



УДК 536

## МЕТОД НАНЕСЕНИЯ ОГНЕЗАЩИТНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА «ЖИДКОЕ СТЕКЛО–МИКРОЧАСТИЦЫ ГРАФИТА» НА ПОВЕРХНОСТИ ОГРАЖДЕНИЯ

А.С. Устинов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, 185910, Российская Федерация  
Адрес для переписки: anton-ustinov@psu.karelia.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 17.09.18, принята к печати 19.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1001-1007

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Устинов А.С. Метод нанесения огнезащитного композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» на поверхности ограждения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1001–1007. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1001-1007

### Аннотация

Приведены результаты исследования огнестойкого композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита». Рассмотрена технология изготовления образцов с необходимыми соотношениями массовых долей компонентов смеси. Выбран способ нанесения композитного материала в качестве огнезащитного защитного покрытия. Методом обмазки изготовлены огнестойкие покрытия и выполнены исследования адгезионной способности изготовленных покрытий. Выявлены значения предельных нагрузок, которые приводят к разрушению композитного материала. Предельное зафиксированное значение нагрузки для деревянной поверхности составило 1,22 МПа, что удовлетворяет требованиям нормативных документов. Прочность адгезионной связи с железом значительно меньше и составляет 0,2 МПа. Методом торкретирования изготовлены огнестойкие покрытия. В связи с изменением способа нанесения выполнена корректировка огнезащитного состава. Проведены исследования адгезионной способности данных покрытий. Нижняя граница адгезионной связи огнестойкого композитного материала для дерева составила 0,8 МПа, для железа – 0,1 МПа. На основании результатов проведенных исследований сделан вывод о том, что композитный материал с полученными характеристиками может использоваться в качестве огнезащитного покрытия для строительных конструкций с целью повышения огнестойкости и снижения пожарной опасности, в качестве футеровки оборудования в теплоэнергетической и металлургической промышленности, а также в технике, применяемой в чрезвычайных ситуациях.

### Ключевые слова

огнезащитный композитный материал, способ нанесения, обмазка, торкретирование

## APPLICATION METHOD OF FIRE-RETARDANT COMPOSITE MATERIAL "WATER GLASS-GRAPHITE MICROPARTICLES" ON ENCLOSURE SURFACE

A.S. Ustinov<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Petrozavodsk State University, (PetrSU), Petrozavodsk, 185910, Russian Federation  
Corresponding author: anton-ustinov@psu.karelia.ru

### Article info

Received 17.09.18, accepted 19.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1001-1007

Article in Russian

**For citation:** Ustinov A.S. Application method of fire-retardant composite material "water glass-graphite microparticles" on enclosure surface. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1001–1007 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1001-1007

### Abstract

The paper presents research results of fire-resistant composite material liquid glass-graphite microparticles. The production technology is considered for samples with necessary ratios of mass fractions of the mixture components. The method of composite material applying as a fire-retardant protective coating is chosen. Fire-resistant coatings are made by encapsulation method, and studies of adhesive capability of the produced coatings are performed. The values of limit loads that lead to the destruction of the composite material are revealed. The maximum fixed load value for the wooden

surface was 1.22 MPa, that meets the requirements of regulatory documents. The strength of the adhesion bond with iron is much less and is equal to 0.2 MPa. Also, fire-resistant coatings are manufactured by the second alternative shotcrete method. The composition adjustment is performed in connection with the change of the application method for fire retardant composition. The studies of adhesion ability of these coatings are carried out. The lower boundary value of the adhesion bond for fire-resistant composite material for wood was 0.8 MPa, the strength of the adhesion bond with iron is much less and is equal to 0.1 MPa. Based on the research results, it is concluded that the composite material with the obtained characteristics can be used as a fire-retardant coating for building structures in order to increase fire resistance and reduce fire danger, as an equipment lining in the heat and power industry and metallurgical industry, as well as in equipment used in emergency situations.

**Keywords**

fire-retardant composite material, application method, coating, shotcrete

**Введение**

Внедрение современных систем локализации и гашения очага пожара давно уже стало острой необходимостью. В настоящее время используются сложные системы сигнализации, автоматического пожаротушения, мониторинг огнеопасных объектов, но зачастую и эти методы не срабатывают [1].

Предотвратить стремительное распространение огня позволяют огнезащитные материалы.

В настоящее время идет интенсивная разработка эффективных огнестойких материалов и конструкций, а также технических устройств пожарной безопасности.

Современный этап развития физики, техники, инженерных средств и устройств характеризуется использованием композитных материалов, которые активно вошли в практику и заменили традиционные материалы в энергетической, транспортной, электронной и других сферах деятельности [2–10]. Отличие большинства композитных материалов от традиционных состоит в том, что процесс их изготовления может быть совмещен с процессом изготовления изделия. Исследования показали, что простая технология отверждения порошка углерода с использованием жидкого натриевого стекла и отвердителя может быть реализована для синтеза огнестойкого композита с углеродистым наполнителем [11, 12].

Жидкое натриевое стекло  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  в качестве связующего компонента ценно такими свойствами, как экологическая чистота производства и применения, негорючестью и нетоксичностью, а также дешевизной и доступностью исходного материала. При этом важной характеристикой, определяющей прочностные свойства покрытия, является адгезия. Эта характеристика в значительной степени влияет на возникновение предельного состояния при нагрузках и зависит от способа нанесения композитного материала на защищаемую поверхность. Обладая высокими адгезионными свойствами, жидкое стекло хорошо склеивает различные материалы.

Применение графита в качестве наполнителя обусловлено его высокой термической и химической стойкостью [13], а также эффективным замедлением нейтронов при их пространственно-энергетическом распределении [14]. Следует отметить, что композитный материал характеризуется пористостью. В порах могут протекать химические реакции, происходит окисление углерода до оксида углерода:



Избыток кислорода  $\text{O}_2$  может привести к догоранию  $\text{CO}$  до диоксида углерода [15]:



Индексы в уравнениях характеризуют агрегатное состояние: т – твердое, г – газообразное.

При этом создается дефицит свободного кислорода. С понижением концентрации кислорода увеличивается количество  $\text{CO}$ . В связи с отсутствием в газовой фазе кислорода в порах развивается эндотермическая реакция взаимодействия  $\text{C}$  и  $\text{CO}_2$ :



Максимальной концентрации  $\text{CO}_2$  в слое топлива соответствует и наибольшая температура. По мере увеличения в газовой фазе  $\text{CO}$  температура в его макро- и микропорах понижается.

Наряду с теплоемкостью и энтропией важнейшими характеристиками являются энтальпия и энергия Гиббса. Оценка производится по знаку и абсолютной величине энергии Гиббса  $\Delta G_T^0$ , кДж/моль. Определив изменение энергии Гиббса, можно количественно вычислить направление и полноту протекания процесса. В тех случаях, когда  $\Delta G_T^0 \ll 0$ , при всех условиях реакция возможна только в прямом направлении. Если  $\Delta G_T^0 \gg 0$ , реакция неосуществима или возможна только в обратном направлении. При  $\Delta G_T^0 = 0$  система находится в равновесии [16].

На рис. 1 представлена зависимость от температуры энергии Гиббса–изобарно-изотермических потенциалов в уравнениях реакций (1)–(4) [15].

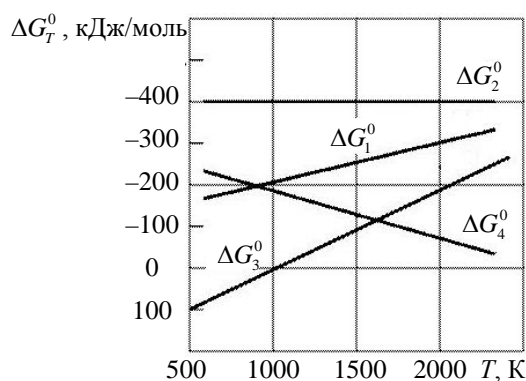


Рис. 1. Температурная зависимость  $\Delta G_T^0$  (кДж/моль) реакций горения углерода

Использование микропорошка графита в качестве наполнителя компенсирует повышение теплозащитных свойств композитного материала за счет эндотермической реакции взаимодействия С и  $\text{CO}_2$  в макро- и микропорах композита, по сравнению, например со слюдой, коэффициент теплопроводности которой также обладает сильной анизотропией.

Целью настоящей работы является выбор и обоснование метода нанесения на защищаемую поверхность огнестойкого покрытия, в качестве которого используется композитный материал «жидкое стекло–микрочастицы графита».

#### Разработка огнестойкого покрытия

Первоначально готовилась композиция из жидкого стекла. Заранее все составляющие подготавливались в необходимых соотношениях: порошок графита (42 масс.%), жидкое стекло  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  (50 масс.%) и отвердитель – натрий кремнефтористый  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  (8 масс.%) [12]. Соотношение компонентов было экспериментально подобрано в условии отсутствия разрушения образцов при нагреве до 100 °С. Далее состав замешивали в чистой емкости. В жидкое стекло высыпали кремнефтористый натрий. При полном растворении отвердителя в полученную стекло-связку добавляли порошок графита и продолжали замешивать до получения однородной смеси.

На следующем этапе исследована огнестойкость полученных экспериментальных образцов композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» [11]. Предел огнестойкости определен по потере теплоизолирующей способности (I) вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности материала до предельных для данного материала значений, которые составляют 220 °С. В соответствии с противопожарными нормативными документами *получен предел огнестойкости* П15, который составил 15 мин<sup>1</sup>. Методом рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии определена структура композитного материала, установлены фазы компонентов продуктов реакции образования микрокомпозиции. Показано, что на первом этапе нагрева при температуре от 40 до 200 °С происходит испарение как внешней, так и внутренней влаги образцов. При последующем нагреве в интервале температур от 473 до 570 °С происходит разложение натрия кремнефтористого  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  с образованием фторида натрия  $\text{NaF}$ , а также тетрафорида кремния  $\text{SiF}_4$ , который улетучивается. Термоаналитическим методом установлено, что при нагреве свыше 900 °С образцы начинают постепенно разрушаться вследствие достижения компонентами смеси температуры плавления [17].

На основании результатов исследований сделан вывод о том, что композитный материал с полученными характеристиками может использоваться в качестве защитного покрытия строительных конструкций с целью повышения огнестойкости и снижения пожарной опасности, в качестве футеровки оборудования в теплоэнергетической и металлургической промышленности, а также в технике, применяемой в чрезвычайных ситуациях.

#### Выбор и обоснование способа нанесения защитного покрытия

По консистенции огнестойкий композитный материал можно отнести к группе огнезащитных штукатурок, паст и обмазок, по составу аналогичных краскам, но отличающихся более крупной дисперсностью наполнителей и антипиренов, образующих на защищаемой поверхности слой покрытия

<sup>1</sup> ISO 834–12:2012 Fire–resistance tests. Elements of building construction. Part 12: Specific requirements for separating elements evaluated on less than full scale furnaces.

большей толщины, чем лаки и краски<sup>1</sup>. Отличие огнестойких штукатурок, паст и обмазок от обычных цементно-песчаных шпатлевок и растворных штукатурных смесей, предназначенных для отделочных работ, состоит в том, что в качестве связующего не используется цемент, а в качестве заполнителя не используется кварцевый песок. Огнезащитные штукатурные растворы, пасты и обмазки готовят на основе жидкого стекла, строительного гипса, глиноземистого цемента, пуццолановых цементов. В качестве заполнителя используется углерод и другие вещества [1]. Это, в свою очередь, еще раз подтверждает групповую принадлежность огнестойкого материала.

В результате анализа способов нанесений покрытий выявлено, что для нанесения покрытий следует использовать метод обмазки.

#### **Разработка способа нанесения огнестойкого материала**

Наиболее распространенными объектами огнезащиты являются деревянные и металлические поверхности. Для нанесения огнестойкого материала любую поверхность необходимо предварительно подготовить: механическим способом очистить от грязи, пыли, ржавчины, окалины, других загрязнений<sup>2</sup>. Если защищаемая поверхность гладкая, то ее необходимо дополнительно зачистить шкуркой, чтобы сделать более шероховатой – таким образом обеспечивается лучшая сцепляемость огнезащитного состава с защищаемой поверхностью. Обезжиривание поверхности выполняется с использованием уайт-спирита. Далее защищаемую поверхность высушивают. На этом подготовка защищаемой поверхности закончена.

На следующем этапе наносится огнезащитный состав и изготавливается огнестойкое покрытие. Огнезащитный состав наносился с помощью шпателя на поверхность, начиная с центральной части, а от нее – к периферии, при этом края плотно прижимались. Это способствовало лучшему сцеплению с поверхностью, уменьшению пустот и растрескивания готового покрытия. Требуемая толщина покрытия обеспечивалась за один технологический подход. Огнезащитная обработка проводилась при 10–25 °С и нормальном атмосферном давлении. По мере высыхания и окончательного набора прочности наблюдалась усадка огнестойкого покрытия.

Разработанный способ обладает рядом преимуществ: он обеспечивает монолитную связь с защищаемой поверхностью, при которой не образуется щель между защищаемой поверхностью и покрытием, обеспечивается бесшовность; возможно придать поверхности любую форму и использовать ее во влажных помещениях; наносить покрытия просто.

Допускается использование и других способов нанесения. Например, лучшую сцепляемость огнезащитного состава с защищаемой поверхностью обеспечивает предварительная подготовка, а именно зачистка, для чего может использоваться антикоррозионная грунтовка для металлических и деревянных поверхностей Грунт ГФ-021М.

Из огнестойкого состава могут изготавливаться огнестойкие плитки, которые, как и облицовочные, можно приклеивать на защищаемые поверхности. В этом случае необходим подбор дополнительного высокотемпературного клеящего соединения, адгезионные свойства которого обеспечивали бы надежное соединение огнестойких плиток с защищаемыми поверхностями, например термостойкие или каминные герметики. По термостойкости и адгезионным свойствам все герметики практически одинаковы, они различаются лишь ценой. По результатам анализа выбран жаростойкий герметик KimTecTermo 1200 °С, который может применяться для уплотнения швов и стыков в отопительных установках, открытых каминных и печах, а также для огнеупорных поверхностей, например кирпичей.

#### **Исследование адгезионной способности образцов композитного материала, изготовленных методом обмазки покрытий**

Важной характеристикой, определяющей прочностные свойства композиционного материала, является адгезия. Эта характеристика в значительной степени влияет на наступление предельного состояния при нагрузках. Метод отрыва позволяет получить наиболее точную характеристику прочности адгезионного соединения, однако его применение связано с некоторыми затруднениями, в частности, необходимо строго центрированно приложить нагрузку к испытываемому образцу и обеспечить равномерное распределение напряжений по адгезионному шву. В случае адгезии двух жестких твердых тел этот способ более показателен, так как в этом случае при приложении достаточной силы может произойти практически одновременный отрыв по всей площади контакта. Уровень адгезии при испытании на отрыв, сдвиг или расслаивание можно определять на обычных динамометрах или на специальных адгезиометрах.

Для исследования процессов, происходящих при смешении графита с жидким стеклом в присутствии отвердителя, проведены механические испытания композиционного материала с целью

<sup>1</sup> ГОСТ Р 53292-2009 Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний. Введен 01.01.2009. М.: Стандартинформ, 2009. 17 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 9.402-2004 ЕСЗКС. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. Введен 01.01.2006. М.: Стандартинформ, 2005. 43 с.

определения нагрузки, необходимой для отрыва испытываемого покрытия от поверхности основания. Готовая композиция (толщиной 2 мм) наносилась на деревянные образцы (6 штук). После полного высыхания образцы разрывали, нагрузка в момент разрыва покрытия определялась с погрешностью 10 Па.

Величина адгезии (Па) рассчитывалась по формуле<sup>1</sup>:

$$R = \frac{F}{A}, \quad (5)$$

где  $F$ , Н – значение силы, при которой произошел отрыв;  $A$ , м<sup>2</sup> – площадь отрыва.

Нагрузка на образец прикладывалась путем подвешивания груза на крючки. Разрушение образцов происходило по границе композитного материала и подложек по самой структуре в продольном сечении (рис. 2). Трещины в образцах не образовывались. Предельное зафиксированное значение нагрузки составило 1,22 МПа, что удовлетворяет требованиям нормативных документов<sup>2</sup>. Также в результате проведенных экспериментов было выявлено, что прочность адгезионной связи с железом значительно меньше – 0,2 МПа.

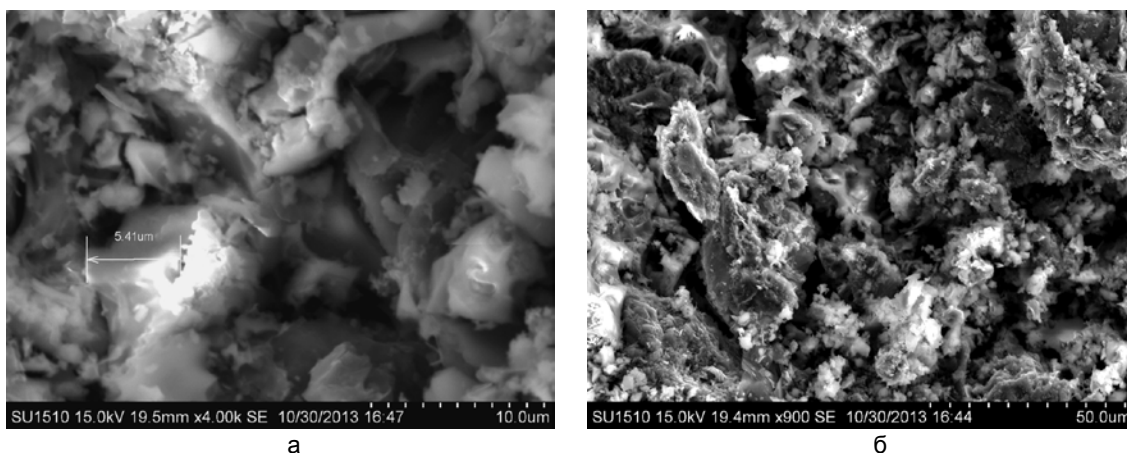


Рис. 2. Микрофотография поверхности отрыва (электронный микроскоп HitachiSU 1510): а – длина 10 мкм; б – 50 мкм

### Изготовление огнестойких покрытий методом торкретирования

На основе исследования методов нанесения покрытий в качестве альтернативы методу обмазки для нанесения был выбран метод торкретирования, позволяющий изготавливать более тонкие покрытия. Однако понятие «торкретирование» имеет два толкования<sup>3</sup>:

1) специализированный метод бетонирования в водохозяйственном строительстве, в результате которого получается торкрет-бетон. Области применения торкрет-бетона предусматривают создание покрытий с использованием данного материала в процессе производства работ при возведении новых зданий и сооружений и при производстве работ, связанных с предупредительным ремонтом, с восстановлением конструкций зданий и сооружений, в том числе и огнеупорной облицовки;

2) это синоним распыления, набрызга, разбрызгивания, пульверизации, нанесения.

В настоящей статье использовано второе толкование, это обусловлено тем, что под способ нанесения подбирается исходная консистенция огнезащитного состава. Она может соответствовать как бетонам и торкрет-бетонам, так и пастам, обмазкам, краскам и т.д. Оборудование, используемое для изготовления огнестойких покрытий, также определяется выбранным способом нанесения. Для изготовления тонких огнестойких покрытий выбран безвоздушный метод торкретирования как наиболее экономичный и безопасный.

Для нанесения огнезащитного материала обычно применяют установки безвоздушного распыления (УБР), в которых краскораспылитель имеет встроенное в головку сопло и нагнетающий высокое давление на наносимый материал насос. В связи с этим для огнестойких покрытий выбран краскораспылитель электрический 6505 «ПРОРАБ».

В связи с изменением способа нанесения огнезащитного состава потребовалась корректировка консистенции состава. Поэтому для изготовления огнестойких покрытий методом безвоздушного распыления использовался следующий состав: жидкое натриевое стекло – 40 %, наполнитель графит –

<sup>1</sup> ГОСТ 28574-90 Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Методы испытаний адгезии защитных покрытий. Введен 01.01.1991. М.: Стандартинформ, 1990. 7 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 379-95 Кирпич и камни силикатные. Технические условия. Введен 01.07.1996. М.: Изд-во стандартов, 1996. 12 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 25192-2012 Бетоны. Классификация и общие технические требования. Введен 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2013. 7 с.

34 %, кремнефтористый натрий – 6 %, вода – 20 %.

При торкретировании для обеспечения равномерного покрытия скорость перемещения оборудования сохранялась постоянной. За один технологический подход наносился только один слой толщиной 1 мм. Следующий слой наносился после высыхания предыдущего. Таким образом, требуемая толщина покрытия обеспечивалась за несколько технологических проходов. В результате были изготовлены огнестойкие покрытия толщиной 3 мм для исследования адгезионной способности (рис. 3, а); нагрузка на образец прикладывалась путем подвешивания груза (рис. 3, б).

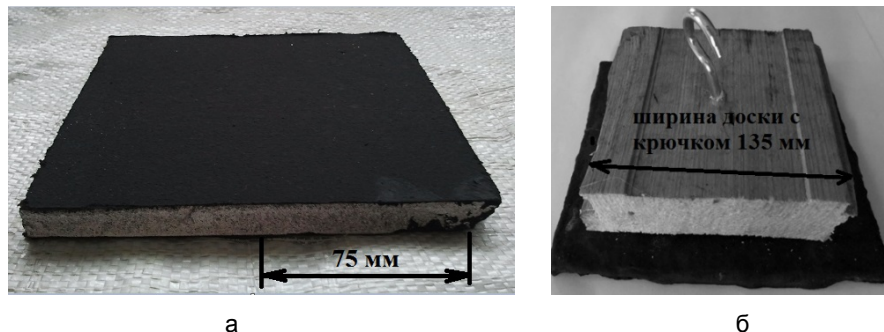


Рис. 3. Приспособления для определения нагрузки на отрыв покрытия

Проведенные эксперименты позволили сделать следующие выводы. Величина нижней границы адгезионной связи огнестойкого композитного материала для дерева составила 0,8 МПа, прочность адгезионной связи с железом значительно меньше – 0,1 МПа.

#### Заключение

Рассмотрены способы нанесения огнезащитного композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» на ограждаемые поверхности. Методом обмазки изготовлены огнестойкие покрытия и исследована адгезионная способность. Исследования показали, что для деревянных образцов разрушение происходило по границе композитного материала и подложек по самой структуре в продольном сечении. Трещины в образцах не образовывались. Предельно зафиксированная нагрузка составила 1,22 МПа. Результаты проведенных экспериментов показали, что прочность адгезионной связи с железом значительно меньше – 0,2 МПа.

Также были изготовлены огнестойкие покрытия методом торкретирования, проведены исследования адгезионной способности. Нижняя граница адгезионной связи огнестойкого композитного материала для дерева составила 0,8 МПа, прочность с железом – 0,1 МПа.

На основании результатов исследований сделан вывод о том, что композитный материал с полученными характеристиками может использоваться в качестве защитного покрытия для строительных конструкций с целью повышения огнестойкости и снижения пожарной опасности, в качестве футеровки оборудования в теплоэнергетической и металлургической промышленности, а также в технике, применяемой в чрезвычайных ситуациях.

#### Литература

1. Собрень С.В. Огнезащита материалов и конструкций. Пожарная безопасность предприятия. Справочник. 3-е изд. М.: Пожнзна, 2004. 240 с.
2. Sateesh N., Rajesh V., Rao P.M.V., Satyanarayana K., Mahesh Babu B. Thermal analysis of carbon composites subjected to various atmospheric conditions // *Materials Today: Proceedings*. 2018. V. 5. N 2. P. 5768–5773. doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.173
3. Волкова В.К. Теплофизические свойства композиционных материалов с полимерной матрицей и твердых растворов. М.: Наука образование, 2011. 104 с.
4. Ullah S., Ahmad F. Effects of zirconium silicate reinforcement on expandable graphite based intumescent fire retardant coating // *Polymer Degradation and Stability*. 2014. V. 103. P. 49–62. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.02.016
5. Kim H.K., Ryou J.S. New approach for delaying the internal temperature rise of fire resistant mortar made with coated aggregate // *Construction and Building Materials*. 2017. V. 149. P. 76–90. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.116
6. Рыженко В.Х., Рыженко А.В. Проектирование конструкций с требуемой огнестойкостью // *Актуальные проблемы техносферной безопасности и природообустройства*.

#### References

1. Sobur' S.V. *Fire Protection of Materials and Constructions. Concern Fire Safety. Handbook*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Pozhkniga, 2004, 240 p. (in Russian)
2. Sateesh N., Rajesh V., Rao P.M.V., Satyanarayana K., Mahesh Babu B. Thermal analysis of carbon composites subjected to various atmospheric conditions. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 5768–5773. doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.173
3. Volkova V.K. *Thermophysical Properties of Composite Materials with Polymeric Matrix and Solid Solutions*. Moscow, Nauka Obrazovaniya Publ., 2011, 104 p. (in Russian)
4. Ullah S., Ahmad F. Effects of zirconium silicate reinforcement on expandable graphite based intumescent fire retardant coating. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, vol. 103, pp. 49–62. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.02.016
5. Kim H.K., Ryou J.S. New approach for delaying the internal temperature rise of fire resistant mortar made with coated aggregate. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 149, pp. 76–90. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.116
6. Ryzhenko V.H. Ryzhenko A.V. Design of the structures with the required fire-resistance. *Proc. Actual Problems of Technosphere Safety and Environmental Engineering*. Blagoveshchensk,

- Благовещенск, 2014. С. 283–287.
7. Минасян Р.М. Кремнийорганические клеи-герметики с повышенной огнестойкостью // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. № 7. С. 11–12.
  8. Kerekes Z., Lubloy E., Restas A. Standard fire testing of chimney linings from composite materials // *Journal of Building Engineering*. 2018. V. 19. P. 530–538. doi: 10.1016/j.jobe.2018.05.030
  9. Grange N., Chetehouna K., Gascoin N., Coppalle A., Reynaud I., Senave S. One-dimensional pyrolysis of carbon based composite materials using FireFOAM // *Fire Safety Journal*. 2018. V. 97. P. 66–75. doi: 10.1016/j.firesaf.2018.03.002
  10. Zhang J., Delichatsios M.A., Fateh T., Suzanne M., Ukleja S. Characterization of flammability and fire resistance of carbon fibre reinforced thermoset and thermoplastic composite materials // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. V. 50. P. 275–282. doi: 10.1016/j.jlp.2017.10.004
  11. Питухин Е.С., Устинов А.С. Исследование предела огнестойкости композитного материала жидкое стекло-микрочастицы графита // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т. 16. № 2. С. 277–283. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-277-283
  12. Гостев В.А., Питухин Е.А., Устинов А.С., Яковлева Д.А. Исследование теплозащитных свойств композитного материала жидкое стекло-микрочастицы графита // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 3(91). С. 82–88.
  13. Химическая энциклопедия: В 5 т. / Гл. ред. И.Л. Кнунянц, Н.С. Зефилов. М.: Советская энциклопедия, 1998.
  14. Гусев Н.Г., Климанов В.А., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. Т. 1. Физические основы защиты от излучений. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1989. 512 с.
  15. Нечаев В.В., Смирнов Е.А. Физическая химия сплавов. М.: МИФИ, 2006. 227 с.
  16. Самарский А.А., Вабишевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: УРСС, 2003. 784 с.
  17. Устинов А.С., Питухин Е.А. Исследование композитного материала «жидкое стекло–микрочастицы графита» методом термогравиметрии // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 5. С. 826–833. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-826-83.
  - Russia, 2014, pp. 283–287. (in Russian)
  7. Minas'yan R.M. Organosilicon glue-sealing materials with improved refractoriness. *Polymer Science. Series D*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 44–45. doi: 10.1134/S1995421209010080
  8. Kerekes Z., Lubloy E., Restas A. Standard fire testing of chimney linings from composite materials. *Journal of Building Engineering*. 2018, vol. 19, pp. 530–538. doi: 10.1016/j.jobe.2018.05.030
  9. Grange N., Chetehouna K., Gascoin N., Coppalle A., Reynaud I., Senave S. One-dimensional pyrolysis of carbon based composite materials using FireFOAM. *Fire Safety Journal*, 2018, vol. 97, pp. 66–75. doi: 10.1016/j.firesaf.2018.03.002
  10. Zhang J., Delichatsios M.A., Fateh T., Suzanne M., Ukleja S. Characterization of flammability and fire resistance of carbon fibre reinforced thermoset and thermoplastic composite materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, vol. 50, pp. 275–282. doi: 10.1016/j.jlp.2017.10.004
  11. Pitukhin E.A., Ustinov A.S. Fire-resistance properties research of “water glass - graphite microparticles” composite material. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 277–283. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-277-283
  12. Gostev V.A., Pitukhin E.A., Ustinov A.S., Yakovleva D.A. Thermal insulation properties research of the composite material water glass-graphite microparticles. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 3, pp. 82–88. (in Russian)
  13. *Chemical Encyclopedia* / Ed. I.L. Knunyants, N.S. Zefirov. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1998. (in Russian)
  14. Gusev N.G., Klimanov V.A., Mashkovich V.P., Suvorov A.P. *Protection Against Ionizing Radiation. V. 1. Physical Basis of Radiation Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 512 p. (in Russian)
  15. Nechaev V.V., Smirnov E.A. *Physical Chemistry of Alloys*. Tutorial. Moscow, MEPHI Publ., 2006, 227 p. (in Russian)
  16. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. *Computational Heat Transfer*. Moscow, URSS, 2003, 784 p. (in Russian)
  17. Ustinov A.S., Pitukhin E.A. Research of “water glass - graphite microparticles” composite material by thermogravimetry method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 826–833 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-826-833

**Автор**

**Устинов Антон Сергеевич** – старший преподаватель, Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-5254-0549, anton-ustinov@psu.karelia.ru

**Author**

**Anton S. Ustinov** – Senior lecturer, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-5254-0549, anton-ustinov@psu.karelia.ru