

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.02.9-30>

УДК 69:614.84:691-419

Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор)

© А. Н. Гарашченко^{1(✉)}, А. А. Берлин², А. А. Кульков¹

¹ АО "ЦНИИ специального машиностроения" (Россия, 141371, Московская обл., г. Хотьково, ул. Заводская)

² Институт химической физики РАН (Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4)

РЕЗЮМЕ

Введение. Рассмотрены публикации, отражающие особенности создания конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с точки зрения обеспечения требуемого уровня их пожаробезопасности. Отмечено, что работам по обеспечению требуемого уровня огнестойкости конструкций из ПКМ уделяется недостаточно внимания, что препятствует их применению в различных сферах, и в особенности в строительстве.

Аналитическая часть. Проведен анализ публикаций по исследованиям показателей огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных покрытий (ОЗП) как одного из видов полимеров и средств огнезащиты конструкций из ПКМ. Отмечается необходимость решения непростой задачи по обеспечению требуемой адгезии между ОЗП и ПКМ, а также по обеспечению стойкости конструкций и долговечности покрытий в процессе эксплуатации. Представлены результаты, свидетельствующие о возможности существенного улучшения показателей пожарной опасности ПКМ при относительно малой толщине покрытия.

Анализ публикаций показал важную роль и возможности теплотехнических расчетов для моделирования температурных полей в конструкциях и определения необходимых толщин вспучивающихся ОЗП и других средств огнезащиты. Эта роль обусловлена, в частности, тем, что для конструкций из ПКМ такие испытания практически не проводятся. Показано, что существует методика, которая уже в настоящее время успешно используется для расчетов прогрева конструкций из композитов и может рассматриваться в качестве основы для дальнейшего совершенствования. Как видно из представленных результатов, несущие композитные конструкции необходимо конструировать оптимальной формы, что в сочетании с огнезащитными покрытиями позволит обеспечить их заданную огнестойкость.

Выводы. Таким образом, представлены результаты, демонстрирующие возможные пути обеспечения требуемой пожаробезопасности как ПКМ, так и создаваемых из них конструкций и изделий. Отмечены задачи по данной важной и перспективной тематике, которые требуют решения.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал; показатели пожарной опасности; горючесть; огнестойкость; огнезащита; вспучивающиеся покрытия; теплотехнические расчеты.

Для цитирования: Гарашченко 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.

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

Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures

© Anatoliy N. Garashchenko^{1(✉)}, Aleksandr A. Berlin², Aleksandr A. Kulkov¹

¹ Central Research Institute for Special Machinery (Zavodskaya St., Khotkovo, Moscow Region, 141371, Russian Federation)

² Semenov institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences (Kosygina St., 4, Moscow, 119991, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Publications reflecting the peculiarities of creating structures made of polymer composite materials (PCM) on determining the required fire-safety level are studied. It was noted that insufficient attention to ensuring the required level of fire resistance of PCM structures, which prevents their use in various fields and, in particular, in engineering is paid.

Analytical part. The analysis of publications on research flame retardant efficiency of intumescent flame-retardant coatings (FRC) indicators as one of the polymer types and fire protection means of structures made of PCM is carried out. The necessity of solving the urgent task of ensuring the required adhesion between the FRC and PCM, as well as ensuring durability and durability of coatings during the operation period is noted. The results, indicating the possibility of a significant improvement in the PCM fire risk indicators at a relatively low coating thickness are presented.

The analysis of publications showed the important role and possibilities of heat engineering calculations for modeling temperature fields in structures and determining the required thicknesses of intumescent FRC and other fire protection equipment. This role is partly associated with the fact of impossibility of testing such PCM structures as well. It is shown that there is a technique that is currently being successfully used to calculate the heating of polymer composite structures and can be considered as a basis for further improvement. As can be seen from the presented simulation results, bearing composite structures have to be designed in an optimal shape, which, in combination with fire-retardant coatings, will ensure their fire resistance.

Conclusion. The results, demonstrating possible ways to ensure the required fire safety indicators of the PCM structures are presented. On this important and promising topic, tasks that need to be carried out are also noted.

Keywords: polymer composite materials; fire safety; fire hazard indices; fire resistance; fire protection; intumescent coating; thermotechnical calculations.

For citation: A. N. Garashchenko, A. A. Berlin, A. A. Kulkov. Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 9–30 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30.

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

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) все в большей степени заменяют металлы при производстве различных конструкций, их элементов, а также разнообразных изделий из них. Растет объем их использования при изготовлении ограждающих конструкций, основной функцией которых является обеспечение требуемого термического сопротивления и одновременно необходимых прочностных, эксплуатационных, эстетических и прочих показателей. В последнее время конструкции из ПКМ все чаще применяются в качестве несущих конструкций, эксплуатируемых при значительных силовых нагрузках. При необходимости они могут совмещать функции несущих и ограждающих конструкций. Однако широкому использованию ПКМ в различных сферах в значительной степени препятствуют их показатели пожарной опасности.

Пожарная опасность ПКМ определяется горючестью (т. е. способностью материала загораться, поддерживать и распространять процесс горения), дымовыделением, токсичностью продуктов термического разложения, а конструкций из ПКМ — огнестойкостью (т. е. способностью сохранять при воздействии огня несущие, теплоизолирующие и ограждающие функциональные свойства по отдельности или в сочетании). Однако если улучшению и получению заранее заданных показателей пожаробезопасности материалов на полимерной основе традиционно уделялось значительное внимание как за рубежом, так и в нашей стране, то исследования по оценке и обеспечению огнестойкости конструкций из полимерных композитов проводились в ограниченном объеме. Соответственно, и количество публикаций по их огнестойкости и влиянию на нее огнезащиты, в частности вспучивающихся покрытий, относительно невелико. Подобные публикации авторы постарались отметить в настоящем обзоре.

Полимерные композиты применяются в строительстве, на транспорте, при создании изделий военной техники, в авиастроении при изготовлении

панелей, сегментов корпуса фюзеляжа, элементов крыла, оперения, хвостовой части и пр. Многослойные панели в виде огнестойких и огнепроницаемых экранов предназначены для локализации возможных очагов возгорания в “пожароопасных зонах” и защиты от пламени различных конструктивных элементов летательных аппаратов, емкостей, инженерных систем и пр. Можно отметить, что наибольшее количество публикаций по вопросам обеспечения пожаробезопасности полимерных композитов и конструкций из них характерно именно для авиационной отрасли. Кроме того, композиты используются на морских судах и в железнодорожных вагонах, например, в виде многослойных ограждающих конструкций, несущих и прочих элементов.

Из ПКМ изготавливаются ответственные элементы различных образцов военной техники, такие как контейнеры, бункеры, емкости, баки, экраны для защиты личного состава и техники, амортизаторы и пр. К некоторым из них предъявляются требования по огнестойкости при задаваемых условиях огневого воздействия. Все большее количество конструкций и изделий из ПКМ используется на кораблях ВМФ (переборки, надстройки, емкости, контейнеры и т. д.). На надводных кораблях и в особенности на подводных лодках имеется большое количество резинотехнических, в частности гидроакустических, изделий и амортизаторов, что повышает вероятность возгораний и развития пожара в период их эксплуатации и особенно на стадии проведения ремонтно-восстановительных работ. Однако информация по использованию ПКМ в военной технике и результатам исследований по обеспечению требуемых показателей пожаробезопасности во многих случаях содержится в технических отчетах или изданиях, к которым нет широкого доступа. Некоторые из статей, опубликованных в таких изданиях, анализируются в настоящем обзоре.

Наибольшим потенциалом для использования полимерных композитов обладает строительная отрасль, где они применяются все в большем объеме,

и не только в виде ограждающих панелей, облицовок и т. д., но и в качестве несущих конструкций, заменяя сталь и железобетон. Современные технологии обеспечивают возможность изготовления композитных элементов различной структуры, что позволяет создавать из ПКМ колонны, балки, мачты, настилы, защитные экраны, обделки тоннелей, желоба, трубы, баллоны и пр. При их изготовлении используются различные технологии (формование, послойное нанесение, намотка, вакуумная инфузия, пултрузия, выкладка, напыление, литье и пр.). Возможности изготовления методом пултрузии композитных профилей практически любой формы продемонстрированы на рис. 1. Таким образом можно изготавливать, например, несущие колонны и балки двутаврового, коробчатого или любого другого профиля. Кроме того, можно упомянуть об использовании стеклопластиковых и базальтопластиковых армирующих элементов (например, стержней) в конструкциях из бетона вместо стальной арматуры. Бандажи из углепластика обеспечивают усиление железобетонных конструкций с недостаточной несущей способностью. На строительных и промышленных объектах, а также на транспорте используются вибродемпфирующие и прочие элементы и изделия из резины и полиуретана.

Снижение горючести и других показателей пожарной опасности полимерных материалов чаще всего достигается с помощью антипиренов (замедлителей горения), а также в результате модификации или синтеза малогорючих полимеров. При этом улучшение показателей горючести обычно сопровождается ухудшением физико-механических характеристик ПКМ и (или) увеличением стоимости композитов. Однако даже если удастся улучшить показатели пожарной опасности материалов, то в большинстве случаев это практически не влияет на такую важнейшую характеристику пожарной опасности самих конструкций, как огнестойкость, показателем которой является предел огнестойкости.



Рис. 1. Вид профилей из стеклопластика, изготовленных методом пултрузии Производственной компанией «Армопроект»
Fig. 1. Appearance of fiberglass profiles made of pultrusion by Manufacturing Company “Armoprojekt”

Для обеспечения требуемого уровня предела огнестойкости необходимо применение специальных мер и средств.

При обеспечении пожаробезопасности конструкций из ПКМ несомненный интерес представляют результаты, полученные при исследованиях природного полимерного композита — древесины. Показательно, что после многолетних исследований и многочисленных публикаций по характеристикам пожарной опасности самого материала (как при отсутствии, так и при наличии огнезащиты) стали появляться статьи по оценке и обеспечению с помощью огнезащиты приемлемых показателей (пределов огнестойкости и класса пожарной опасности) для конструкций из древесины.

Традиционной площадкой для обсуждения рассматриваемых в обзоре вопросов является международная научно-техническая конференция “Полимерные материалы пониженной горючести”, имеющая многолетнюю историю. На ней, наряду с рассмотрением путей улучшения показателей для различных полимеров, больше внимания стало уделяться обеспечению необходимого и заранее задаваемого уровня пожаробезопасности конструкций из ПКМ.

Мировая тенденция к значительному росту объемов использования полимерных композитов в различных отраслях, а также к увеличению номенклатуры конструкций, создаваемых из ПКМ, требует постоянного совершенствования методов и средств по обеспечению требуемых показателей пожаробезопасности. В настоящем обзоре анализируются публикации по рассматриваемой тематике и представлены соображения авторов по не решенной на данный момент проблеме повышения пожаробезопасности конструкций из ПКМ.

Состояние вопроса

Обеспечению приемлемого уровня пожароопасных характеристик материалов на полимерной основе посвящены многочисленные исследования. В различных источниках (в частности, в [1–5]) рассматриваются показатели, обусловленные горючестью полимеров и сопутствующими процессами. Известно [2, 3], что все методы снижения горючести основаны на принципах: 1) изменения теплового баланса пламени за счет увеличения различного рода теплопотерь; 2) уменьшения потока тепла от пламени на полимер за счет создания защитных слоев, например из образующегося кокса; 3) снижения скорости газификации полимера; 4) изменения соотношения горючих и негорючих газов в сторону последних.

Классификация материалов по пожарной опасности с указанием методик определения соответ-

вующих показателей установлена Федеральным законом № 123-ФЗ “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” (далее — ФЗ № 123). Кроме того, определение показателей пожарной опасности ПКМ и конструкций из них регламентируется ГОСТ Р 56206–2014 (ИСО 25762:2009) “Композиты полимерные. Методы оценки пожарной опасности и пределов огнестойкости”. Указаны методики, по которым необходимо проводить испытания: на горючесть — по ГОСТ 30244–94; на воспламеняемость — по ГОСТ 30402–96; на распространение пламени — по ГОСТ Р 51032–97; на огнестойкость — по ГОСТ 30247–94 и ГОСТ 30247.1–94. Используется также ГОСТ 12.1.044–89 для исследования горючести (п. 4.3), распространения пламени (п. 4.19), определения коэффициента дымообразования (п. 4.18) и показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов (п. 4.20). В [6–8] отмечается, что применяемая на практике методологическая и нормативная база, регламентирующая оценки пожарной опасности полимерных композитов, существенно зависит от области их использования и функционального назначения.

Специфика испытаний и применения полимерных композитов в авиастроении нашла отражение в многочисленных публикациях, в частности в [6, 7, 9–13]. Дополнительно к перечисленным выше показателям пожарной опасности материалов, из которых в качестве главного рассматривается горючесть, большое внимание уделяется определению характеристик тепловыделения. Помимо многочисленных работ по оценке показателей пожарной опасности ПКМ, в значительном объеме проводились испытания конструкций из них, в основном в виде многослойных панелей и экранов [11–13]. В них в качестве внутреннего и наружного слоев применяются стекло- и углепластики, а в качестве внутреннего слоя — пенополиуретан, пенополистирол или стеклопластиковые соты. По методикам, регламентированным международными авиационными правилами, оценивалась огнестойкость и огнестойкость таких конструкций [11–13].

Испытания на огнестойкость многослойных панелей и прочих конструкций из полимерных композитов, предназначенных для судостроения, проводятся с учетом требований Международного кодекса по применению испытаний на огнестойкость 2010 г. (Кодекс ПИО 2010). Применяемые на судах материалы должны быть устойчивыми к воспламенению и распространению горения, определяемым в нашей стране по ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.19). Можно отметить, что на отечественном рынке широко представлены материалы и противопожарные композитные конструкции, производимые зарубежными фирмами. Во многом это обусловлено значи-

тельным объемом проводимых за рубежом испытаний, а также испытаний конструкций в огневых печах при стандартных режимах воздействия. Информация по ним содержится в отчетах испытательных центров, а формальное упоминание — в рекламных проспектах фирм – производителей или поставщиков материалов и конструкций.

Особенностью испытаний на огнестойкость конструкций, применяемых на кораблях ВМФ, является то, что задаваемые чаще всего температурные режимы отличаются от так называемого “стандартного” режима и соответствуют рассматриваемому сценарию развития пожара. Результаты таких испытаний в огневых печах, как правило, содержатся в научно-технических отчетах организаций кораблестроительной и судостроительной отрасли, а доступные публикации по результатам подобных исследований практически отсутствуют. Имеются также сертификаты и рекламная информация зарубежных и отечественных фирм по средствам огнезащиты конструкций (переборки, палубы и пр.) без публикаций в журналах с анализом и обобщением результатов исследований. В свободном доступе находятся преимущественно доклады, представленные на научно-технических конференциях и посвященные практике и перспективам использования полимерных композитов в судостроении (например, [14–16]).

Недостаток публикуемой информации характерен также для материалов и конструкций из композитов, применяемых в вагонах железной дороги и метрополитена. Авторами [8] рассмотрены требования пожарной безопасности, предъявляемые к материалам на полимерной основе, которые сформулированы в Техническом регламенте Таможенного союза (ТР ТС) “О безопасности железнодорожного подвижного состава” (ТР-ТС-001–2012). В соответствии с ним предусматривается комплексная оценка материалов по группе горючести, коэффициенту дымообразования, индексу распространения пламени и токсичности продуктов горения. Отмечается, что во многих других случаях использования полимерных композитов метод испытаний по определению горючести материалов и их классификация устанавливаются согласно ГОСТ 12.1.044–89 (п. 4.3), и это в значительной степени отличается от определения параметров горючести строительных материалов по ГОСТ 30244–94. Что касается испытаний на огнестойкость многослойных панелей, применяемых в вагонах и изготавливаемых с использованием ПКМ, информации о них в доступных источниках обнаружить не удалось.

Известно, что полимерные композиты применялись при создании изделий военной техники, что позволило существенно снизить их массу и улучшить другие эксплуатационные характеристики. Для не-

которых из них требовалось подтверждение их работоспособности при огневом воздействии. При проведении испытаний в большинстве случаев воспроизводились условия высокотемпературного воздействия, которые отличались от “стандартных” и задавались для конкретных сценариев развития аварийных ситуаций. Информация по таким испытаниям содержится в основном в научно-технических отчетах и лишь частично освещается в немногочисленных публикациях. К их числу относятся работы [17–24], причем некоторые из них опубликованы в изданиях (журналах), которые имеют ограниченный тираж и к архивам которых ограничен доступ. В работе [17] продемонстрирована возможность обеспечения требуемого уровня огнестойкости несущих композитных конструкций на примере гребного вала из стеклопластика. Огнестойкость подтверждена для заданного режима пожара с помощью испытаний модельных образцов в огневой печи и тепловых расчетов. Работы [17–22] посвящены обеспечению огнестойкости многослойных ограждающих конструкций из ПКМ, являющихся основными элементами контейнеров, бункеров, панелей. Имеются также публикации (например, [23, 24]) по оценке стойкости при пожаре тары (укупорки) из ПКМ при отсутствии или при наличии огнезащиты.

В обзоре основное внимание уделено анализу публикаций, посвященных обеспечению требуемого уровня огнестойкости конструкций из ПКМ как важнейшего показателя их пожаробезопасности. При этом рассматривались особенности, характерные для несущих конструкций, которые до последнего времени применялись и исследовались в меньшем объеме по сравнению с ограждающими конструкциями из полимерных композитов.

Как отмечалось выше, в соответствии с ФЗ № 123 и ГОСТ Р 56206–2014 испытания на огнестойкость предписано проводить по ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94 в огневых печах аккредитованных испытательных центров при “стандартных” режимах пожара. Однако до настоящего времени подавляющее большинство экспериментов по определению пределов огнестойкости и эффективности средств огнезащиты приходилось на конструкции из стали, применяемые в строительстве. Что касается конструкций из полимерных композитов, то, несмотря на их важность и перспективность, количество таких испытаний для них по указанным стандартам до последнего времени было минимальным. И это на фоне традиционно большого объема исследований, посвященных показателям пожарной опасности различных материалов на полимерной основе, и заслуженного внимания к работам, направленным на улучшение этих показателей [1–6].

В ходе анализа представляется логичным и полезным упомянуть публикации по древесине, являющейся природным полимерным композитом. Они свидетельствуют о том, что, наряду со значительным объемом исследований по определению показателей пожарной опасности самой древесины [25], в последние годы стали чаще проводиться испытания в огневых печах конструкций из нее, причем как при отсутствии, так и при наличии огнезащиты. Их целью являлась оценка пределов огнестойкости и класса пожарной опасности. В качестве примера можно назвать работы [26–30]. Логично предположить, что практика проведения и увеличения объема подобных испытаний впоследствии станет характерной и для ПКМ. Следует отметить случаи применения в ограждающих конструкциях с каркасом из древесины низкоплотного полимерного композита, совмещающего функции теплоизоляции и огнезащиты [31, 32]. Материалы такого типа могут использоваться и в композитных конструкциях вместо пенополистиролов и пенопластов, поскольку они имеют более приемлемые показатели пожарной опасности, чем указанные традиционно применяемые полимеры [31, 32].

Важнейшей задачей при обеспечении требуемого уровня пожарной безопасности (огнестойкости) конструкций из полимерных композитов является оценка роли и возможностей огнезащиты. Не вызывает сомнений, что добиться значительного повышения их пожаробезопасности можно при использовании конструктивной огнезащиты (плит, матов) соответствующей толщины. Однако для элементов из ПКМ наиболее приемлемыми являются вспучивающиеся огнезащитные покрытия (ОЗП) на полимерной основе, при этом возникают вопросы о возможности и целесообразности их применения. В связи с этим анализу результатов их исследований и особенностям использования необходимо уделить должное внимание.

При нагреве вспучивающихся (терморасширяющихся) ОЗП образуется достаточно толстый и низко теплопроводный слой (пенококс), который способен в течение определенного времени значительно уменьшить тепловой поток к защищаемой поверхности конструкции и обеспечить существенный теплосъем с нагретой до высоких температур поверхности этого слоя за счет излучения. При таком способе огнезащиты реализуются принципы снижения горючести и повышения огнестойкости, перечисленные в [2, 3]. Однако для вспучивающихся ОЗП необходимо решить непростую задачу по обеспечению требуемой адгезии между покрытиями и ПКМ, а также их эксплуатационной стойкости и долговечности при эксплуатации. Такие материалы сами являются полимерными композитами и могут

быть отнесены к группе “полимеров пониженной горючести” [2, 3]. В обзоре анализируется информация по свойствам и влиянию вспучивающихся покрытий на пожаробезопасность конструкций из ПКМ, а также дается оценка возможности и целесообразности их использования в качестве огнезащиты.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время производится большая номенклатура вспучивающихся ОЗП, предназначенных для защиты от пожаров конструкций из различных материалов (стали, древесины, ПКМ). Их можно условно разделить на несколько групп. В таблице приведены некоторые типичные и выпускаемые серийно представители этих групп с указанием относительного уровня их огнезащитной эффективности. Она определяется в значительной степени кратностью вспучивания, стабильностью и стойкостью вспученного слоя (пенококса), а также его структурой и теплопроводностью. В таблице указано, какие из покрытий совместимы с ПКМ (стеклопластиковыми, резиновыми, полиуретановыми и пр.). Видно, что имеется крайне ограниченное число серийно выпускаемых вспучивающихся ОЗП, которые могут рас-

считываться при выборе наиболее приемлемого варианта огнезащиты композитных конструкций.

Анализ состояния исследований и практического использования вспучивающихся ОЗП свидетельствует о том, что проблемой является высокая стоимость испытаний в огневых печах, необходимых для подтверждения заданных пределов огнестойкости защищаемых конструкций. Причем они далеко не всегда позволяют определить толщины огнезащиты, требуемые для конкретных конструкций.

Кроме того, все более очевидной становится проблема, связанная с завершением гарантийных сроков эксплуатации ОЗП. Вспучивающиеся составы, как и любые другие материалы на полимерной основе, подвержены старению, в результате чего их основные характеристики могут существенно ухудшиться. Приходится констатировать, что в строительной отрасли, где используется основной объем выпускаемых ОЗП, отсутствует единый подход и соответствующие нормативные документы, не проводятся необходимые исследования, подтверждающие сохранение (а точнее степень изменения) основных свойств, главным из которых является огнезащитная эффективность. Знание динамики ее изменения

Номенклатура типичных вспучивающихся покрытий / Typical foaming coatings spectrum

Типичные ОЗП Typical fire-protective coatings	Огнезащитная эффективность Fire-protective efficiency	Кратность вспучивания Intumescence multiplicity	Эксплуатацион- ная стойкость Service durability	Материал защищаемой конструкции Protection structure material
Феникс СТВ, Огракс-В-СК, Nullifire S-607 HB (водно-дисперсионные) Phenix STV, Ograx-B-SK, Nullifire S-607 HB (water-dispersion)	Высокая High	40–45	Относительно низкая Relatively low	Сталь Steel
Феникс CTC, Nullifire S-606, Unitherm ASR, Джокер 521 (растворитель) Phenix STS, Nullifire S-606, Unitherm ASR, Joker 521 (solvent)	То же The same	40–45	Средняя Average	То же The same
Феникс ДП (водно-дисперсионное) Phenix DP (water-dispersion)	“	100–120	Относительно низкая Relatively low	Древесина Wood
СГК-1, СГК-2, Огракс-МСК на основе хлорсульфированного полиэтилена и терморасширяющегося графита (растворитель) SGK-1, SGK-2, Ograx-MSK based on chlorosulfonated polyethylene and thermally expanding graphite (solvent)	Средняя Average	20–25	Высокая High	Сталь, ПКМ Steel, PC
Рубеж-В на основе перхлорвиниловой смолы (растворитель) Rubezh-V based on perchlorovinyl resin (solvent)	То же The same	30–40	То же The same	Сталь, ПКМ (с грунтом) Steel, PC (with the ground)
Огракс-СКЭ, Chartec-7 на эпоксидной основе (растворитель) Ograx-SKE, Chartec-7 based on epoxy resin (solvent)	Низкая Low	8–10	“	Сталь, ПКМ Steel, PC

требуется для обоснованного назначения проектных толщин ОЗП, сроков их эксплуатации и регламентации мероприятий по восстановлению огнезащиты. При отсутствии результатов таких исследований гарантийные сроки эксплуатации вспучивающихся покрытий, рекомендуемые производителями материалов, а также заключения о возможности их продления нельзя признать обоснованными.

При решении этой проблемы для вспучивающихся ОЗП, применяемых в строительстве, необходимо воспользоваться результатами, имеющимися в ракетно-космической, авиационной, кораблестроительной отраслях, и адаптировать применяемые там методики исследований. Результаты, представленные в [13, 33–41], свидетельствуют о том, что проведение ускоренных климатических испытаний и определение (подтверждение) основных характеристик применяемых материалов на полимерной основе (не только конструкционных, но и огнезащитных) с учетом длительности и условий эксплуатации должно стать обязательным. Это обусловлено тем, что при эксплуатации, как отмечается в [13, 33–41], может происходить существенное ухудшение характеристик пожарной опасности за счет изменения структуры полимерной матрицы, в результате чего снижается термостойкость, легче протекает термодеструкция, удаляются антипиренирующие добавки и т. д.

Несмотря на вышеизложенное, только немногочисленные работы [37–41] посвящены оценке влияния эксплуатационных факторов на эффективность вспучивающихся ОЗП и огнестойкость защищаемых ими конструкций. Как показано в [40], со временем происходит снижение огнезащитной эффективности (для покрытия СГК-2 порядка 25 % за 25 лет). Подобные изменения объясняются в основном снижением со временем кратности вспучивания ОЗП (в данном случае приблизительно на 25 %) [40]. Учитывая, что СГК-2 по своей природе относится к числу материалов с наибольшей стойкостью к воздействию внешних факторов, можно ожидать существенно большего влияния длительности и условий эксплуатации на снижение кратности вспучивания и огнезащитной эффективности большинства из применяемых покрытий. Данные, подтверждающие возможность снижения кратности вспучивания покрытий в несколько раз, представлены в [37–39].

Важную роль в оценке огнезащитной эффективности и, соответственно, огнестойкости конструкций со вспучивающимися ОЗП, а также в прогнозировании их изменения в процессе эксплуатации могли бы сыграть теплотехнические расчеты, позволяющие оценивать уровень прогрева конструкций и определять толщину различных ОЗП. Однако общепринятые методики расчетов отсутствуют,

а методики, рассмотренные в обзоре, используются пока в недостаточной степени.

Анализируя особенности и перспективы применения ПКМ, можно указать еще на ряд нерешенных вопросов и неиспользованных возможностей в части обеспечения пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов. Во-первых, это ограниченная номенклатура серийно выпускаемых ОЗП, которые были бы совместимы с конкретными полимерными композитами и могли бы эффективно защищать конструкции из них. Можно назвать только несколько материалов на основе хлорсульфированного полиэтилена и эпоксидных смол (см. таблицу). Крайне желательна разработка новых вспучивающихся покрытий, предназначенных для рассматриваемых конструкций. Во-вторых, это недооценка необходимости и возможности конструирования формы элементов из ПКМ с ОЗП для обеспечения требуемых пределов огнестойкости на базе использования существующих методик теплотехнических и статических расчетов и их дальнейшего совершенствования. В-третьих, это недостаточная информированность о перспективах снижения показателей пожарной опасности ПКМ (стеклопластиков, базальтопластиков, углепластиков, резин, полиуретанов и пр.) с помощью вспучивающихся ОЗП. Обратимся к публикациям, посвященным трем перечисленным вопросам.

Относительно возможности снижения показателей пожарной опасности полимерных композитов с помощью вспучивающихся ОЗП можно отметить, что накопленные к настоящему времени результаты, полученные для стеклопластиков, полиуретанов и резин, свидетельствуют о перспективности такого варианта снижения горючести и других стандартных показателей материалов. В качестве примера можно привести результаты испытаний образцов стеклопластика на основе эпоксидного связующего, проведенные по ГОСТ 12.1.044–89 (пп. 4.3, 4.18, 4.19, 4.20 — определение группы горючести, дымообразующей способности, токсичности продуктов разложения, индекса распространения пламени) и по ГОСТ 30402–96 (воспламеняемость) [42]. Они показали, что при относительно небольшой толщине вспучивающегося покрытия СГК-2 (порядка 0,5 мм) достигается существенное улучшение свойств по сравнению с вариантом без огнезащиты. Удалось обеспечить следующие группы стандартизованных показателей: В1 (трудновоспламеняемый материал) вместо В2 (умеренновоспламеняемый); трудногорючий вместо горючий средней воспламеняемости; Д2 и Т2 (умеренная дымообразующая способность и умеренноопасный материал по токсичности продуктов горения) при существенном улучшении контрольных параметров; медленное

(практически нулевое) распространение пламени вместо быстрого распространения пламени [42]. Ранее подобные результаты по горючести стеклопластиков были получены для ПКМ с покрытием СГК-1. Использование покрытий СГК-1 и СГК-2 толщиной порядка 0,5 мм обеспечило перевод типичного литьевого полиуретана из горючего средней воспламеняемости в трудногорючий [42]. Это свидетельствует о том, что во многих случаях применение тонкослойных вспучивающихся ОЗП является реальной альтернативой традиционным способам, предусматривающим использование антипиренов, модифицированных и относительно дорогих связующих и пр.

Для подтверждения пределов огнестойкости несущих и ограждающих конструкций из любых материалов с огнезащитой (в данном случае со вспучивающимся покрытием) по ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94 предусмотрено проведение испытаний в огневых печах. Огнезащитная эффективность ОЗП определялась при испытаниях преимущественно конструкций из стали. Известно, что требуется испытать несколько (а иногда значительное количество) образцов при различной толщине огнезащиты и различной массивности конструкций (для конструкций из стали она характеризуется приведенной толщиной металла).

Однако даже несколько испытаний во многих случаях не позволяют обоснованно переносить их результаты на конструкции других типоразмеров и определять требуемые толщины огнезащиты при иной, чем при испытаниях, длительности огневого воздействия (тем более при температурных режимах пожара, отличающихся от “стандартного”). Для этого необходима методика расчетов, апробированная с использованием результатов огневых испытаний, позволяющая моделировать работу вспучивающихся покрытий и прогрев защищаемых ими конструкций. Естественно, возможность ее использования должна быть доказана. Однако пока это реализуется крайне редко, и в подавляющем большинстве случаев толщины огнезащиты в таблицах или номограммах, рекомендуемых производителями материалов, не определяются должным образом и не могут быть признаны обоснованными.

Работы по созданию вариантов методик отражены в отечественных и зарубежных публикациях [18, 20, 22, 43–66]. Показательно, что в авторитетном обзоре [45] сделан вывод о необходимости расчетов для моделирования работы и определения толщин огнезащиты и высказано предположение о скором появлении моделей, которые с достаточной степенью достоверности будут предсказывать поведение вспучивающихся ОЗП в условиях пожара. В обзоре отмечается также, что развитие химии и

технологии огнезащитных материалов дошло до такого уровня, что создание новых материалов невозможно лишь на основе экспериментальных данных, без привлечения численных методов. Данное предположение оправдалось, и в нашей стране стали появляться подобные методики.

Следует упомянуть о трех математических моделях и методиках расчетов конструкций со вспучивающимися ОЗП. Правда, одна из них [47] не нашла применения на практике. В то же время методика, упоминаемая в [20–22, 40, 48] успешно использовалась для расчетов различных конструкций с покрытиями СГК-1 и СГК-2, для чего был определен весь предусмотренный в ней комплекс характеристик этих материалов, включая кратность вспучивания. Однако для других ОЗП она практически не применялась, о чем свидетельствует отсутствие соответствующих публикаций.

Более универсальными и апробированными при расчетах различных вспучивающихся покрытий оказались модель и методика расчетов, представленные в работах [18, 46, 49–53]. Можно констатировать, что с их появлением стало возможным решение большинства задач, необходимость решения которых была оговорена в обзоре [45]. Кроме того, вывод о значимости методики, упоминаемой в [18, 46, 49, 51–53], следует из анализа, проведенного в обстоятельном обзоре [60], посвященном вспучивающимся ОЗП.

Методику и компьютерную программу, представленные в [46, 49, 51–53], отличает оптимальное сочетание сложности математической модели (учитываются основные физико-химические процессы, происходящие во вспучивающихся материалах и в их пенококсе при нагреве) с возможностью ее численной реализации и разработки компьютерной программы, а также моделирования прогрева различных конструкций с огнезащитой и, в конечном счете, определения проектных толщин ОЗП. В [46, 49, 51–53] обосновывается выбор порядка численной реализации исходной системы уравнений, приводятся порядок и результаты определения комплекса свойств ОЗП, необходимых для проведения расчетов, а также даются примеры апробирования методики путем сопоставления результатов расчетов с данными испытаний конструкций с конкретными ОЗП в огневых печах.

Используемая математическая модель учитывает в явном виде такие физико-химические процессы, происходящие в огнезащитных и в конструкционных материалах при нагреве, как термическая деструкция, порообразование, фильтрация газообразных продуктов термодеструкции по толщине вспученного слоя. Принципиально важным моментом является возможность учета динамики измене-

ния толщины вспученного слоя (пенококка), т. е. рост и последующее уменьшение его толщины, обусловленное выгоранием и усадкой [26, 46, 49, 51–53]. Кроме того, задается такой вид зависимостей для теплофизических характеристик в этом слое, который позволяет учесть изменение лучистой и конвективной составляющих коэффициента теплопроводности непосредственно в ходе численных вычислений с учетом порообразования в материале и деформирования расчетной области. Можно проводить расчеты при различных температурных режимах пожара, что необходимо для определения проектных толщин огнезащиты, а также для учета конкретных условий испытаний в огневых печах при анализе и обобщении их результатов.

Разработка, апробация и применение указанной методики [46, 49, 51–53] первоначально предусматривались для строительных конструкций из стали. Методика позволяет, в частности, обоснованно переносить результаты испытаний в огневых печах при стандартном воздействии на другие условия, а также на металлоконструкции других габаритов. Это важно, поскольку, как отмечалось ранее, во многих случаях потребителям предлагаются таблицы и графики с рекомендуемыми толщинами ОЗП без должного обоснования. Методика использовалась при анализе и обработке результатов испытаний ОЗП и выпуске проектов огнезащиты несущих и ограждающих конструкций для многочисленных строительных объектов, а также изделий различного назначения (в том числе из ПКМ). Вместе с тем можно констатировать, что до сих пор возможности этой методики явно недооценивались. Помимо возможности ее использования уже в настоящее время и в большем объеме, она может рассматриваться в качестве основы для дальнейшего совершенствования и создания, в конечном счете, общепринятой методики, необходимость которой становится все более очевидной. При этом подразумевается, что ее применение должно быть регламентировано в нормативных документах.

Данная методика [46, 49, 51–53] может использоваться для различных конструкций из ПКМ, эксплуатируемых как при наличии покрытий, так и без них. Даже в авиационной отрасли, где испытания на огнестойкость многослойных композитных конструкций проводились и проводятся в большом объеме [10–13], ее использование представляется целесообразным при моделировании их прогрева, анализе результатов испытаний, переносе их результатов на другие условия и определении оптимальных вариантов огнезащиты. О необходимости подобного моделирования свидетельствует попытка создания расчетной методики для авиационной отрасли [13, 61]. Однако в ходе проводимых авторами

этой методики расчетов не учитывались особенности работы разлагающихся и вспучивающихся материалов и покрытий. В связи с этим представляется целесообразным и перспективным создание более совершенной методики теплотехнических расчетов, адаптированной к потребностям авиационной отрасли.

Если рассматривать силовые конструкции и изделия из ПКМ, то следует отметить, что для них испытания в огневых печах до настоящего времени практически не проводились. В такой ситуации применение методики, подобной приведенной в [46, 49, 51–53], является основным путем обоснования их огнестойкости и выбора средств огнезащиты. При ее использовании появляется возможность моделирования температурных полей и оценки их влияния на напряженно-деформированное состояние, что для конструкций из композитов особенно актуально.

Показательно, что подобная ситуация характерна также для конструкций из другого горючего композитного материала — древесины. Для них в отличие от полимерных композитов испытания в огневых печах проводятся, но в недостаточном объеме, что также свидетельствует о необходимости соответствующих расчетов. Уже первые попытки численного моделирования, представленные в [26], свидетельствуют о том, что они эффективны для определения величины (скорости) обугливания, выбора рациональных вариантов огнезащиты, оценки пределов огнестойкости, а также для определения класса пожарной опасности конструкций из древесины.

Следует упомянуть также еще об одном подходе к моделированию прогрева конструкций при пожаре и определению толщины огнезащиты. Он представлен, в частности, в работах [62–66]. В математической модели авторы используют уравнение нестационарной теплопроводности, которое не учитывает физико-химических процессов, происходящих в материалах при нагреве. Такие процессы косвенно учитываются при определении эффективных теплофизических характеристик огнезащитных материалов, которые устанавливаются путем решения обратной задачи теплопроводности [63] с использованием результатов измерения температуры в ходе нескольких стандартных испытаний конструкций с огнезащитой при конкретном режиме огневого воздействия. И если для конструкций с не разлагающейся при нагреве конструктивной огнезащитой применение такой экспериментально-расчетной методики обосновано (например, [64, 66]), то для разлагающихся, а тем более для вспучивающихся, материалов ее использование [64–66] является, по существу, вынужденным и может быть объясне-

но отсутствием возможности применения более совершенных моделей и программ расчетов.

Таким образом, с помощью методики, упоминаемой в [46, 49, 51–53], можно проводить моделирование прогрева конструкций и изделий различного назначения из любых материалов (стали, стеклопластика, резины, полиуретана, древесины, железобетона и пр.), защищенных вспучивающимися ОЗП. Имеются многочисленные результаты, демонстрирующие научную обоснованность, практическую значимость и перспективы таких расчетов для обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций и изделий.

Моделирование в большом объеме проводилось для металлоконструкций [46, 49, 51–53]. Получены результаты, представляющие интерес не только для проектировщиков огнезащиты, но и (в соответствии с пожеланиями и предположениями, содержащимися в обзоре [45]) для разработчиков вспучивающихся составов и исследователей их основных характеристик. В [67] получена наглядная количественная информация о влиянии кратности вспучивания и уменьшения толщины вспученного слоя, а также температуры начала вспучивания на прогрев защищаемых конструкций, т. е. на эффективность огнезащиты. Примеры представлены на рис. 2 и 3.

Результаты моделирования роли температуры начала вспучивания, сохранности и толщины пенококса [67] явились для авторов [68] обоснованием необходимости изучения особенностей протекания реакций и выбора оптимального соотношения полифосфата аммония и пентаэритрита в композиции, обеспечивающего минимальную температуру вспучивания. Это соответствует соображениям, высказанным в обзоре [45] о положительной роли расчетов при разработке новых ОЗП.

В [67] получены, в частности, результаты, во многом не соответствующие традиционной трактовке роли процессов, влияющих на огнезащитную эффективность ОЗП и, соответственно, на выбор путей повышения эффективности за счет организации таких процессов. Было установлено, что тепловые эффекты термодеструкции материала, а также теплоемкость и фильтрация образующихся газообразных продуктов практически не влияют на уровень прогрева конструкций, т. е. на эффективность покрытий. Это объясняется относительно большой длительностью рассматриваемых процессов (десяти минут), в то время как влияние этих факторов заметно сказывается при относительно кратковременном высокотемпературном воздействии (секунды), что характерно, например, для условий эксплуатации теплозащиты конструкций ракетно-космической техники.

Таким образом, было установлено [67], что основными факторами, определяющими такое влияние,

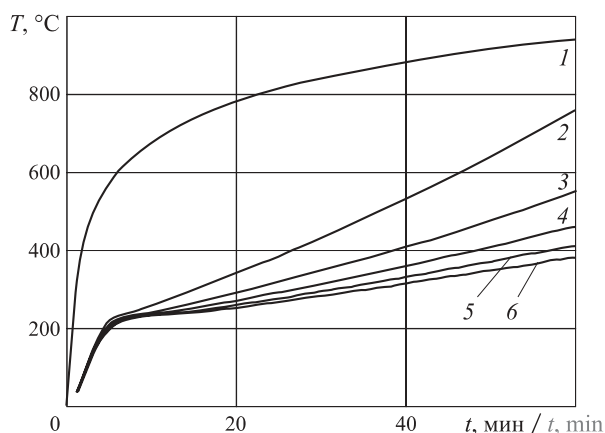


Рис. 2. Зависимость от времени температуры газовой среды (1) и стальной конструкции (2–6) при кратности вспучивания, равной 20 (2), 40 (3), 60 (4), 80 (5) и 100 (6)

Fig. 2. Time dependences of temperature of gas (1) and steel structure (2–6) with the intumescence multiplicity equal to 20 (2), 40 (3), 60 (4), 80 (5), and 100 (6)

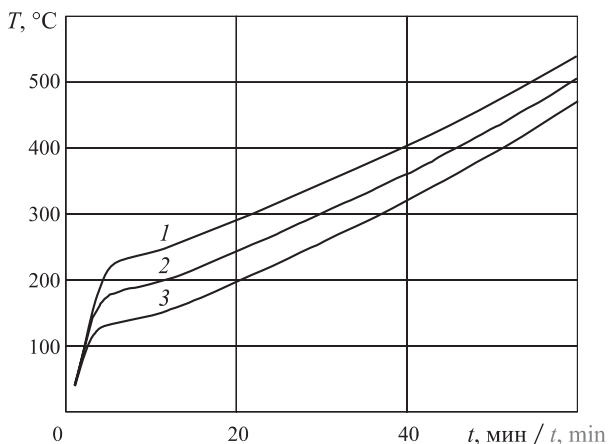


Рис. 3. Зависимость от времени температуры конструкций при температуре начала вспучивания 220 °C (1), 170 °C (2) и 120 °C (3)

Fig. 3. Time dependences of structure at foaming temperature extremes equal to 220 °C (1), 170 °C (2), and 120 °C (3)

являются динамика изменения толщины вспученного слоя и уровень его теплопроводности. Максимальная эффективность ОЗП реализуется при наибольшей кратности вспучивания и стабильном слое пенококса (с минимальным выгоранием и усадкой, а также без отслоения и удаления его частей). Наиболее желательной является мелкопористая структура, обеспечивающая наименьший уровень лучистой теплопередачи при высоких температурах. Примером ОЗП с максимальной кратностью вспучивания (100–120) являются огнезащитные лаки ПРОТЕРМ ВУД и Феникс ДП (см. таблицу), используемые в качестве огнезащиты конструкций из древесины. Эти материалы имеют и относительно низкую температуру начала вспучивания (порядка 130 °C), что, как наглядно показано в [26, 67, 68] и на рис. 3, является положительным фактором.

К сожалению, для конструкций из ПКМ пока отсутствуют подобные высокоэффективные ОЗП с максимальным вспучиванием и низкой температурой начала вспучивания, что было бы крайне желательно, учитывая относительно низкую термостойкость полимерных композитов. Существенная потеря прочности для большинства из них происходит уже при температурах порядка 100 °С. Почти все ОЗП, перечисленные в таблице, имеют температуру начала вспучивания 220–240 °С, а покрытие СГК-2, хорошо совместимое с ПКМ, — порядка 165 °С (однако кратность его вспучивания всего 25).

Можно отметить результаты первых успешных попыток проведения теплотехнических расчетов для конструкций из ПКМ. В работах [69, 70] рассматривались различные средства огнезащиты, включая вспучивающиеся покрытия, и оценивалась их роль в повышении огнестойкости композитных конструкций. В работе [71] представлены результаты моделирования прогрева стеклопластиковой стойки в виде трубы диаметром 250 мм и толщиной 10 мм с покрытием СГК-2 толщиной 1,5 мм. Расчеты показали относительно высокий (недопустимый) уровень прогрева стойки: температура на наружной и внутренней поверхностях оболочки составила соответственно 348 и 322 °С при 30-минутном воздействии по стандартному (для пожара) температурному режиму. Получено численное подтверждение того, что добиться снижения уровня прогрева стеклопластика до приемлемого уровня не удастся даже в случае увеличения толщины покрытия в 2 раза (соответственно 242 и 210 °С). Даже если одновременно с этим произойдет гипотетическое увеличение кратности вспучивания покрытия в два раза (с 25 до 50) плюс гипотетическое снижение температуры начала вспучивания (со 165 до 120 °С), то уровень прогрева оболочки останется недопустимо высоким (соответственно 183 и 157 °С). Подобные результаты являются наглядной иллюстрацией невозможности обеспечения высоких пределов огнестойкости большинства конструкций из ПКМ только за счет применения вспучивающихся ОЗП.

С помощью подобных расчетов [69–71] можно было бы наглядно и оперативно продемонстрировать невозможность обеспечения с помощью вспучивающихся ОЗП работоспособности (при огневом воздействии) углепластиковых элементов в виде бандажей, предназначенных для усиления железобетонных строительных конструкций с недостаточной несущей способностью. Результаты расчетов прогрева колонны диаметром 500 мм, усиленной слоем углепластика толщиной 1 мм, защищенного покрытием типа СГК-2 толщиной 2 мм, показали [69, 70], что даже при существенном отводе тепла в массив железобетона (“увеличение теплопотерь” [2, 3])

уровень прогрева композитного бандажа недопустимо велик, что приводит к очень быстрой утрате им несущей способности. При 45-минутном воздействии по стандартному температурному режиму уровень прогрева бандажа составил 203–216 °С, а уже при 15-минутном воздействии — 155–168 °С, т. е. бандаж в таком исполнении неработоспособен. Тем не менее вначале на строительных объектах допускалось использование одного из вспучивающихся покрытий и только позднее взамен него стала применяться конструктивная огнезащита, необходимость чего можно было бы обосновать заблаговременно.

Таким образом, моделирование прогрева в условиях пожаров различных композитных конструкций показало [69, 70], что при использовании вспучивающегося покрытия требуемые пределы огнестойкости конструкций из ПКМ в большинстве случаев обеспечены быть не могут. Частично слои, прилегающие к ОЗП, будут перегреваться и практически не смогут участвовать в обеспечении несущей способности конструкции. Следует особо отметить, что упоминаемая в [46, 49, 51–53] методика позволяет рассчитывать температурные поля не только в ОЗП, но и в прилегающих “жертвенных” слоях композитной конструкции. Это важно, если учесть, что все упомянутые выше характерные для ОЗП физико-химические процессы (кроме вспучивания) происходят и в ПКМ при нагреве. Определение необходимого для таких расчетов набора характеристик полимерных композитов не является проблемой, однако пока практикуется применение методик, не учитывающих эти процессы, что нельзя признать оправданным.

Уместно напомнить, что на начальном этапе создания конструкций и изделий из ПКМ для военной техники попытки использования многих подходов и приемов, традиционно применяемых при создании их металлических прототипов, не увенчались успехом. Потребовалась новая методология проектирования и отработки. Это характерно и для несущих пожаробезопасных конструкций из ПКМ. Стало очевидным, что для минимизации количества “жертвенных” слоев требуется специальное конструирование формы силовых элементов и наличие облицовки с нанесением на ее поверхность вспучивающегося ОЗП, которое в данном случае играет важную, но вспомогательную роль. Создаваемые таким образом композитные конструкции могут оказаться не совсем привычного вида (с массивным силовым ядром и с относительно тонкими наружными “жертвенными” слоями). Современные технологии позволяют это реализовать: на рис. 1 демонстрируются, в частности, различные профили, изготавливаемые методом пултрузии.

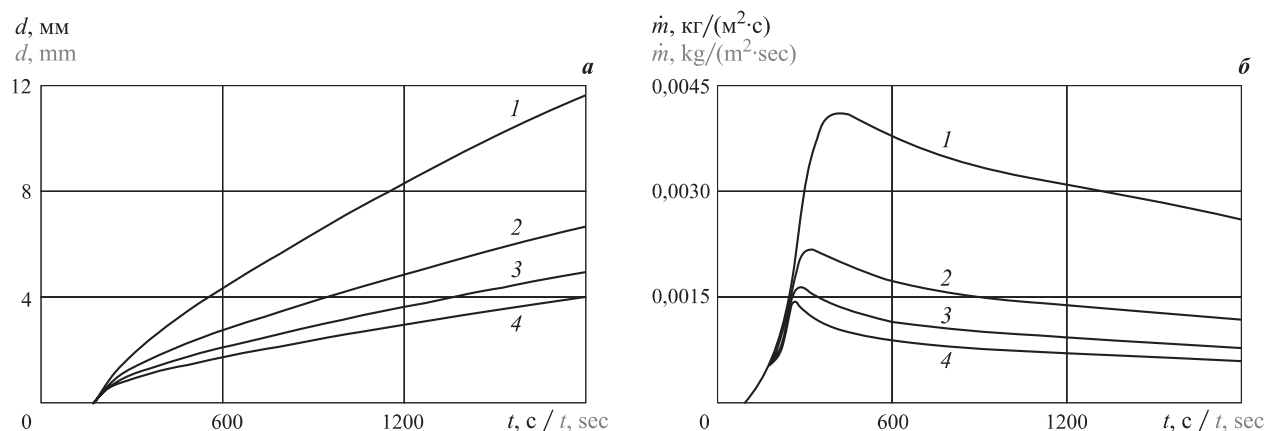


Рис. 4. Зависимость от времени глубины деструкции (а) и массовой скорости выделения газообразных продуктов термического разложения (б) для эластомера при кратности вспучивания: 1 — 0; 2 — 2; 3 — 4; 4 — 6

Fig. 4. Time dependence of depth of destruction (a) and the mass rate of gaseous products of thermal decomposition release (b) for the elastomer at the foaming multiplicity: 1 — 0; 2 — 2; 3 — 4; 4 — 6

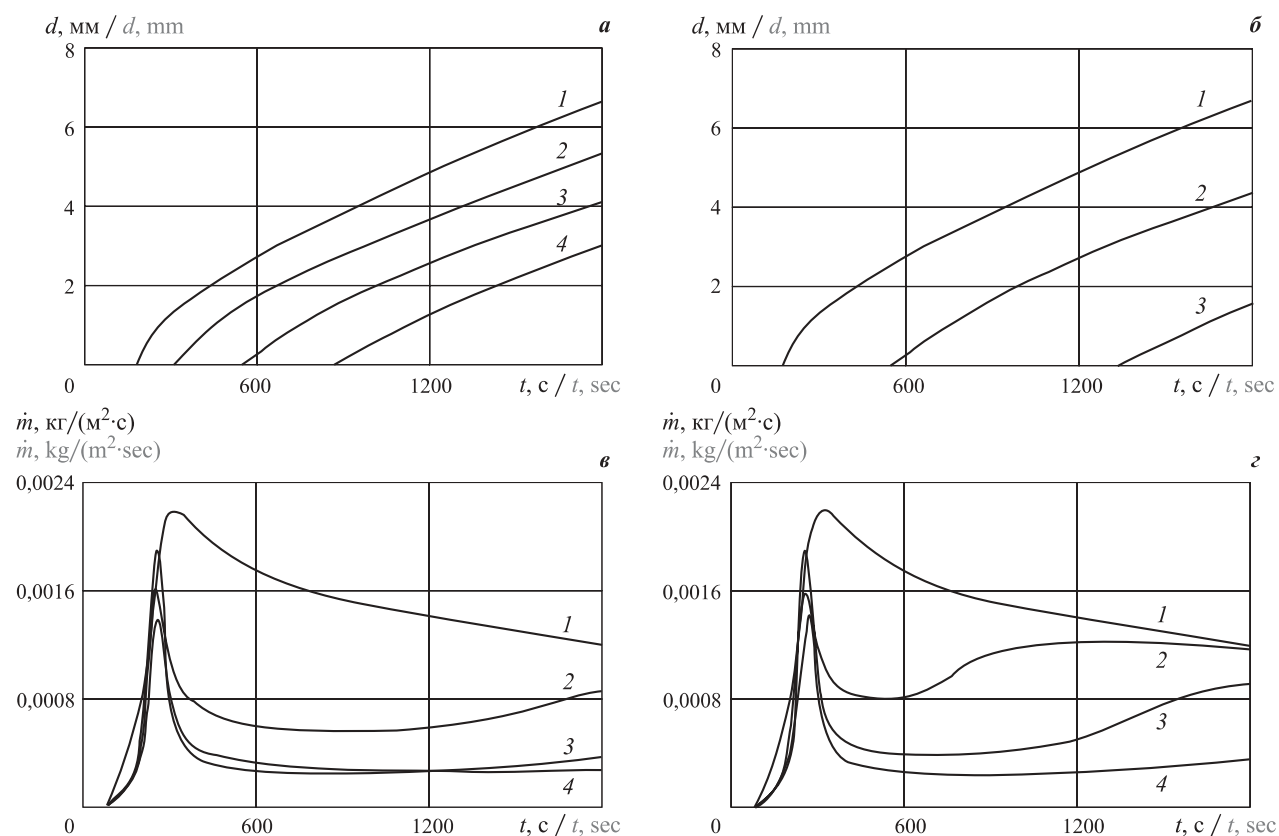


Рис. 5. Зависимость от времени глубины деструкции (а, б) и массовой скорости выделения газообразных продуктов термического разложения (в, г) для эластомера с кратностью вспучивания, равной 2, при наличии ОЗП различной толщины: 1 — 0 мм; 2 — 0,5 мм; 3 — 1 мм; 4 — 1,5 мм

Fig. 5. Time dependence of depth of destruction (a, б) and the mass rate of release of gas thermal decomposition products (в, г) for an elastomer with the foaming multiplicity of 2, in the presence of a flame-retardant coating of various thickness: 1 — 0 mm; 2 — 0.5 mm; 3 — 1 mm; 4 — 1.5 mm

В работах [71–73] представлены результаты моделирования двумерных температурных полей в несущих конструкциях круглой или квадратной формы с наружной оболочкой (облицовкой) и с ОЗП на ее поверхности. Расчеты показали значительное снижение уровня прогрева внутренних силовых эле-

ментов конструкции, которые должны обеспечивать требуемый предел огнестойкости, т. е. заданную несущую способность в течение всего времени огневого воздействия.

В последней части обзора на примере резин (эластомеров) рассматривается вариант снижения горю-

части полимерного композита за счет вспучивания самого материала. При этом учитывалось, что по данным разработчиков за счет модификации можно добиться увеличения толщины эластомеров в несколько раз. По разработанной методике, незначительно отличающейся от упоминаемой в [46, 49, 51–53], выполнены расчетные оценки, результаты которых представлены в [74, 75]. Устанавливалась массовая скорость выделения газообразных продуктов термической деструкции, которая определяет в значительной степени горючесть материала. В данном случае реализуется механизм снижения горючести за счет “уменьшения скорости газификации полимера” [2, 3]. Проведены численные исследования для случаев отсутствия огнезащиты элементов из такого материала, а также при нанесении на поверхность эластомера дополнительного слоя из совместимого с ним вспучивающегося покрытия СГК-2.

Результаты моделирования глубины деструкции (продвижения изотермы 300 °С) и массовой скорости газовыделения из модифицированного эластомера при отсутствии и наличии на поверхности дополнительного ОЗП представлены на рис. 4 и 5 [74, 75].

Численные исследования показали [74, 75], что возможно уменьшение скорости газовыделения материала в 3 раза за счет вспучивания эластомера и почти в 10 раз — при наличии дополнительного покрытия. Эти результаты демонстрируют эффективность механизма снижения горючести за счет “уменьшения скорости газификации полимера” [2, 3]. Как видно из рис. 4 и 5, соответствующим образом значительно уменьшается и уровень глубины деструкции эластомера, что свидетельствует не только о снижении горючести, но и о возможности значительного увеличения предела огнестойкости таких элементов. Показано также, что при наличии ОЗП возможна ситуация, когда в течение длительного времени воздействия будет отсутствовать термическая деструкция материала. Полученные результаты иллюстрируют новые возможности повышения пожаробезопасности материалов на полимерной основе, в частности пределов огнестойкости соответствующих конструкций и изделий. Подобным

образом можно повысить пожаробезопасность изделий, изготавливаемых из резины и полиуретана, таких как амортизаторы, гидроакустические изделия, топливные баки и пр.

Выводы

Существует большое количество публикаций по исследованиям свойств и применению полимерных композитов в различных сферах. Однако лишь небольшая часть их посвящена вопросам обеспечения требуемого уровня огнестойкости конструкций из ПКМ. Отмечено, что наиболее полно в печати отражены вопросы пожаробезопасности ограждающих конструкций из ПКМ, применяемых в авиационном строении. В то же время ощущается недостаток информации по возможностям и путям обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности несущих композитных конструкций с огнезащитой, наиболее перспективной сферой применения которых является строительство.

Рассмотрены особенности и показатели огнезащитной эффективности вспучивающихся материалов как одного из видов полимеров пониженной горючести и одного из средств огнезащиты конструкций из ПКМ. Показана роль и продемонстрированы возможности теплотехнических расчетов, позволяющих моделировать температурные поля и определять толщины вспучивающихся и прочих покрытий, что создает предпосылки для конструирования оптимальной формы и обеспечения заданной огнестойкости элементов из полимерных композитов. Отмечены достоинства существующей методики, которая может уже в настоящее время использоваться для расчетов прогрева конструкций из ПКМ и рассматриваться в качестве основы для ее дальнейшего совершенствования и создания, в итоге, общепринятой методики.

Представленные в обзоре результаты демонстрируют возможные пути обеспечения требуемого уровня пожаробезопасности как ПКМ, так и создаваемых из них конструкций и изделий. Перечислены задачи по данной важной и перспективной тематике, требующие решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асеева Р. М., Заиков Г. Е. Горение полимерных материалов. — М.: Наука, 1981. — 280 с.
2. Khalturinskii N. A., Popova T. V., Berlin A. A. The combustion of polymers and the mechanism of action of fire-proofing agents // Russian Chemical Reviews. — 1984. — Vol. 53, Issue 2. — P. 197–209. DOI: 10.1070/rc1984v053n02abeh003041.
3. Берлин Ал. Ал. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести // Сороковский образовательный журнал. — 1996. — Т. 2, № 9. — С. 57–63.
4. Antonov A. V., Reshetnikov I. S., Khalturinskij N. A. Combustion of char-forming polymeric systems // Russian Chemical Reviews. — 1999. — Vol. 68, Issue 7. — P. 605–614. DOI: 10.1070/rc1999v068n07abeh000408.

5. *Khalturinskii N. A., Rudakova T. A.* Physical aspects of polymer combustion and the inhibition mechanism // Russian Journal of Physical Chemistry B. — 2008. — Vol. 2, Issue 3. — P. 480–490. DOI: 10.1134/s1990793108030238.
6. *Барботько С. Л., Вольный О. С., Кириенко О. А., Луценко А. Н., Шуркова Е. Н.* Сопоставление методов оценки пожарной опасности полимерных материалов в различных отраслях транспорта и промышленности // Комментарии к стандартам ТУ, сертификатам. Приложение к журналу “Все материалы. Энциклопедический справочник”. — 2015. — № 1. — С. 2–9.
7. *Барботько С. Л., Вольный О. С., Кириенко О. А., Луценко А. Н., Шуркова Е. Н.* Сопоставление методов оценки пожарной опасности полимерных материалов в различных отраслях транспорта и промышленности (продолжение) // Комментарии к стандартам ТУ, сертификатам. Приложение к журналу “Все материалы. Энциклопедический справочник”. — 2015. — № 2. — С. 2–9.
8. *Константинова Н. И., Смирнов Н. В., Шебеко А. Ю.* К вопросу об оценке эффективности огнезащиты полимерных материалов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 7–8. — С. 32–42. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.32-42.
9. *Барботько С. Л., Вольный О. С., Кириенко О. А., Шуркова Е. Н.* Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 1. Испытания на горючесть. Влияние толщины образца на регистрируемые характеристики // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 1. — С. 40–48.
10. *Шуркова Е. Н., Вольный О. С., Луценко А. Н., Барботько С. Л.* Сравнительная оценка пожаробезопасности ПКМ для изготовления конструктивных элементов летательных аппаратов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2014. — Т. 23, № 2. — С. 20–27.
11. *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.
12. *Барботько С. Л., Вольный О. С., Вешкин Е. А., Гончаров В. А.* Оценка огнестойкости материалов и конструктивных элементов для авиационной техники // Авиационная промышленность. — 2018. — № 2. — С. 63–67.
13. *Барботько С. Л., Вольный О. С., Кириенко О. А., Шуркова Е. Н.* Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. — М.: ВИАМ, 2019. — 424 с.
14. *Середохо В. А.* Применение композиционных материалов в судостроении. URL: http://compositeforum.ru/netcat_files/userfiles/P12-16_Gorev_SNSZ.pdf (дата обращения: 08.02.2019).
15. *Анисимов А. В.* Перспективы применения полимерных композиционных материалов в судостроении. URL: <http://www.hccomposite.com/upload/iblock/fbd/fbd012f6683d92bd2d1c233244cfa44f.pdf> (дата обращения: 18.01.2019).
16. *Кутейников М. А., Кордонец С. М., Федонюк Н. Н.* Разработка новых правил по конструкции и прочности морских судов из полимерных композиционных материалов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 46/47. — С. 64–71.
17. *Гаращенко А. Н., Страхов В. Л., Разин А. Ф., Канина Э. П., Рудзинский В. П.* Отработка теплоогнезащиты несущей конструкции гребного вала из композиционных материалов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15: Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. — 1992. — Вып. 1(101). — С. 12–15.
18. *Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П.* Расчет нестационарного прогрева многослойных огнезащитных конструкций // Вопросы оборонной техники. Сер. 15: Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. — 1994. — Вып. 1(109)-2(110). — С. 30–36.
19. *Назаренко В. А., Гаращенко А. Н.* Результаты исследований и перспективы использования вспучивающегося покрытия СГК-2 для защиты от пожаров конструкций и оборудования различного назначения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2005. — Т. 14, № 6. — С. 21–25.
20. *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. — P. 543–556. DOI: 10.1615/heattransres.v36.i7.20.
21. *Теплоухов А. В.* Исследование поведения многослойных конструкций в условиях воздействия внешних тепловых потоков // Труды МИТ. — 2008. — Т. 9, Ч. 1. — С. 231–238.
22. *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. — P. 254–260. DOI: 10.1134/s10740-008-2015-9.

23. Гаращенко А. Н., Васин В. П., Натрусов В. И. Повышение пожаробезопасности тары для боеприпасов, изготавливаемой из полимерных композиционных материалов, с помощью огнезащиты // Вопросы оборонной техники. Сер. 15: Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. — 2012. — Вып. 1(164)-2(165). — С. 44–50.
24. Плотников В. И., Кульков А. А., Слитков М. Н., Плотников Р. В., Гаращенко А. Н. Отработка конструкции и исследование теплового состояния укупорки из полимерных композиционных материалов в условиях пожара // Фундаментальные основы баллистического проектирования : сб. тр. 5-й Всероссийской научно-технической конференции. — СПб. : Изд-во БГТУ «Военмех», 2016. — С. 193–196.
25. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. — 262 с.
26. 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.
27. Альменбаев М. М., Арцыбашева О. В., Асеева Р. М., Макишев Ж. К., Москалев В. А., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Исследование скорости обугливания деревянных конструкций длительного срока эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2014. — № 9(158). — С. 246–254.
28. Альменбаев М. М. Эффективность различных способов повышения огнезащиты древесины с лакокрасочными материалами // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 2(60). — С. 56–60. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_24182040_94341714.pdf (дата обращения: 18.01.2019).
29. Анохин Е. А., Полищук Е. Ю., Сивенков А. Б. Применение огнезащитных пропиточных композиций для снижения пожарной опасности деревянных конструкций с различными сроками эксплуатации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 2. — С. 22–35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.22-35.
30. Анохин Е. А., Полищук Е. Ю., Сивенков А. Б. Применение огнезащитных пропиточных композиций для повышения класса пожарной опасности деревянных конструкций длительного срока эксплуатации // Ройтмановские чтения : материалы 5-й Международной научно-практической конференции. — М., 2017. — С. 10–14.
31. Шутлов Ф. А., Ярборо Д. Теплоизоляционные и экологические характеристики огнестойкого полимерного пенокомпозиата PENOCOM® // Технологии техносферной безопасности. — 2014. — № 4(56). — 4 с. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_23105869_67731454.pdf (дата обращения 18.01.2019).
32. Шутлов Ф. А., Круглов Е. Ю., Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Влияние теплоизоляции из полимерного пенокомпозиата «PENOCOM» на огнестойкость ограждающих деревянных каркасных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 1. — С. 28–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37.
33. Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Барботько С. Л., Николаев Е. В. Методические особенности проведения и обработки результатов климатических испытаний полимерных композиционных материалов // Пластические массы. — 2013. — № 1. — С. 37–41. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_18903155_28681924.pdf (дата обращения: 10.01.2019).
34. Барботько С. Л., Барботько М. С., Вольный О. С., Шведкова А. К. Исследование длительных совместных воздействий факторов температуры и влажности на пожаробезопасность стеклопластиков // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2014. — Т. 23, № 7. — С. 16–26.
35. Лаптев А. Б., Барботько С. Л., Николаев Е. В. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // Авиационные материалы и технологии. — 2017. — № 5. — С. 547–561.
36. Барботько С. Л., Николаев Е. В., Абрамов Д. В., Вольный О. С. Влияние старения полимерных композиционных материалов на величины регистрируемых характеристик пожарной опасности // Пластические массы. — 2017. — № 1-2. — С. 51–57. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_28949543_56951119.pdf (дата обращения: 10.01.2019).
37. Вахитова Л. Н., Лапушкин М. П., Калафат К. В. Срок службы огнезащитных покрытий вспучивающегося типа // F+S: технологии безопасности и противопожарной защиты. — 2011. — № 2(50). — С. 58–61.
38. Гайковская О. Н., Коваленко В. В., Несенюк А. О., Савченко О. В. Некоторые аспекты сохранения огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий для металлических конструкций // Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. — 2011. — № 1(23). — С. 47–55.

39. Вахитова Л. Н., Калафат К. В. Огнезащита стальных конструкций. — Киев : НПВ “Интерсервис”, 2013. — 152 с.
40. Теплоухов А. В., Зверев В. Г., Гаращенко А. Н. Методика и результаты оценки влияния длительной эксплуатации конструкций на основные свойства вспучивающихся огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 1. — С. 9–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.9-16.
41. Крутов А. М., Страхов В. Л., Кульков А. А., Гаращенко А. Н., Далинкевич А. А. Обеспечение гарантийных сроков эксплуатации огнезащиты несущих металлоконструкций методом ускоренных климатических испытаний // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики (МНТК–2016) : 10-я Международная научно-техническая конференция. — М. : Изд-во Росэннергоатом, 2016. — С. 429–434.
42. Гаращенко А. Н., Суханов А. В., Гаращенко Н. А., Смирнов Н. В., Константинова Н. И., Меркулов А. А. Снижение пожарной опасности полимерных композиционных материалов при использовании вспучивающихся огнезащитных покрытий // Пожарная безопасность. — 2012. — № 4. — С. 61–67.
43. Anderson C. E., Dziuk J., Mallow W. A., Buckmaster J. Intumescent reaction mechanisms // Journal of Fire Sciences. — 1985. — Vol. 3, Issue 3. — P. 161–194. DOI: 10.1177/073490418500300303.
44. Buckmaster J., Anderson C., Nachman A. A model for intumescent paints // International Journal of Engineering Science. — 1986. — Vol. 24, Issue 3. — P. 263–276. DOI: 10.1016/0020-7225(86)90084-4.
45. Reshetnikov I. S., Antonov A. V., Khalturinskii N. A. Mathematical description of combustion of intumescent polymer systems // Combustion, Explosion, and Shock Waves. — 1997. — Vol. 33, Issue 6. — P. 669–684. DOI: 10.1007/bf02671799.
46. Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П. Математическое моделирование работы и определение комплекса характеристик вспучивающейся огнезащиты // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 1997. — Т. 6, № 3. — С. 21–30.
47. Isakov G. N., Kuzin A. Ya. Modeling of heat and mass transfer in multilayer heat- and fire-insulating coatings under interaction with a high-temperature gas flow // Combustion, Explosion, and Shock Waves. — 1998. — Vol. 34, Issue 2. — P. 191–197. DOI: 10.1007/bf02672820.
48. Zverev V. G., Golédin V. D., Nesmelov V. V., Tsimbalyuk A. F. Modeling heat and mass transfer in intumescent fire-retardant coatings // Combustion, Explosion, and Shock Waves. — 1998. — Vol. 34, Issue 2. — P. 198–205. DOI: 10.1007/bf02672821.
49. 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.
50. 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. — P. 921–925. DOI: 10.1023/a:1004149625276.
51. Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Кузнецов Г. В., Рудзинский В. П. Тепломассообмен в тепло- и огнезащите с учетом процессов термического разложения, испарения – конденсации, уноса массы и вспучивания – усадки // Математическое моделирование. — 2000. — Т. 12, № 5. — С. 107–113.
52. Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П. Программные комплексы для расчетов температурных полей в строительных конструкциях с огнезащитой с учетом термического разложения, вспучивания – усадки и испарения – конденсации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2001. — Т. 10, № 4. — С. 9–11.
53. Strakhov V. L., Garashchenko A. N., Kuznetsov G. V., Rudzinskii V. P. Mathematical simulation of thermophysical and thermochemical processes during combustion of intumescent fire-protective coatings // Combustion, Explosion, and Shock Waves. — 2001. — Vol. 37, Issue 2. — P. 178–186. DOI: 10.1023/a:1017557726294.
54. Bartholmai M., Schriever R., Schartel B. Influence of external heat flux and coating thickness on the thermal insulation properties of two different intumescent coatings using cone calorimeter and numerical analysis // Fire and Materials. — 2003. — Vol. 27, Issue 4. — P. 151–162. DOI: 10.1002/fam.823.
55. Еремина Т. Ю. Моделирование и оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2003. — Т. 12, № 5. — С. 22–29.
56. Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П., Алейник В. А. Математическое моделирование работы водосодержащих вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2003. — Т. 12, № 1. — С. 39–46.

57. Бессонов Н. М., Еремина Т. Ю., Дмитриева Ю. Н., Крашенинникова М. В. Расчетный метод определения пределов огнестойкости металлоконструкций, покрытых огнезащитным вспучивающимся составом // Пожарная безопасность. — 2007. — № 1. — С. 89–96.
58. Griffin G. J. The modeling of heat transfer across intumescent polymer coatings // Journal of Fire Sciences. — 2010. — Vol. 28, Issue 3. — P. 249–277. DOI: 10.1177/0734904109346396.
59. Зверев В. Г., Теплоухов А. В., Цимбалюк А. Ф. Исследование свойств и огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2014. — Т. 57, № 8-2. — С. 148–153.
60. Ненахов С. А., Пименова В. П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония (обзор литературы) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2010. — Т. 19, № 8. — С. 11–58.
61. Барботько С. Л., Вольный О. С., Кириенко О. А., Шуркова Е. Н. Построение математической модели и расчет температур образцов при испытаниях на огнестойкость // Труды ВИАМ. — 2017. — № 7(55). — С. 110–122. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29678401_94671304.pdf (дата обращения: 10.01.2019).
62. Новак С., Харченко І., Круковский П. Разраховково-експериментальний метод розв'язування задач оптимального теплового проектування вогнестійких конструкцій // Пожежна безпека. — 1997. — № 4. — С. 24–26.
63. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассообмена (общий инженерный подход). — Киев : Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. — 218 с.
64. Новак С. В., Якименко Е. Ф. Анализ современных методов определения характеристики огнезащитной способности покрытия и облицовок // Пожежна безпека: теорія і практика. — 2011. — № 8. — С. 56–61.
65. Григорьян Н. Б., Полищук В. Д., Круковский П. Г., Новак С. В. Оценка огнезащитной способности вспучивающегося огнезащитного покрытия “Феникс СТС” // Пожежна безпека: теорія і практика. — 2014. — № 17. — С. 34–38.
66. Ковальов А. І., Зобенко Н. В. Методика попередньої оцінки здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі // Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. — 2016. — № 1(1). — С. 59–64.
67. Гаращенко А. Н., Кульков А. А., Васин В. П., Рудакова Т. А. Влияние состава и особенностей поведения вспучивающихся огнезащитных покрытий на их эффективность // Вопросы оборонной техники. Сер. 15: Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. — 2010. — Вып. 4(159). — С. 33–38.
68. Рудакова Т. А., Евтушенко Ю. М., Григорьев Ю. А., Батраков А. А. Пути снижения температуры пенообразования в системе полифосфат аммония – пентаэритрит в интумесцентных системах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 3. — С. 24–31.
69. Гаращенко А. Н., Суханов А. В., Гаращенко Н. А., Рудзинский В. П., Мараховский С. С. Огнезащита конструкций из полимерных композитов и оценка ее эффективности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2009. — Т. 18, № 5. — С. 15–24.
70. Гаращенко А. Н., Гаращенко Н. А., Рудзинский В. П., Суханов А. В., Мараховский С. С., Теминовский И. В. Пожаробезопасность строительных конструкций из полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. — 2010. — № 2. — С. 45–59.
71. Рудзинский В. П., Гаращенко А. Н., Гаращенко Н. А. Теплотехнические расчеты двумерных температурных полей в конструкциях из полимерных композитов со вспучивающимся огнезащитным покрытием // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2013. — Т. 22, № 8. — С. 42–47.
72. Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П., Каледин В. О. Обеспечение требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композиционных материалов с помощью огнезащиты // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 8(145). — С. 143–149.
73. Rudzinsky V. P., Garashchenko A. N. Numerical analysis of heat transfer in fire-protective coatings deformable upon heating // EPJ Web of Conferences “Thermophysical Basis of Energy Technologies 2015”. — 2016. — Vol. 110. — Art. No. 01067. DOI: 10.1051/epjconf/201611001067.
74. Гаращенко А. Н., Берлин А. А., Кульков А. А., Дахтиев 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.

75. Garashchenko A. N., Rudzinsky V. P., Garashchenko N. A. Solving heat conduction problems in movable boundary domains under intensive physical-chemical transformation conditions // EPJ Web of Conferences “Thermophysical Basis of Energy Technologies 2015”. — 2016. — Vol. 110, Art. No. 01020. DOI: 10.1051/epjconf/201611001020.

REFERENCES

1. R. M. Aseeva, G. E. Zaikov. *Goreniye polimernykh materialov* [Burning of polymeric materials]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 280 p. (in Russian).
2. N. A. Khalturinskii, T. V. Popova, A. A. Berlin. The combustion of polymers and the mechanism of action of fire-proofing agents. *Russian Chemical Reviews*, 1984, vol. 53, issue 2, pp. 197–209. DOI: 10.1070/rc1984v053n02abeh003041.
3. Al. Al. Berlin. Combustion of polymers and polymer materials of reduced combustibility. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal / Soros Educational Journal*, 1996, vol. 2, no. 9, pp. 57–63 (in Russian).
4. A. V. Antonov, I. S. Reshetnikov, N. A. Khalturinskij. Combustion of char-forming polymeric systems. *Russian Chemical Reviews*, 1999, vol. 68, issue 7, pp. 605–614. DOI: 10.1070/rc1999v068n07abeh000408.
5. N. A. Khalturinskii, T. A. Rudakova. Physical aspects of polymer combustion and the inhibition mechanism. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, vol. 2, issue 3, pp. 480–490. DOI: 10.1134/s1990793108030238.
6. S. L. Barbotko, O. S. Volnyy, O. A. Kiriyenko, A. N. Lutsenko, E. N. Shurkova. Comparison of fire-safety assessment methods of polymer materials in different fields of transport and industry. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. Prilozheniye k zhurnalu / All the Materials. Encyclopaedic Reference Book. Journal Supplement*, 2015, no. 1, pp. 2–9 (in Russian).
7. S. L. Barbotko, O. S. Volnyy, O. A. Kiriyenko, A. N. Lutsenko, E. N. Shurkova. Comparison of fire-safety assessment methods of polymer materials in different fields of transport and industry (continuation). *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. Prilozheniye k zhurnalu / All the Materials. Encyclopaedic Reference Book. Journal Supplement*, 2015, no. 2, pp. 2–9 (in Russian).
8. N. I. Konstantinova, N. V. Smirnov, A. Yu. Shebeko. Revisiting the assessment of polymeric materials fire protection efficiency. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 7–8, pp. 32–42 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.32-42.
9. S. L. Barbotko, O. S. Volnyy, O. A. Kirienko, E. N. Shurkova. Features the testing of aviation materials on fire safety. Part 1. Test on flammability — influence of sample thickness on registered characteristics. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 40–48 (in Russian).
10. E. N. Shurkova, O. S. Volnyj, A. N. Lutsenko, S. L. Barbotko. Comparative evaluation of fire polymer composite materials used to the manufacture of structural elements for aircrafts. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 2, pp. 20–27 (in Russian).
11. S. L. Barbotko, O. A. Kirienko, O. S. Volnyj, A. N. Lutsenko. 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. *Problemy bezopasnosti poletov / Problems of Flight Safety*, 2017, no. 5, pp. 3–24 (in Russian).
12. S. L. Barbot'ko, O. S. Vol'niy, E. A. Veshkin, V. A. Goncharov. Evaluation of fire-resistance of materials and structural components for aircraft equipment. *Aviatsionnaya promyshlennost / Aviation Industry*, 2018, no. 2, pp. 63–67 (in Russian).
13. S. L. Barbotko, O. S. Volnyj, O. A. Kirienko, E. N. Shurkova. *Otsenka pozharobezopasnosti polimernykh materialov aviatsionnogo naznacheniya: analiz sostoyaniya, metody ispytaniy, perspektivy razvitiya, metodicheskiye osobennosti* [Fire safety assessment of aviation polymeric materials: background data analysis, test methods, prospects for the development, methodological features]. Moscow, VIAM Publ., 2019. 424 p. (in Russian).
14. V. A. Seredokho. *Use of composite materials in shipbuilding* (in Russian). Available at: http://composite-forum.ru/netcat_files/userfiles/P12-16_Gorev_SNSZ.pdf (Accessed 8 February 2019).
15. A. V. Anisimov. *Prospects for the use of polymer composite materials in shipbuilding* (in Russian). Available at: <http://www.hccomposite.com/upload/iblock/fbd/fbd012f6683d92bd2d1c233244cfa44f.pdf> (Accessed 18 January 2019).
16. M. A. Kuteynikov, S. M. Kordonets, N. N. Fedonyuk. Development of new rules for full structure and strength of fiber reinforced plastic ships. *Nauchno-tehnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva / Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*, 2017, no. 46/47, pp. 64–71 (in Russian).

17. A. N. Garashchenko, V. L. Strakhov, A. F. Razin, E. P. Kanina, V. P. Rudzinskiy. The development of the heat protection of the propeller shaft supporting structure made of composite materials. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15. Kompozitsionnyye nemetallicheskiye materialy v mashinostroyenii / Military Enginery. Issues 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*, 1992, no. 1(101), pp. 12–15 (in Russian).
18. V. L. Strakhov, A. N. Garashchenko, V. P. Rudzinskiy. Estimation of non-stationary heating of multi-layer flame retardant coatings. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15. Kompozitsionnyye nemetallicheskiye materialy v mashinostroyenii / Military Enginery. Issues 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*, 1994, no. 1(109)-2(110), pp. 30–36 (in Russian).
19. V. A. Nazarenko, A. N. Garashchenko. Results of investigations and perspectives of SGK-2 expanding covering application for constructions and different kind of equipment fire protection. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2005, vol. 14, no. 6, pp. 21–25 (in Russian).
20. V. G. Zverev, V. A. Nazarenko, A. F. Tsimbalyuk. 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.
21. A. V. Teploukhov. Investigation of the behavior of multilayer structures under the influence of external heat fluxes. *Trudy MIT / Proceedings of Moscow Institute for Heat Technology*, 2008, vol. 9, part 1, pp. 231–238 (in Russian).
22. V. G. Zverev, V. A. Nazarenko, A. F. Tsimbalyuk. 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.
23. A. N. Garashchenko, V. P. Vasin, V. I. Natrusov. Improving the fire safety of ammunition containers made of polymer composite structures, using fire protection. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15. Kompozitsionnyye nemetallicheskiye materialy v mashinostroyenii / Military Enginery. Issues 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*, 2012, no. 1(164)-2(165), pp. 44–50 (in Russian).
24. V. I. Plotnikov, A. A. Kulkov, M. N. Slitkov, R. V. Plotnikov, A. N. Garashchenko. Development of the design and study of the thermal state of the capping of polymer composite materials in fire conditions. In: *Fundamentalnyye osnovy ballisticheskogo proyektirovaniya* [Fundamental bases of ballistic design]. Proceedings of 5th All-Russian Scientific and Technical Conference. Saint Petersburg, Voenmekh Publ., 2016, pp. 193–196 (in Russian).
25. R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov. *Goreniye drevesiny i yeye pozharoopasnyye svoystva* [Wood burning and its fire hazard properties]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2010. 262 p. (in Russian).
26. A. Ya. Korolchenko, A. N. Garashchenko, N. A. Garashchenko, V. P. Rudzinskiy. Calculations of the thickness of fire protection, providing the required indicators of fire danger of wood-glued structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 49–56 (in Russian).
27. M. M. Almenbaev, O. V. Artsybasheva, R. M. Aseeva, Zh. K. Makishev, V. A. Moskalev, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov. Study of the charring rate for long-life wooden constructions. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskkiye nauki / Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2014, no. 9(158), pp. 246–254 (in Russian).
28. M. M. Almenbayev. Efficiency of various ways of improve fire protection of wood with paintwork materials. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, no. 2(60), pp. 56–60 (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_24182040_94341714.pdf (Accessed 18 January 2019).
29. E. A. Anokhin, E. Yu. Polishchuk, A. B. Sivenkov. Use of fire-retardant impregnating compositions for reducing fire hazard of wooden structures of various lifetimes. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 22–35 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.22-35.
30. E. A. Anokhin, E. Yu. Polishchuk, A. B. Sivenkov. The use of fire-protective impregnating coatings to improve the fire hazard class of long service life wooden structures. In: *Roytmanovskiye chteniya* [Roitman readings]. Proceedings of 5th International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2017, pp. 10–14 (in Russian).
31. F. A. Shutov, D. Yarbrough. Insulation and environmental specifications flame retardant polymer foam composites PENOCOM®. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2014, no. 4(56). 4 p. (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_23105869_67731454.pdf (Accessed 18 January 2019).
32. F. A. Shutov, E. Yu. Kruglov, R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov. Influence of polymeric foam composite “PENOCOM” on fire resistance of wood frame separating constructions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 28–37 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.28-37.

33. V. N. Kirillov, V. A. Efimov, S. L. Barbotko, E. V. Nikolaev. Methodical features of carrying out and processing of climatic tests results of polymeric composite materials. *Plasticheskiye massy / Plastics*, 2013, no. 1, pp. 37–41 (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_18903155_28681924.pdf (Accessed 10 January 2019).
34. S. L. Barbotko, M. S. Barbotko, O. S. Volnyy, A. K. Shvedkova. Research of joint long-time impacts of temperature and humidity on fire safety of glass reinforced polymers. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 7, pp. 16–26 (in Russian).
35. A. B. Laptev, S. L. Barbotko, E. V. Nikolaev. The main research areas of the persistence properties of materials under the influence of climatic and operational factors. *Aviacionnye materialy i tehnologii / Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. 5, pp. 547–561 (in Russian).
36. S. L. Barbotko, E. V. Nikolaev, D. V. Abramov, O. S. Volnyj. Influence of polymeric composite materials aging on fire danger registered characteristic. *Plasticheskiye massy / Plastics*, 2017, no. 1–2, pp. 51–57 (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_28949543_56951119.pdf (Accessed 10 January 2019).
37. L. N. Vakhitova, M. P. Lapushkin, K. V. Kalafat. Lifetime of intumescent fire retardant coatings. *F+S: tekhnologii bezopasnosti i protivopozharnoy zashchity / F+S: Fire and Security*, 2011, no. 2(50), pp. 58–61 (in Russian).
38. O. N. Gaykovaya, V. V. Kovalenko, A. O. Nesenyuk, O. V. Savchenko. Some aspects of preservation of fire retardant efficiency of swelling coatings for metal constructions. *Naukoviy visnik: tsivilniy zakhista ta pozhezhna bezpeka / Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 2011, no. 1(23), pp. 47–55 (in Russian).
39. L. N. Vakhitova, K. V. Kalafat. *Ognezashchita stalnykh konstruksiy* [Fire retardance of steel structures]. Kiev, NPV “Interservis” Publ., 2013. 152 p. (in Russian).
40. A. V. Teploukhov, V. G. Zverev, A. N. Garashchenko. Methodology and results of estimation of the influence of structures long-term exploitation on basic properties of the intumescent flame-retardant coatings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 9–16 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.9-16.
41. A. M. Krutov, V. L. Strakhov, A. A. Kulkov, A. N. Garashchenko, A. A. Dalinkevich. Ensuring the warranty periods for the use of flame retardant load-bearing steel structures by the method of accelerated climatic tests. In: *Bezopasnost, effektivnost i ekonomika atomnoy energetiki* [Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Power Industry]. Proceedings of 10th International Scientific and Technical Conference. Moscow, Rosenergoatom Publ., 2016, pp. 429–434 (in Russian).
42. A. N. Garashchenko, A. V. Sukhanov, N. A. Garashchenko, N. V. Smirnov, N. I. Konstantinova, A. A. Merkulov. Decrease of fire hazard of polymeric composite materials when using of intumescent fireproof coverings. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 4, pp. 61–67 (in Russian).
43. C. E. Anderson, J. Dziuk, W. A. Mallow, J. Buckmaster. Intumescent reaction mechanisms. *Journal of Fire Sciences*, 1985, vol. 3, issue 3, pp. 161–194. DOI: 10.1177/073490418500300303.
44. J. Buckmaster, C. Anderson, A. Nachman. A model for intumescent paints. *International Journal of Engineering Science*, 1986, vol. 24, issue 3, pp. 263–276. DOI: 10.1016/0020-7225(86)90084-4.
45. I. S. Reshetnikov, A. V. Antonov, N. A. Khalturinskii. Mathematical description of combustion of intumescent polymer systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1997, vol. 33, issue 6, pp. 669–684. DOI: 10.1007/bf02671799.
46. V. L. Strakhov, A. N. Garashchenko, V. P. Rudzinsky. Mathematical modeling of intumescent fire protection functioning and performances. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 1997, vol. 6, no. 3, pp. 21–30 (in Russian).
47. G. N. Isakov, A. Ya. Kuzin. Modeling of heat and mass transfer in multilayer heat- and fire-insulating coatings under interaction with a high-temperature gas flow. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1998, vol. 34, issue 2, pp. 191–197. DOI: 10.1007/bf02672820.
48. V. G. Zverev, V. D. Golédin, V. V. Nesmelov, A. F. Tsimbalyuk. Modeling heat and mass transfer in intumescent fire-retardant coatings. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1998, vol. 34, issue 2, pp. 198–205. DOI: 10.1007/bf02672821.
49. A. N. Garashchenko, V. L. Strakhov, V. P. Rudzinsky, A. A. Ryzhkov. Approval of the design method for intumescent fire retardance applied on building constructions by example of Hensotherm 4KC. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 1999, vol. 8, no. 5, pp. 29–37 (in Russian).
50. V. L. Strakhov, A. N. Garashchenko, G. V. Kuznetsov, V. P. Rudzinskii. 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.

51. V. L. Strakhov, A. N. Garashchenko, G. V. Kuznesov, V. P. Rudzinski. Heat and mass transfer in thermo- and fire protection, taking into account the processes of thermal decomposition, evaporation – condensation, mass transfer and swelling – shrinkage. *Matematicheskoye modelirovaniye / Mathematical Models and Computer Simulations*, 2000, vol. 12, no. 5, pp. 107–113.
52. V. L. Strakhov, A. N. Garashchenko, V. P. Rudzinskii. Software for simulation of temperature fields in fire resistant building constructions with taking into account the processes of thermal decomposition, intumescence – shrinkage and evaporation – condensation. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2001, vol. 10, no. 4, pp. 9–11 (in Russian).
53. V. L. Strakhov, A. N. Garashchenko, G. V. Kuznetsov, V. P. Rudzinskii. Mathematical simulation of thermo-physical and thermochemical processes during combustion of intumescent fire-protective coatings. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2001, vol. 37, issue 2, pp. 178–186. DOI: 10.1023/a:1017557726294.
54. M. Bartholmai, R. Schriever, B. Scharfel. Influence of external heat flux and coating thickness on the thermal insulation properties of two different intumescent coatings using cone calorimeter and numerical analysis. *Fire and Materials*, 2003, vol. 27, issue 4, pp. 151–162. DOI: 10.1002/fam.823.
55. T. Yu. Eremina. Modelling and estimation of fire protection efficiency of bloating fireproof compounds. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2003, vol. 12, no. 5, pp. 22–29 (in Russian).
56. V. L. Strakhov, A. N. Garashchenko, V. P. Rudzinskii, V. A. Aleinik. Mathematical modelling of performance of water-contained intumescent fire-retardant coverings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2003, vol. 12, no. 1, pp. 39–46 (in Russian).
57. N. M. Bessonov, T. Yu. Eremina, Yu. N. Dmitrieva, M. V. Krashenninnikova. Calculated method for determining the fire resistance of metal structures coated with flame retardant intumescent composition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2007, no. 1, pp. 89–96 (in Russian).
58. G. J. Griffin. The modeling of heat transfer across intumescent polymer coatings. *Journal of Fire Sciences*, 2010, vol. 28, issue 3, pp. 249–277. DOI: 10.1177/0734904109346396.
59. V. G. Zverev, A. V. Teploukhov, A. F. Tsimbaluyk. Investigation of properties and fire protection efficiency of intumescent coatings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika / Russian Physics Journal*, 2014, vol. 57, no. 8-2, pp. 148–153 (in Russian).
60. S. A. Nenakhov, V. P. Pimenova. Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate (review of the literature). *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 8, pp. 11–58 (in Russian).
61. S. L. Barbotko, O. S. Volnij, O. A. Kiriyeenko, E. N. Shurkova. Creation of the mathematical model and calculation of sample temperatures at tests on fire resistance. *Trudy VIAM / Proceedings of VIAM*, 2017, no. 7(55), pp. 110–122 (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_29678401_94671304.pdf (Accessed 10 January 2019).
62. S. Novak, E. Kharchenko, P. Krukovskiy. Analytical-experimental assessment for solving problems of optimal thermal design of fire resistance structures. *Fire Safety*, 1997, no. 4, pp. 24–26 (in Ukrainian).
63. Krukovskiy P. G. *Obratnyye zadachi teplomassoobmena (obshchiy inzhenernyy podkhod)* [Inverse heat and mass transfer problems (general engineering approach)]. Kiev, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine Publ., 1998. 218 p. (in Russian).
64. S. V. Novak, E. F. Yakimenko. Analysis of modern methods, determination of the fire-protective methods and coatings characteristics. *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktika / Fire Safety: Theory and Practice*, 2011, no. 8, pp. 56–61 (in Russian).
65. N. B. Grigoryan, V. D. Polishchuk, P. G. Krukovsky, S. V. Novak. Assessment of the intumescent fire-protective coating “Phenix STS” ability. *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktika / Fire Safety: Theory and Practice*, 2014, no. 17, pp. 34–38 (in Russian).
66. A. Kovaliov, N. Zobenko. Preliminary assessment technique of coating flame retardant capacity for steel structures under hydrocarbon fire temperature conditions. *Naukoviy visnik: tsivilniy zakhist ta pozhazhna bezpeka / Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 2016, no. 1(1), pp. 59–64 (in Ukrainian).
67. A. N. Garashchenko, A. A. Kulikov, V. P. Vasin, T. A. Rudakova. Influence of the compound and fracturing behavior of intumescent flame retardant coatings on their effectiveness. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15. Kompozitsionnyye nemetallicheskiye materialy v mashinostroyenii / Military Engineering. Issues 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*, 2010, vol. 15, no. 4(159), pp. 33–38 (in Russian).
68. T. A. Rudakova, Yu. M. Yevtushenko, Yu. A. Grigoryev, A. A. Batrakov. Ways of reducing the temperature of foaming in the system ammonium polyphosphate — pentaerythritol in intumescent systems. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 24–31 (in Russian).

69. A. N. Garashenko, A. V. Sukhanov, N. A. Garashenko, V. P. Rudzinskiy, S. S. Marakhovskiy. Fire protection of polymeric composite structures and its effectiveness estimation. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2009, vol. 18, no. 5, pp. 15–24 (in Russian).
70. A. N. Garashchenko, N. A. Garashchenko, V. P. Rudzinsky, A. V. Soukhanov, S. S. Marakhovsky, I. V. Teminovskiy. Fire safety of polymeric composite building structures. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov / Composite Materials Constructions*, 2010, no. 2, pp. 45–59 (in Russian).
71. V. P. Rudzinskiy, A. N. Garashchenko, N. A. Garashchenko. Thermotechnical calculations of two-dimensional temperature fields in polymer composite structures with intumescent fire protection. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 8, pp. 42–47 (in Russian).
72. A. N. Garashchenko, V. P. Rudzinsky, V. O. Kaledin. Use of fire protection for reducing fire hazard of polymer composites and structures on their basis. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki / Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2013, no. 8(145), pp. 143–149 (in Russian).
73. V. P. Rudzinsky, A. N. Garashchenko. Numerical analysis of heat transfer in fire-protective coatings deformable upon heating. *EPJ Web of Conferences “Thermophysical Basis of Energy Technologies 2015”*, 2016, vol. 110, art. no. 01067. DOI: 10.1051/epjconf/201611001067.
74. A. N. Garashchenko, A. A. Berlin, A. A. Kulkov, I. Z. Dashtiev. Features of the creation of structures made of polymer composites in the presence of requirements for their fire safety indicators. *Voprosy oboronnay tekhniki. Seriya 15. Kompozitsionnyye nemetallicheskiye materialy v mashinostroyenii / Military Engineering. Issues 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*, 2018, no. 2(189), pp. 62–69 (in Russian).
75. A. N. Garashchenko, V. P. Rudzinsky, N. A. Garashchenko. Solving heat conduction problems in movable boundary domains under intensive physical-chemical transformation conditions. *EPJ Web of Conferences “Thermophysical Basis of Energy Technologies 2015”*, 2016, vol. 110, art. no. 01020. DOI: 10.1051/epjconf/201611001020.

Поступила 12.02.2019; после доработки 22.03.2019; принята к публикации 29.03.2019
 Received 12 February 2019; received in revised form 22 March 2019; accepted 29 March 2019

Информация об авторах

ГАРАЩЕНКО Анатолий Никитович, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института специального машиностроения, г. Хотьково Московской обл., Российская Федерация; e-mail: a.n.gar@mail.ru

БЕРЛИН Александр Александрович, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии наук, научный руководитель Института химической физики Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

КУЛЬКОВ Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, первый заместитель директора и главного конструктора Центрального научно-исследовательского института специального машиностроения, г. Хотьково Московской обл., Российская Федерация

Information about the authors

Anatoliy N. GARASHCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Leading Researcher of Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Moscow Region, Russian Federation; e-mail: a.n.gar@mail.ru

Aleksandr A. BERLIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of the Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Aleksandr A. KULKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Deputy of General Director and Chief Designer, Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo, Moscow Region, Russian Federation