

# Электроника, фотоника, приборостроение и связь

УДК 621.45.038.74

## РАЗРАБОТКА АКТИВНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ В УСЛОВИЯХ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ<sup>1</sup>

*Н.С. Альдебенев, И.Р. Тонеев, Е.С. Журавлева, Д.А. Деморецкий\**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: nikaldy@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматривается проблема создания теплозащитного покрытия для информационно-измерительных приборов и систем различного назначения, подвергающихся внешнему высокотемпературному воздействию в условиях аварийных ситуаций, связанных с пожаром. В качестве решения проблемы предлагается использование теплозащитных материалов, содержащих активные добавки, которые обеспечивают теплозащитный эффект, способствующий преломлению тепловых потоков, направленных на нагрев защищаемого объекта. Теплозащитный эффект обеспечивается эндотермической реакцией, которая происходит в материале, когда достигается температура разложения выбранного компонента. Следует отметить, что температура, при которой должна происходить реакция с поглощением тепла, должна быть ниже температуры поражения защищаемого объекта. В таком случае тепловые потоки, проходящие через слой теплозащитного материала, будут преломляться, так как тепло будет затрачиваться на разложение эндотермического наполнителя. Прогрев материала будет осуществляться за счет матрицы материала и продуктов разложения. Исходя из задач, для выполнения которых необходимо применение теплозащитного материала, определяется количе-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

\* Альдебенев Николай Сергеевич, инженер НИС кафедры «Технология твердых химических веществ», аспирант.

Тонеев Иван Романович, младший научный сотрудник НИС кафедры «Технология твердых химических веществ», преподаватель кафедры «Химическая технология полимерных и композиционных материалов».

Журавлева Елена Сергеевна, младший научный сотрудник НИС кафедры «Технология твердых химических веществ», аспирант.

Деморецкий Дмитрий Анатольевич, заведующий кафедрой «Технология твердых химических веществ», доктор технических наук, профессор.

*ство эндотермического наполнителя. Соответственно, с увеличением промежутка времени, в течение которого необходимо ликвидировать пожар, содержание эндотермического наполнителя также увеличивается. Применение теплозащитного материала актуально для аварийных регистраторов полетных данных, так как при авиакатастрофе с высокой вероятностью возможно возникновение пожара, который может привести к потере информации, необходимой для определения причин аварийной ситуации.*

**Ключевые слова:** теплозащитное покрытие, бортовой самописец, эндотермическая реакция, теплопроводность, испытательный стенд, газовая горелка, пламя, термопара

## **Введение**

Проблема создания эффективного теплозащитного покрытия (ТЗП) актуальна для широкого спектра применений. На сегодняшний день это необходимо как для космических аппаратов и бортовых самописцев, так и для контейнеров, сейфов и других конструкций, защищающих различные объекты от воздействия высокотемпературного нагрева [1–5]. Исходными данными для разработки ТЗП являются условия, при которых оно должно выполнять свою функцию. От этого зависит, на каких принципах будет осуществляться разработка ТЗП и какие теплофизические свойства ТЗП необходимы для выполнения им поставленной задачи [6–10].

В статье рассматривается экспериментальное исследование свойств теплозащитного покрытия на примере макета, моделирующего конструкцию защитного контейнера или сейфа, на внутренней стенке которого размещено ТЗП. В качестве теплозащитного покрытия были взяты образцы с различными составами.

## **Дифференциальный термический анализ**

Для определения способности компонентов разлагаться с поглощением тепла был проведен дифференциальный термический анализ [11–13]. В качестве эндотермической добавки для составов теплозащитных покрытий был выбран гептагидрат сульфата магния  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ .

Для опытов были отобраны навески исследуемых веществ в количестве 50 мг. Для определения эндотермического эффекта вещества в пробирки с исследуемыми веществами устанавливались термопары прибора. Далее производили нагрев пробирок до наблюдения отклонения температуры в веществе от температуры нагрева. Эксперимент останавливался, когда температура в веществе начинала соответствовать температуре нагрева (то есть эндотермическое разложение вещества было закончено). Данные экспериментов фиксировали на графиках с помощью программного обеспечения прибора ДТА. По оси ординат отложена разница температур в веществе и на нагреваемой поверхности. По оси абсцисс отложены значения фактической температуры, которая росла со скоростью 5 °С/мин.

График изменения температуры в объеме эндотермически активного компонента во время сбора данных показан на рис. 1. Процедура проводилась в соответствии с ГОСТ 33403-2015 [14].

Из рис. 1 видно, что при нагревании до 112,5 °С температура в объеме компонента начинает отклоняться; таким образом, начинается реакция разложения вещества с поглощением выделяемого тепла. Реакция заканчивается при температуре воздействия, соответствующей 130 °С. Данный процесс описывается химическим уравнением эндотермического разложения гептагидрата сульфата магния:



при этом гептагидрат сульфата магния разлагается с выделением воды и сульфата

магния.

Максимальный эндотермический эффект (отклонение температуры в веществе от температуры нагрева) наблюдается при 120 °С (разница температуры в исследуемом веществе и температуры нагрева составила 6,8 °С).

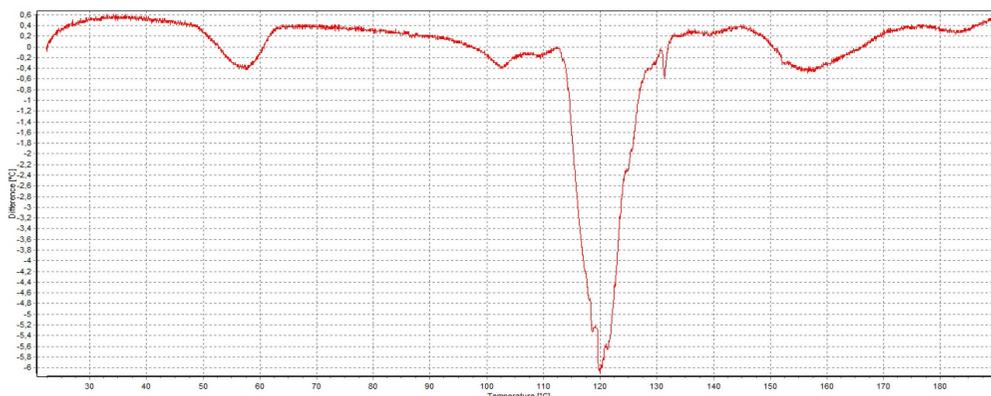


Рис. 1. Дифференциальный термический анализ эндотермического компонента для ТЗП

Тепловой эффект химической реакции определили по тому же принципу, что и для разложения хлорида аммония. В табл. 1 представлены энтальпии образования веществ.

Таблица 1

**Энтальпии образования веществ**

Вещество	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	$MgSO_4$	$H_2O$
Энтальпия образования $\Delta H^0$ , кДж/моль	-3384	-1288,8	-285,33

Тепловой эффект химической реакции разложения 1 моля хлорида аммония составляет  $\Delta H^0_{реакции} = (-1288,8 + 7(-285,33)) - 3384 = 97,89$  кДж (для разложения 1 моля гептагидрата сульфата магния необходимо затратить 97,89 кДж тепла).

Например, кремниевые транзисторы начнут разрушаться при температуре (120...150) °С. Соответственно, пока в объеме теплозащитного материала будет происходить описанная эндотермическая реакция, прибор будет продолжать свое функционирование.

**Экспериментальная оценка эффективности эндотермической добавки**

Компонент, с которым проводился ДТА, использовался в качестве эндотермического наполнителя для изготовления образцов ТЗП. В процессе исследования были протестированы три образца ТЗП, рецептуры которых представлены в табл. 2.

Полученные образцы были использованы в макете (рис. 2).

Элемент *a* или теплоизоляционный материал необходим для предотвращения потери тепла во время эксперимента. Для определения теплофизических свойств выбранных образцов ТЗП на макете термопары типа *K* были установлены на нагретой поверхности элемента *e*, между элементами *d* и *e*, *c* и *d*, а также

между элементами  $b$  и  $c$  [15–17]. Внешний вид элементов макета и процесс сборки представлены на рис. 3 и 4.

Таблица 2

**Рецептуры испытуемых образцов**

Рецептура № 1	Связующее (35 %) + инертный наполнитель (65 %)
Рецептура № 2	Связующее (35 %) + полые микросферы (65 %) Воздушные включения составляют 50 % объема образца
Рецептура № 3	Связующее (35 %) + эндотермический наполнитель (65 %)
Рецептура № 4	Связующее (30 %) + эндотермический наполнитель (70 %)

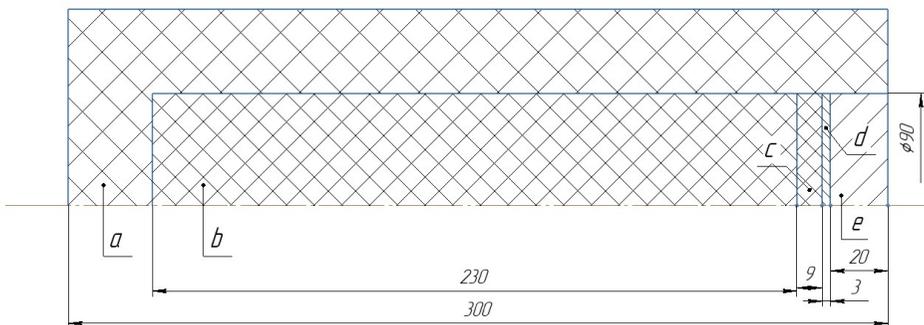


Рис. 2. Схема компоновки, моделирующая конструкцию сейфа либо защитного контейнера:  $a$  – теплоизоляционный материал;  $b$  – защищаемый объект;  $c$  – образец теплозащитного покрытия;  $d$  – имитация внутренней металлической оболочки сейфа;  $e$  – имитация внешней металлической оболочки сейфа



Рис. 3. Элементы макета:  $a$  – защищаемый объект;  $b$  – образец теплозащитного покрытия;  $c$  – имитация внутренней металлической оболочки;  $d$  – имитация наружной металлической оболочки



Рис. 4. Процесс сборки макета

После сборки макет устанавливается на испытательный стенд (рис. 5).

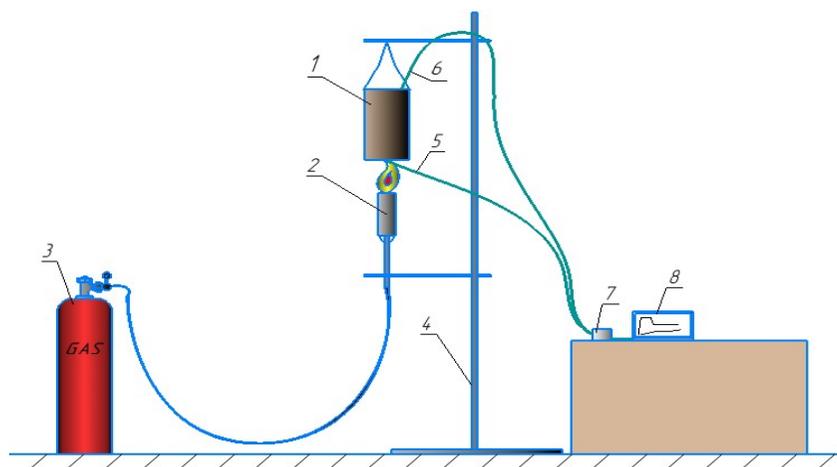


Рис. 5. Схема проведения эксперимента на испытательном стенде:  
 1 – макет; 2 – газовая горелка; 3 – газовый баллон; 4 – штатив;  
 5 – термопара; 6 – термопара; 7 – аналого-цифровой преобразователь;  
 8 – компьютер

Были проведены эксперименты с целью определить, сколько времени требуется для того, чтобы температура в зоне между защищаемым объектом *b* и образцом теплозащитного материала *c* достигла температуры  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  при воздействии на внешнюю оболочку «е» пламени горелки. При этом температура на нагретой поверхности поддерживалась в диапазоне  $(800\dots 1000)\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, в постановке эксперимента рассматривается одна из многочисленных задач, связанных с разработкой теплозащитных материалов.

В результате экспериментов были получены диаграммы изменения температур в макете, изображенные на рис. 6–9.

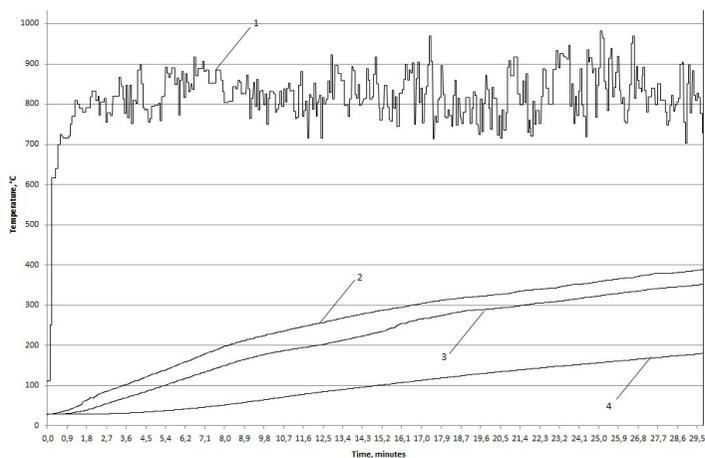


Рис. 6. График изменения температур в макете с образцом № 1: 1 – температура в зоне нагрева; 2 – температура между внешней и внутренней оболочками; 3 – температура между внутренней оболочкой и образцом ТЗП; 4 – температура между образцом ТЗП и защищаемым объектом

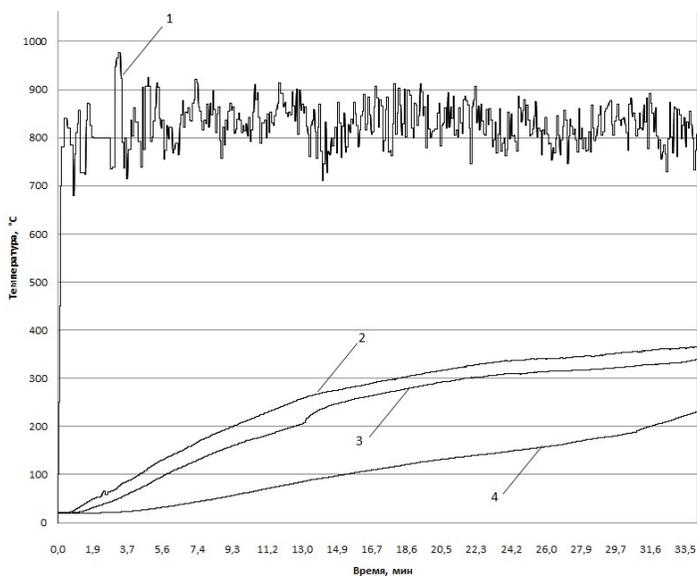


Рис. 7. График изменения температур в макете с образцом № 2: 1 – температура в зоне нагрева; 2 – температура между внешней и внутренней оболочками; 3 – температура между внутренней оболочкой и образцом ТЗП; 4 – температура между образцом ТЗП и защищаемым объектом

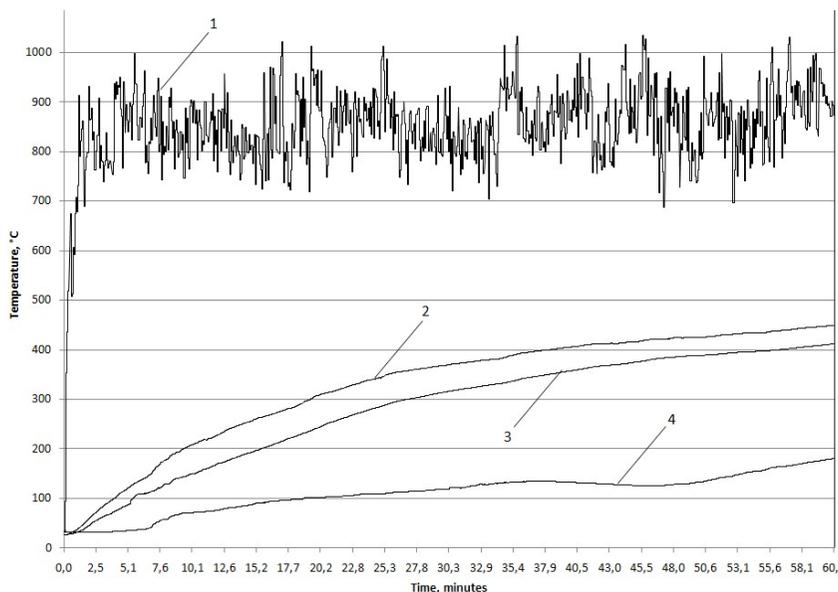


Рис. 8. График изменения температур в макете с образцом № 3:  
 1 – температура в зоне нагрева; 2 – температура между внешней и внутренней оболочками; 3 – температура между внутренней оболочкой и образцом ТЗП; 4 – температура между образцом ТЗП и защищаемым объектом

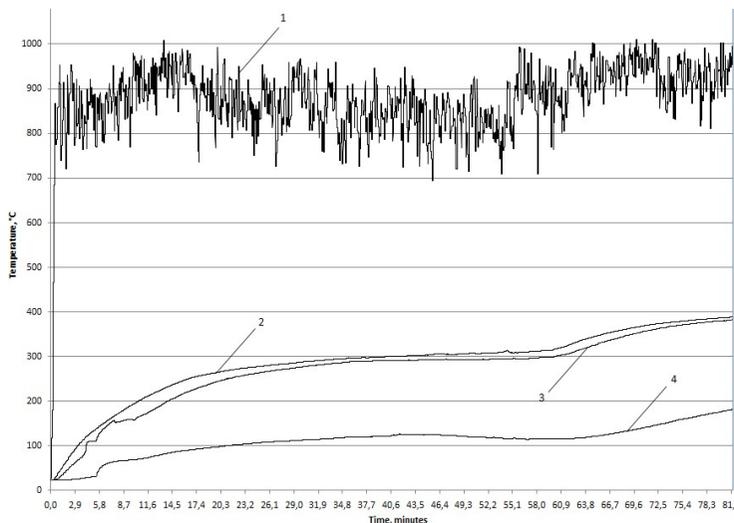


Рис. 9. График изменения температур в макете с образцом № 4:  
 1 – температура в зоне нагрева; 2 – температура между внешней и внутренней оболочками; 3 – температура между внутренней оболочкой и образцом ТЗП; 4 – температура между образцом ТЗП и защищаемым объектом

Так как наибольший интерес вызывает процесс изменения температуры в зоне между образцом ТЗП и защищаемым объектом, графики изменения температуры в указанной зоне сведены в общую диаграмму, на которой наблюдается различие в динамике роста температуры. Диаграмма представлена на рис. 10.

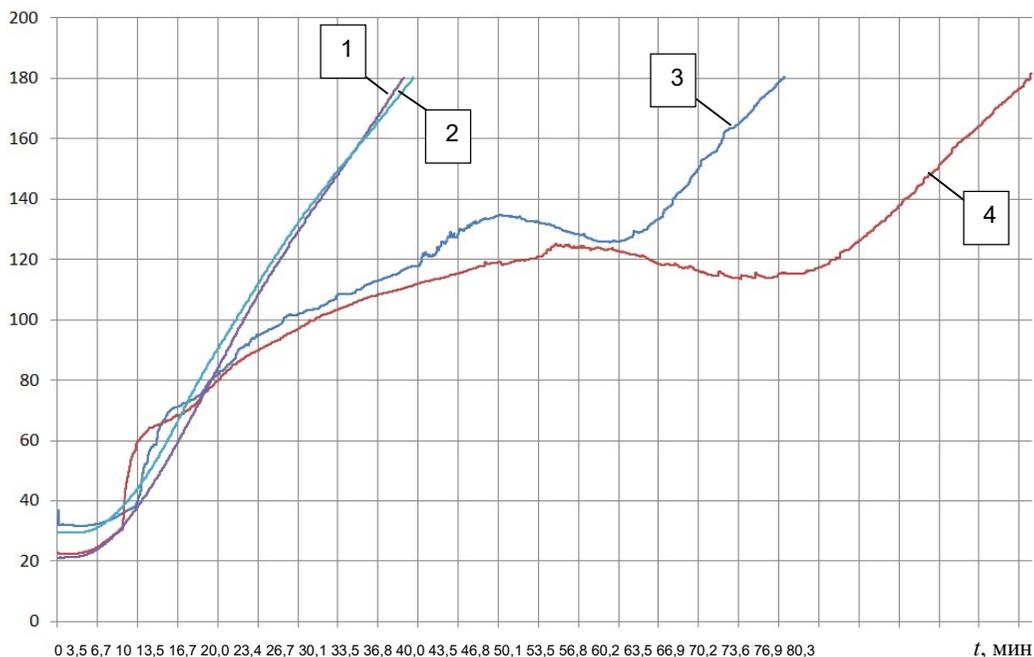


Рис. 10. Диаграмма изменения температуры за образцами ТЗП во время нагрева макета: 1 – график изменения температуры за образцом № 1; 2 – график изменения температуры за образцом № 2; 3 – график изменения температуры за образцом № 3; 4 – график изменения температуры за образцом № 4

Из графиков, показанных на рис. 10, видно, что образец № 1, который не содержит эндотермического компонента, показал самое короткое время экспозиции. Не дал особого прироста по времени прогрева и внедрение в образец № 2 высокопористого наполнителя. Следует отметить, что во время экспериментов с образцами № 1 и № 2 температура на границе ТЗП – защищаемый объект росла линейно. Самое длительное время нагрева до температуры 180 °С между защищаемым объектом и образцом ТЗП наблюдается в эксперименте с образцом № 4, поскольку рецептура содержит наибольшее количество эндотермического наполнителя.

### Выводы

Проведенные исследования доказывают, что наличие эндотермического наполнителя в составе рецептуры ТЗП позволяет значительно увеличить теплоемкость изолирующего слоя, поскольку повышаются его теплопоглощающие характеристики. Экспериментально подтверждено, что наличие эндотермического наполнителя в составе ТЗП позволяет повысить его эффективность на 100 %. Кроме того, увеличение содержания эндотермического наполнителя в составе ТЗП также способствует увеличению его эффективности. Разработанный теплозащитный материал рекомендуется для применения в составе бортовых самописцев, в шкафах управления электрооборудованием, сейфах, защитных контейнерах и др.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Охапкин А.С.* Исследование характеристик теплопередачи термозащитных композиционных материалов // Журнал инженерной физики и теплофизики. 1985. Т. 49, 6. С. 1469–1473.
2. *Алифанов О.М., Черепанов В.В.* Идентификация моделей и прогнозирование физических свойств высокопористых теплозащитных материалов // Журнал инженерной физики и теплофизики. 2010. Т. 83. С. 770–782.
3. *Алифанов О.М., Будник С.А., Ненарокомов А.В., Нетелев А.В., Титов Д.М.* Определение тепловых свойств разрушающихся материалов с применением для испытаний конструкций космических аппаратов // 61-й Международный астронавтический конгресс (МАК-10) (Прага, Чешская Республика). 2010. С. 10.
4. *Dec J.A., Braun R.D., Lamb B.* Анализ абляционного теплового отклика с использованием метода конечных элементов // Журнал теплофизики и теплопередачи. 2012. Т. 26, 2. С. 201–212.
5. *Резник С.В., Просунцов П.В., Михайловский К.В.* Прогнозирование теплофизических и термомеханических характеристик пористых углерод-керамических композиционных материалов теплозащитного экрана аэрокосмических аппаратов // Журнал инженерной физики и теплофизики. 2015. Т. 88, 3. С. 594–601.
6. *Крашенникова М.В.* Тенденции и перспективы разработки составов вспучивающихся огнезащитных покрытий для повышения пределов огнестойкости строительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 2(17). С. 36–39.
7. *Сипягина Н.А.* Новые композиционные материалы на основе керамических высокопористых теплозащитных материалов и аэрогелей // VIII конференция молодых ученых по общей и неорганической химии. 2018. С. 80.
8. *Бессарабов А.М., Емельянова О.Н., Степанова Т.И., Поляков А.В., Зайков Г.Е., Стоянов О.В.* Разработка нового поколения легких композиционных теплозащитных материалов на основе концепции *calc* // Вестник Казанского технологического университета. Т. 12(15). 2012. С. 83–88.
9. *Исаев А.У.* Материалы, применяемые в качестве теплозащитных и теплоизоляционных // Все материалы: Энциклопедический справочник. 2013. Т. 3. С. 7–11.
10. *Розененкова В.А., Миронова Н.А., Солнцев С.С., Гаврилов С.В.* Керамические покрытия для градиентных высокотемпературных теплозащитных материалов, стекла и керамики. 2013. Т. 1. С. 29–32.
11. *Шленский О.Ф., Шашков А.Г., Аксенов Л.Н.* Теплофизика распадающихся материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 144 с.
12. ГОСТ Р 53293-2009 Материалы, вещества и средства противопожарной защиты, идентификация методами термического анализа.
13. *Альмяшев В.И.* [и др.]. Комплексный термический анализ: учеб. пособие. СПб: Лемма, 2017. 193 с.
14. ГОСТ 33403-2015, Методы испытаний химических продуктов, опасных для окружающей среды, определение термической стабильности и сопротивления воздействию воздуха.
15. *El Wardi F.Z., Cherki A., Mounir S., Khabbazi A., Maaloufa Y.* Thermal characterization of a new multilayer building material based on clay, cork and cement mortar // Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. Energy Procedia. Vol. 157. 2019. Pp. 480–491.
16. *Yuki Kubotaa, Ousei Miyamoto, Takuya Aokia, Yuichi Ishidaa, Toshio Ogasawarac, Shin-jiro Umezub.* New thermal protection system using high-temperature carbon fiber-reinforced plastic sandwich panel // Acta Astronautica. Vol. 160. 2019. Pp. 519–526.
17. *Ying Lia, Lu Zhanga, Rujie Hea, Yongbin Mac, Keqiang Zhang, Xuejian Baia, Baosheng Xua, Yanfei Chena.* Integrated thermal protection system based on C/SiC composite corrugated core sandwich plane structure // Aerospace Science and Technology. Vol. 91. 2019.

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2022 г.

# DEVELOPMENT OF ACTIVE HEAT-PROTECTIVE MATERIALS FOR INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS EXPERIENCING THERMAL LOADS IN EMERGENCY SITUATIONS

*N.S. Aldebenev, I.R. Toneev, E.S. Zhuravleva, D.A. Demoretsky\**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: nikaldy@yandex.ru

**Abstract.** *The article deals with the problem of creating a t-protective coating for information-measuring devices and systems for various purposes exposed to external high-temperature exposure in emergency situations related to fire. As a solution to the problem, it is proposed to use thermal-protective materials containing active additives that provide a thermal-protective effect that promotes the refraction of heat flows aimed at heating the protected object. The heat-shielding effect is provided by an endothermic reaction that occurs in the material when the decomposition temperature of the selected component is reached. It should be noted that the temperature at which the reaction with heat absorption should occur should be lower than the temperature of the lesion of the protected object. In this case, the heat flows passing through the layer of heat-shielding material will be refracted, since heat will be spent on the decomposition of the endothermic filler. The heating of the material will be carried out due to the matrix of the material and decomposition products. Based on the tasks that require the use of a heat-protective material, the amount of endothermic filler is determined. Accordingly, with an increase in the time interval during which it is necessary to eliminate the fire, the content of endothermic filler also increases. The use of thermal-protective material is relevant for emergency flight data recorders, since in the event of a plane crash, a fire is likely to occur, which can lead to the loss of information necessary to determine the causes of an emergency.*

**Keywords:** *thermal-protective coating, flight recorder, formulations, endothermic reaction, thermal conductivity, test bench, gas burner, flame, thermocouple*

## REFERENCES

1. *Okhapkin A.S.* Study of the heat-transfer characteristics of a thermally protective composite materials, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Vol. 49, 6(1985). 1469–1473.
2. *Alifanov O.M., Cherepanov V.V.* Identification of models and prediction of physical properties of highly porous heat-shielding materials, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Vol. 83 (2010). 770–782.
3. *Alifanov O.M., Budnik S.A., Nenarokomov A.V., Netelev A.V., Titov D.M.* Destructive Materials Thermal properties determination with application for spacecraft structures testing. The 61th International Astronautical Congress (IAC-10) (Prague, Czech Republic) (2010) 10.
4. *Dec J.A., Braun R.D., Lamb B.* Ablative thermal response analysis using the finite element method, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. Vol. 26, 2 (2012). 201–212.
5. *Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V.* Prediction of Thermophysical and Thermomechanical Characteristics of Porous Carbon-Ceramic Composite Materials of the Heat Shield of Aerospace Craft, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Vol. 88, 3 (2015). 594–601.
6. *Krashennikova M.V.* Trends and prospects of the development of compositions of distending fire protecting coatings for increase of limits of fire resistance of building constructions, *Fire and explosion safety*. Vol. 2(17) (2008). 36–39.

---

\* *Nikolay S. Aldebenev, junior researcher.*  
*Ivan R. Toneev, junior researcher.*  
*Elena S. Zhuravleva, junior researcher.*  
*Dmitry A. Demoretsky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

7. *Sipyagina N.A.* New composite materials on the basis of ceramic high porous heatprotective materials and aerogels, The VIII conference of young scientists on general and inorganic chemistry, Moscow April. 10–13 (2018) 80.
8. *Bessarabov A.M., Emelyanova O.N., Stepanova T.I., Polyakov A.V., Zaikov G.E., Stoyanov O.V.* The development of the new generation of lightweight composite heat protective materials on the basis of the concept of calcs, Vestnik of the Kazan Techological University. Vol. 12(15) (2012). 83–88.
9. *Isaev A.U.* Materials applicated as heat protective and heat insulating ones, All the materials, Encyclopedic guide. Vol. 3 (2013). 7–11.
10. *Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Solntcev S.S., Gavrilov S.V.* Ceramic coatings for gradient high temperature heat protective materials, Glass and ceramics. Vol. 1 (2013). 29–32.
11. *Shlensky O.F., Shashkov A.G., Aksenov L.N.* Thermal physics of decaying materials, Moscow: Energoatomizdat, 1985, 144.
12. State standard R 53293-2009 Materials, substances, and fire protection means, Identification by the methods of the thermic analysis.
13. *Almyashev V.I.* [and others]. Comprehensive thermal analysis: tutorial, Saint-Petersburg: Publishing house Lemma, 2017, 193.
14. State standard 33403-2015, Test methods for chemical products that are hazardous to the environment, Determination of thermal stability and resistance to air.
15. *El Wardi F.Z., Cherki A., Mounir S., Khabbazi A., Maaloufa Y.* Thermal characterization of a new multilayer building materialbased on clay, cork and cement mortar, Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. Energy Procedia. Vol. 157 (2019). 480–491.
16. *Yuki Kubotaa, Ousei Miyamotob, Takuya Aokia, Yuichi Ishidaa, Toshio Ogasawarac, Shinjiro Umezub.* New thermal protection system using high-temperature carbon fibrereinforced plastic sandwich panel, Acta Astronautica. Vol. 160 (2019). 519–526.
17. *Ying Lia, Lu Zhanga, Rujie Hea, Yongbin Mac, Keqiang Zhang, Xuejian Baia, Baosheng Xua, Yanfei Chena.* Integrated thermal protection system based on C/SiC composite corrugated core sandwich plane structure, Aerospace Science and Technology. Vol. 91 (2019).