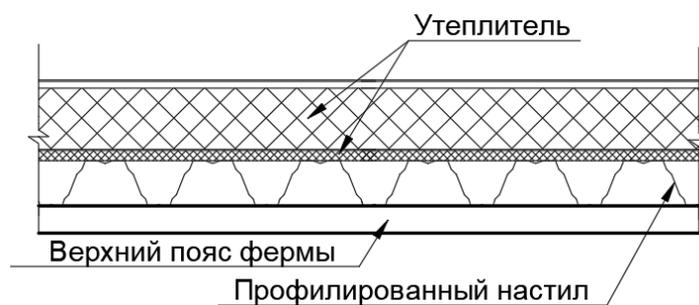


Рисунок 1. – Пример стержневой стальной конструкции с частичной огнезащитой поверхности

³ ТКП EN 1993-1-2-2009 (02250). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости. – Введ. 10.12.2009 г. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 70 с.

⁴ ТКП EN 1991-1-2-2009 (02250). Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-2. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости. – Введ. 10.12.2009 г. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 48 с.

В настоящей статье рассмотрены вопросы прогрева стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности в условиях воздействия высоких температур, соответствующих стандартной температурной зависимости пожара⁵. Такие исследования принято относить к теплотехнической задаче огнестойкости.

Теплотехническая задача огнестойкости решена на основе серии экспериментальных исследований, теоретических исследований в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Экспериментальные исследования использованы для оценки эффективных значений теплофизических характеристик вспучивающегося состава (Sika Unitherm ASR) путем решения обратной задачи теплопроводности для расчетной конечно-элементной модели с использованием методов параметрической оптимизации. Полученные теплофизические характеристики позволили оценить прогрев стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности в условиях воздействия высоких температур и сопоставить с результатами огневых испытаний.

Основная часть

Методика и результаты экспериментальных исследований. В качестве основы для разработки методики проведения экспериментальных исследований была использована методика оценки огнезащитной эффективности средства по металлу согласно СТБ 11.03.02⁶. В отличие от стандарта (в дополнение к стандарту) методика предусматривает:

– использование в качестве испытуемых образцов стальных труб квадратного сечения размерами 200 × 200 мм, толщиной 12 мм и размерами 80 × 80 мм, толщиной 4 мм по ГОСТ 30245⁷, при этом для сортамента размерами сечения 200 × 200 мм, толщиной 12 мм к испытаниям принимается один образец с частичной огнезащитой наружной поверхности (с трех сторон);

– схему размещения термоэлектрических преобразователей для испытуемых образцов стальных труб измерения температуры;

– порядок проведения измерений и длительность огневого воздействия на испытуемые образцы стальных труб (45 мин).

В остальном методика проведения экспериментальных исследований соответствовала СТБ 11.03.02⁸.

Использование в качестве испытуемых образцов стальных труб квадратного сечения по ГОСТ 30245⁹ обусловлено широким применением такого сортамента для стропильных конструкций в Республике Беларусь. При этом к испытаниям приняты как сечение с высокой приведенной толщиной металла (200 × 200 мм, толщина 12 мм), так и сечение с низкой приведенной толщиной металла (80 × 80 мм, толщина 4 мм). Параметры испытуемых образцов

⁵ ГОСТ 30247.0. Межгосударственный стандарт. Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. – Введ. 01.01.1996 г. – ИПК Издательство стандартов, 2003. – 13 с.

⁶ СТБ 11.03.02-2010. Система стандартов пожарной безопасности. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 20.10.2010 г. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2010. – 40 с.

⁷ ГОСТ 30245-2012. Межгосударственный стандарт. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. – Введ. 01.01.2016 г. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2014. – 38 с.

⁸ СТБ 11.03.02-2010. Система стандартов пожарной безопасности. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 20.10.2010 г. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2010. – 40 с.

⁹ ГОСТ 30245-2012. Межгосударственный стандарт. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. – Введ. 01.01.2016 г. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2014. – 38 с.

указаны в таблице 1. Для каждого вида сортамента было проведено одно испытание, одновременно для образца с полной огнезащитой и образца с частичной огнезащитой наружной поверхности (с трех сторон).

Таблица 1. – Параметры испытываемых образцов

Номер образца	Размеры сечения / толщина стенки, мм	Способ огнезащиты	Толщина сухого слоя огнезащитного состава ¹⁰ , мм
1	200 × 200 / 12	С четырех сторон	0,216
2	200 × 200 / 12	С трех сторон	0,216
3	80 × 80 / 4	С четырех сторон	0,610

В соответствии со СТБ 11.03.02 высота каждого образца составляла 1700 мм. Для предотвращения теплообмена между газовой средой в огневой печи и внутренней полостью конструкций сверху образца была приварена стальная пластина толщиной, соответствующей испытываемому сортаменту. В нижней части образца для обеспечения устойчивости по двум сторонам были приварены равнополочные уголки размером 50 × 50 мм, толщиной 4 мм по ГОСТ 8509¹¹ и длиной 600 мм.

Схема размещения термоэлектрических преобразователей для испытываемых образцов представлена на рисунке 2. Измерения проводили в среднем сечении по высоте модельной конструкции 4 термоэлектрическими преобразователями на всех внутренних поверхностях каждого образца.

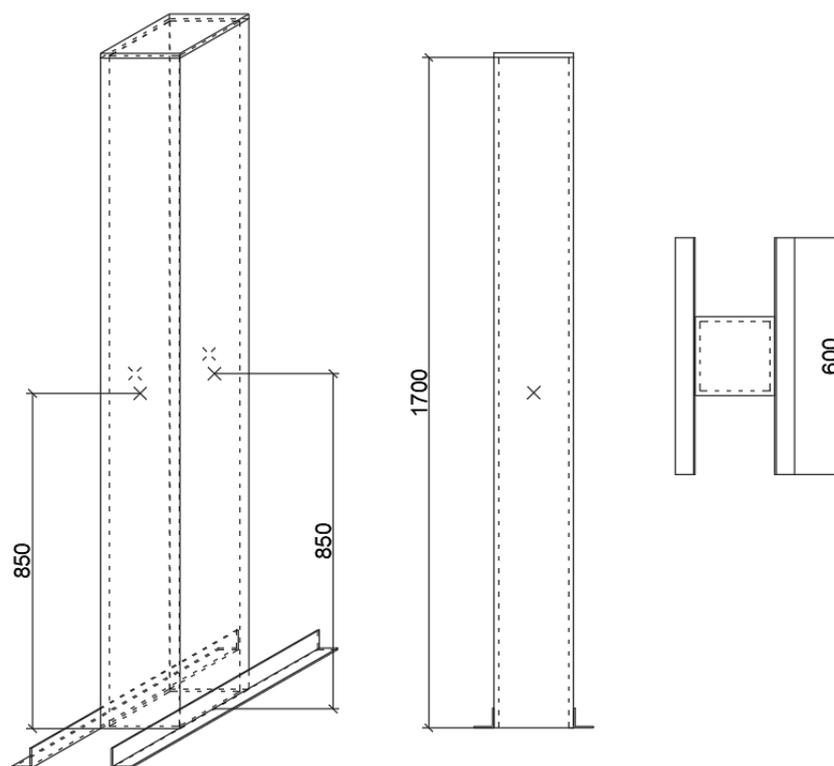


Рисунок 2. – Схема модельной конструкции для проведения испытаний

На рисунке 3 представлен вид конструкций после проведения огневых испытаний и демонтажа из огневой печи. Следует отметить, что с увеличением толщины исходного

¹⁰ См. сноску 6.

¹¹ ГОСТ 8509-93. Межгосударственный стандарт. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. – Введ. 20.02.1996 г. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 1993. – 14 с.

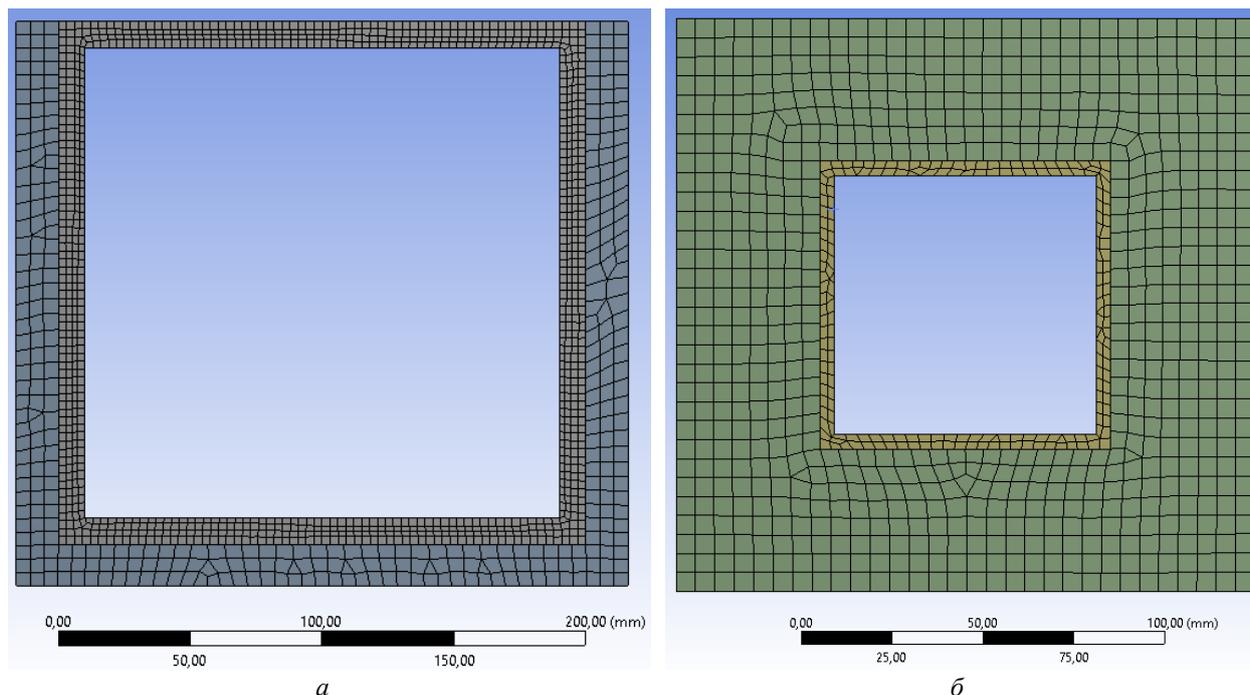


Рисунок 4. – Общий вид расчетных конечно-элементных моделей стержневых стальных конструкций с частичной (а) и полной (б) огнезащитой наружной поверхности

Начальные и граничные условия расчетных конечно-элементных моделей стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой [4]:

начальные условия: температура в расчетном сечении одинакова и равна температуре окружающей среды;

граничные условия (для теплообмена между газовой средой пожара и наружной поверхностью конструкций граничные условия приняты 3-го рода, для теплообмена между огнезащитным составом и стальной конструкцией – 4-го рода):

– температура греющей среды принята равной изменению среднеобъемной температуры газовой среды в печи при проведении огневых испытаний (рис. 5, 7);

– коэффициент теплоотдачи конвекцией от нагревающей среды к поверхности конструкции с температурой равен 25 Вт/м^2 ¹²;

– степень черноты поверхности материалов принята равной 0,8 для огнезащитного состава, 0,7 – для стали и 1,0 – для пламени (греющей среды)¹³;

– толщина огнезащиты принята постоянной для всей продолжительности огневого воздействия, при этом для конструкций с частичной огнезащитой наружной поверхности толщина огнезащиты с одной стороны принята равной нулю (рис. 5);

– для контура примыкания огнезащитного состава к стальному сечению принят идеальный тепловой контакт (равенство плотности теплового потока для двух тел);

– для конструкций с полной огнезащитой наружной поверхности потерями тепла внутри стального сечения пренебрегали (тепловой поток принят равным нулю), для конструкций с частичной огнезащитой наружной поверхности дополнительно учитывался внутренний лучистый теплообмен между стенкой без огнезащиты и стенками с огнезащитой).

На этапе оценки эффективных значений теплофизических характеристик вспучивающегося состава для стержневых стальных конструкций с полной огнезащитой наружной поверхности путем решения обратной задачи теплопроводности для расчетной конечно-

¹² См. сноску 4.

¹³ См. сноску 4.

элементной модели с использованием методов параметрической оптимизации были приняты следующие расчетные предпосылки:

- теплофизические характеристики стали приняты согласно Еврокоду 1993-1-2¹⁴;
- значение удельной теплоемкости материала огнезащиты принято постоянным и равным 1000 Дж/кг×К согласно СТБ ENV 13381-4¹⁵;
- значение плотности материала огнезащиты принято постоянным, 5 кг/м³.

Процесс параметрической оптимизации для эффективного коэффициента теплопроводности заключается в проведении итерационного расчета с последовательным уточнением зависимости коэффициента теплопроводности материала огнезащиты от температуры до момента удовлетворительной сходимости расчетных и экспериментальных данных прогрева стального сечения. Результат оценки эффективного коэффициента теплопроводности для материала огнезащиты представлен в таблице 2.

Таблица 2. – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности материала огнезащиты от температуры

Температура, °С	Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м×К при толщине огнезащитного слоя, мм	
	0,216	0,610
20	1,00	1,000
250	7,00	7,000
280	0,35	0,080
350	0,15	0,030
600	0,40	0,006
680	0,90	0,900
800	1,40	1,400
1000	2,00	2,000

Как следует из данных таблицы 1, до момента вспучивания эффективный коэффициент теплопроводности принимает завышенные значения ввиду принятых граничных условий постоянства толщины огнезащиты.

Полученные теплофизические характеристики позволили решить теплотехническую задачу для расчетной конечно-элементной модели с частичной огнезащитой наружной поверхности и сопоставить с экспериментальными данными. Как следует из рисунка 7, получена удовлетворительная сходимость для расчетной конечно-элементной модели. Это свидетельствует о возможности использования разработанных расчетных моделей для прогнозирования прогрева как полностью, так и частично защищенных стальных конструкций вспучивающимся огнезащитным составом.

Следует отметить, что кривые прогрева стальных образцов при проведении огневых испытаний можно условно представить в виде линейных участков, соединенных в двух точках перегиба. Первая точка перегиба соответствует процессу активного вспучивания и характеризуется достижением средней температуры образцов 1 и 2 значения 280 °С, для образца 3 – около 180 °С. Вторая точка перегиба соответствует достижению средней температуры для всех образцов от 400 до 450 °С.

¹⁴ См. сноску 4.

¹⁵ ENV 13381-4:2009. Метод испытания огнестойкости строительных конструкций: – Введ. 15.12.2009 г. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2010. – 138 с.

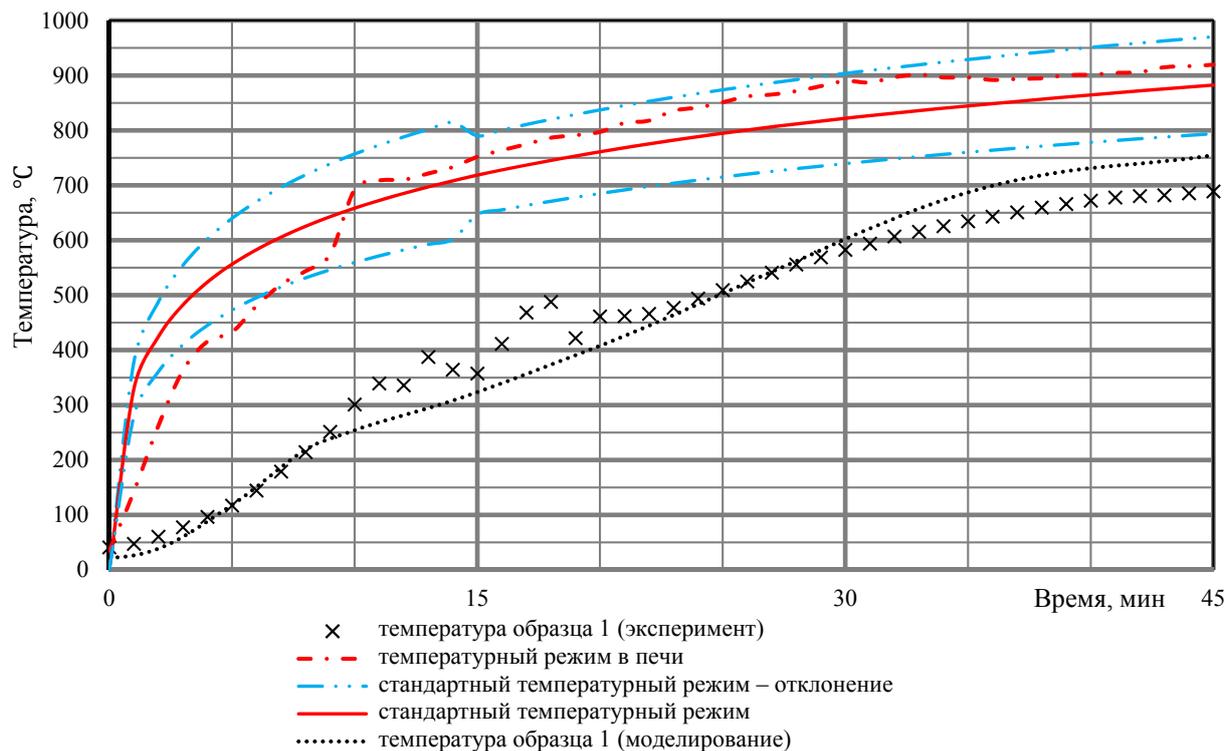


Рисунок 5. – Результаты проведения огневых испытаний образца 1

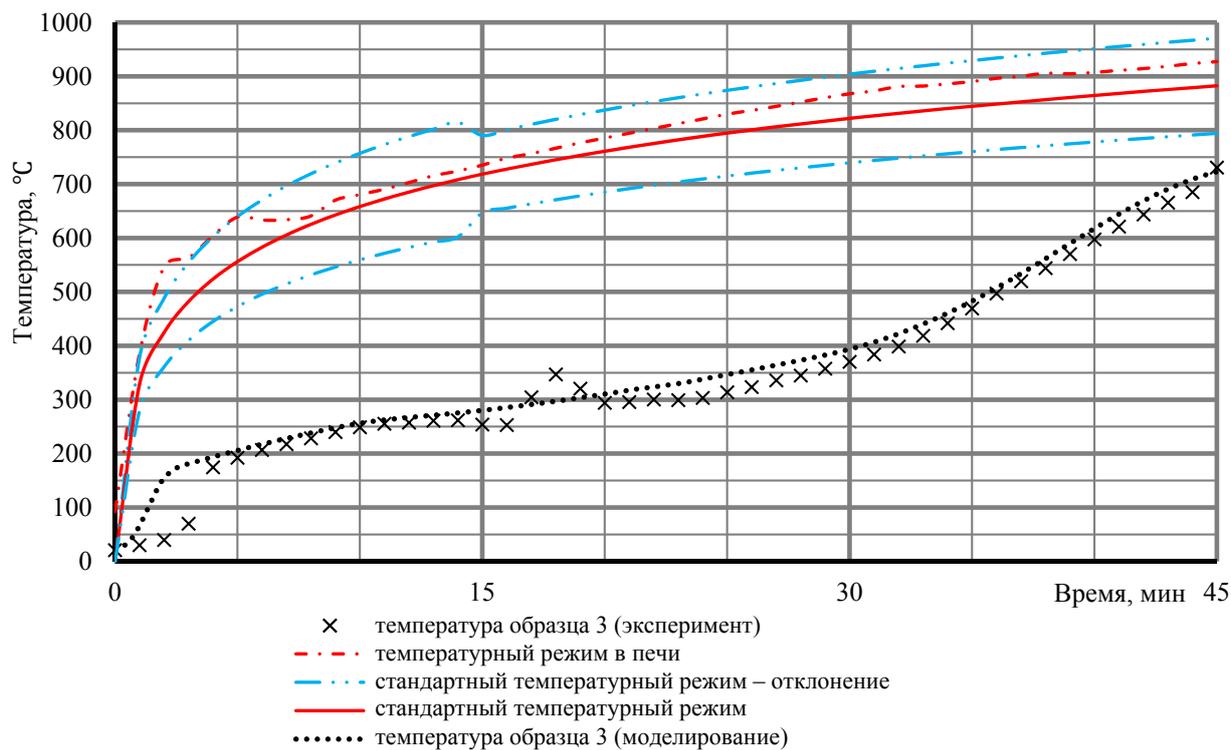


Рисунок 6. – Результаты проведения огневых испытаний образца 3

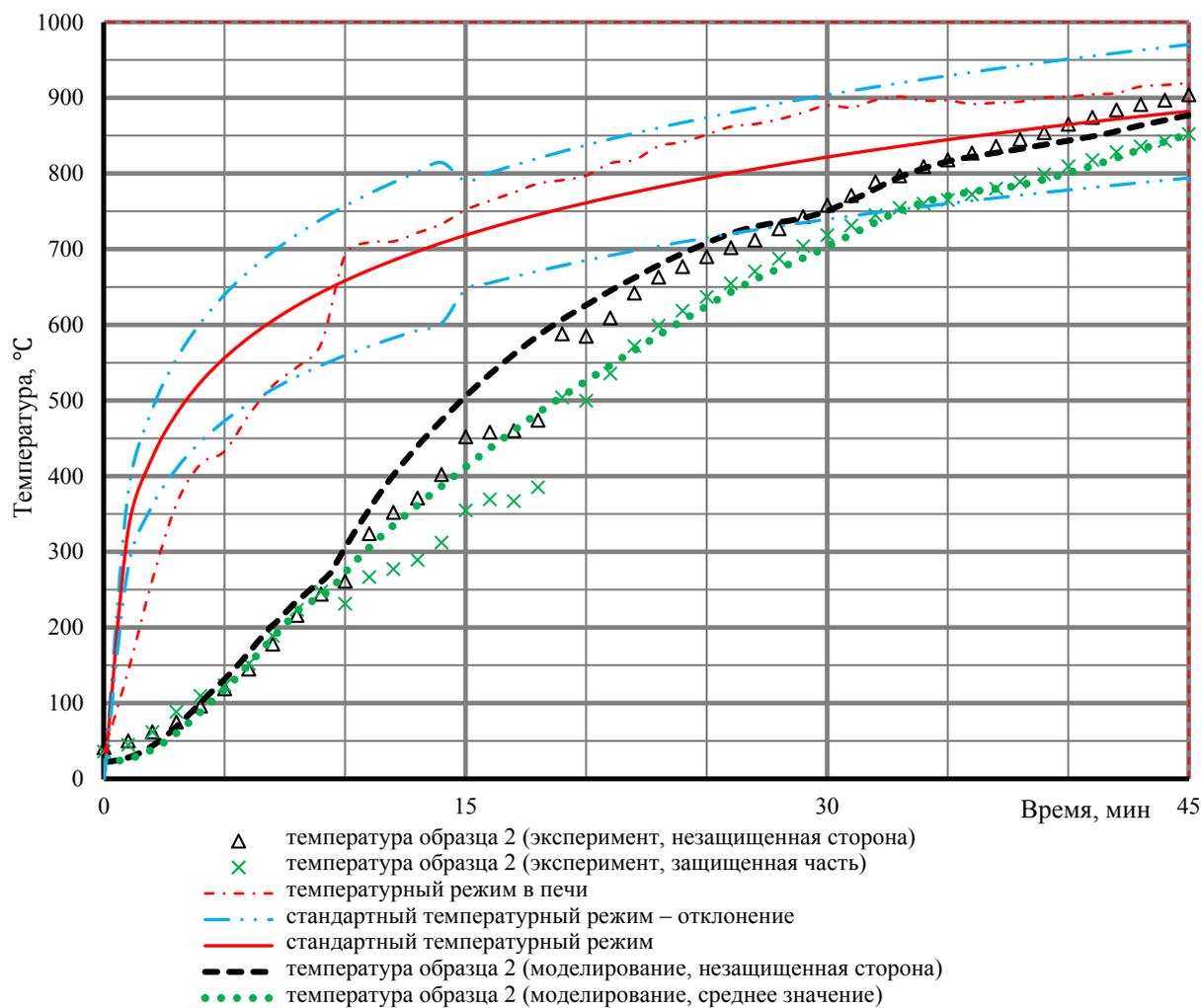


Рисунок 7. – Результаты проведения огневых испытаний образца 2

Заключение

Проведены экспериментальные исследования по прогреву стальных образцов с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности. Методика экспериментальных исследований основана на оценке огнезащитной эффективности средства по металлу согласно СТБ 11.03.02¹⁶. Для испытаний были использованы стальные трубы квадратного сечения размерами 200 × 200 мм, толщиной 12 мм и размерами 80 × 80 мм, толщиной 4 мм по ГОСТ 30245¹⁷, при этом для сортамента размерами сечения 200 × 200 мм толщиной 12 мм к испытаниям принят один образец с частичной огнезащитой наружной поверхности (с трех сторон).

Разработаны расчетные конечно-элементные модели стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой наружной поверхности. Получены эффективные значения теплофизических характеристик вспучивающегося состава, позволившие решить теплотехническую задачу для расчетной конечно-элементной модели испытанных образцов.

¹⁶ СТБ 11.03.02-2010. Система стандартов пожарной безопасности. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 20.10.2010 г. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2010. – 40 с.

¹⁷ ГОСТ 30245-2012. Межгосударственный стандарт. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. – Введ. 01.01.2016 г. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2014. – 38 с.

Получена удовлетворительная сходимость для расчетной конечно-элементной модели. Это свидетельствует о возможности использования разработанных расчетных моделей для прогнозирования прогрева как полностью, так и частично защищенных стальных конструкций вспучивающимся огнезащитным составом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гравит, М.В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий / М.В. Гравит // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 5. – С. 33–37.
2. Натейкина, Л.И. Минимальная толщина огнезащитного покрытия вспенивающегося типа / Л.И. Натейкина // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 2. – С. 10–12.
3. Голованов, В.И. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER T / В.И. Голованов, В.В. Павлов, А.В. Пехотиков // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – № 11. – С. 8–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16.
4. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.

**Прогрев стержневых стальных конструкций с частичной и полной огнезащитой
наружной поверхности при огневом воздействии**

**Heating of rod steel structures with partial and full fire-protected external surface
under fire exposure**

Ботян Сергей Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
безопасности, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Sergey S. Botyan

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Senior lecturer

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Жамойдик Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0407-5176

Sergey M. Zhamoydik

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Associate Professor

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0407-5176

Кудряшов Вадим Александрович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», отдел научной
и инновационной деятельности,
начальник отдела

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: vadkud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

Vadim A. Kudryashov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Department of Scientific and Innovation Activity,
Head of the Department

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: vadkud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

Олесьюк Николай Михайлович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», сектор международного
сотрудничества, старший инспектор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: nikolai-96@tut.by

ORCID: 0000-0001-5925-1371

Nikolai M. Olesiyuk

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
International Cooperation Sector, Senior Inspector

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: nikolai-96@tut.by

ORCID: 0000-0001-5925-1371

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-1.20>

HEATING OF ROD STEEL STRUCTURES WITH PARTIAL AND FULL FIRE-PROTECTED EXTERNAL SURFACE UNDER FIRE EXPOSURE

Batyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Olesiyuk N.M.

Purpose. Based on experimental studies and theoretical data, to determine the thermophysical characteristics of the intumescent flame retardant and evaluate the heating of rod steel structures with partial (tri-partite) and full fire protection of the outer surface under conditions of high temperatures in comparison with the results of fire tests.

Methods. Experimental studies, modeling in the system of finite element analysis.

Findings. Based on a series of experimental and theoretical studies in the ANSYS finite element analysis system, the heat engineering problem of fire resistance of steel structures with partial and full fire protection of the outer surface is solved. Experimental studies were used to evaluate the effective values of the thermal and physical characteristics of the intumescent composition (Sika Unitherm ASR) by solving the inverse heat conduction problem for the calculated finite element model using parametric optimization methods. The obtained thermal and physical characteristics made it possible to evaluate the heating of steel structures with partial and full fire protection of the outer surface under conditions of high temperatures and compare that with the results of fire tests.

Application field of research. The results can be used to solve the fire resistance problems of rod steel structures with partial and full fire protection of the outer surface while designing and constructing buildings and structures.

Keywords: fire resistance; intumescent fire protection, thermophysical characteristics; coefficient of thermal conductivity; specific heat, experimental studies; inverse heat conduction problem, standard temperature regime, steel structures, finite element method.

(The date of submitting: February 5, 2020)

REFERENCES

1. Gravit M.V. Otsenka porovogo prostranstva penokoksa ognezashchitnykh vspuchivayushchikhsya pokrytiy [Evaluation the pore space of foam coke flame retardant intumescent coatings]. *Fire and explosion safety*, 2013. Vol. 22, No. 5. Pp. 33–37. (rus)
2. Nateykina L.I. Minimal'naya tolshchina ognezashchitnogo pokrytiya vspenivayushchegosya tipa [The minimum thickness of the fireproof coating foaming type]. *Fire and explosion safety*, 2016. Vol. 25, No. 2. Pp. 33–37. (rus)
3. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Ognezashchita stal'nykh konstruktsiy plitnym materialom PYRO-SAFE AESTUVER T [Fire protection of steel structures with PYRO-SAFE AESTUVER T plate material]. *Fire and explosion safety*, 2016. No. 11. Pp. 8–16. (rus). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16.
4. Yakovlev A.I. *Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruktsiy* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 143 p. (rus)