

Оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературных газовых потоках

© А.Ю. Андрияшкин^{1✉}, А.А. Киршина¹, Е.Н. Кадочникова²

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 1-ая Красноармейская ул., 1)

²Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149)

АННОТАЦИЯ

Введение. При пожарах на объектах нефтегазовой отрасли часто возникают высокотемпературные газовые потоки, истекающие из отверстий, трещин, разрывов разгерметизированного оборудования и трубопроводов. Огнезащитная эффективность вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературных газовых потоках резко снижается, поэтому актуальна задача разработки методики адекватной оценки их огнезащитной эффективности.

Цели и задачи. Целями проведенного исследования являлись разработка методики оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературных газовых потоках и экспериментальная оценка огнезащитной эффективности различных вспучивающихся покрытий. Решались следующие задачи исследования: оценка скорости истечения высокотемпературных газовых потоков из работающих под давлением разгерметизированных объектов; анализ методики определения огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в спокойной (малоподвижной) газовой среде; разработка методики оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературном газовом потоке; экспериментальная оценка огнезащитной эффективности различных вспучивающихся покрытий в высокотемпературном газовом потоке.

Методы. В работе использовались расчет скорости истечения высокотемпературных газовых потоков из работающих под давлением разгерметизированных объектов; анализ действующей методики определения огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в спокойной (малоподвижной) среде, в которой учитывается только температура газа в печи. Предложена методика оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературном газовом потоке, в которой учитывается температура и скорость газового потока. Для оценки огнезащитной эффективности вспучивающегося покрытия в высокотемпературном газовом потоке введен коэффициент относительной огнестойкости. Проведена экспериментальная оценка различных вспучивающихся покрытий, показавшая существенное снижение их огнезащитной эффективности в высокотемпературном газовом потоке, реализующем углеводородный температурный режим.

Результаты и их обсуждение. Взаимное аэродинамическое и тепловое воздействие газового потока существенно снижает огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий стальных конструкций, что подтверждается результатами экспериментов, проведенных по предложенной методике. В методике оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций учитывается температура и скорость газового потока, воздействующего на образец.

Выводы. Актуальна и необходима оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций на работающих под давлением объектах нефтегазовой отрасли, так как в высокотемпературном газовом потоке наблюдается существенное снижение их огнезащитной эффективности.

Ключевые слова: углеводородный температурный режим; предельное состояние; высокотемпературный газовый поток; огнестойкость; методика испытаний

Для цитирования: Андрияшкин А.Ю., Киршина А.А., Кадочникова Е.Н. Оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературных газовых потоках // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 4. С. 14–26. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.14-26

✉ Андрияшкин Александр Юрьевич, e-mail: sascha1a@mail.ru

The evaluation of the fire-retardant efficiency of intumescent coatings of steel structures exposed to high-temperature gas flows

© Alexander Yu. Andryushkin^{1✉}, Alyona A. Kirshina¹, Elena N. Kadochnikova²

¹Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov (1st Krasnoarmesky St., 1. Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

² Saint Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. High-temperature gas flows often occur in case of a fire at oil and gas facilities; gas flows out of holes, cracks, ruptures in depressurized items of equipment and pipelines. The fire-retardant efficiency of intumescent coatings of steel structures, exposed to high-temperature gas flows, plummets. Hence, the task of developing a methodology for the adequate assessment of their fire-retardant efficiency is relevant.

Goals and objectives. The purpose of the study was to develop a methodology for evaluating the fire-retardant efficiency of intumescent coatings for steel structures exposed to high-temperature gas flows and experimentally evaluate the fire-retardant efficiency of various intumescent coatings. The following research-focused tasks were solved: the evaluation of the velocity of high-temperature gas flows leaving depressurized items that normally operate under pressure; the analysis of the methodology designated for identifying the fire-retardant efficiency of intumescent coatings of steel structures in a calm (sedentary) gaseous medium; the development of a method for evaluating the fire-retardant efficiency of intumescent coatings of steel structures exposed to high-temperature gas flows; the experimental evaluation of the fire-retardant efficiency of various intumescent coatings in a high-temperature gas flow.

Methods. The velocity of high-temperature gas flows, leaving depressurized items that normally operate under pressure, has been calculated. The co-authors have analyzed the established methodology used to identify the fire-retardant efficiency of intumescent coatings of steel structures in a steady (sedentary) environment, where gas temperature in a furnace is the only factor taken into account. The co-authors propose a method for evaluating the fire-retardant efficiency of intumescent coatings of steel structures exposed to high-temperature gas flows, which takes into account gas flow temperature and velocity. To evaluate the fire-retardant efficiency of an intumescent coating exposed to a high-temperature gas flow, a coefficient of relative fire resistance is introduced. An experimental evaluation of various intumescent coatings is carried out. It shows a substantial fire-retardant efficiency decrease in a high-temperature gas flow that fosters the hydrocarbon temperature regime.

Results and discussion. Mutual aerodynamic and thermal effects of a gas flow substantially reduce the fire-retardant efficiency of intumescent coatings of steel structures, and this is proven by the results of experiments conducted according to the proposed method. The method for evaluating the fire-retardant effectiveness of intumescent coatings of steel structures takes into account the temperature and velocity of a gas flow that affects the sample.

Conclusions. It is relevant and necessary to evaluate the fire-retardant efficiency of intumescent coatings of steel structures at oil and gas facilities, operating under pressure, since a substantial decrease in their fire-retardant efficiency is observed in high-temperature gas flows.

Keywords: hydrocarbon temperature regime; limit state; high-temperature gas flow; fire resistance; testing methodology

For citation: Andryushkin A.Yu., Kirshina A.A., Kadochnikova E.N. The evaluation of the fire-retardant efficiency of intumescent coatings of steel structures exposed to high-temperature gas flows. *Pozharovzryvobezopasnost'/ Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(4):14-26. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.14-26 (rus).

✉ Alexander Yuryevich Andryushkin, e-mail: sascha1a@mail.ru

Введение

Проблема пожаровзрывоопасности углеводородов при их транспортировке и переработке обусловлена предельными параметрами технологических процессов (давление, температура, расход) и значительной энергоемкостью оборудования. При пожарах на объектах нефтегазовой отрасли часто возникают высокотемпературные газовые потоки, они истекают из отверстий, трещин, разрывов разгерметизированного оборудования. Температура газового потока может достигать 1300 °С, а скорость его истечения — близка к местной скорости звука (до 340 м/с). Подвергающиеся аэродинамическому и тепловому воздействию газового потока металлические конструкции (стены, фермы, стойки, балки, перекрытия) деформируются и теряют несущую способность в течение короткого времени, что приводит к разрушению объекта и существенному ущербу. Размер ущерба обусловлен огнестойкостью металлических конструкций и их составных частей.

При обеспечении огнестойкости металлических конструкций эффективны различные огнезащитные покрытия, в частности вспучивающиеся покрытия. Однако эффективность многих огнезащитных покрытий в высокотемпературных газовых потоках резко снижается, поэтому актуальна задача разработки методики адекватной оценки их огнестойкости.

Целью проведенного исследования являлась разработка методики оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературных газовых потоках и экспериментальная оценка огнезащитной эффективности различных вспучивающихся покрытий.

Для достижения цели исследования были сформулированы следующие задачи:

- 1) оценка скорости истечения высокотемпературных газовых потоков из работающих под давлением разгерметизированных объектов;
- 2) анализ методики определения огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий сталь-

- ных конструкций в спокойной (малоподвижной) газовой среде;
- 3) разработка методики оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературном газовом потоке;
 - 4) экспериментальная оценка огнезащитной эффективности различных вспучивающихся покрытий в высокотемпературном газовом потоке.

Скорость истечения высокотемпературных газовых потоков из работающих под давлением разгерметизированных объектов

К работающим под давлением объектам нефтегазовой отрасли относятся герметичные корпуса оборудования (емкости, сосуды, резервуары, баки, баллоны, цистерны, аппараты) и связывающие их трубопроводы. Все находящиеся под давлением объекты потенциально пожаровзрывоопасны, так как многие из них характеризуются большой емкостью и высоким давлением. Пожар на работающем под давлением объекте начинается с взрыва паровоздушной смеси, разгерметизации объекта и воспламенения жидкости на всей свободной поверхности. В разгерметизированном корпусе или трубопроводе при горении углеводородов давление возрастает в 8–10 раз по сравнению с первоначальным рабочим давлением.

При разгерметизации корпуса оборудования или трубопровода через образовавшиеся разрывы, трещины, отверстия происходит истечение высокотемпературных газовых потоков, а избыточное давление внутри него поддерживается приходом газообразных продуктов горения.

Скорость истечения газа из разгерметизированного корпуса оборудования или трубопровода [1, 2]:

$$U_{\Gamma} = \varphi_c \left(\frac{2(p_0 - p_n)}{\rho_0} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где U_{Γ} — скорость истечения газа из разгерметизированного корпуса оборудования или трубопровода, м/с;

φ_c — коэффициент скорости, учитывающий потери напора ($\varphi_c = 0,95 \dots 0,99$);

p_0 — полное давление внутри корпуса оборудования или трубопровода, Па;

p_n — давление окружающей среды, Па;

ρ_0 — плотность газа внутри разгерметизированного корпуса оборудования или трубопровода, кг/м³.

Расчеты по выражению (1) показывают, что при незначительном давлении в разгерметизированном корпусе или трубопроводе $p_0 = 0,11 \dots 0,15$ МПа скорость истечения газа из отверстия составляет $U_{\Gamma} =$

$= 100 \dots 200$ м/с. В том случае, если давление велико, $p_0 = 0,8 \dots 1,0$ МПа, соотношение давления в разгерметизированном корпусе или трубопроводе и окружающего давления становится критическим и скорость истечения газа достигает местной скорости звука $U_{\Gamma} = U_{зв}$ [1, 2]:

$$U_{зв} = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma + 1} R T_0} = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{P_0}{\rho_0}}, \quad (2)$$

где $U_{зв}$ — местная скорость звука, м/с;

γ — показатель адиабаты;

R — газовая постоянная, Дж/(кг·К);

T_0 — температура газа в разгерметизированном корпусе или трубопроводе, К.

Таким образом, скорость истечения высокотемпературного газового потока из разгерметизированного корпуса или трубопровода значительна и может достигать местной скорости звука.

Анализ методики определения огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в спокойной газовой среде

Огнестойкость незащищенных стальных конструкций невелика. Например, прогреваемая пламенем стенка нефтяного резервуара, выполненная из стального листа толщиной 4...6 мм, теряет несущую способность в течение 3...5 мин. При пожаре температура стали за короткое время достигает критических значений и наблюдается резкое снижение ее прочностных свойств, выражающееся в потере несущей способности конструкции. Для обеспечения огнестойкости стальных конструкций в течение более 15 мин на их поверхности наносят различные теплоизолирующие материалы. Широко применяют огнезащитные вспучивающиеся покрытия, имеющие ряд преимуществ: относительно низкую трудоемкость нанесения (валиком, кистью, распылением); малую толщину до 3 мм; возможность защиты труднодоступных мест; огнезащитные и декоративные функции покрытия [3, 4].

Огнезащитные вспучивающиеся покрытия характеризуются низким коэффициентом теплопроводности и большой удельной теплоемкостью, также их нагревание сопровождается эндотермическими реакциями, поэтому материал покрытия аккумулирует большое количество тепла, выделяются вытесняющие воздух инертные газы и пары, блокируется подвод тепла к защищаемой металлической поверхности. Процесс нагревания покрытия сопровождается образованием жесткого вспученного кокса, который, обладая низкой теплопроводностью, выполняет функцию теплозащитного экрана (рис. 1). При этом значительно увеличивается время нагрева металли-



Рис. 1. Вспучивание огнезащитного покрытия при нагревании (слева), наружная поверхность вспученного кокса (в центре), пористая структура вспученного кокса (справа)

Fig. 1. The expansion of the fire-retardant coating in the process of heating (left); the outer surface of expanded coke (centre); the porous structure of expanded coke (right)

ческой конструкции до критической температуры, т.е. растет предел огнестойкости конструкции. Огнезащитные тонкослойные покрытия при воздействии высокой температуры вспучиваются в несколько десятков раз (до 200 раз), достигая нескольких сантиметров, и теплоизолируют металлическую поверхность, обеспечивая предел огнестойкости конструкции 45...90 мин [5–16].

ГОСТ Р 53295–2009¹ регламентирует метод определения огнезащитной эффективности средств огнезащиты стальных конструкций. Огнезащитная эффективность характеризуется временем в минутах от начала стандартного теплового воздействия до достижения критической температуры 500 °С стандартным образцом из стального двутаврового прокатного профиля с огнезащитным покрытием. Таким образом, предельным состоянием стального образца является потеря теплоизолирующей способности покрытия вследствие повышения температуры конструкции до критического значения 500 °С, а время, в течение которого достигается эта температура, — пределом огнестойкости конструкции $\tau_{огн}$. Чем больше время, которое требуется стали образца для нагревания до критической температуры, тем выше огнезащитная эффективность испытываемого средства огнезащиты.

Стандартный образец для испытаний представляет собой стальную колонну двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239–89² или профиля № 20Б1 по ГОСТ 26020–83³ высотой 1700 ± 10 мм,

¹ ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. № 71-ст.

² ГОСТ 8239–89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 сентября 1989 г. № 2940.

³ ГОСТ 26020–83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандар-

на которую устанавливают термопары и наносят средство огнезащиты в соответствии с рекомендуемой производителем технологией (рис. 2). Подготовленный образец помещают в печь и проводят испытания в соответствии в условиях, регламентируемых ГОСТ 30247.0–94⁴, т.е. при стандартном

там от 17 декабря 1983 г. № 6095 дата введения установлена 1 января 1986 г.

⁴ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию в строительстве (МНТКС)

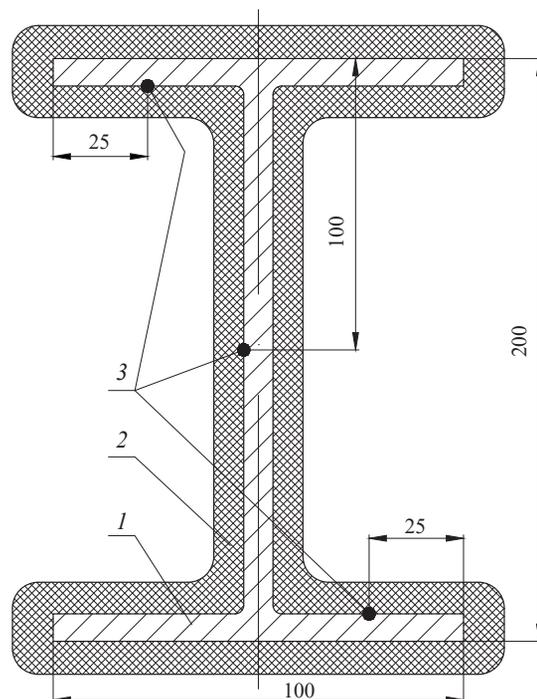


Рис. 2. Схема расстановки термоэлектрических преобразователей: 1 — двутавр № 20; 2 — огнезащитное покрытие; 3 — термоэлектрические преобразователи (3 шт.)

Fig. 2. A layout plan of thermoelectric converters: 1 — I-beam no. 20; 2 — fire-resistant coating; 3 — thermoelectric converters (3 items)

температурном режиме до достижения им критической температуры 500 °С, определяемой как средняя температура по показаниям трех термопар. Стандартный температурный режим характеризуется зависимостью (рис. 3) [17–20]:

$$t_{\text{печ}} = t_{\text{нач}} + 345 \lg(8\tau_{\text{огн}} + 1), \quad (3)$$

где $t_{\text{печ}}$ — температура в печи, °С;

$t_{\text{нач}}$ — температура в печи до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °С;

$\tau_{\text{огн}}$ — время от начала испытания до достижения испытываемым образцом критической температуры 500 °С, мин.

Условия реальных пожаров могут существенно отличаться от стандартных условий и характеризоваться различной температурой и скоростью распространения. В этом случае для оценки огнестойкости строительных конструкций применяют ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014⁵, описывающий альтернативные температурные режимы испытаний: углеводородный, наружный, медленно развивающийся (тлеющий) (см. рис. 3).

При интенсивном развитии пожара предусмотрено проведение испытаний по углеводородному температурному режиму [17–20]:

17 ноября 1994 г.

⁵ ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 октября 2014 г. № 1275-ст.

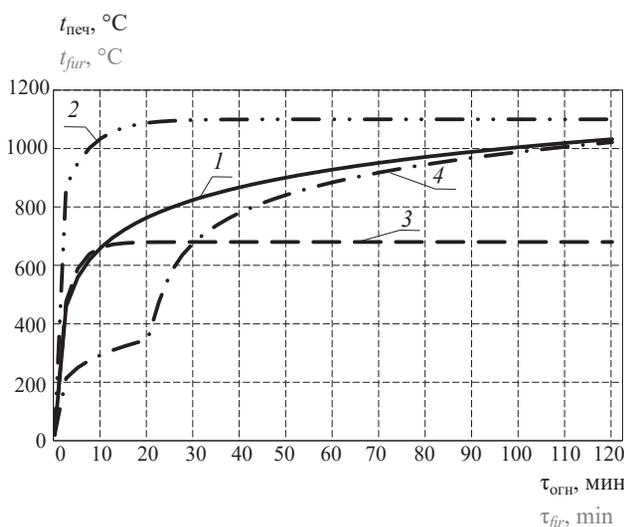


Рис. 3. Температурные режимы: 1 — стандартный; 2 — углеводородный; 3 — наружный; 4 — медленно развивающийся (тлеющий)

Fig. 3. Temperature regimes: 1 — standard; 2 — hydrocarbon; 3 — outdoor; 4 — slowly developing (smoldering)

$$t_{\text{печ}} = 1080(1 - 0,325 \exp(-0,167 \tau_{\text{огн}}) - 0,675 \times \exp(-2,5 \tau_{\text{огн}})) + 20. \quad (4)$$

В случае воздействия внешнего пожара огнестойкость наружных конструкций может быть несколько ниже, тогда используют наружный температурный режим [17–20]:

$$t_{\text{печ}} = 660(1 - 0,687 \exp(-0,32 \tau_{\text{огн}}) - 0,313 \times \exp(-3,8 \tau_{\text{огн}})) + 20. \quad (5)$$

Огнестойкость некоторых конструкций может быть определена из условия медленно развивающегося (тлеющего) температурного режима [17–20]:

$$t_{\text{печ}} = 154 \tau_{\text{огн}}^{0,25} + 20, \quad 0 < \tau_{\text{огн}} \leq 21, \quad (6)$$

$$t_{\text{печ}} = t_{\text{нач}} + 345 \lg(8(\tau_{\text{огн}} - 20) + 1) + 20, \quad \text{при } \tau_{\text{огн}} > 21.$$

Типовые температурные режимы, рассчитываемые по выражениям (3)–(6), показывают изменение температуры в испытательной печи с течением времени, т.е. задается и контролируется только один параметр — температура газа. В печи образец нагревается равномерно со всех сторон, скорость движения газа вокруг образца незначительна.

Анализ метода определения огнезащитной эффективности средств огнезащиты стальных конструкций показывает, что испытания проходят в условиях спокойной (малоподвижной) газовой среды. Из рассмотренных температурных режимов наиболее опасным является углеводородный температурный режим, при котором температура за короткий промежуток времени возрастает до 1100 °С. Такое горение характерно для жидких или газообразных углеводородов при разгерметизации корпусов и трубопроводов. Оно сопровождается образованием высокотемпературных газовых потоков, разрушающих вспучивающееся покрытие за счет интенсивной газовой эрозии и абляции. Поэтому при оценке огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий необходим учет двух факторов: температуры и скорости газового потока.

Критерием огнезащитной эффективности средства огнезащиты является время, в течение которого температура испытываемого образца достигает критического значения. При одинаковой толщине вспучивающегося покрытия образец, находящийся в высокотемпературном газовом потоке, достигнет критической температуры раньше, чем образец, нагреваемый спокойной газовой средой. Поэтому огнезащитная эффективность вспучивающегося покрытия в высокотемпературном газовом потоке значительно снижается, что не учитывается действующей методикой испытаний.

Таким образом, актуальна разработка методики экспериментальной оценки огнезащитной эффек-

тивности вспучивающегося покрытия в высокотемпературном газовом потоке, учитывающая температуру и скорость газового потока.

Методика оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературном газовом потоке

Для создания высокотемпературного газового потока, близко имитирующего горение при углеводородном температурном режиме, можно использовать газовую горелку. Горелка позволяет регулировку параметров газового потока (расход, скорость истечения, температура) и их постоянство во время проведения испытаний, что обеспечивает воспроизводимость условий эксперимента. Температура пламени кислородно-пропановой горелки может достигать 2700 °С, кислородно-ацетиленовой горелки — 3100 °С, скорость истечения газового потока — до 100 м/с. Образующаяся в горелке смесь горючего газа и кислорода вытекает из мундштука и, сгорая, дает устойчивый высокотемпературный газовый поток, воздействующий на испытываемый образец (рис. 4) [17–20].

Для имитации углеводородного режима с помощью термопары на оси высокотемпературного потока определяют расстояние $l_{г.п}$ от среза мундштука, на котором температура газового потока составляет $t_{г.п} = 1100 \pm 10$ °С. В этом же месте с помощью специального приемника давления (трубка Пито) находят скорость газового потока $U_{г.п}$. Испытываемый образец устанавливается так, чтобы между срезом мундштука и нагреваемой поверхностью покрытия было расстояние $l_{г.п}$, при этом ось мундштука горелки должна проходить через центр квадратной пластины. Воспроизводимость условий эксперимента обеспечивается постоянством параметров работы горелки и размещением испытываемых образцов на одинаковом расстоянии от среза мундштука горелки $l_{г.п}$.

Образец для испытаний представляет собой квадратную стальную пластину размером, например 150×150×4 мм, с нанесенным с одной стороны по технологии производителя огнезащитным вспучивающимся составом, а с другой стороны с начекаленной или приваренной по центру пластины термопарой, измеряющей температуру стали. Размеры стальной пластины должны быть в несколько раз больше диаметра газового потока в месте установки пластины, чтобы огнезащитное покрытие постепенно вспенивалось от центра к краям по мере прогрева испытываемого образца.

За базовый показатель взято время предела огнестойкости стальной пластины без огнезащитного покрытия $\tau_{б.огн}$, измеряемое от начала нагрева до повышения температуры на ее необогреваемой

поверхности до критического значения. Все стальные пластины имеют одинаковые размеры и приведенную толщину металла $\delta_{пр} = const$.

Определение огнестойкости стальной пластины с огнезащитным покрытием осуществляют следующим образом. После выставления образца на расстоянии $l_{г.п}$ зажигают газовую горелку и начинают отсчет времени от начала воздействия высокотемпературного газового потока на образец. Через определенные промежутки времени по показаниям термопары фиксируют температуру на необогреваемой поверхности стальной пластины $t_{пл}$. При достижении температурой на необогреваемой поверхности стальной пластины критического значения $t_{пл} = 500$ °С нагрев прекращают. Время, прошедшее от начала воздействия высокотемпературного газового потока на образец и до потери им теплоизолирующей способности, т.е. достижения температурой на необогреваемой поверхности стальной пластины критического значения, принимают за предел огнестойкости образца $\tau_{огн}$.

Для оценки огнезащитной эффективности вспучивающегося покрытия, не зависящей от условий проведения эксперимента (различная приведенная толщина металла, особенности высокотемпературного газового потока, создаваемого различными горелками, и пр.), введен коэффициент относительной огнестойкости:

$$K_{от.огн} = \frac{\tau_{огн}}{\tau_{б.огн}}, \tag{7}$$

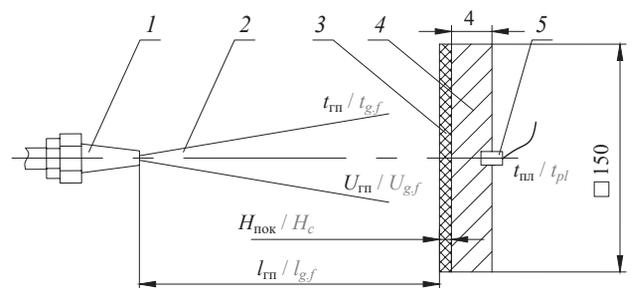


Рис. 4. Схема определения огнестойкости стальной пластины с огнезащитным покрытием в высокотемпературном газовом потоке: 1 — мундштук газовой горелки; 2 — высокотемпературный газовый поток; 3 — огнезащитное покрытие; 4 — стальная пластина; 5 — термопара измерения температуры стальной пластины; $t_{г.п}$ — температура газового потока; $U_{г.п}$ — скорость газового потока; $l_{г.п}$ — расстояние от среза мундштука до поверхности огнезащитного вспучивающегося покрытия; $t_{пл}$ — температура на необогреваемой поверхности стальной пластины

Fig. 4. A chart used to identify the fire resistance of a steel plate with fire-resistant coating exposed to a high-temperature gas flow: 1 — the tip of a gas burner; 2 — high-temperature gas flow; 3 — fire-resistant coating; 4 — steel plate; 5 — the thermocouple for measuring the temperature of the steel plate; $t_{g.f}$ — the temperature of the gas flow; $U_{g.f}$ — the velocity of the gas flow; $l_{g.f}$ — the distance from the cut of the tip to the surface of the fire-resistant intumescent coating; t_{pl} — the temperature on the unheated surface of the steel plate

где $K_{от.огн}$ — коэффициент относительной огнестойкости;

$\tau_{огн}$ — время от начала испытания образца с вспучивающимся покрытием до достижения им критической температуры, мин;

$\tau_{б.огн}$ — время от начала испытания образца без вспучивающегося покрытия до достижения им критической температуры, мин.

Таким образом, предложена методика экспериментальной оценки огнезащитной эффективности вспучивающегося покрытия в высокотемпературном газовом потоке, учитывающая температуру и скорость газового потока.

Экспериментальная оценка огнезащитной эффективности различных вспучивающихся покрытий в высокотемпературном газовом потоке

В настоящее время выпускаются различные вспучивающиеся композиции и краски. Для экспериментальной оценки их огнезащитной эффективности в высокотемпературном потоке газа выбраны три состава.

Состав 1 — однокомпонентное силиконо-графитовое вспучивающееся покрытие. По данным производителя стальная конструкция при приведенной толщине металла $\delta_{пр} = 3,4$ мм с покрытием толщиной $H_{пок} = 1,0$ мм имеет огнестойкость R45.

Состав 2 — двухкомпонентный состав на эпоксидной основе, смешиваемый перед нанесением и формирующий при нагревании вспучивающееся покрытие. По данным производителя стальная конструкция при приведенной толщине металла $\delta_{пр} = 3,4$ мм с покрытием толщиной $H_{пок} = 1,2$ мм имеет огнестойкость R45.

Состав 3 — водоразбавляемая краска, представляющая собой тонкодисперсную смесь огнезащитных компонентов, связующего и добавок и формирующая при нагревании вспучивающееся покрытие. По данным производителя, стальная конструкция при приведенной толщине металла $\delta_{пр} = 3,4$ мм с покрытием толщиной $H_{пок} = 0,8$ мм имеет огнестойкость R45.

По данным производителей, каждый испытываемый состав имеет предел огнестойкости 45 мин, т.е. в печи со стационарной газовой средой стальная конструкция с нанесенным составом при реализации стандартного температурного режима нагревается до критической температуры 500 °С не менее чем за 45 мин.

Образец для испытаний в высокотемпературном газовом потоке представляет собой пластину из углеродистой стали (Ст3) размерами 150×150×4 мм с нанесенным по технологии изготовителя составом. Толщина покрытий образцов составом 1 составила $H_{пок} = 0,95...1,05$ мм; составом 2 — $H_{пок} = 1,18...1,29$ мм; составом 3 — $H_{пок} = 0,77...0,85$ мм.

Определение предела огнестойкости образцов в высокотемпературном газовом потоке проводилось по предложенной выше методике при температурном режиме, близком к углеводородному режиму. Высокотемпературный газовый поток создавался газовой горелкой «Донмет 286», представляющей собой устройство для смешивания энергоносителей и получения при их сжигании факела заданной формы. Горелка состоит из ствола с мундштуком внутрисоплового смешения, вентилей горючего газа, кислорода и сжатого воздуха. Ствол закреплен в стойке для установки на столе и настройки положения горелки (рис. 5).

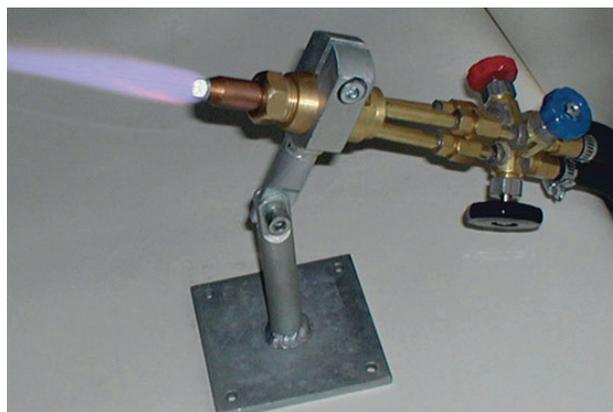


Рис. 5. Газовая горелка «Донмет 286»

Fig. 5. Gas burner “Donmet” 286

Испытываемый образец устанавливался на расстоянии от среза мундштука горелки $l_{г.п} = 140 \pm 2$ мм, при котором температура на оси газового потока составляет $t_{г.п} = 1100 \pm 10$ °С, скорость потока газа $U_{г.п} = 35 \pm 5$ м/с. В процессе нагревания покрытие постепенно вспучивалось от центра образца к краям. Все три испытываемых огнезащитных покрытия при нагревании интенсивно вспучивались. В месте аэродинамического воздействия газового потока на вспученное покрытие наблюдалось его разрушение (рис. 6). За предел огнестойкости образца принято время, измеряемое от начала нагрева до достижения температурой на необогреваемой поверхности стальной пластины критического значения $t_{пл} = 500$ °С.

Обработка результатов эксперимента проводилась в следующей последовательности (табл.). Рассчитывалось среднее значение предела огнестойкости образца [1]:

$$\tau_{огн.ср} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{обр}} \tau_{огни}}{N_{обр}} \quad (8)$$

где $\tau_{огн.ср}$ — среднее значение предела огнестойкости образцов;

$N_{обр}$ — число образцов, шт.;

$\tau_{огни}$ — значение предела огнестойкости i -го образца.

Среднее квадратическое отклонение предела огнестойкости образцов [1]:

$$S_{\tau} = \sqrt{\left(\frac{1}{N_{\text{обр}} - 1}\right) \sum_{i=1}^{N_{\text{обр}}} (\tau_{\text{огни}} - \tau_{\text{огн.ср}})^2}, \quad (9)$$

где S_{τ} — среднее квадратическое отклонение предела огнестойкости образцов, мин.

Коэффициент вариации [1]:

$$v_{\tau} = \frac{S_{\tau}}{\tau_{\text{огн.ср}}}, \quad (10)$$

где v_{τ} — коэффициент вариации.

Доверительный интервал для предела огнестойкости образцов $\Delta\tau_{\text{огн}}$ [1]:

$$\Delta\tau_{\text{огн}} = \frac{t_{\tau} S_{\tau}}{\sqrt{N_{\text{обр}}}}, \quad (11)$$

где t_{τ} — значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы $(N_{\text{обр}} - 1)$ и уровне значимости 0,05 (доверительная вероятность $P = 0,95$) (при $N_{\text{обр}} = 10$ $t_{\tau} = 2,262$).

Допускаемые отклонения отдельных значений предела огнестойкости образцов должны находиться в пределах $\tau_{\text{огн.ср}} \pm \Delta\tau_{\text{огн}}$.

Нормальность распределения результатов испытаний оценивалась по асимметрии и эксцессу [1]:

$$As = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{обр}}} (\tau_{\text{огни}} - \tau_{\text{огн.ср}})^3}{N_{\text{обр}} S_{\tau}^3}, \quad Ex = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{обр}}} (\tau_{\text{огни}} - \tau_{\text{огн.ср}})^4 - 3}{N_{\text{обр}} S_{\tau}^4}. \quad (12)$$

Дисперсии асимметрии и эксцесса рассчитывают по выражению [1]:

$$D(As) = \frac{6(N_{\text{обр}} - 1)}{(N_{\text{обр}} + 1)(N_{\text{обр}} + 3)}, \quad (13)$$

$$D(Ex) = \frac{24N_{\text{обр}}(N_{\text{обр}} - 2)(N_{\text{обр}} - 3)}{(N_{\text{обр}} - 1)^2(N_{\text{обр}} + 32)(N_{\text{обр}} + 5)}.$$

Если выполняются условия $|As| = 3\sqrt{D(As)}$ и $|Ex| = 5\sqrt{D(Ex)}$, то результаты испытаний распределены нормально.

При нормальном распределении для оценки вероятности отказа по пределу огнестойкости образца задается минимальное допускаемое значение предела огнестойкости $[\tau_{\text{огн. мин}}]$ [1]:

$$V_{\text{отк}} = \Phi\left(\frac{\tau_{\text{огн.ср}} - [\tau_{\text{огн. мин}}]}{S_{\tau}}\right), \quad (14)$$

где $V_{\text{отк}}$ — вероятность отказа по пределу огнестойкости образца;

$\Phi(z)$ — функция Лапласа;

$[\tau_{\text{огн. мин}}]$ — минимальное допускаемое значение предела огнестойкости образца, мин.

За базовый показатель предела огнестойкости образца взято время, измеряемое от начала нагрева стальной пластины без вспучивающегося покрытия до достижения ее необогреваемой поверхностью критической температуры 500 °С. Базовая огнестойкость стальной пластины без огнезащитного покрытия составила $\tau_{\text{б.огн}} = 1,1$ мин, она определялась как среднее значение измерений, проведенных для трех пластин. Огнезащитная эффективность каждого состава характеризуется коэффициентом относительной огнестойкости $K_{\text{от.огн } i}$, рассчитанным по выражению (7) (см. таблицу).

Анализ огнестойкости различных составов в высокотемпературном газовом потоке, реализующем углеродный температурный режим, показал, что предел огнестойкости образцов весьма низкий и составляет менее 15 мин при приведенной толщине металла $\delta_{\text{пр}} = 1,0$ мм. Эти же составы при стандартном температурном режиме и близкой толщине огнезащитного вспучивающегося покрытия имеют предел огнестойкости не менее 45 мин при приведенной толщине металла $\delta_{\text{пр}} = 3,4$ мм. Следовательно, создаваемые в высокотемпературном газовом потоке условия существенно снижают огнестойкость стальных конструкций, защищенных вспучивающимися покрытиями.

Задавая минимальный допускаемый предел огнестойкости $[\tau_{\text{огн}}] = 10$ мин, установлено, что состав 1 имеет вероятность отказа $V_{\text{отк}} = 0,4588$, состав 2 — $V_{\text{отк}} = 0,8964$, состав 3 — $V_{\text{отк}} = 0,0334$. При этом коэффициент относительной огнестойкости составов: $K_{\text{от.огн1}} = 9,18$; $K_{\text{от.огн2}} = 7,95$; $K_{\text{от.огн3}} = 11,28$ (см. таблицу).

Таким образом, проведенная экспериментальная оценка различных вспучивающихся покрытий показала существенное снижение их огнезащитной эффективности в высокотемпературном газовом потоке, реализующем углеводородный температурный режим, что должно учитываться при обеспечении огнестойкости стальных конструкций, работающих под давлением объектов нефтегазовой отрасли.

Результаты и их обсуждение

При пожарах на работающих под давлением объектах нефтегазовой отрасли часто возникают высокотемпературные газовые потоки, характеризующиеся высокой температурой до 1300 °С и значительной скоростью истечения из отверстий, трещин, разрывов разгерметизированного оборудования.

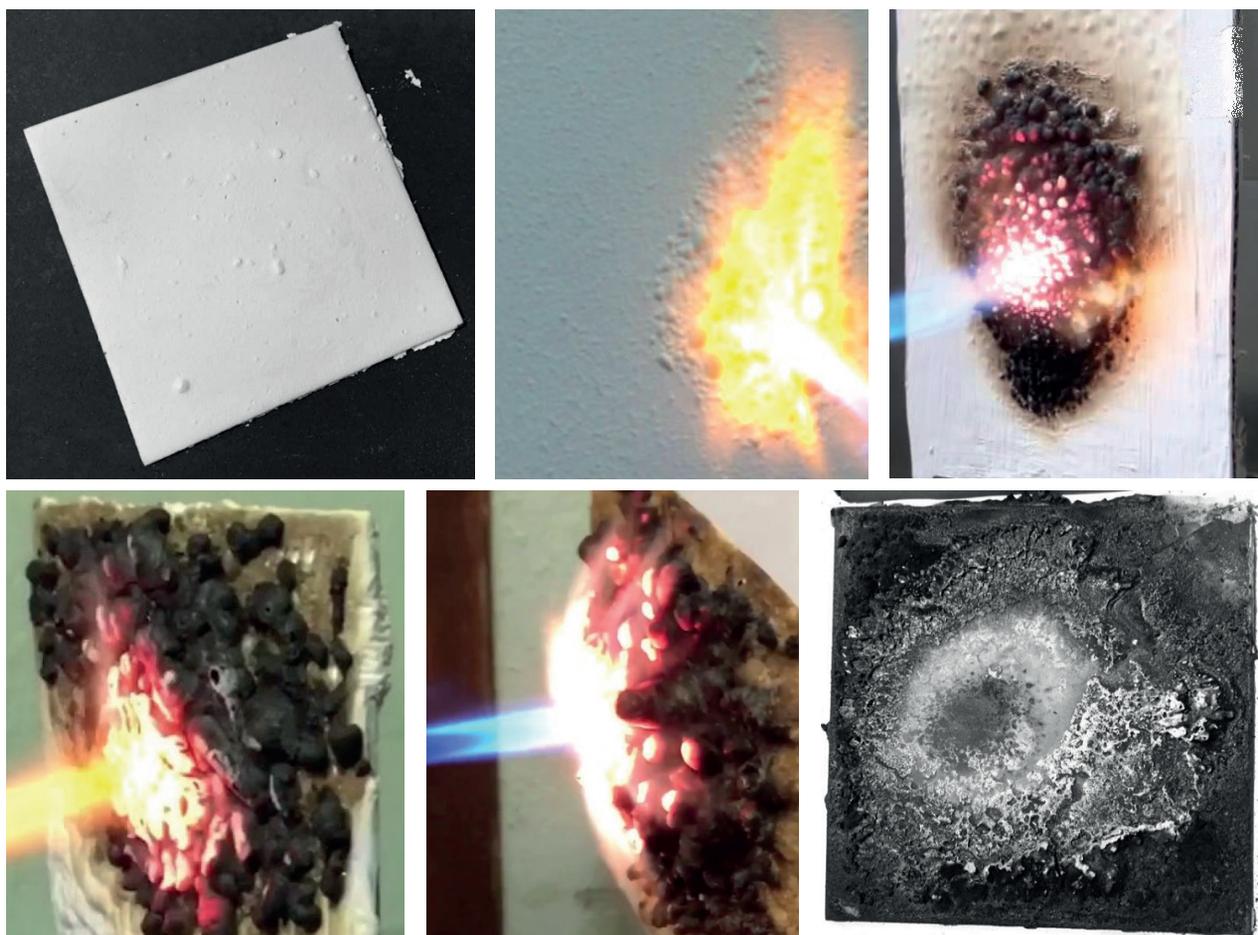


Рис. 6. Постепенное вспучивание огнезащитного покрытия от центра к краям образца в процессе нагрева высокотемпературным газовым потоком

Fig. 6. Gradual intumescence of the fire-retardant coating from the center to the edges of the sample exposed to heating by a high-temperature gas flow

Результаты эксперимента по определению предела огнестойкости стальной пластины с вспучивающимися покрытиями (составами) и вероятности их отказа

Results of an experiment conducted to determine the fire resistance limit of a steel plate with intumescent coatings (compositions) and the probability of their failure

Номер образца Sample number	Предел огнестойкости образца $\tau_{огн}$, мин Fire resistance limit of sample τ_{fr} , min		
	Состав 1 ($H_{пок} = 0,95 \dots 1,05$ мм) Composition 1 ($H_c = 0,95 \dots 1,05$ mm)	Состав 2 ($H_{пок} = 1,18 \dots 1,29$ мм) Composition 2 ($H_c = 1,18 \dots 1,29$ mm)	Состав 3 ($H_{пок} = 0,77 \dots 0,85$ мм) Composition 3 ($H_c = 0,77 \dots 0,85$ mm)
1	9,10	10,80	11,50
2	10,20	8,30	13,90
3	11,10	7,90	10,20
4	8,90	8,10	13,40
5	8,60	8,50	12,60
6	10,40	7,80	11,10
7	10,10	8,10	13,90
8	10,20	9,40	13,80

Окончание таблицы

9	11,50	8,50	12,10
10	10,90	10,00	11,60
Среднее значение $\tau_{огн.ср}$, мин Average value of $\tau_{av.fir}$, min	10,10	8,74	12,41
Среднее квадратическое отклонение S_{τ} , мин Mean square deviation S_{τ} , min	0,97	1,00	1,32
Коэффициент вариации v_{τ} Coefficient of variation v_{τ}	0,10	0,11	0,11
Доверительный интервал $\Delta\tau_{огн}$, мин Confidence interval $\Delta\tau_{fir}$, min	0,69	0,71	0,94
Нормальность распределения Normality of distribution	Нормальное Normal	Нормальное Normal	Нормальное Normal
Минимальный допустимый предел огнестойкости $[\tau_{огн.мин}]$, мин Minimum acceptable limit of fire resistance $[\tau_{fir.min}]$, min	10,00	10,00	10,00
Вероятность отказа $V_{отк}$ Probability of failure V_{tf}	0,4588	0,8964	0,0334
Коэффициент относительной огнестойкости $K_{от.огн}$ Coefficient of relative fire resistance $K_{rel.fir.res}$	9,1818	7,9455	11,2818

По результатам расчетов скорость истечения газа может достигать местной скорости звука 340 м/с. Подвергающиеся аэродинамическому и тепловому воздействию газового потока стальные конструкции теряют несущую способность и разрушаются в течение короткого времени, что приводит к существенному ущербу. Для минимизации ущерба повышают огнестойкость стальных конструкций, нанося на их поверхности огнезащитные покрытия. Из-за технологичности нанесения и хороших эксплуатационных свойств широко применяют огнезащитные вспучивающиеся покрытия.

Анализ действующей методики определения огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций показал, что испытания проходят в спокойной (малоподвижной) газовой среде. Во время испытаний изменяется только температура газа в печи. Наиболее опасным является углеводородный температурный режим, при котором температура за короткий промежуток времени возрастает до 1100 °С. Так как в действующей методике скорость газового потока не учитывается, то предложена методика более адекватной оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературном газовом потоке, учитывающая два фактора: температуру и скорость газового потока.

По предложенной методике проведена экспериментальная оценка огнезащитной эффективности различных вспучивающихся покрытий в высокотемпературном газовом потоке. Испытывалось три различных состава, предел огнестойкости образцов которых по данным производителя при стандартном температурном режиме и приведенной толщине металла $\delta_{пр} = 3,4$ мм составляет 45 мин. Их испытания в высокотемпературном газовом потоке, реализующем углеродный температурный режим, показали, что предел огнестойкости образцов весьма низкий и составляет менее 15 мин, а у одного из составов — меньше 10 мин при приведенной толщине металла $\delta_{пр} = 1,0$ мм.

Полученные экспериментальные результаты говорят о необходимости оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций на работающих под давлением объектах нефтегазовой отрасли.

Выводы

Огнезащитная эффективность вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературных газовых потоках резко снижается, поэтому актуальна задача разработки методики адекватной оценки их огнестойкости.

Скорость истечения высокотемпературных газовых потоков из разгерметизированного объекта может достигать местной скорости звука.

По действующей методике определение огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций проводится в спокойной (малоподвижной) газовой среде, при проведении испытания изменяется только температура газа.

По предложенной методике оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций проводится в высокотемпературном газовом потоке, учитываются температура и скорость газового потока.

Для оценки огнезащитной эффективности вспучивающегося покрытия в высокотемператур-

ном газовом потоке введен коэффициент относительной огнестойкости.

Проведенная экспериментальная оценка различных вспучивающихся покрытий показала существенное снижение их огнезащитной эффективности в высокотемпературном газовом потоке, реализующем углеводородный температурный режим.

Можно сделать вывод об актуальности и необходимости оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературном газовом потоке работающих под давлением объектов нефтегазовой отрасли, так как в этих условиях наблюдается существенное снижение огнезащитной эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрюшкин А.Ю. Применение сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для снижения вероятности отказа многослойных функциональных покрытий : монография. СПб., 2021. 258 с.
2. Андрюшкин А.Ю., Цой А.А. Определение параметров высокотемпературного газового потока при испытаниях огнезащитных покрытий // Безопасность жизнедеятельности. 2016. № 7 (187). С. 35–39.
3. Phan L.T., McAllister T.P., Gross J.L., Hurley M.J. Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2010. 200 p. DOI: 10.6028/nist.tn.1681
4. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2014. 20 p. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
5. Morys M., Illerhaus B., Sturm H., Schartel B. Variation of intumescent coatings revealing different modes of action for good protection performance // Fire Technology. 2017. Vol. 53. Pp. 1569–1587. DOI: 10.1007/s10694-017-0649-z
6. Kang J., Takahashi F., T'ien J.S. Computer tomography based structure characterization of expanded intumescent coatings for fire protection // Fire Technology. 2019. Vol. 55. Pp. 689–712. DOI: 10.1007/s10694-018-0796-x
7. Schaumann P., Kirsch T. Protected steel and composite connections: simulation of the mechanical behaviour of steel and composite connections protected by intumescent coating in fire // Journal of Structural Fire Engineering. 2015. Vol. 6. Issue 1. Pp. 41–48. DOI: 10.1260/2040-2317.6.1.41
8. Fox D.M., Cho W., Dubrulle L., Grützmaier P.G., Zammarano M. Intumescent polydopamine coatings for fire protection // Green Materials. 2020. DOI: 10.1680/jgrma.19.00065
9. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 95. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
10. Puspitasari W.C., Ahmad F., Ullah S., Hussain P., Megat-Yusoff P.S.M., Masset P.J. The study of adhesion between steel substrate, primer, and char of intumescent fire retardant coating // Progress in Organic Coatings. 2019. Vol. 127. Pp. 181–193. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.11.015
11. Nolan D.P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. Gulf Professional Publ., 2011. 340 p. DOI: 10.1016/C2009-0-64221-5
12. Correia A.M., Pires T.A.C., Rodrigues J.P.C. Behaviour of steel columns subjected to fire // Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Leeds, UK : University of Leeds, 2011. Pp. 879–890. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_13-01
13. Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong C. Wang. Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 101. Pp. 25–38. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.08.006

14. Meijing Liu, Shenggang Fan, Wenjun Sun, Runmin Ding, Ting Zhu. Fire-resistant design of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints // *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 100. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.06.006
15. Maciulaitis R., Grigonis M., Malaiskiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance // *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 98. Pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007
16. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New method for quality control of fire protective coatings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 471. Issue 11. DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112016
17. Андрюшкин А.Ю., Цой А.А. О методике определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения // *Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России*. 2016. № 2. С. 45–53. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V82/7.pdf>
18. Андрюшкин А.Ю., Цой А.А., Смирнова М.А. Об основных предпосылках метода испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературных газовых потоках // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2016. № 1 (37). С. 39–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25984067>
19. Андрюшкин А.Ю., Цой А.А., Смирнова М.А. О методе испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературных газовых потоках // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2016. № 2 (38). С. 37–45.
20. Цой А.А., Демехин Ф.В. Испытание огнезащитных материалов в условиях углеводородного температурного режима // *Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России*. 2015. № 4. С. 139–142. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V74/4.pdf>

REFERENCES

1. Andryushkin A.Yu. *Application of supersonic gas-dynamic sputtering with multi-jet gas supply to reduce the probability of failure of multilayer functional coatings : monograph*. St. Petersburg, 2021; 258. (rus).
2. Andryushkin A.Yu., Tsoi A.A. Methods of the determination parameter hot gas flow when test defensive covering. *Life safety*. 2016; 7(187):35-39. (rus).
3. Phan L.T., McAllister T.P., Gross J.L., Hurley M.J. *Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings*. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2010; 200. DOI: 10.6028/nist.tn.1681
4. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. *White paper on fire behavior of steel structures*. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2014; 20. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
5. Morys M., Illerhaus B., Sturm H., Scharfel B. Variation of intumescent coatings revealing different modes of action for good protection performance. *Fire Technology*. 2017; 53:1569-1587. DOI: 10.1007/s10694-017-0649-z
6. Kang J., Takahashi F., T'ien J.S. Computer tomography based structure characterization of expanded intumescent coatings for fire protection. *Fire Technology*. 2019; 55:689-712. DOI: 10.1007/s10694-018-0796-x
7. Schaumann P., Kirsch T. Protected steel and composite connections: simulation of the mechanical behaviour of steel and composite connections protected by intumescent coating in fire. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2015; 6(1):41-48. DOI: 10.1260/2040-2317.6.1.41
8. Fox D.M., Cho W., Dubrulle L., Grützmacher P.G., Zammarano M. Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials*. 2020. DOI: 10.1680/jgrma.19.00065
9. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018; 95:42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
10. Puspitasari W.C., Ahmad F., Ullah S., Hussain P., Megat-Yusoff P.S.M., Masset P.J. The study of adhesion between steel substrate, primer, and char of intumescent fire retardant coating. *Progress in Organic Coatings*. 2019; 127:181-193. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.11.015
11. Nolan D.P. *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities*. Gulf Professional Publ., 2011; 340. DOI: 10.1016/C2009-0-64221-5
12. Correia A.M., Pires T.A.C., Rodrigues J.P.C. Behaviour of steel columns subjected to fire. *Proceedings of the Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Leeds, UK, University of Leeds, 2011; 879-890. DOI: 10.3850/978-981-08-7724-8_13-01

13. Qing Xu, Guo-Qiang Li, Jian Jiang, Yong C. Wang. Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures. *Fire Safety Journal*. 2018; 101:25-38. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.08.006
14. Meijing Liu, Shenggang Fan, Wenjun Sun, Runmin Ding, Ting Zhu. Fire-resistant design of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints. *Fire Safety Journal*. 2018; 100:1-19. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.06.006
15. Maciulaitis R., Grigonis M., Malaiskiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance. *Fire Safety Journal*. 2018; 98:15-23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007
16. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New method for quality control of fire protective coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471(11). DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112016
17. Andryushkin A.Yu., Tsoi A.A. The methods of definition of fire rating of flame-retardant coating for steel structures in hydrocarbon jet fire. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2016; 2:45-53. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V82/7.pdf> (rus).
18. Andryushkin A.Yu., Tsoi A.A., Smirnova M.A. About the basic preconditions of creation of the method of testing fire-resistant coatings in high temperature gas flow. *Problems of Risk Management in the Technosphere*. 2016; 1(37):39-46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25984067> (rus).
19. Andryushkin A.Yu., Tsoi A.A., Smirnova M.A. The method tests fire protective coatings in high-temperature gas flow. *Problems of Risk Management in the Technosphere*. 2016; 2(38):37-45. (rus).
20. Tsoy A.A., Demehin F.V. Testing of fire resistant materials in the conditions of the hydrocarbon temperature mode. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2015; 4:139-142. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V74/4.pdf> (rus).

*Поступила 15.03.2021, после доработки 20.05.2021; принята к публикации 04.06.2021
Received January March 15, 2021; Received in revised form February May 20, 2021; Accepted June 4, 2021*

Информация об авторах

АНДРЮШКИН Александр Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 717627; Scopus Author ID: 55603904600; ORCID: 0000-0002-7812-069X; e-mail: sascha1a@mail.ru

КИРШИНА Алена Андреевна, ассистент кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7564-6672; e-mail: kirshinaalyona@gmail.com

КАДОЧНИКОВА Елена Николаевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 832642; ORCID: 0000-0002-4577-390X; e-mail: vf10@yandex.ru

Information about the authors

Alexander Yu. ANDRYUSHKIN, Cand. Sci. (Eng.), Assistant professor, Head of the Department of the Technology of Structural Materials and Production of Rocket and Space Technology, Baltic state technical university "VOENMEH", Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 717627; Scopus Author ID: 55603904600; ORCID: 0000-0002-7812-069X; e-mail: sascha1a@mail.ru

Alyona A. KIRSHINA, Assistant of the Department Engines and Power Installations of Aircraft, Baltic State Technical University "VOENMEH", Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7564-6672; e-mail: kirshinaalyona@gmail.com

Elena N. KADOCHNIKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 832642; ORCID: 0000-0002-4577-390X; e-mail: vf10@yandex.ru