

Сведения о выполненных работах и
полученных научных результатах в 2023 году

по проекту «**Математическое и физическое моделирование процесса тепло- и массопереноса композиционных материалов в условиях пожара**»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-21-00068

Руководитель: Якимов Анатолий Степанович, д-р техн. наук

1. Разработана и апробирована [1, 2] двухмерная по пространству сопряженная физико-математическая модель прогрева многослойного контейнера на основе огнезащитного вспучивающегося покрытия (ОВП). В качестве ОВП (1 слой) использовался огнезащитный состав ВПМ-2 [3, 4], в качестве второго слоя выступала древесина или пористая сталь, в качестве третьего слоя – был изоляционный материал (асбестоцемент).

2. Разработан метод численного решения неоднородной задачи прогрева составного тела (многослойного контейнера) на основе итерационно-интерполяционного метода (ИИМ) и теории линейных операторов. Использование аналога метода расщепления заключалось в поочередном интегрировании по пространственным переменным. Данная технология распространяется (обобщается) на трехмерные по пространству краевые задачи.

3. На основе экспериментальных [3, 4] и апробированных теоретических результатов [1, 2, 5] дана уточненная постановка задачи о термохимическом разрушении в многослойном композиционном материале. Для получения надежных теоретических результатов необходимо учитывать специфику внутренней структуры ОВП (теплофизические, кинетические свойства) при нагревании: тепловыделение от термического разложения и перетекания тепла поперек таблетки. Учет третьего слоя ОВП в многослойном теле уменьшает вероятность разрушения защищаемого второго слоя при ограниченном времени воздействия пожара ($t_k = 20$ мин), что согласуется с известными данными [5].

4. Разработана и создана физико-математическая модель процесса тепломассопереноса (ТМП) строительных материалов (СМ) при взаимодействии их с частицами, нагретых до высокой температуры [6, 7]. На первом этапе исследования предполагается отсутствие взаимодействия ТМП между частицами и СМ уголка с воздушной средой, окружающей нагретые частицы и СМ уголка: а) разработан численный метод на основе ИИМ для решения трехмерной задачи прогрева уголка СМ нагретыми частицами; б) исследованы зависимости времен зажигания уголка СМ от начальной температуры СМ, начальной температуры горячих частиц и их количества; в) оказалось, что время зажигания уголка СМ, предварительно нагретого до температуры $T_n = 373$ К уменьшилось до $t^* = 22.3$ с, по сравнению с базовым (10 частиц, $a = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $d = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $T_n = 300$ К, $T_{S^*} = 700$ К, $t^* = 23.92$ с), этот результат качественно согласуется с данными эксперимента; г) при уменьшении

начальной температуры частиц $TS^* = 650$ К время зажигания уголка СМ увеличилось до $t^* = 25.71$ с. Это обусловлено уменьшением запаса тепла «нагретых» частицах, что в итоге приводит к увеличению времени прогрева и времени воспламенения уголка СМ [8]; д) при уменьшении числа «горячих» до пяти и ниже: увеличении расстояния между ними в 3.6 раза ($d = 1.8 \cdot 10^{-2}$ м) при такой же длине частиц $a = 5 \cdot 10^{-3}$ м для прочих одинаковых входных данных не происходит зажигания уголка СМ. Это связано с понижением со временем температуры уголка СМ при меньшем количестве «горячих» частиц из-за уменьшения запаса тепла, необходимого для прогрева и зажигания СМ. Этот результат находится в согласии с данными эксперимента [9].

5. Разработана методика проведения эксперимента с использованием в качестве излучателя АЧТ-45/100/1100, выбран из соображений, что данный прибор является эталонным излучателем и предназначен для градуировки и поверки пирометров в диапазоне температур 300–1100 °С в лабораторных и цеховых условиях. Это позволило в динамике (реальном времени) анализировать изменение температурного поля на поверхности образца в ходе огневых испытаний. Расположение образца и оптико-электронной регистрирующей аппаратуры напротив нагревателя выбиралось таким образом, чтобы фиксировать влияние заданного значения теплового потока на торце образца. Тепловое воздействие продолжалось в течение 10 минут. Во время всего эксперимента производилась непрерывная съемка на ИК-камеру торцевой части образца при тепловом воздействии. Съемка производилась в спектральном интервале 3.1–3.3 мкм, диапазон измеряемых температур 200 – 800 °С.

6. Произведено комплексное экспериментальное исследование в лабораторных условиях зажигания образцов строительных материалов на основе сосны, в результате воздействия модельного очага горения различной интенсивности, а также влияния теплоизоляционных строительных материалов на пожароопасные свойства древесины. В инфракрасной области излучение поверхности образцов регистрировалось с помощью тепловизора JADE J530SB с применением оптического фильтра 3.1–3.3 мкм, который позволял измерять температуру в интервале 310–1500 К. Для интерпретации зарегистрированного излучения от исследуемого образца были использованы калибровки, поставляемые изготовителем узкополосного оптического фильтра.

7. Подготовлена лабораторная база для проведения экспериментальных исследований по изучению горения по поверхности строительных материалов на основе древесины. С использованием в качестве излучателя модели абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100 Омского завода ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 100–1100 °С проведено экспериментальное исследование влияния мощности теплового потока в диапазоне 10–30 кВт/м² на характеристики зажигания и горения с применением бесконтактных методов ИК диагностики в узких спектральных диапазонах инфракрасных длин волн.

8. Также проведена оценка темпа нагрева образца на основании данных, полученных с использованием метода ИК–термографии. Для элемента внутреннего угла строения усредненный по трем образцам темп нагрева составил – 0.21 °С в секунду, а для элемента ограждения – 0.13 °С в секунду. Различия тепловых потоков и темпа нагрева для элемента ограждения и внутреннего угла строения связаны с тем, что прогрев у второй конструкции происходит интенсивнее за счет большей области покрытия горящими и тлеющими частицами перед исследуемым образцом.

9. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ПЭВМ № 2023664987 «TFview-v.1. Визуализация поля температуры на поверхности контрольного образца» / Касымов Д. П. (RU), Агафонцев М. В. (RU), Перминов В.В. (RU).

1. Касымов Д.П., Перминов В.В., Шевлякова А.А., Якимов А.С. Математическое моделирование процесса тепломассообмена в композиционных материалах при действии пожара. Теплофизика высоких температур. 2023. Т. 61, № 1. С. 83–90. DOI: 10.31857/S0040364423010155

2. Касымов Д.П., Перминов В.В., Шевлякова А.А., Якимов А.С. Моделирование процесса тепломассопереноса в композиционных материалах при пожаре // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 3. С. 607–614. http://www.itmo.by/publications/jepiter/bibl/?SECTION_ID=1060

3. Романенков И. Г., Левитес Ф. А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.

4. Исаков Г.Н., Несмелов В.В. О некоторых закономерностях тепломассопереноса во вспучивающихся огнезащитных материалах. Физика горения и взрыва. 1994. № 2. С. 57–63. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/a13/a13106f375daa114804097826c950483.pdf>

5. Зверев В.Г., Назаренко В.А., Цимбалюк А.Ф. Тепловая защита многослойных контейнеров от воздействия пожаров. Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46, № 2. С. 283–289. <https://www.mathnet.ru/links/6abe045e275973f97093044d06fdc8fc/tvt1049.pdf>

6. Касымов Д.П., Перминов В.В., Голубничий Е.Н., Якимов А.С. Моделирование зажигания строительных материалов частицами, нагретыми до высокой температуры. Физика горения и взрыва. 2024. № 2 (в печати).

7. Лобода Е.Л., Касымов Д.П., Якимов А.С. Численный расчет воспламенения деревянных строений нагретыми частицами. Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97, № 2 (в печати).

8. Кузнецов В.Т., Фильков А.И. Воспламенение различных видов древесины потоком лучистой энергии. Физика горения и взрыва. 2011. № 1. С. 74–79. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/a36/a365987be142af2ac16d42aa143e4cb2.pdf>

9. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Martynov G.F., Tarakanova V. Studying firebrands interaction with flat surface of various wood construction materials in laboratory conditions. J. Phys. Conf. Ser. 2019. 1359 012092, doi:10.1088/1742-6596/1359/1/012092