https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.06.28-39
УДК 69:614.84; 691-419

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала МБОР на стенде лучистого нагрева

© А.Н. Гаращенко ✉, А.В. Виноградов, И.З. Даштиев, Н.В. Кобылков, С.А. Терехов

АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (Россия, 141371, Московская обл., г. Хотьково, ул. Заводская)

АННОТАЦИЯ

Введение. На примере рулонного базальтоволокнистого материала МБОР продемонстрированы возможности исследований конструктивной огнезащиты на стенде лучистого нагрева.

Методика исследований. Воспроизведение требуемого режима высокотемпературного воздействия производится за счет лучистого нагрева пакетом мощных галогенных ламп накаливания. Режим регулируется изменением напряжения, подаваемого на лампы, и контролируется с помощью термопар, фиксирующих температуру нагреваемой поверхности образца огнезащиты. Подобные исследования показали свою эффективность для различных видов огнезащиты и различных конструкций. Особенно они актуальны при обеспечении рациональной огнезащиты конструкций из полимерных композитов, имеющих относительно низкую термостойкость (80...120 °С), поскольку испытания в огневых печах для них практически не проводились.

Результаты и обсуждение. Проведены испытания нескольких вариантов многослойной огнезащиты на основе материала МБОР-20Ф. Представлены зависимости от времени температуры поверхности защищаемого элемента (пластины из полиуретана размерами 200 × 300 × 20 мм), а также на границе между слоями материала МБОР при воспроизведении стандартного температурного режима. Продемонстрировано, насколько возрастает огнезащитная эффективность при наличии между слоями МБОР огнезащитного клеевого состава ПЛАЗАС. Показано, что такая конструктивная огнезащита применима не только для конструкций из металла. Она позволяет обеспечить высокие показатели огнестойкости и перспективна для защиты конструкций и изделий из полимерных композитов. Результаты термопарных измерений при испытаниях по предлагаемой методике могут быть использованы для оценки величин теплофизических характеристик огнезащитных материалов при высоких температурах, которые в большинстве случаев отсутствуют, но необходимы для проведения теплотехнических расчетов. Продемонстрировано, что подобные эксперименты могут проводиться и при температурных режимах нагрева, отличающихся от стандартного (например, при воспроизведении режима горения углеводородного горючего).

Выводы. Эксперименты на стенде лучистого нагрева в сочетании с теплотехническими расчетами позволяют ускорить выбор оптимального варианта огнезащиты и определение ее толщины и в то же время дают возможность сократить до разумного минимума количество дорогостоящих испытаний натурных образцов различных конструкций и изделий с огнезащитой в огневых печах.

Ключевые слова: галогенные лампы; огнезащитный клеевой состав; стандартный температурный режим; огнестойкость; теплофизические характеристики; теплотехнические расчеты

Для цитирования: *Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Даштиев И.З., Кобылков Н.В., Терехов С.А.* Исследования вариантов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала МБОР на стенде лучистого нагрева // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 28–39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.28-39

✉ *Гаращенко Анатолий Никитович*, e-mail: a.n.gar@mail.ru

Using a radiant heat test facility to study the options for the fire protection of structures involving coiled MBOR basalt fiber material

© Anatoliy N. Garashchenko ✉, Aleksandr V. Vinogradov, Idris Z. Dashtiev, Nikita V. Kobylkov, Sergey A. Terekhov

Central Research Institute for Special Machinery (Zavodskaya St., Khotkovo, Moscow Region, 141371)

ABSTRACT

Introduction. Coiled MBOR basalt fiber material is used to demonstrate the potential of research into the fire protection of structures using a radiant heat test facility.

Research methods. A set of high-power halogen lamps is used to simulate a high temperature impact. The heating intensity is adjusted by changing the voltage applied to the lamps, and it is controlled by the thermocouples that record the temperature of the heated surface of a fire proofing material. The studies have proven efficient for various types of fire proofing and various structures. They are especially relevant in providing rational fire protection of polymer composite structures having relatively low thermal resistance (80...120 °C) due to the fact that they are rarely tested in fired furnaces.

Results and discussion. Several options of multilayered MBOR-20F fire proofing were tested. Dependences between time, on the one hand, the surface temperature of protected elements (200 × 300 × 20 mm polyurethane plates), and the temperature between the layers of the fire-proofing material, on the other hand, are presented under standard temperature conditions. Fire protection efficiency improvement by PLAZAS fire-resistant adhesive compound, applied between MBOR layers, is demonstrated. This fireproofing method is applicable not only to metal structures. It demonstrates high fireproofing properties and has a strong potential if applied to fireproof polymer composite structures and products. The measurements, taken by thermocouples in the course of a session of tests, can be used to estimate the thermophysical properties of fireproofing materials exposed to high temperatures, which are rare in most cases, although they are necessary for a thermal analysis. It is demonstrated that similar experiments can also be carried out at nonstandard heating temperatures (for example, when the combustion of fossil fuels is imitated).

Conclusions. Experiments, conducted using the radiant heat test facility, and thermal engineering calculations allow to accelerate the selection of the optimal fire protection option and identification of the fireproofing thickness. Moreover, this method allows to reasonably minimize the number of costly fired furnace tests using full-scale samples of fireproofed structures and products.

Keywords: halogen lamps; fire-resistant adhesive compound; standard temperature mode; fire resistance; thermal and physical characteristics; thermal and physical analyses

For citation: Garashchenko A.N., Vinogradov A.V., Dashtiev I.Z., Kobylkov N.V., Terekhov S.A. Using a radiant heat test facility to study the options for the fire protection of structures involving coiled MBOR basalt fiber material. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):28-39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.28-39 (rus).

✉ *Anatoliy Nikitovich Garashchenko*, e-mail: a.n.gar@mail.ru

Введение

Одним из эффективных средств огнезащиты, обеспечивающих достижение высоких пределов огнестойкости различных конструкций, является конструктивная огнезащита на основе термостойких плит, матов, рулонных материалов. Испытания конструкций с огнезащитой в огневых печах аккредитованных испытательных центров стандартизованы, однако, требуются значительные затраты средств и времени на их проведение. В то же время важная информация по огнезащитной эффективности применяемых материалов может быть получена в ходе предварительных исследований на лабораторно-стендовом оборудовании.

Такие исследования особенно актуальны при осуществлении рациональной огнезащиты конструкций и изделий из полимерных композиционных материалов, имеющих относительно низкую термостойкость (в большинстве случаев на уровне 80…120 °С). Обеспечение требуемых показателей их пожаробезопасности представляет собой сложную задачу. Основные проблемы и особенности создания пожаробезопасных конструкций с несущими элементами из полимерных композитов рассмотрены в [1, 2]. Важнейшим показателем их пожарной опасности является предел огнестойкости и обеспечение требуемого его уровня, что в большинстве случаев возможно только за счет применения конструктивной огнезащиты значительной толщины. В то же время испытания в огневых печах аккредитованных испытательных центров для таких конструкций, практически, не проводились.

Перед авторами статьи стояла задача по проектированию в кратчайшие сроки оптимальной огнезащиты конструкции с несущим элементом из полиуретана, являющегося одним из видов полимерных композитов. Рассматривались варианты обеспечения пределов огнестойкости 60 мин и 90 мин при огневом воздействии на такую конструкцию по стандартному температурному режиму. Признано необходимым проведение (на начальном этапе проектирования огнезащиты) испытаний образцов на лабораторно-стендовом оборудовании при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия при пожаре, а в последующем — выполнение теплотехнических расчетов конструкции с огнезащитой с учетом результатов этих испытаний. Такой подход, как отмечено в [1, 2], ускоряет выбор оптимального варианта огнезащиты и определение ее толщины и в то же время позволяет сократить до минимума количество дорогостоящих огневых испытаний натурных образцов с огнезащитой, необходимых для подтверждения правильности принятых проектных и технологических решений. Можно отметить, что реализация подобного подхода, безусловно, актуальна также для обеспечения огнезащиты конструкций из других материалов (метала, железобетона, древесины).

В ходе проектирования рассматриваемой конструкции из полимерного композита был проведен анализ современных средств защиты от пожара с учетом показателей огнезащитной эффективности и стоимости материалов огнезащиты, а также особенностей ее нанесения (монтажа). Анализ показал целесообразность использования в данном случае конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала марки МБОР-20Ф толщиной 20 мм, имеющего слой алюминиевой фольги на поверхности. Известно, что материал МБОР различной толщины успешно используется совместно с клеевым огнезащитным составом ПЛАЗАС в составе конструктивной огнезащиты несущих конструкций из металла, воздуховодов и т.д. Как правило, используется один слой (в отдельных случаях — два слоя) МБОР толщиной от 8 до 20 мм и слой ПЛАЗАС толщиной от 1,5 до 3,7 мм.

В данной статье обоснован выбор и представлены результаты испытаний образцов огнезащиты на лабораторно-стендовом оборудовании, которые явились важным этапом работ по обеспечению заданных показателей пожаробезопасности рассматриваемой конструкции из полимерных композитов.

Методика исследований

В нашей стране и за рубежом опубликовано значительное количество работ, посвященных методам и результатам исследований образцов различных средств огнезащиты на лабораторно-стендовом оборудовании. Их анализ свидетельствует, что за рубежом методики таких испытаний во многих случаях стандартизованы. Для отечественной практики более характерно использование нестандартизованных методик для решения исследователями конкретных задач. Применяемые методики отличаются по способам воспроизведения и контроля условий высокотемпературного воздействия на образцы, по размерам исследуемых образцов и т.д. В большинстве случаев высокотемпературное воздействие обеспечивается за счет электрических нагревателей или горелок.

Широкое распространение получили испытания с использованием горелок (керосиновых или газовых). Они описываются в работах [3–10] и стандарте ISO 2685:1998 (E)[1]. Результаты оценки огнезащитной эффективности различных рецептур вспучивающихся покрытий при использовании газовых горелок представлены, например, в [3–5]. Особенностью таких испытаний является относительно небольшая зона огневого воздействия на образец и неравномерность теплового потока даже в пределах этой зоны. Соответственно, предусматривалось использование относительно небольших образцов.

Методики, предусматривающие использование керосиновых и газовых горелок, получили наибольшее распространение при огневых испытаниях материалов и конструктивных элементов авиационного назначения, что нашло отражение в стандарте ISO 2685:1998 (E), справочниках, отчетах и публикациях [6–11]. С помощью таких испытаний за рубежом и в нашей стране оценивается и обеспечивается выполнение требования по огнестойкости и огненепроницаемости. В авиационной отрасли огненепроницаемым материалом или компонентом является материал или компонент, способный выдерживать пламя температурой 1100 ± 80 °C как минимум в течение 15 мин при выполнении своих функций, а огнестойким — материал или компонент, способный выдерживать пламя температурой 1100 ± 80 °C как минимум в течение 5 мин. Кроме использования обычных горелок, способных обеспечить воздействие пламени на относительно небольшом участке образца, практикуется применение специальной многорожковой газовой горелки с диаметром факела 120, 152 и даже 180 мм [7–11]. Однако даже при таком увеличении рабочей зоны огневого воздействия на образец вызывает сомнения возможность проведения испытаний конструктивной огнезащиты при времени воздействия более 15 мин, предусмотренном в авиационной отрасли.

Существуют также методики, предусматривающие использование трубчатых электрических нагревателей. Однако, как правило, и в этом случае размеры исследуемых образцов ограничены. Испытываются, например, вспучивающиеся покрытия, нанесенные на стальные пластины размером 140 × 80 мм [12] или диаметром около 100 мм [13]. Возможности для исследований различных средств огнезащиты подобным методом ограничены рядом причин, в числе которых сложность воспроизведения заданного режима высокотемпературного воздействия и обеспечения равномерного нагрева образцов.

Гораздо большие возможности у методик, предусматривающих использование в качестве источника нагрева мощных галогенных ламп накаливания. Стенды лучистого нагрева первоначально создавались и используются до настоящего времени для испытаний материалов и элементов ракетно-космической техники [14]. Продемонстрировали они свою эффективность и при исследованиях огнезащиты в основном тонкослойных вспучивающихся покрытий [15–18].

В целом следует отметить, что наибольший опыт и возможности по исследованиям различных средств огнезащиты на различных вариантах стенда

[1] ISO 2685:1998 (E). Aircraft — Environmental test procedure for airborne equipment — Resistance to fire in designated fire zones. Second edition // International Organization for Standardization, Genev, Switzeland, 1998. 31 p.

лучистого нагрева имеются в АО «ЦНИИСМ», что отражено в публикациях [15, 18–20]. Имеющийся в организации стенд лучистого нагрева в настоящее время приспособлен для исследований образцов конструктивной огнезащиты. Обеспечена возможность проведения испытаний при относительно большом времени высокотемпературного воздействия на образцы, имеющие достаточно большие размеры. В связи с этим на данном стенде была запланирована и проведена серия испытаний образцов конструктивной огнезащиты на основе рулонного базальтоволокнистого материала марки МБОР, предназначенного для защиты от пожара конструкции из полиуретана.

Исследования проводились на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 1.

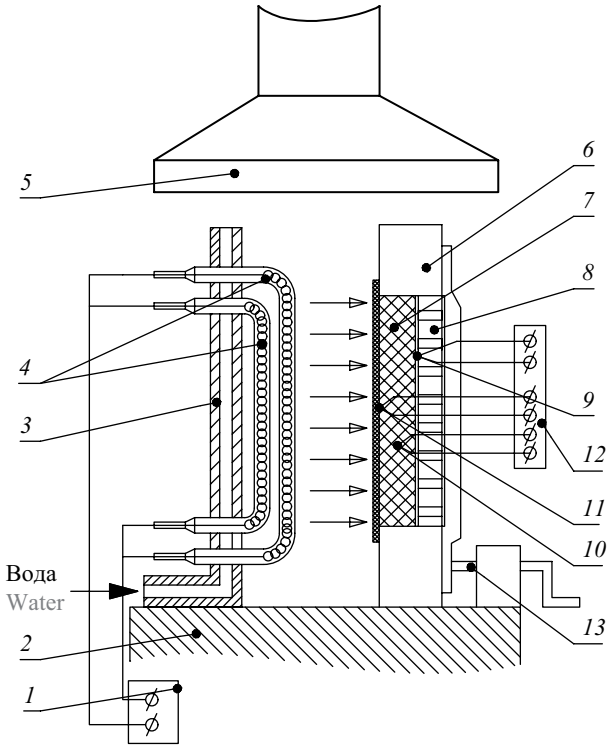

Рис. 1. Схема стенда лучистого нагрева: *1* — пульт управления нагревом; *2* — стол; *3* — водоохлаждаемый экран; *4* — галогенные лампы; *5* — вентиляционный кожух; *6* — огнестойкая панель, в которой устанавливается исследуемый образец; *7* — образец огнезащиты; *8* — подложка из полиуретана; *9* — термопара на границе огнезащита-подложка; *10*, *11* — термопары, расположенные на обогреваемой поверхности и распределенные по толщине огнезащиты; *12* — система регистрации температуры; *13* — устройство для перемещения образца

Fig. 1. The diagram of a radiant heat test facility: *1* — heating control panel; *2* — table; *3* — water-cooled screen; *4* — halogen lamps; *5* — fan covering; *6* — fire resistant panel accommodating the sample; *7* — fire proofing sample; *8* — polyurethane base; *9* — thermocouple between the fireproofing and the base; *10*, *11* — thermocouples on the heated surface and distributed inside the fireproofing; *12* — temperature monitoring system; *13* — sample mover

Нагреватель представляет собой пакет галогенных ламп КГ220-2500, расположенных в два ряда и охватывающих площадь 400 × 400 мм. Мощность одной лампы — 2500 Вт (всего в пакете 63 лампы). Таким образом, общая мощность нагревателя 157,5 кВт. Лампы установлены в специальные штекеры, объединенные в шины, которые кабелями подключены к системе управления нагревом. Отражающий экран нагревателя, за которым расположены штекеры, охлаждается водой, что позволяет увеличить длительность эксперимента. Нагреватель установлен на специальной стойке, позволяющей регулировать пространственное расположение образца относительно пакета ламп.

Управление нагревом ведется с помощью шкафа управления следующим образом. В начальный момент нагреватель включается по трем фазам на напряжение 220 В по схеме «звезда» и происходит разогрев системы. После того как пусковые токи снизятся до номинального уровня (это время задается программируемым таймером и составляет 0,2…0,3 с), происходит автоматическое переключение ламп на схему «треугольник» под напряжение 380 В. Таким образом, удается избежать значительных пусковых токов в процессе форсажного включения нагревателя. Достигаются следующие значения плотности теплового потока, подающего на нагреваемую поверхность: 450 кВт/м² при напряжении 220 В и 1350 кВт/м² при напряжении 380 В. Возможна установка датчика теплового потока, представляющего собой медную пластину толщиной 2,5…3 мм с зачеканенными с тыльной стороны термопарами.

Образец размещается в проеме плоской вертикальной панели из огнезащитной плиты Promatect L-500 толщиной 60 мм, обладающей высокой термостойкостью и относительно низкой теплопроводностью. Наружная поверхность образца перекрывается пластиной из высокотеплопроводного углерод-углеродного материала толщиной 0,5 мм. Под ней размещаются термопары, которые фиксируют температуру нагреваемой поверхности образца и вместе с этим служат для регулирования режима высокотемпературного воздействия от пакета ламп накаливания.

Объектом исследований являлись плоские образцы конструктивной огнезащиты размером 200 × 300 мм различной толщины из слоев базальтоволокнистого материала марки МБОР-20Ф толщиной 20 мм (при отсутствии и наличии между ними слоев клеевого огнезащитного состава ПЛАЗАС). Защищаемый элемент — пластина из полиуретана марки СКУ-ПФЛ-100 толщиной 20 мм, имеющая такие же размеры. Было известно, что ввиду использования влагосодержащего клеевого слоя, тем-

пература поверхности защищаемых конструкций из стали через определенный промежуток времени достигает значения 100 °С и может оставаться на этом уровне, подчас, значительное время. Применительно к конструкциям из полимерных композитов, имеющих низкую термостойкость, представляет несомненный интерес оценка влияния слоев такого состава на эффективность огнезащиты.

Уровень прогрева образцов в ходе каждого испытания фиксировался с помощью термопар, установленных на границе огнезащита-подложка, а также между каждым слоем МБОР-20Ф. Общий вид стенда в процессе испытания показан на рис. 2. Видна углерод-углеродная пластина, под которой размещаются термопары, регистрирующие температуру поверхности образца и обеспечивающие управление режимом нагрева. В зоне ненагреваемой поверхности полиуретановой пластины размещался слой минераловатной теплоизоляции толщиной порядка 25 мм.

Режим нагрева при испытаниях регулировался за счет изменения мощности нагревателя и задавался таким, чтобы температура нагреваемой поверхности приблизительно соответствовала или была несколько ниже, чем температура газовой среды при стандартном температурном режиме пожара. Расчетные оценки показали, что для огнезащитных материалов с низкой теплопроводностью, к которым относится МБОР, температура нагреваемой поверхности приближается к температуре газовой среды. Поэтому реализуемый при испытаниях режим нагрева позволяет достаточно близко воспроизводить высокотемпературное воздействие при стандартном температурном режиме. В то же время результаты измерений температуры нагреваемой поверхности при испытаниях являются важной информацией для последующего теплотехнического анализа. Изменение температуры газовой среды при стандартном режиме описывается зависимостью (1):

$$T = T_o + 345\lg(8t + 1), \quad (1)$$

где T — температура газовой среды, соответствующая времени t, °С;

T_o — температура до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °С;

t — время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Всего было проведено девять испытаний образцов с различными вариантами конструктивного исполнения и толщиной огнезащиты на основе материала МБОР-20Ф. Поверхности с фольгой при испытаниях ориентировались в сторону нагрева. Перед каждым из испытаний проводилась оценка толщины слоев огнезащиты. Продолжительность испытания задавалась такой, чтобы температура поверхности подложки из полиуретана достигала уровня 140…180 °С. После выключения нагревателя запись изменения температуры производилась еще некоторое время.

В четырех случаях (опыты № 1–4) испытывались образцы с огнезащитой из одного, двух и трех слоев МБОР-20Ф без использования клеевого огнезащитного состава ПЛАЗАС. В опыте № 5 использовалось два слоя МБОР-20Ф, на каждый из которых (на фольгу) наносился слой состава ПЛАЗАС толщиной порядка 0,7 мм. После отверждения клея на каждом из слоев МБОР они соединялись в единый образец. При этом было установлено, что после отверждения каждый из слоев оказался деформирован.

При изготовлении образцов для последующих испытаний два или три слоя МБОР-20Ф склеивались составом ПЛАЗАС толщиной 0,5…0,7 мм. После его отверждения деформация образцов огне-

Рис. 2. Общий вид стенда лучистого нагрева во время испытания
Fig. 2. A radiant heat test facility in the process of testing

защиты не наблюдалась (опыты № 6–9). На наружную поверхность (на слой фольги) одного из образцов огнезащиты (опыт № 8) был нанесен слой огнезащитного вспучивающегося покрытия СГК-2 толщиной порядка 0,7 мм. В опыте № 9 использовался образец огнезащиты с наружным слоем из термостойкой кремнеземной ткани КТ-11, на поверхность которой был нанесен слой покрытия СГК-2 толщиной порядка 0,6 мм.

В последних двух случаях пластина углерод-углеродного материала не использовалась. В этих двух опытах предпринималась попытка регистрации температуры наружной поверхности вспучивающегося покрытия с помощью термопары (и регулирования по ее показаниям режима нагрева). В опыте № 8 регистрировалось также изменение температуры под наружным слоем фольги, а в опыте № 9 — под слоем ткани КТ-11. В ходе этих двух экспериментов выполнялось визуальное наблюдение за поверхностью образцов. После испытаний и охлаждения образцов проводился их визуальный осмотр и фиксировалось состояние огнезащиты.

Результаты и обсуждение

В ходе анализа состояния образцов после проведения экспериментов было установлено, что при высокотемпературном нагреве происходит уменьшение толщины (усадка, спекание) МБОР-20Ф (на 25…30 % и более для наиболее прогретого слоя). МБОР после высокотемпературного воздействия стал хрупким, но плавление базальтового волокна не зафиксировано. На нагреваемой поверхности образцов огнезащиты сохранялись только отдельные участки фольги.

Визуальные наблюдения за нагреваемой поверхностью образцов показали, что в опыте № 8 наблюдалось вспучивание покрытия СГК-2. Толщина вспученного слоя составила порядка 17…22 мм с последующим его уменьшением до толщины 8…12 мм в конце эксперимента. В опыте № 9 после образования вспученного слоя толщиной 15…20 мм наблюдалось его постепенное отслоение и обрушение с отдельных участков наружного слоя ткани КТ-11.

Результаты испытаний представлены в таблице и на рис. 3–5. В таблице указана структура образцов и приведен важнейший для защищаемых композитных конструкций (в данном случае из полиуретана) показатель — время достижения температурой на границе огнезащита-подложка уровня 100 °С. На рис. 3 представлены результаты термопарных измерений в ходе первых четырех испытаний, проведенных для образцов из МБОР-20Ф без клеевого состава, а остальные — в ходе испытаний № 6, 7, 9 при наличии слоев клеевого состава (рис. 4, 5).

Анализ результатов испытаний, представленных в таблице и на рис. 3–5, показал, что конструктивная огнезащита, предусматривающая использование промежуточных слоев из состава ПЛАЗАС, обеспечивает более высокий уровень огнезащитной эффективности по сравнению с вариантом многослойной конструкции только из МБОР-20Ф.

Вид кривых на рис. 4, 5 можно объяснить процессами диффузии, конденсации и последующего кипения (испарения) пара, образовавшегося при нагреве клеевого материала [21]. Реализуется так называемая полка или плато, что показали ранее полученные результаты многочисленных испытаний (в том числе сертификационных) конструкций с подобной огнезащитой. Такой вариант обеспечивает относительно низкую толщину огнезащиты металлоконструкций, для которых критическая температура имеет уровень 500 °С. Применительно к конструкциям из полимерных композитов, имеющих значительно меньшую термостойкость, представляет несомненный интерес оценка влия-

Время достижения температурой уровня 100 °С на границе огнезащита-подложка из полиуретана
Time to 100 °C at the boundary between the fireproofing and the polyurethane base

Номер испытания Test no.	1	2	3	4	5*	6	7	8**	9***
Кол-во слоев МБОР-20Ф Number of MBOR-20F layers	1	2	2	3	2	3	3	3	3
Наличие слоев ПЛАЗАС Use of PLAZAS layers	—	—	—	—	2*	2	2	2	2
$t_{100\ °C}$, мин / $t_{100\ °C}$, min	9,4	17,4	20,3	33,2	25,0	66,5	68,5	52,1	55,4

*Состав ПЛАЗАС на поверхностях первого и второго слоя МБОР-20Ф.
**Покрытие СГК-2 на поверхности первого слоя МБОР-20Ф.
***Ткань КТ-11 с покрытием СГК-2 на нагреваемой поверхности огнезащиты.

*PLAZAS compound on the surface of the first and second MBOR-20F layers.
**SGK-2 coating on the surface of the first MBOR-20F layer.
***KT-11 fabric w/SGK-2 coating on the heated fireproofing surface.

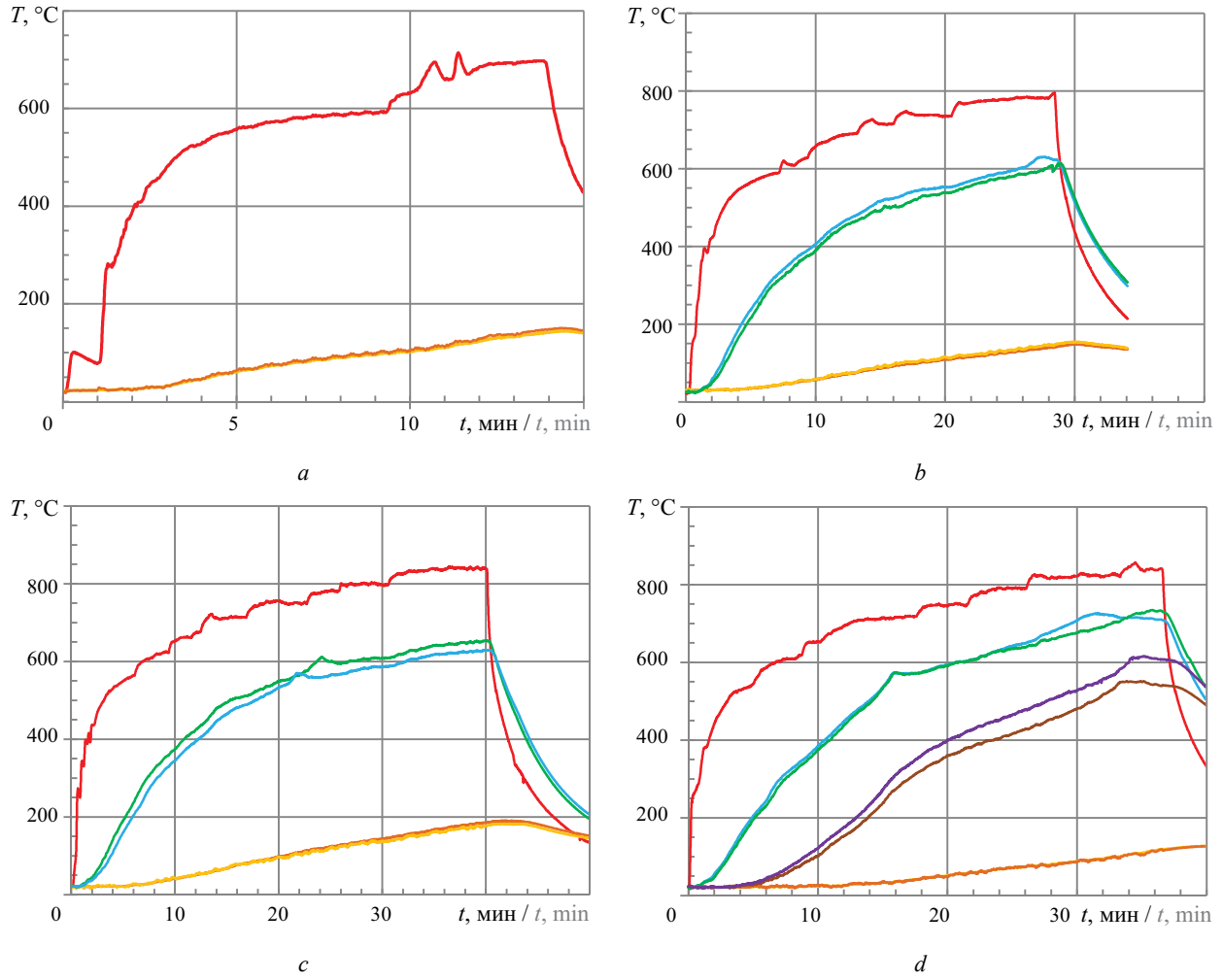

Рис. 3. Изменение со временем температуры на нагреваемой поверхности огнезащиты (—) и пластины из полиуретана (—, —) для образцов, состоящих из одного слоя МБОР-20Ф (*a*), двух слоев МБОР-20Ф (*b*, *c*), трех слоев МБОР-20Ф (*d*), а также температуры на границе первый-второй (—, —) и второй-третий (—, —) слои МБОР-20Ф (испытания № 1–4)

Fig. 3. The change in the temperature of the heated surface of the fireproofing material (—) and the polyurethane plate (—, —) over time for the samples that have one MBOR-20F layer (*a*), two MBOR-20F layers (*b*, *c*), three MBOR-20F layers (*d*), as well as the temperature at the boundaries between the first and the second (—, —) layer and the second and the third (—, —) layer of MBOR-20F (tests 1-4)

ния такого состава, поскольку он способен повысить эффективность конструктивной огнезащиты. В данном случае установлено, что даже наличие прослоек из ПЛАЗАС относительно небольшой толщины обеспечило появление таких полок, что привело к существенному снижению уровня нагрева защищаемой пластины из полиуретана. Это видно на рис. 4, 5. Эксперименты показали, что при использовании трех слоев МБОР-20Ф, склеенных слоями ПЛАЗАС, можно обеспечить значения показателя огнестойкости конструкций из полимерных композитов на уровне 60 мин.

Существенно худший результат получен для составного образца из двух слоев МБОР-20Ф с составом ПЛАЗАС, который наносился на фольгу каждого из слоев и предварительно отверждался (испытание № 5). Не выявлено значимого эффекта от использования тонкого слоя покрытия СГК-2 на поверхности огнезащиты. Однако это может быть связано с тем, что при образовании и росте толщины вспученного слоя измерение температуры нагреваемой поверхности с помощью термопар затрудняется и, возможно, был реализован более жесткий режим нагрева по сравнению с испытаниями, когда термопары достаточно точно и стабильно фиксировали температуру поверхности огнезащиты, находясь под пластиной из углерод-углеродного материала.

Относительно возможности достижения показателя огнестойкости композитной конструкции на уровне 90 мин можно отметить следующее. Испытания на используемом стенде лучистого нагрева при указанном выше размере в плане образцов не предполагают возможность увеличения их тол-

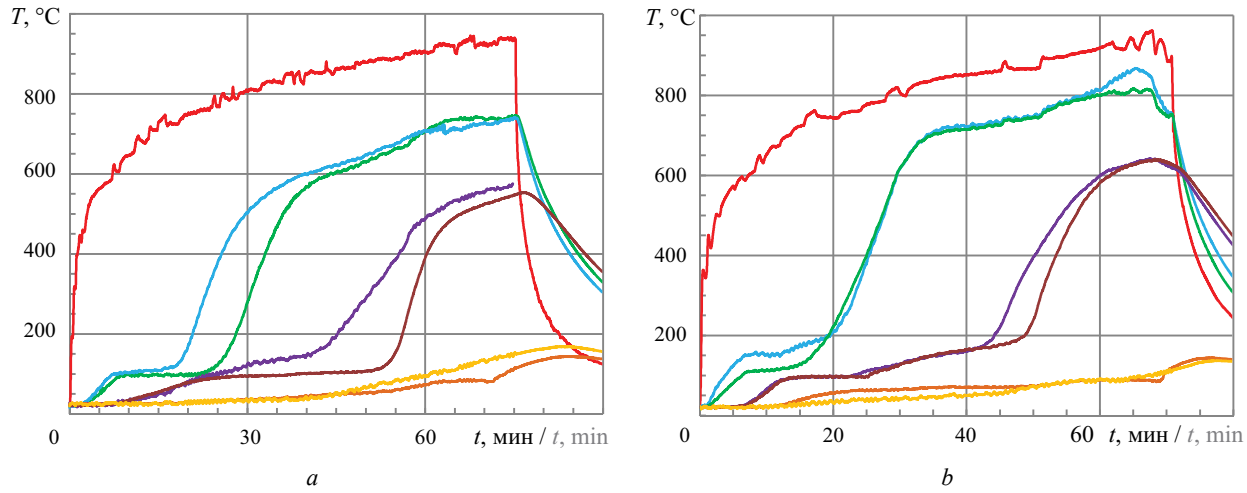

Рис. 4. Изменение со временем температуры на нагреваемой поверхности огнезащиты (—) и пластины из полиуретана (—, —) для образцов, состоящих из трех слоев МБОР-20Ф со слоями ПЛАЗАС между ними, а также температуры на границе первый-второй (—, —) и второй-третий (—, —) слои огнезащиты в испытаниях № 6 (*a*) и № 7 (*b*)

Fig. 4. The change in the temperature of the surface of the heated fireproofing material (—) and the polyurethane plate (—, —) over time for the samples that have three MBOR-20F layers w/ PLAZAS layers between them, as well as the temperature at the boundaries between the first and the second (—, —) layer, as well as the second and the third (—, —) fire proofing layer in tests 6 (*a*) and 7 (*b*)

щины до 80 мм (четыре слоя МБОР-20Ф) и более из-за возрастающей при этом роли так называемого краевого эффекта. Однако экстраполяция полученных результатов экспериментальных исследований позволяет дать прогноз по уровню толщины конструкционной огнезащиты на основе МБОР-20Ф с промежуточными слоями из клеевого огнезащитного состава ПЛАЗАС, необходимыми для обеспечения показателя огнестойкости 90 мин для конструкций из полимерных композитов. В первом приближении оценка ожидаемой суммарной толщины огнезащиты дает уровень 100…140 мм.

Для более точного определения толщин огнезащиты для конкретных конструкций должны проводиться теплотехнические расчеты с учетом результатов испытаний на стенде лучистого нагрева. Это и предполагалось провести на следующем этапе работ по обеспечению требуемой огнестойкости упоминаемой конструкции из полиуретана.

Важным моментом является то, что анализ и обработка результатов термопарных измерений, представленных в статье, позволяет уточнить значения неизвестных на данный момент значений теплофизических характеристик огнезащитных материалов (в данном случае МБОР) при высоких температурах, от которых зависят в значительной степени результаты теплотехнических расчетов.

Кроме того, испытания на стенде лучистого нагрева позволяют решать и другие задачи. Например, оценивать стойкость различных материалов в условиях заданного режима высокотемпературного воздействия (наличие усадки, растрескивания плавления и пр.), а также проводить сравнительную оценку термостойкости и огнезащитной эффективности различных материалов. Для иллюстрации проведен эксперимент, в ходе которого оценивалось влияние слоев фольги на уровень прогрева пластины из полиуретана с огнезащитой из слоев материала МБОР толщиной 8…10 мм (без использования клеевого состава). Результаты термопарных

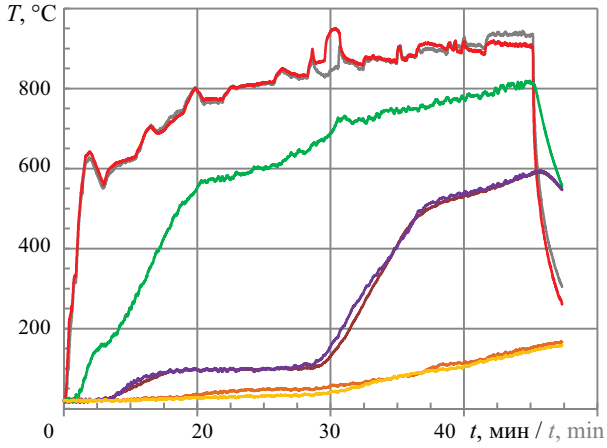

Рис. 5. Изменение со временем температуры на нагреваемой поверхности огнезащиты (—, —) с наружным слоем ткани КТ-11 с покрытием СГК-2 и пластины из полиуретана (—, —) для образца, состоящего из трех слоев МБОР-20Ф со слоями состава ПЛАЗАС между ними, а также температуры на границе первый-второй (—) и второй-третий (—, —) слои МБОР-20Ф в испытании № 9

Fig. 5. The change in the temperature of the heated surface of the fireproofing material (—, —) w/ an outer layer of KT-11 fabric treated with SGK-2 coating and the polyurethane plate (—, —) for the sample that has three MBOR-20F layers w/ PLAZAS compound layers between them, as well as in the temperature at the boundaries between the first and the second (—) layer, the second and the third layer of MBOR-20F (—, —) in test 9

измерений в ходе этого испытания, представленные на рис. 6, показали, что уровень прогрева пластины из полиуретана несущественно отличался для обеих частей составного образца (наличие фольги приблизительно на 10 °С снизило уровень прогрева пластины из полиуретана за время воздействия порядка 43 мин по стандартному режиму). Важным результатом этого эксперимента было то, что он продемонстрировал возможность значительного увеличения лучистого теплового потока и температуры нагреваемой поверхности образца на этом стенде до уровня 1100 °С и более (см. рис. 6).

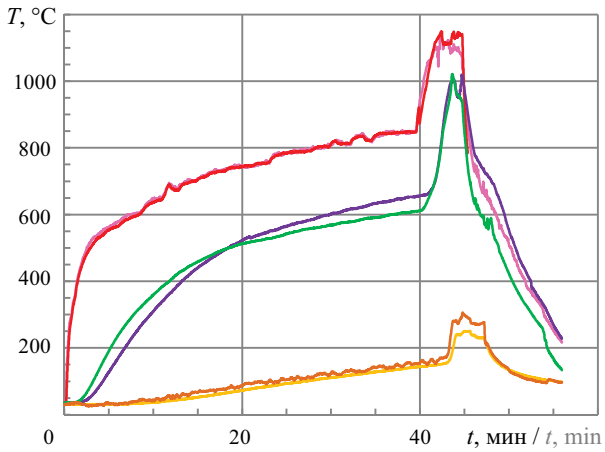

Рис. 6. Изменение со временем температуры нагреваемой поверхности огнезащиты (—, —) и пластины из полиуретана, (—, —), а также температуры на границе третий-четвертый слои составного образца, состоящего из шести слоев материала МБОР толщиной 8…10 мм с фольгой (—) и без фольги (—), соответственно

Fig. 6. The change in the temperature of the heated surface of the fireproofing material (—, —) and the polyurethane plate, (—, —), as well as in the temperature at the boundary between the third and the fourth layer of the composite sample that has six 8-10 mm thick MBOR material layers w/ foil (—) and w/o foil (—) (respectively) over time

Естественно, испытания на стенде лучистого нагрева позволяют оценивать уровень прогрева металлических пластин с огнезащитой. В качестве примера на рис. 7 представлены показания термопар, размещенных на пластине из алюминиевого сплава и между сжатыми в 1,8 раза слоями огнезащиты из трех слоев материала МБОР-20Ф. Необходимость подобных экспериментов обусловлена тем, что огнезащита из рулонных материалов или матов при их обустройстве на реальных конструкциях может иметь различную плотность за счет сжатия.

Можно отметить, что эксперименты по предлагаемой методике являются не только важным этапом выбора рациональной огнезащиты для конкретных конструкций (в данном случае из полиуретана). Результаты термопарных измерений по толщине образцов становятся источником важной информации для

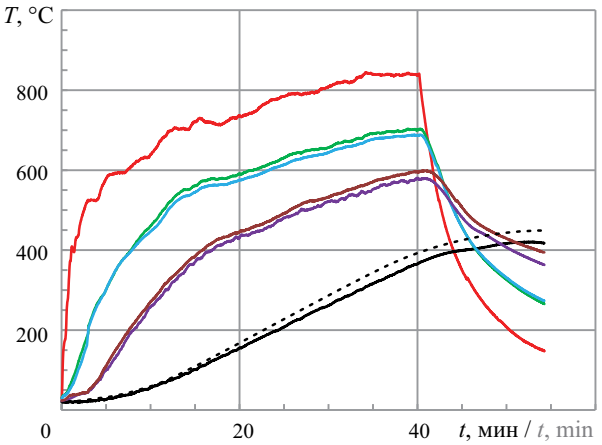

Рис. 7. Изменение со временем температуры нагреваемой поверхности огнезащиты (—) и пластины из алюминиевого сплава (—, - - -) для образцов, состоящих из трех слоев МБОР-20Ф, сжатых в 1,8 раза, а также температуры на границе первый-второй (—, —) и второй-третий (—, —) слои МБОР-20Ф

Fig. 7. The change in the temperature of the heated surface of the fireproofing material (—) and the aluminum alloy plate (—, - - -) for samples that have three MBOR-20F layers compressed by a factor of 1.8, as well as in the temperature at the boundary between the first and the second (—, —) layers as well as the second and third (—, —) layers of MBOR-20F over time

уточнения теплофизических характеристик огнезащиты. Это расширяет возможности и повышает точность теплотехнических расчетов, с помощью которых можно, в частности, учесть влияние конфигурации защищаемых конструкций и изделий. Для проектирования огнезащиты из рулонных материалов типа МБОР это весьма актуально, учитывая возможность защиты с их помощью от пожара, например, конструкций цилиндрической формы.

Выводы

Продемонстрированы возможности оценки эффективности средств огнезащиты на стенде лучистого нагрева на примере испытаний образцов конструктивной огнезащиты на основе базальтоволокнистого материала МБОР-20Ф при воспроизведении заданных условий огневого воздействия. Представлены результаты серии экспериментов при использовании различных вариантов огнезащиты конструкции из полимерного композита (полиуретана) при стандартном температурном режиме воздействия.

Продемонстрирован существенно больший уровень огнезащитной эффективности при наличии клеевого состава ПЛАЗАС между слоями МБОР-20Ф. Такая огнезащита перспективна, например, для обеспечения показателя огнестойкости 60, 90 мин и более для конструкций и изделий из полимерных композитов, отличающихся низкой термостойкостью.

Результаты термопарных измерений при испытаниях могут быть использованы для оценки величин теплофизических характеристик огнезащитных материалов при высоких температурах, необходимых для проведения теплотехнических расчетов. Испытания на стенде возможны при температурных режимах нагрева, отличающихся от стандартного (например, при воспроизведении режима горения углеводородного горючего).

Эксперименты на стенде лучистого нагрева позволяют ускорить выбор оптимального варианта огнезащиты и определение ее толщины и сократить до разумного минимума количество дорогостоящих огневых испытаний натурных образцов с огнезащитой, необходимых для подтверждения правильности принятых проектных и технологических решений по огнезащите различных конструкций и изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаращенко А.Н., Берлин А.А., Кульков А.А., Даштиев И.З.* Особенности создания конструкций из полимерных композитов при наличии требований по показателям их пожаробезопасности // Вопросы оборонной техники. Сер. 15: Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2018. Вып. 2 (189). С. 62–69.
2. *Гаращенко А.Н., Берлин А.А., Кульков А.А.* Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 2. С. 9–30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30
3. *Evtushenko Yu.M., Grigoriev Yu.A., Rudakova T.A., Ozerin A.N.* Effect of aluminum hydroxide on the fireproofing properties of ammonium polyphosphate-pentaerythritol-based intumescent coating // Journal of Coatings Technology and Research. 2019. Vol. 16. No. 5. 1389–1398. DOI: 10.1007/s11998-019-00221-6
4. *Григорьев Ю.А., Евтушенко Ю.М., Кучкина И.О., Рудакова Т.А.* Тенденции развития и методы испытаний огнезащитных покрытий // Клеи. Герметики. Технологии. 2019. № 5. С. 39–44. DOI: 10.31044/1813-7008-2019-0-5-39-44
5. *Андрюшкин А.Ю., Цой А.А.* О методике определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2016. № 2. С. 45–53. URL: https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V82/7.pdf
6. *Tambe S., Kao Y.-H., Jeng S.-M.* Development of next generation burner characteristics for fire testing of power plant materials and components. DOT/FAA/TC-13/38, Report FAA DoT USA. 2015. 52 p. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC-13-38.pdf
7. *Marker T.R.* Aircraft materials fire test handbook, Revision 3 // DOT/FAA/TC-17/55, Federal Aviation Administration, Atlantic Citi, USA, 2019. 573 p. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC17-55.pdf
8. *Le Neve S.* Fire behaviour of structural composite materials // The 6th Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference, Atlantic City, USA, 2010. 48 p.
9. *Laborie D.* Fire test burner evaluation // International Aircraft Systems Fire Protection Working Group Meeting Atlantic City, New Jersey, USA, 2015, 8 p. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/systems/ Oct15Meeting/Laborie-1015-FireTestBurnerEvaluation.pdf
10. *Барботько С.Л., Кириенко О.А., Вольный О.С., Луценко А.Н.* Анализ пожарной опасности мотогондол авиационных двигателей и других пожароопасных зон; используемые методы огневых испытаний материалов и конструктивных элементов на соответствие требованиям авиационных норм // Проблемы безопасности полетов. 2017. № 5. С. 3–24.
11. *Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н.* Оценка пожаробезопасности материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М. : Изд-во ВИАМ, 2018. 424 с.
12. *Баженов С.В., Наумов Ю.В.* Прогнозирование динамики нагрева металлических конструкций с огнезащитной обработкой по результатам определения теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий (лабораторный метод) // Пожарная безопасность. 2005. № 1. С. 50–54.
13. *Рыбка Е.А., Андронов В.А.* Лабораторная установка для оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий для металлических конструкций с учетом параметров развития реального пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 10. С. 19–24. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16902909
14. *Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.

15. *Гаращенко А.Н., Страхов В.Л., Рудзинский В.П., Рыжков А.А.* Апробирование методики расчетов вспучивающейся огнезащиты строительных конструкций на примере покрытия Хенсотерм 4КС // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1999. Т. 8. № 5. С. 29–37.
16. *Zverev V.G., Nazarenko V.A., Tsimbalyuk A.F.* Heat and fire protection of multilayer structures based on the use of foaming coatings // Heat Transfer Research. 2005. Vol. 36. Issue 7. Pp. 543–556. DOI: 10.1615/HeatTransRes.v36.i7.20
17. *Zverev V.G., Nazarenko V.A., Tsimbalyuk A.F.* Thermal protection of multilayer containers against the effect of fires // High Temperature. 2008. Vol. 46. Issue 2. Pp. 254–260. DOI: 10.1134/s10740-008-2015-9
18. *Корольченко А.Я., Гаращенко А.Н., Гаращенко Н.А., Рудзинский В.П.* Расчеты толщин огнезащиты, обеспечивающих требуемые показатели пожарной опасности деревоклееных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2008. Т. 17. № 3. С. 49–56. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12510629
19. *Виноградов А.В., Кульков А.А., Пашутов А.В.* О возможностях исследования характеристик и моделирования натурных тепловых нагружений на образцы и узлы конструкций из композиционных материалов в условиях лабораторной экспериментальной базы ОАО ЦНИИСМ // Труды МИТ : научно-технический сборник. 2014. Т. 14. Ч. 1. С. 136–144.
20. *Курмашова И.А., Виноградов А.В., Соловьева Е.А.* Исследование материалов для теплоизолирующих костюмов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15: Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2014. Вып. 1 (174). С. 32–36.
21. *Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P.* High-temperature heat and mass transfer in a layer of moisture-containing fireproof material // High Temperature. 2000. Vol. 38. Issue 6. Pp. 921–925. DOI: 10.1023/a:1004149625276

REFERENCES

1. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kulkov A.A., Dashtiev I.Z. Features of the creation of structures made of polymer composites in the presence of requirements for their fire safety indicators. *Military Enginery. Issues 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*. 2018; 2(189):62-69. (rus).
2. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kulkov A.A. Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(2):9-30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30 (rus).
3. Evtushenko Yu.M., Grigoriev Yu.A., Rudakova T.A., Ozerin A.N. Effect of aluminum hydroxide on the fireproofing properties of ammonium polyphosphate–pentaerythritol-based intumescent coating. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2019; 16(5):1389-1398. DOI: 10.1007/s11998-019-00221-6
4. Grigoriev Yu.A., Evtushenko Yu.M., Kuchkina I.O., Rudakova T.A. Development trends and test methods of fire-proofing coatings. *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2019; 5:39-44. DOI: 10.31044/1813-7008-2019-0-5-39-44 (rus).
5. Andryushkin A.Yu., Tsoy 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
6. Tambe S., Kao Y.-H., Jeng S.-M. *Development of next generation burner characteristics for fire testing of power plant materials and components. DOT/FAA/TC-13/38*. Report FAA DoT USA. 2015; 52. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC-13-38.pdf
7. Marker T.R. *Aircraft Materials Fire Test Handbook, Revision 3. DOT/FAA/TC-17/55*. Federal Aviation Administration, Atlantic Citi, USA, 2019; 573. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/TC17-55.pdf
8. Le Neve S. Fire behaviour of structural composite materials. *The 6th Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference*. Atlantic City, USA, 2010; 48.
9. Laborie D. Fire test burner evaluation. *International Aircraft Systems Fire Protection Working Group Meeting Atlantic City*. New Jersey, USA, 2015; 8. URL: https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/systems/Oct-15Meeting/Laborie-1015-FireTestBurnerEvaluation.pdf.
10. Barbotko S.L., Kirienko O.A., Volnyj O.S., Lutsenko A.N. Analysis of the fire danger of aircraft engines motor-gondols and other fire hazardous zones; use of fire tests methods of materials and constructive elements to correspond of aviation norms. *Air safety problems*. 2017; 5:3-24. (rus).
11. Barbotko S.L., Volny O.S., Kirienko O.A., Shurkova E.N. *Evaluation of aviation materials' fire safety: analysis of the state, test methods, development prospects, methodological features* / by E.N. Kablov (ed.). Moscow, VIAM publ., 2018; p. 424. (rus).
12. Bazhenov S.V., Naumov Yu.V. Prediction of the dynamics of fire — retarded metal constructions heating on the basis of determination of thermal insulation characteristics of fire retardant coatings (laboratory method). *Fire Safety*. 2005; 1:50-54. (rus).

13. Rybka E.A., Andronov V.A. Laboratory installation for an estimation of fireproof efficiency of reactive coverings for metal constructions taking into account parameters of development of a real fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(10):19-24. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16902909 (rus).
14. Eliseev V.N., Tovstonog V.A. *Heat transfer and heat testing of material and aerospace structures with radiant heating*. Moscow, BMSTU Publ., 2014; 396. (rus).
15. Garashchenko A.N., Strakhov V.L., Rudzinsky V.P., Ryzhkov A.A. Testing of methods for calculating the swelling fire protection of building structures on the example of the Hensotherm 4KS coating. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1999; 8(5):29-37. (rus).
16. Zverev V.G., Nazarenko V.A., Tsimbalyuk A.F. Heat and fire protection of multilayer structures based on the use of foaming coatings. *Heat Transfer Research*. 2005; 36(7):543-556. DOI: 10.1615/HeatTransRes.v36.i7.20
17. Zverev V.G., Nazarenko V.A., Tsimbalyuk A.F. Thermal protection of multilayer containers against the effect of fires. *High Temperature*. 2008; 46(2):254-260. DOI: 10.1134/s10740-008-2015-9
18. Korolchenko A.Ya., Garashchenko A.N., Garashchenko N.A., Rudzinskiy V.P. Calculations of the thickness of fire protection, providing the required indicators of fire danger of wood-glued structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 17(3):49-56. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12510629 (rus).
19. Vinogradov A.V., Kulkov A.A., Pashutov A.V. On the possibilities of studying the characteristics and modeling of full-scale thermal loads on samples and components of structures made of composite materials in the conditions of the laboratory experimental base of Public Corporation CRISM. *Moscow Institute for Heat Technology*. 2014; 14(1):136-144. (rus).
20. Kurmasova I.A., Vinogradov A.V., Solovyova E.I. Research of the materials for thermai insulation suits. *Military Enginery. Issues 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*. 2018; 2(189):62-69. (rus).
21. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P. High-temperature heat and mass transfer in a layer of moisture-containing fireproof material. *High Temperature*. 2000; 38(6):921-925. DOI: 10.1023/a:1004149625276

Поступила 09.10.2020, после доработки 11.11.2020; принята к публикации 23.11.2020
Received October 9, 2020; Received in revised form November 11, 2020; Accepted November 23, 2020

Информация об авторах

ГАРАЩЕНКО Анатолий Никитович, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; РИНЦ ID: 592555; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

ВИНОГРАДОВ Александр Всеволодович, канд. техн. наук, начальник лаборатории, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6115-1633; e-mail: win11@yandex.ru

ДАШТИЕВ Идрис Зилфикарович, д-р техн. наук, начальник отделения, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; РИНЦ ID: 904740; ORCID: 0000-0001-5098-6064; e-mail: plastickon@yandex.ru

КОБЫЛКОВ Никита Валерьевич, инженер, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1430-5625; e-mail: kobilkov-k@yandex.ru

ТЕРЕХОВ Сергей Александрович, инженер, АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2895-3885; e-mail: s-terekh75@rambler.ru

Information about the authors

Anatoliy N. GARASHCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Leading Researcher, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ID RISC: 592555; ORCID: 0000-0002-8143-944X; e-mail: a.n.gar@mail.ru

Aleksandr V. VINOGRADOV, Cand. Sci. (Eng.), Laboratory Chief, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6115-1633; e-mail: win11@yandex.ru

Idris Z. DASHTIEV, Dr. Sci. (Eng.), Head Of Sub-Branch, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ID RISC: 904740; ORCID: 0000-0001-5098-6064; e-mail: plastickon@yandex.ru

Nikita V. KOBYLKOV, Engineer, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1430-5625; e-mail: kobilkov-k@yandex.ru

Sergey A. TEREKHOV, Engineer, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2895-3885; e-mail: s-terekh75@rambler.ru