

# АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ОГНЕЗАЩИТНОГО ВСПУЧИВАЮЩЕГОСЯ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКИСЛЕННОГО ГРАФИТА

М.А. КОМАРОВА<sup>1</sup>

М.В. ШАЛАБИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Россия

## Аннотация

*Введение.* Создание эффективных вспучивающихся огнезащитных покрытий для металлических строительных конструкций требует глубокого понимания механизмов их термического разложения. Модификация классических огнезащитных систем, в частности путем добавления в рецептуру интеркалированного графита, направлена на повышение их термостабильности и огнезащитной эффективности. Ключевым инструментом для изучения этих процессов является синхронный термический анализ методами термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии.

*Цель.* Исследование механизма и кинетики термической деструкции терморасширяющегося огнезащитного покрытия на основе связующего из эпоксидной диановой смолы и аминного отвердителя и окисленного графита как основного интумесцентного наполнителя в инертной (аргон) и окислительной (кислород) атмосферах методами ТГ/ДСК для оценки его огнезащитного потенциала и выявления ключевых стадий термического разложения.

*Материалы и методы.* В работе проведен термический анализ образцов покрытия на синхронном термоанализаторе NETZSCH STA 449 F5 в атмосферах аргона и кислорода при скорости нагрева 10 К/мин в диапазоне до 1000 °С. Определены качественные характеристики, в том числе тепловые эффекты и выполнен сравнительный анализ поведения покрытия в условиях пиролиза и окисления после обработки полученных данных с использованием программного обеспечения Proteus Thermal Analysis.

*Результаты.* Представлены результаты исследований термических свойств терморасширяющегося огнезащитного покрытия на основе связующего из эпоксидной диановой смолы и аминного отвердителя и окисленного графита как основного интумесцентного наполнителя, а также самого окисленного графита. Определены термические свойства в температурном интервале от 24 до 1000 °С. Установлено, что термическое разложение терморасширяющегося огнезащитного покрытия на основе связующего из эпоксидной диановой смолы и аминного отвердителя и окисленного графита как основного интумесцентного наполнителя носит многостадийный характер.

Количественно определена критическая температура перехода покрытия в активное состояние, соответствующее началу интумесценции.

*Выводы.* Подтверждено, что окисленный графит в составе исследуемого огнезащитного покрытия обеспечивает высокий эндотермический эффект, что подтверждает эффективность огнезащитного покрытия в условиях пожара. Полученные данные позволяют количественно оценить вклад различных стадий разложения в огнезащитную эффективность состава.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, огнезащитные покрытия, вспучивающиеся покрытия, окисленный графит, термический анализ, термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, пиролиз, окисление, огнестойкость

**Для цитирования:** Комарова М.А., Шалабин М.В. Анализ термического разложения огнезащитного вспучивающегося покрытия на основе окисленного графита // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 1(48). С. 213–225. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-213-225](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-213-225)

#### **Вклад авторов**

Комарова М.А. – постановка задачи исследования, анализ и интерпретация полученных данных, формулировка выводов, написание текста статьи.

Шалабин М.В. – выполнение экспериментальной части, подбор и анализ литературных источников, редактирование текста статьи.

#### **Финансирование**

Исследование выполнено в рамках договорных работ между АО «НИЦ «Строительство» и АО «Унихимтек».

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 27.01.2026

Поступила после рецензирования 24.02.2026

Принята к публикации: 27.02.2026

## **ANALYSIS OF THE THERMAL DECOMPOSITION OF A FIRE-RETARDANT INTUMESCENT COATING BASED ON OXIDIZED GRAPHITE**

M.A. KOMAROVA<sup>1</sup>

M.V. SHALABIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Science and Research Center of Construction, 2nd Institut'skaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russia

#### **Abstract**

*Introduction.* The development of effective intumescent fire-retardant coatings (FRC) for steel building structures requires a deep understanding of their thermal decomposition mechanisms. Modification of classic fire-retardant systems, in particular by adding intercalated graphite to the formulation, is aimed at improving its thermal stability and fire-retardant effectiveness. A key tool for studying these processes is synchronous thermal analysis using thermogravimetry (TG) and differential scanning calorimetry (DSC) methods.

*Aim.* Study of the mechanism and kinetics of thermal degradation of a thermally expanding fire-retardant coating based on an epoxy dianic resin binder and an amine hardener, with oxidized graphite as the main intumescent filler in inert (argon) and oxidative (oxygen) atmospheres using TG/DSC methods for assessing its fire-retardant potential and identifying the key stages of thermal decomposition.

*Materials and methods.* Thermal analysis of the coating samples was carried out using a NETZSCH STA 449 F5 synchronous thermal analyzer in argon and oxygen atmospheres at a heating rate of 10 K/min up to 1000 °C. Qualitative characteristics, including thermal effects, were determined, and a comparative analysis of the coating's behavior under pyrolysis and oxidation conditions was performed after processing the obtained data using Proteus Thermal Analysis software.

*Results.* Presented are the results of studies of the thermal properties of a thermally expanding fire-retardant coating based on an epoxy dianic resin binder and an amine hardener, with oxidized graphite as the main intumescent filler, as well as the oxidized graphite itself. The thermal properties were determined in the temperature range from 24 to 1000°C. It was determined that the thermal decomposition of a thermally expanding fire-retardant coating based on an epoxy dianic resin binder and an amine hardener and oxidized graphite as the main intumescent filler is multistage.

The critical temperature of the coating transition to an active state, corresponding to the initiation of intumescence, has been quantitatively determined.

*Conclusions.* It has been confirmed that the oxidized graphite in the analyzed fire-retardant coating provides a high endothermic effect, which confirms the effectiveness of the fire-retardant coating in fire conditions. The data obtained allow to quantitatively assess the impact of various decomposition stages in the fire-retardant effectiveness of the formulation.

**Keywords:** fire safety, fire-protective coatings, intumescent coatings, intercalated graphite, thermal analysis, TG, DSC, pyrolysis, oxidation, fire resistance

**For citation:** Komarova M.A., Shalabin M.V. Analysis of the thermal decomposition of a fire-retardant intumescent coating based on oxidized graphite. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 1(48), pp. 213–225. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-213-225](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-213-225)

#### **Authors contribution statement**

Komarova M.A. – setting the research aim, analysis and interpretation of the received data, formulating of conclusions, writing the text of the article.

Shalabin M.V. – performing of the experimental part, selection and analysis of literary sources, editing the text of article.

#### **Funding**

The study was carried out under the contract between JSC Science and Research Center of Construction and JSC «Unichimtek».

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest

*Received 27.01.2026*

*Revised 24.02.2026*

*Accepted 27.02.2026*

## **Введение**

В настоящее время обеспечение требуемых пределов огнестойкости металлических строительно-конструктивных конструкций является одной из приоритетных задач в области пожарной безопасности зданий и сооружений [1]. Среди широкого спектра средств огнезащиты вспучивающиеся огнезащитные покрытия (ВОП) занимают особое место благодаря способности при нагревании формировать многократно увеличивающийся в объеме теплоизолирующий коксовый слой, эффективно защищающий металлоконструкции от быстрого прогрева [2, 3].

Классические ВОП часто включают в свой состав углеродные материалы, такие как графит, выполняющие роль каркасообразующего агента. Однако в условиях реального пожара (окислительная атмосфера) углеродная фаза может подвергаться интенсивному окислению, что приводит к потере массы защитного слоя и дополнительному тепловыделению, снижая общую эффективность покрытия [4]. Одним из перспективных направлений модификации таких систем является применение интеркалированного графита. Введение в межслойное пространство графита молекул-гостей (интеркалянтов) позволяет изменять его химическую активность, температурную устойчивость и расширяющую способность, что потенциально может повысить огнезащитные характеристики всего композита [5–8].

Для объективной оценки огнезащитного потенциала и понимания механизма работы таких сложных многокомпонентных систем необходимо детальное исследование их поведения при высокотемпературном воздействии. Синхронный термический анализ представляет собой наиболее информативный комплексный метод, позволяющий в одном эксперименте регистрировать изменение массы образца (термогравиметрия, ТГ) и тепловые эффекты (дифференциальная сканирующая калориметрия, ДСК) в контролируемой атмосфере [9, 10]. Сравнение поведения материала в инертной (аргон) и окислительной (кислород) атмосферах позволяет разделить

процессы пиролиза и окисления, количественно оценить их энергетический вклад и определить температурные диапазоны стабильности [11].

Особенностью проведения ДСК-эксперимента интумесцентных покрытий является нарушение теплопередачи от разрушающегося материала к тиглю и далее к сенсору, что происходит за счет спонтанного образования и схлопывания пустот в покрытии при термодеструкции покрытия. Подтверждено, что данный эффект сильнее заметен в корундовых тиглях (с меньшей теплопроводностью), меньше – в тиглях из платины [12]. Поэтому термический анализ методами ТГ/ДСК в данной работе проведен в платиновых тиглях.

Проведено сравнительное исследование термического разложения терморасширяющегося огнезащитного покрытия на основе связующего из эпоксидной диановой смолы и аминного отвердителя и окисленного графита как основного интумесцентного наполнителя в атмосферах аргона и кислорода.

Целью работы является установление механизма его термической деструкции, идентификация ключевых стадий (интумесценция, структурирование углеродного каркаса, стабилизация и деградация пенококса) и количественная оценка их параметров (температура, остаточная масса, тепловой эффект), а также определение критической температуры перехода покрытия в активное состояние, что необходимо для прогнозирования огнезащитной эффективности.

## Материалы и методы

Объектами исследования являются образцы терморасширяющегося огнезащитного покрытия на основе связующего из эпоксидной диановой смолы, аминного отвердителя и окисленного графита как основного интумесцентного наполнителя в виде навесок дисперсного порошка массой до 5 мг, полученных путем измельчения высушенного покрытия, а также окисленный графит в виде навесок порошка массой до 2,5 мг.

Термический анализ проводился методами синхронной термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии (ТГ/ДСК). Испытания выполнены на автоматизированном синхронном термоанализаторе NETZSCH STA 449 F5 Jupiter, оснащенный программным комплексом Proteus Thermal Analysis для сбора и обработки данных. Исследуемые образцы помещали в платиновый тигель и закрывали платиновой крышкой. Подробные условия проведения экспериментов приведены в Таблице 1.

Таблица 1

### Условия термического анализа (ТГ/ДСК)

Table 1

#### Thermal analysis conditions (TG/DSC)

Параметр условия испытаний	Атмосфера Ar (инертная)	Атмосфера O <sub>2</sub> (окислительная)
Термопара	Платина/платино-родий (тип S)	Платина/платино-родий (тип S)
Тигель (материал, объем)	сплав платины с родием (10 %) (Pt/Rh), 80 мкл	сплав платины с родием (10 %) (Pt/Rh), 80 мкл
Масса образца	до 5 мг (порошок)	до 2,5 мг (порошок)
Атмосфера	Аргон (Ar), 30 мл/мин	Кислород (O <sub>2</sub> ), 30 мл/мин
Скорость нагрева	10 К/мин	10 К/мин
Диапазон температур	24 °С → 1000 °С	24 °С → 1000 °С
Режим измерения ДСК	Корректированный	Корректированный

Тепловыделение исследуемых образцов определяли как суммарную теплоту ( $\Delta H$ , Дж/г), рассчитанную с помощью программного приложения по площади комплексных пиков наблюдаемых эффектов при обработке кривых ДСК.

## Результаты

Выбор контрастных газовых сред в данном исследовании является методологической основой для разделения и количественной оценки процессов термического разложения.

Атмосфера аргона является химически инертной. Проведение анализа в среде аргона позволяет изучить процессы пиролиза (термического разложения в отсутствие кислорода) компонентов покрытия: сублимацию и разложение интумесцентных компонентов, реструктуризацию углеродного каркаса.

Атмосфера кислорода моделирует окислительные условия реального пожара. Исследование в среде кислорода направлено на выявление процессов термоокислительной деструкции, главным образом – окисления углеродной фазы.

Сравнение результатов, полученных в инертной и окислительной атмосферах, позволяет количественно оценить вклад экзотермических реакций окисления в общий тепловой баланс, определить потерю массы каркаса и, следовательно, спрогнозировать поведение покрытия в разных условиях пожара.

На рис. 1–2 представлены сравнительные термогравиметрические (ТГ) и дифференциально-термогравиметрические (ДТГ) кривые исследуемого терморасширяющегося огнезащитного покрытия на основе связующего из эпоксидной диановой смолы, аминного отвердителя и окисленного графита как основного интумесцентного наполнителя, полученные в атмосферах аргона и кислорода.

В инертной атмосфере аргона в интервале 190–320 °С наблюдается комплексный ДТГ-пик, соответствующий активной фазе процесса интумесценции и сопровождающийся интенсивной потерей массы. Основная массопотеря (~45 %) происходит в диапазоне 190–520 °С и связана с эндотермическими реакциями интумесцентных компонентов и пиролизом вспененного каркаса с выделением газов. После 520 °С кривая выходит на плато, демонстрируя высокую термостабильность образовавшегося углеродно-неорганического каркаса. Зольный остаток при 1000 °С составляет 53,21 %, что подтверждает наличие значительной доли термостабильных компонентов.

В окислительной атмосфере кислорода начальный этап интумесценции приходится на ~190–260 °С. При данных температурах в интумесцентных покрытиях происходит разложение полифосфатов и их эндотермическая реакция с полиолами [13]. При температуре ~200–320 °С начинается процесс вспенивания окисленного графита и интенсивное образование терморасширенного слоя огнезащитного покрытия.

Около 370°С углеродно-фосфорная пена начинает затвердевать, что завершает начальный этап ее формирования. В интервале 370–650°С происходит образование новых углеродсодержащих продуктов каркаса, в том числе за счет окислительной термодеструкции эпоксидной полимерной матрицы.

При температуре свыше 800 °С начинается стадия окисления каркаса, в результате конечный остаток при 1000 °С снижается до 26,42 %.

Разница в остаточной массе (~27 %) количественно характеризует долю горючего углеродного компонента (в том числе полимерного связующего), который в условиях пожара полностью выгорает.

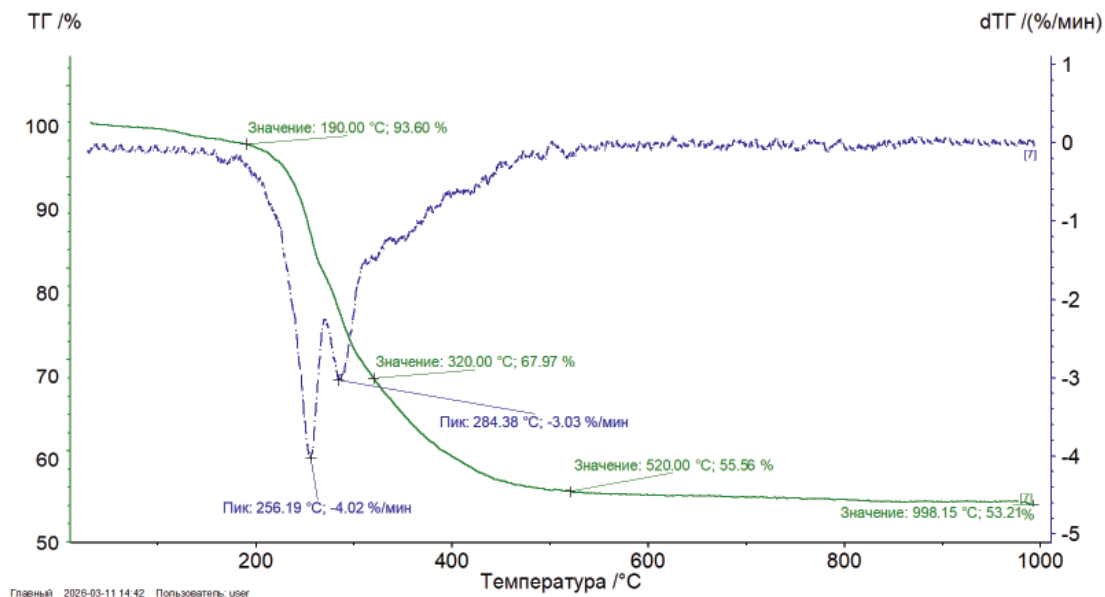


Рис. 1. Результаты термического анализа огнезащитного покрытия в атмосфере аргона  
 Fig.1. Results of thermal analysis of fire-protective coating in an argon atmosphere

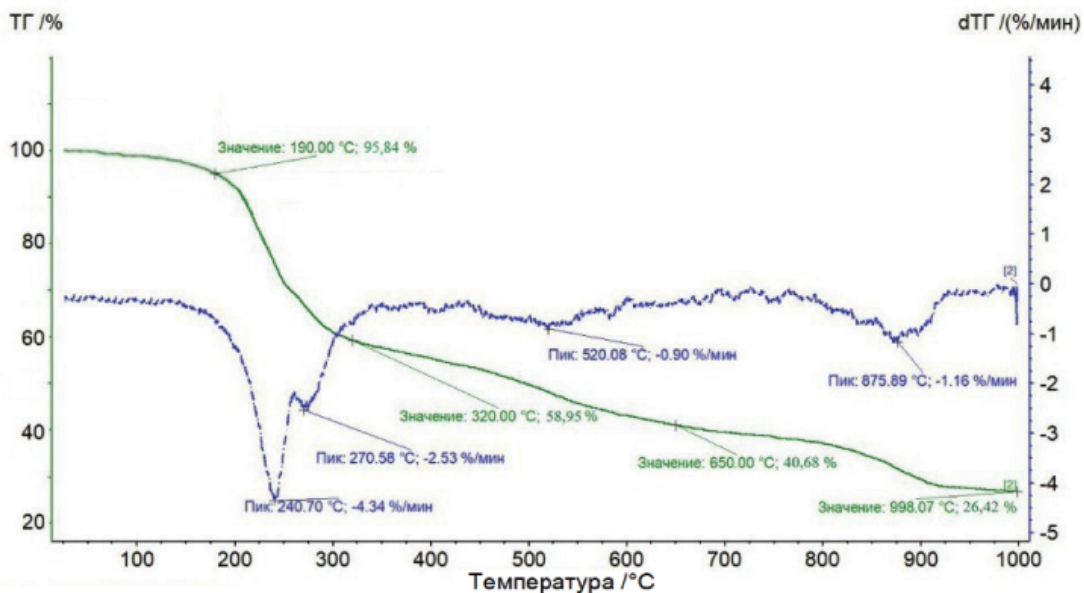


Рис. 2. Результаты термического анализа огнезащитного покрытия в атмосфере кислорода  
 Fig. 2. Results of thermal analysis of fire-protective coating in an oxygen atmosphere

Термограммы исследуемого покрытия в атмосферах аргона и кислорода, представленные на рис. 3 характеризуют энергетический профиль термического разложения покрытия в контрастных средах.

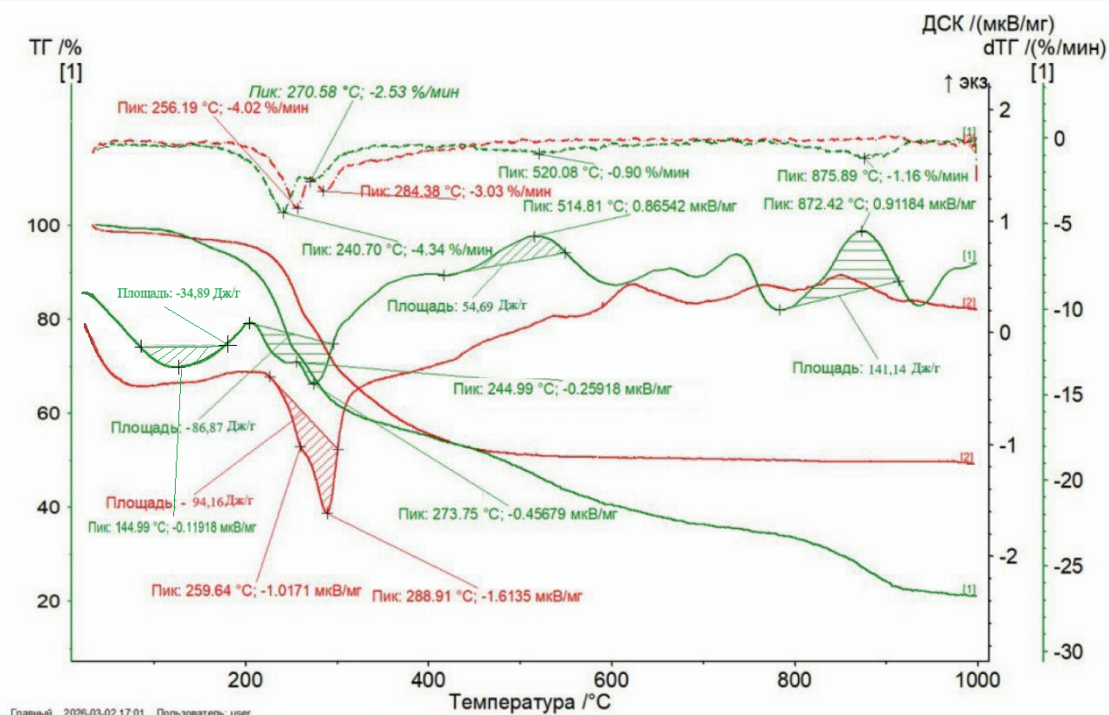


Рис. 3. Термограммы огнезащитного покрытия в атмосфере аргона (красные линии) и в атмосфере кислорода (зеленые линии)

Fig. 3. Thermograms of fire-retardant coating in an argon atmosphere (red lines) and in an oxygen atmosphere (green lines)

Определено, что идентификационные характеристики ТГ- и ДТГ- кривых в диапазоне температур 190–320 °C показывают отсутствие существенных различий между кислородсодержащей и бескислородной атмосферой из чего следует, что реакции окисления с газообразным кислородом мало участвуют в реакциях интумесценции. Об этом свидетельствуют и схожие эндотермические пики на ДСК-кривых в диапазоне температур 190–320 °C.

Однако, сравнительный анализ ДСК- кривых огнезащитного покрытия в инертной и окислительной атмосферах позволяет также сделать вывод об участии кислорода в процессе структурирования и деградации пенококса исследуемого покрытия.

ДСК-кривая огнезащитного покрытия в инертной атмосфере не имеет выраженных экзотермических эффектов, в то время как в атмосфере кислорода можно выделить два экзотермических пика, согласующихся с ДТГ-пиками в аналогичных температурных диапазонах. Первый из них с пиковой температурой 514,81 °C и с энтальпией 54,69 Дж/г связан с окислением эпоксидной матрицы [14], а второй с пиковой температурой 872,42 °C и с энтальпией 141,14 Дж/г характеризует окисление углеродсодержащих продуктов каркаса пенококса.

На основании анализа полученных данных можно сделать вывод, что энергетический профиль пиролиза огнезащитного покрытия в атмосфере аргона отражает потенциал огнезащитного покрытия, так как в полной мере характеризует стадию активной интумесценции, протекающую в диапазоне температур 190–320 °C и позволяет оценить массовую долю термостабильных компонентов.

Полученные качественные характеристики ТГ/ДТГ анализа и данные тепловых эффектов по ДСК позволяют выделить основные этапы термодеструкции исследуемого покрытия в атмосферах аргона и кислорода, представленные в Таблице 2.

Таблица 2

**Основные этапы термодеструкции в атмосферах аргона и кислорода**

Table 2

**The main stages of thermal destruction in argon and oxygen atmospheres**

Основные этапы и их характеристики	Атмосфера аргона				Атмосфера кислорода			
	Температурный интервал, °С	Остаточная масса, %	ДТГ-пики, °С%/мин	Тепловые эффекты, °С / Дж/г	Температурный интервал, °С	Остаточная масса, %	ДТГ-пики, °С%/мин	Тепловые эффекты, °С / Дж/г
Фаза активной интумесценции	190–320	67,97	256,19/ 4,02; 284,38/3,03	259,64; 288,91 / –94,16	190–320	58,95	240,7/ 4,34; 270,58/2,53	244,99; 273,75 / –86,87
Структурирование углеродного каркаса	320–520	55,56	-	-	320–650	40,68	520,08/ 0,90	514,81 / 54,69
Стабилизация / деградация пенококса	520–1000	53,21	-	-	650–1000	26,42	875,89/ 1,16	872,42/ 141,14

Для оценки возможного вклада окисленного графита, являющегося основным интумесцентным наполнителем, в наблюдаемые тепловые эффекты были сняты термограммы окисленного графита в атмосфере аргона и кислорода. Сравнительные результаты представлены на рис. 4.

На ДСК-кривых в атмосфере кислорода чистого окисленного графита и огнезащитного покрытия на его основе наблюдаются пики при температуре около 150 °С, что связано с выделением адсорбированной воды. Вспенивание окисленного графита требует энергии для превращения интеркалянтного соединения в газы и разделения графеновых плоскостей [15], о чем свидетельствуют эндотермические пики при 243,49 °С на термограмме окисленного графита в атмосфере аргона и при 242,09 °С на термограмме окисленного графита в атмосфере кислорода. Сравнение ДСК-кривых, показанных на рис. 4 подтверждает, что вступление окисленного графита в процесс интумесценции огнезащитного покрытия начинается в температурном диапазоне 200–250 °С и вносит дополнительный эндотермический эффект.

Зольный остаток окисленного графита в атмосфере кислорода составляет 5,8 %, а на ДСК-кривой при пиковой температуре 740,55 °С наблюдается значительный экзо-эффект, при этом окисление вспененного графита в составе огнезащитного покрытия происходит при пиковой температуре 872,42 °С. Данный эффект вероятнее всего связан со взаимодействием окисленного графита с полимерной матрицей и приводит к смещению процесса окисления в высокотемпературную область, о чем свидетельствуют результаты работы [16]. Кроме того, слой углерода, образованный наполнителями на основе окисленного графита на поверхности эпоксидной матрицы, действует как тепловой барьер и увеличивает температуру зажигания композитов [17].

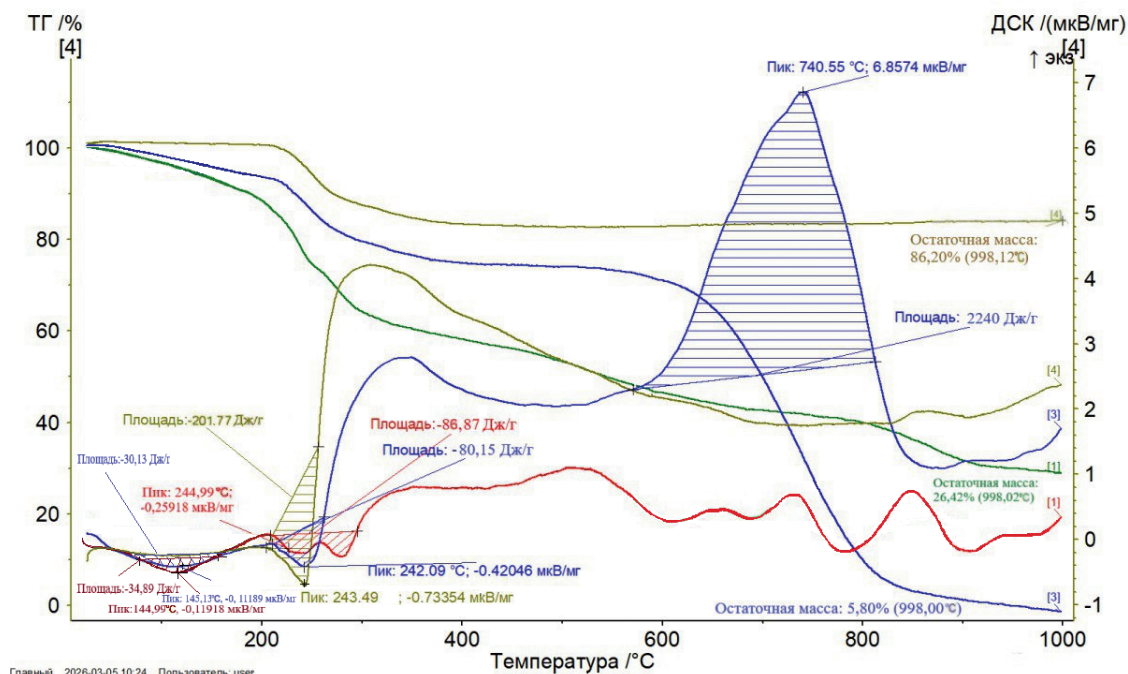


Рис. 4. ТГ и ДСК-кривые: огнезащитного покрытия в атмосфере кислорода – [1]; окисленного графита в атмосфере кислорода – [3]; окисленного графита в атмосфере аргона – [4]

Fig. 4. TG and DSC curves: fire-retardant coating in an oxygen atmosphere – [1]; oxidized graphite in an oxygen atmosphere – [3]; oxidized graphite in an argon atmosphere – [4]

При этом, температура начала интумесценции, соответствующая температуре размягчения полимерной матрицы является ключевым параметром, определяющим огнезащитную эффективность покрытия.

Дифференциально-сканирующий калориметр регистрирует тепловой поток как функцию температуры по формуле (1):

$$q = f(T), \quad (1)$$

где  $q$  – удельный тепловой поток, мкВ/мг (или мВт/мг),

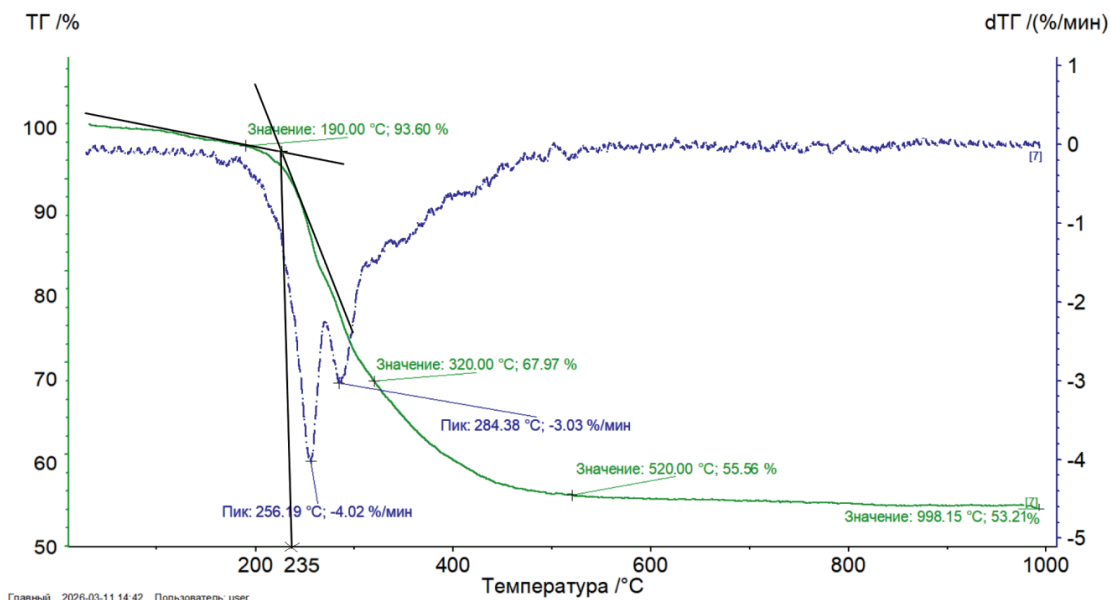
$T$  – температура, °С.

Температура начала интумесценции соответствует температуре размягчения полимерного огнезащитного покрытия и проявляется в виде излома линии ДСК-кривой без выраженного пика.

Для количественного определения данной температуры можно использовать метод пересечения касательных, рекомендованный в термическом анализе полимерных материалов [18]. Результат графического определения температуры размягчения полимерной матрицы представлен на рис. 5.

Более точное значение можно определить, учитывая, что в температурной области до фазового перехода ( $T < T_{ф.п.}$ ) тепловой поток аппроксимируется линейной функцией по формуле (2):

$$q_1(T) = a_1 T + b_1 \quad (2)$$



**Рис. 5.** Графическое определение температуры размягчения полимерной матрицы  
**Fig. 5.** Graphical determination of the softening temperature of the polymer matrix

В области после фазового перехода ( $T > T_{ф.п}$ ) базовая линия описывается другой линейной зависимостью по формуле (3):

$$q_2(T) = a_2 T + b_2 \quad (3)$$

где  $a_1, a_2$  – коэффициенты наклона (связаны с эффективной теплоемкостью);  
 $b_1, b_2$  – свободные члены.

Температура фазового перехода определяется как температура пересечения аппроксимирующих прямых по зависимости (4):

$$q_1(T_{ф.п}) = q_2(T_{ф.п}) \quad (4)$$

Откуда (по формуле (5)):

$$T_{ф.п} = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \quad (5)$$

По аппроксимации полученной ДСК-кривой огнезащитного покрытия в инертной среде в программном обеспечении Proteus Thermal Analysis получены следующие коэффициенты (формулы (6) и (7)):

$$q_1(T) = -0,0711T + 107,11 \quad (6)$$

$$q_2(T) = -0,35T + 172 \quad (7)$$

Таким образом температура размягчения полимерной матрицы для огнезащитного покрытия составила 233 °С.

## Заключение

На основании проведенного комплексного термического анализа (ТГ/ДСК) терморасширяющегося огнезащитного покрытия на основе связующего из эпоксидной диановой смолы, аминного отвердителя и окисленного графита как основного интумесцентного наполнителя в контрастных атмосферах аргона и кислорода определены ключевые закономерности его разложения.

Установлено, что окисленный графит в составе огнезащитного покрытия вносит вклад в эндотермические реакции и снижает горючесть полимерной матрицы.

Энергетический профиль пиролиза огнезащитного покрытия в атмосфере аргона отражает потенциал огнезащитного покрытия, так как в полной мере характеризует стадию активной интумесценции и термостабильность компонентов.

Количественно определена критическая температура перехода покрытия в активное состояние. Методом пересечения касательных к базовой линии ДСК-кривой в аргоне установлена температура размягчения полимерной матрицы. Данная температура соответствует температуре начала термолитического разложения интумесцентных наполнителей согласно данным ТГ. Близость этих температур характеризует согласованный характер процессов расклевывания полимерного связующего и начала термического расширения окисленного графита, необходимого для дальнейшего образования целостного огнезащитного покрытия.

## Список литературы

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 2008. № 30 (ч. 1). Ст. 2800.
2. Иванова А.А., Мезенцева И.А., Закиров М.Ф. Современные подходы к повышению огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий для металлических конструкций с учётом параметров реального пожара // *Актуальные исследования*. 2026. № 10 (296). Ч. I. С. 29–34.
3. Павлович А.В., Дринберг А.С., Машляковский Л.Н. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия. Москва: ЛКМ-пресс, 2018. 487 с.
4. Антипов В.В., Венедиктова М.А., Пушница А.С. Исследование возможности расширения температурного интервала эксплуатации огнезащитных материалов // *Труды ВИАМ*. 2024. № 10 (140). С. 74–83. EDN: JGUFHI.
5. Гильманшина Т.Р., Дубова И.В., Королева Г.А., Васильев Г.В. Условия получения окисленного графита с высокой способностью к терморасширению // *Обогащение руд*. 2023. № 5. С. 13–17.
6. Богданова В.В., Кобец О.И. Огне-термозащитные свойства термовспенивающихся композитов на основе полиолефинов в зависимости от природы и содержания наполнителей // *Полимерные материалы и технологии*. 2018. Т. 4. № 4. С. 64–71.
7. Wang Zhan, Zhiyuan Xu, Le Chen, Lixia Li, Qinghong Kong, Mingyi Chen, Qingwu Zhang, Juncheng Jiang. Research progress of carbon-based materials in intumescent fire-retardant coatings: A review. *European Polymer Journal*, 2024, vol. 220, p.113486.
8. Gardelle B., Duquesne S., Vandereecken P., Bourbigou S. Characterization of the carbonization process of expandable graphite/silicone formulations in a simulated fire. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, vol. 98, no. 5, pp. 1052–1063.
9. Инкина П.С., Беззапонная О.В. Оценка термостойкости строительных материалов методом синхронного термического анализа // *Актуальные проблемы развития технических наук: сборник статей участников XXIV Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки»*. Екатеринбург: Уральский федеральный университет. 2021. С. 26–30. ISBN 978-5-91256-537-3.
10. Барановский В.М., Задорина Е.Н., Крутилин В.М. Современные методы исследования полимерных материалов: исследование полимерных материалов методами термического анализа. Москва: Изд-во МАИ, 1993. 67 с.

11. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесообразующих пород Средней Сибири // *Сибирский лесной журнал*. 2015. № 6. С. 17–30.
12. Головина Е.В. Методика оценки термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для объектов нефтегазовой отрасли: дис. канд. техн. наук: 05.26.03. Екатеринбург, 2019. 130 с.
13. Халтуринский Н.А., Крупкин В.Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. Т. 20. № 10. С. 33–36.
14. Mastalska-Popławska J. Effect of Modified Halloysite/Expandable Graphite Addition on Thermal and Intumescent Properties of the Fire-Resistant Paints for Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 48, pp. 16087–16095.
15. Vast P. Thermal behaviour of graphite intercalation compounds with oxide of difluoride of phosphoryl. *Journal of Thermal Analysis*, vol. 41, 1994, pp.1433–1439.
16. Галигузов А.А., Яшин Н.В., Авдеев В.В. Использование бутадиен-нитрильного каучука в составе интумесцентных огнезащитных материалов на основе пластифицированного поливинилхлорида // *Тонкие Химические Технологии*. 2026. Т. 20. № 1. С. 73–89.
17. Bannov A.G., Nazarenko O.B., Maksimovskii E.A., Popov M.V., Berdyugina I.S. Thermal Behavior and Flammability of Epoxy Composites Based on Multi-Walled Carbon Nanotubes and Expanded Graphite: A Comparative Study. *Applied Sciences*, vol. 10, 2020, iss.19, 13 p.
18. ISO 11357-1:2023. Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC). Part 1: General principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2023. 24 p.

## References

1. Technical Regulation on Fire Safety Requirements: Federal Law No. 123-FZ of July 22, 2008. Collection of Legislation of the Russian Federation. 2008. № 30 (p. 1). St. 2800.
2. Ivanova A.A., Mezentseva I.A., Zakirov M.F. Modern approaches for improving the fire protection effectiveness of intumescent coatings for steel structures, considering the parameters of a typical fire. *Actual researches*, 2026, no. 10 [296], P. I, pp. 29–34.
3. Pavlovich A.V., Drinberg A.S., Mashlyakovskii L.N. Fire-retardant intumescent paint coatings. Moscow: LKM-press, 2018. 487 p.
4. Antipov V.V., Venediktova M.A., Pushnitsa A.S. Research of the possibility of expanding the temperature range of operation of fire-retardant materials. *Works of scholars VIAM*, 2024, no. 10 [140], pp. 74–83. EDN: JGUFHI.
5. Gilmanshina T.R., Dubova I.V., Koroleva G.A., Vasiliev G.V. The conditions for obtaining oxidized graphite with high thermal expansion capacity. *Ore enrichment*, 2023, no. 5, pp. 13–17.
6. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Fire-resistant and heat-resistant properties of heat-expandable polyolefin-based composites depending on the nature and content of additives. *Polymer Materials and Technologies*, 2018, no. 4, pp. 64–71.
7. Wang Zhan, Zhiyuan Xu, Le Chen, Lixia Li, Qinghong Kong, Mingyi Chen, Qingwu Zhang, Juncheng Jiang. Research progress of carbon-based materials in intumescent fire-retardant coatings: A review. *European Polymer Journal*, 2024, vol. 220, p. 113486.
8. Gardelle B., Duquesne S., Vandereecken P., Bourbigot S. Characterization of the carbonization process of expandable graphite/silicone formulations in a simulated fire, 2013, vol. 98, no. 5, pp. 1052–1063.
9. Inkina P.S., Bezzaponaya O.V. Assessment of thermal stability of building materials using synchronous thermal analysis. Current issues in the development of technical sciences: a collection of articles by participants in the XXIV Regional Research Competition “Scientific Olympus” in the field of “Technical Sciences.” Yekaterinburg: Ural Federal University 2021, pp. 26–30. ISBN 978-5-91256-537-3.
10. Baranovsky V.M., Zadorina E.N., Krutilin V.M. Modern methods of researching polymer materials: researching polymer materials using thermal analysis methods. Moscow: MAI Publishing House, 1993, 67 p.
11. Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. Thermal analysis of wood from the main forest-forming species of Central Siberia. *Siberian Forest Journal*, 2015, no. 6, pp. 17–30.
12. Golovina E.V. Methodology for assessing the heat resistance of intumescent fire retardants for oil and gas industry facilities: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.26.03. Yekaterinburg, 2019, 130 p.

13. Khalturinsky N.A., Krupkin V.G. About the mechanism of formation of fire-retardant intumescent coatings. *Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 10, pp. 33–36.
14. Mastalska-Popławska J. Effect of Modified Halloysite/Expandable Graphite Addition on Thermal and Intumescent Properties of the Fire-Resistant Paints for Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 48, pp. 16087–16095.
15. Vast P. Thermal behaviour of graphite intercalation compounds with oxide of difluoride of phosphoryl. *Journal of Thermal Analysis*, vol. 41, 1994, pp. 1433–1439.
16. Galiguzov A.A., Yashin N.V., Avdeev V.V. Use of butadiene-nitrile rubber in intumescent fire-retardant materials based on plasticized polyvinyl chloride. *Advanced Chemical Technologies*, 2026, vol. 20, no. 1, pp. 73–89.
17. Bannov A.G., Nazarenko O.B., Maksimovskii E.A., Popov M.V., Berdyugina I.S. Thermal Behavior and Flammability of Epoxy Composites Based on Multi-Walled Carbon Nanotubes and Expanded Graphite: A Comparative Study. *Applied Sciences*, vol. 10, 2020, iss.19, 13 p.
18. ISO 11357-1:2023. Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC). Part 1: General principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2023. 24 p.

## Информация об авторах / Information about the authors

**Мария Александровна Комарова\***, кандидат химических наук, руководитель научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: maria.com5@mail.ru

**Maria A. Komarova**, Cand. Sci. (Chem.), Bureau Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: maria.com5@mail.ru

**Михаил Валерьевич Шалабин**, аспирант, заведующий лабораторией научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Mikhail V. Shalabin**, Graduate Student, Laboratory Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

\*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author