

УДК 614.84

mansurovtx@rambler.ru

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ИНТУМЕСЦЕНТНОГО ТИПА МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**CRITERIA FOR ESTIMATING THE THERMAL RESISTANCE OF FIREPROOF CABLE COATINGS OF DIFFERENT CHEMICAL NATURE OF INTUMESCENT TYPE BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS***Мансуров Т. Х.,**Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург**Mansurov T.,**The Ural Institute of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Yekaterinburg*

В исследовании представлены наиболее оптимальные термоаналитические характеристики ОКП, полученные методами термического анализа, которые предлагается использовать в качестве критериев оценки термостойкости ОКП различной химической природы методами термического анализа. На основании предложенных критериев была разработана классификация степеней термостойкости ОКП различной химической природы методами термического анализа для условий стандартного режима пожара с последующей апробацией.

Ключевые слова: огнезащитные кабельные покрытия, пенококс, термическая стойкость, синхронный термический анализ, термогравиметрический анализ (ТГ), дифференциальный термогравиметрический анализ (ДТГ), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), критерии оценки термостойкости, стандартный режим пожара.

The study presents the most optimal thermoanalytical characteristics of OCP, obtained by thermal analysis methods, which are proposed to be used as criteria for assessing the thermal stability of OCP of various chemical nature by thermal analysis methods. On the basis of the proposed criteria, a classification of the degrees of thermal stability of OCP of various chemical nature was developed using the methods of thermal analysis for the conditions of a standard fire regime with subsequent approbation.

Keywords: fire retardant cable coatings, coke foam, thermal resistance, synchronous thermal analysis, thermogravimetric analysis (TG), differential thermogravimetric analysis (DTG), differential scanning calorimetry (DSC), criteria for evaluating thermal resistance, standard fire conditions.

Введение

Проведенные исследования огнезащитных кабельных покрытий (далее – ОКП) различной химической природы интумесцентного типа, затронутые в работах [1–6], позволили подойти к вопросу выработки критериев оценки термостойкости ОКП методом синхронного термического анализа с позиции накопленного опыта и достаточного объема эмпирических данных.

Стоит отметить, что для огнезащитных композиций интумесцентного типа, в частности для ОКП, понятие «термостойкость» будет несколько отличаться от классического его понимания [7], характеризующегося способностью веществ и материалов сохранять в неизменном состоянии химическое строение и физические свойства при повышении температуры. Ввиду того, что интумесцентные составы являются много-

компонентным комплексом веществ, которые при воздействии температуры начинают осуществлять фазовые превращения и переходить во вспученное состояние с образованием вспененного коксового слоя, то и термин «термостойкость» будет относиться к конечному результату процесса интумесценции – пенококсу [8]. Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что термостойкость и для ОКП интумесцентного типа – это не что иное, как способность пенококсового слоя сохранять неизменными свои теплозащитные свойства при термическом воздействии реального пожара [8].

В качестве методов исследования предлагается использовать высокоточный метод синхронного термического анализа ввиду его значительной чувствительности, информативности, воспроизводимости полученных результатов, гибкости проведения эксперимента, малого объема анализируемого огнезащитного состава и наличия возможности обработки полученных данных с использованием программного обеспечения. Исследования, предлагаемые к рассмотрению в данной работе, проводились на платиновых тиглях со скоростью нагрева 20 °С/мин и обрабатывались с помощью программного обеспечения NETSCH Proteus Thermal Analysis.

Результаты исследований и их обсуждение

Процесс интумесценции огнезащитного состава протекает в несколько стадий и изменение термоаналитических характеристик в области температур, присущих каждой из них, позволяет интерпретировать значения этих характеристик в контексте сложившихся представлений о «работе» огнезащитных интумесцентных составов [9, 10].

Первой значимой термоаналитической характеристикой ОКП интумесцентного типа является потеря массы огнезащитным составом (Δm). Изменение массы огнезащитной композиции определяется с использованием термогравиметрического анализа (далее – ТГ) и в различных интервалах

температур свидетельствует о разных процессах, протекающих в составе. Потеря массы ОКП в интервале температур 200–450 °С означает процесс наступления интумесценции или перехода состава во вспученное состояние. Чем значительнее протекает этот процесс, тем большее количество огнезащитной композиции претерпевает фазовые переходы и участвует в образовании пенококсового слоя. Анализ литературных источников и полученные эмпирические данные позволяют утверждать, что при достижении температуры 450 °С и более, в огнезащитных композициях интумесцентного типа наступает следующая стадия – выгорание связующего огнезащитного состава, а также структурирование (карбонизация) пенококса. Минимальное значение потери массы и сдвиг наступления этого процесса в область более высоких температур могут свидетельствовать о достаточно высокой термостойкости ОКП. Окончательное формирование пенококса, с завершением процесса интумесценции и выгорания связующего, наступает к 600 °С [11], при этом изменение массы при дальнейшем увеличении температуры можно охарактеризовать как наступление процесса горения и деструкции пенококса с ухудшением теплоизолирующих свойств. Термоаналитической характеристикой, наглядно демонстрирующей этот процесс, является зольный остаток (далее – ЗО) ОКП на момент окончания эксперимента при максимальной температуре стандартного режима пожара – 900 °С [12].

Немаловажной термоаналитической характеристикой огнезащитных композиций является показатель скорости потери массы (\dot{m}) огнезащитного состава, получаемый посредством применения дифференциального термогравиметрического анализа (далее – ДТГ). Скорость потери массы применяется совместно с температурой достижения максимума ДТГ-пика ввиду наилучшей демонстрации протекания процессов перехода ОКП во вспученное состояние при росте термического воздействия.

В температурном интервале 200–300 °С, свидетельствующем о наступлении процесса интумесценции, скорость потери массы и температура максимума ДТГ-пика позволяют охарактеризовать данные изменения, что целесообразно использовать при оценке термостойкости огнезащитного покрытия. Также целесообразно использовать данные ДТГ анализа и в процессе формирования пенококсового слоя в интервале температур 300–450 °С, как одну из термоаналитических характеристик термической стойкости огнезащитных составов интумесцентного типа.

При температурах свыше 450 °С в ОКП интумесцентного типа наступает следующий процесс – выгорание связующего одновременно с карбонизацией (структурированием) пенококкса, при этом в интервале 500–700 °С начинается процесс горения пенококсового слоя. Эмпирические данные, полученные с помощью ДТГ-анализа при

этих значениях температур, дополняют представления о «работе» интумесцентных составов в общем и термостойкости огнезащитных кабельных покрытий, в частности.

Следующим видом термического анализа, позволяющим дать значительное представление о тепловых эффектах фазовых переходов, происходящих в ОКП при высокотемпературном воздействии, является дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК-анализ). Посредством данного вида анализа получают следующие термоаналитические характеристики: температуры максимумов ДСК-пиков ($T_{ДСК}$) и суммарный эндотермический эффект ($\sum Q_{энд}$), позволяющий количественно оценить способность поглощать теплоту составом в процессе фазовых переходов.

Результаты исследований ОКП различной химической природы интумесцентного типа методом термогравиметрии представлены на рис. 1.

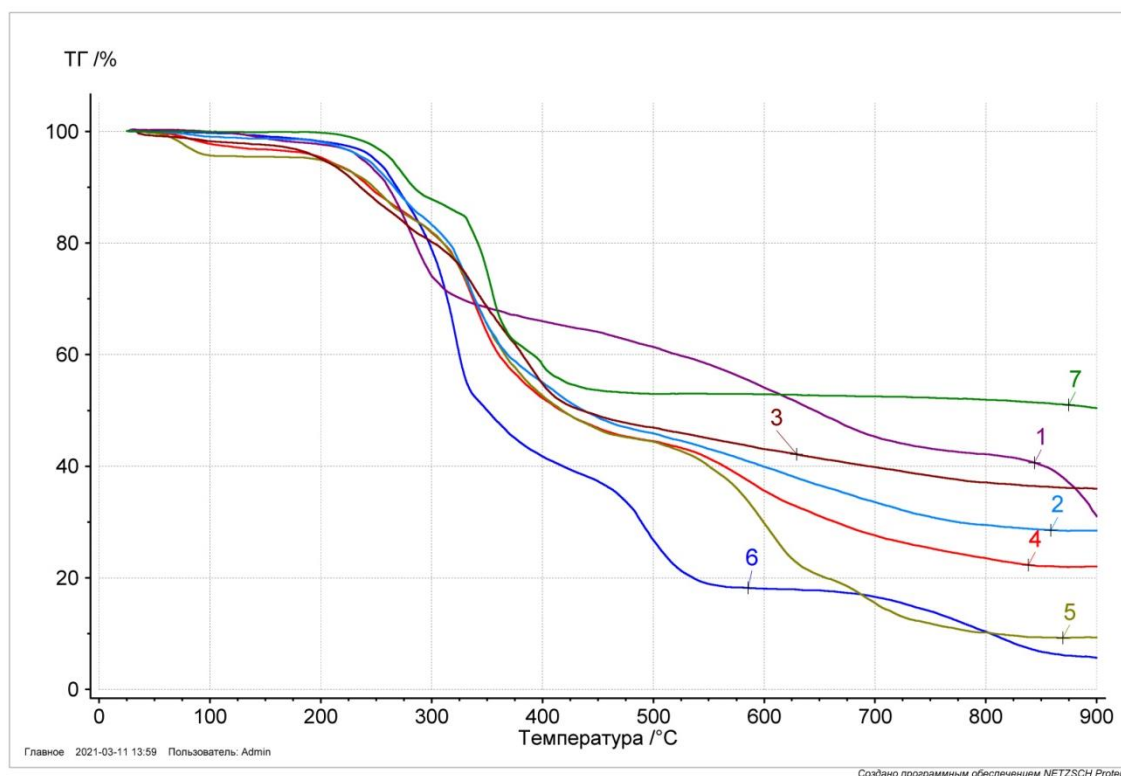


Рисунок 1. Термограммы ТГ-анализа ОКП различной химической природы:

1 – ОКП на основе органического растворителя; 2, 3, 4, 5, 6 – ОКП на основе водной полимерной дисперсии; 7 – ОКП на основе низкомолекулярного каучука

Проведенный анализ термогравиметрических кривых исследуемых ОКП позволил установить, что потеря массы (Δm) интенсивнее всего происходит у составов на водной основе. У покрытий на основе низкомолекулярного каучука и органического растворителя этот показатель существенно ниже, что в районе $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (начало процессов интумесценции), что при температурах выше $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ при наступлении процесса выгорания связующего и карбонизации пенококса. Сравнительно малый показатель потери массы ОКП при температурах более $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ характеризует термическую стойкость химического связующего к выгоранию. Исследуемые составы на основе низкомолекулярного каучука и органического растворителя демонстрируют более высокую термическую стойкость по сравнению с покрытиями на водной основе и по показателю зольного остатка на момент окончания

эксперимента при достижении температуры $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (30^{900}). Этот показатель у некоторых составов на водной основе может составлять 8–10% от первоначальной массы состава (ОКП № 5, № 6). Такие низкие значения данного показателя возможны практически при полном выгорании связующего и пенококса к температуре $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, что указывает на очень низкую термическую стойкость исследуемых составов и согласуется с результатами ДТГ- и ДСК-анализа этих покрытий.

Проведенный ТГ анализ исследуемых огнезащитных композиций указывает на наличие зависимости термостойкости от химической природы связующего огнезащитного состава.

Результаты исследований ОКП различной химической природы интумесцентного типа методом дифференциального термогравиметрического анализа представлены на рис. 2.

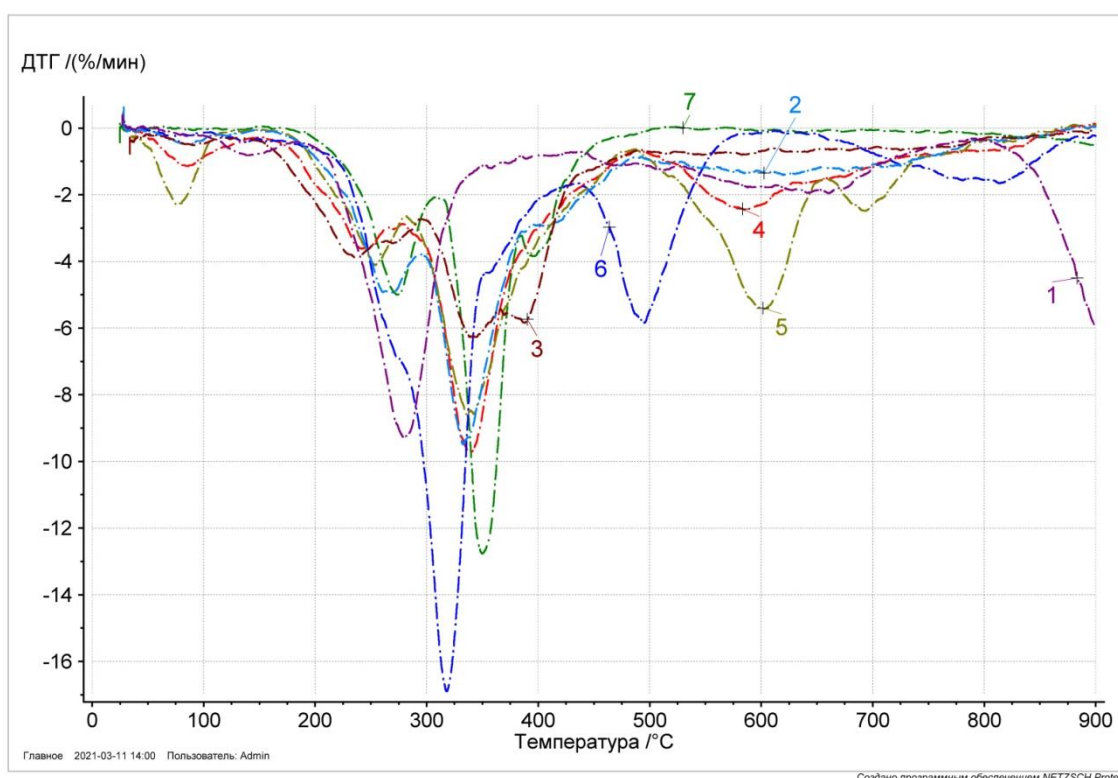


Рисунок 2. Термограммы ДТГ-анализа ОКП различной химической природы: 1 – ОКП на основе органического растворителя; 2, 3, 4, 5, 6 – ОКП на основе водной полимерной дисперсии; 7 – ОКП на основе низкомолекулярного каучука

При проведении ДТГ-анализа исследуемых ОКП различной химической при-

роды интумесцентного типа были определены области температур, в которых наблюдается максимальная скорость потери массы

($\nu_{\text{ДТГ}}$). Ярко выраженные изменения в покрытиях происходят в интервале температур 200–450 °С и проявляются увеличением скорости потери массы ОКП, что характеризуется протеканием процесса интумесценции. Однако у составов различной химической природы пенококсообразование имеет ряд отличительных особенностей. Достижение максимума ДТГ-пика при температуре около 280 °С и скорости потери массы близкой к 12 %/мин наблюдается у покрытия на основе органического растворителя и представлено на графике в виде одного пика, что может быть охарактеризовано использованием интеркалированного графита в рецептуре, у которого процесс интумесценции происходит в одну стадию. У некоторых составов на водной основе (ОКП № 6) этот процесс происходит аналогично, только температура максимума ДТГ пика смещена в область более 300 °С, а скорость потери массы составляет 15–18 %/мин.

Кривые ДТГ-анализа для остальных огнезащитных композиций различной химической природы имеют более одного ДТГ-пика и могут указывать на наличие в рецеп-

туре покрытия пентаэритрита (ПЭР), полифосфата аммония (ПФА) и меламина (МА). Это выражается в присутствии нескольких последовательно расположенных ДТГ-пиков с начала наступления момента интумесценции. При температуре от 230 °С до 280 °С и скоростью потери массы от 4 до 6 %/мин наступает первый пик. Второй пик у исследуемых составов наблюдается от 330 до 350 °С со сравнительно большей скоростью потери массы в пределах 7–17 %/мин.

Ярко выражается и процесс перехода в стадию выгорания связующего с карбонизацией пенококка при температурах выше 450 °С с наличием ДТГ-пика в области температур 500–700 °С. Присутствие ДТГ-пика в этом интервале температур со значительной скоростью потери массы будет свидетельствовать о термоокислительной деструкции пенококка с потерей теплоизолирующих свойств и, следовательно, низкой термостойкости ОКП.

Результаты исследований ОКП различной химической природы с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии представлены на рис. 3.

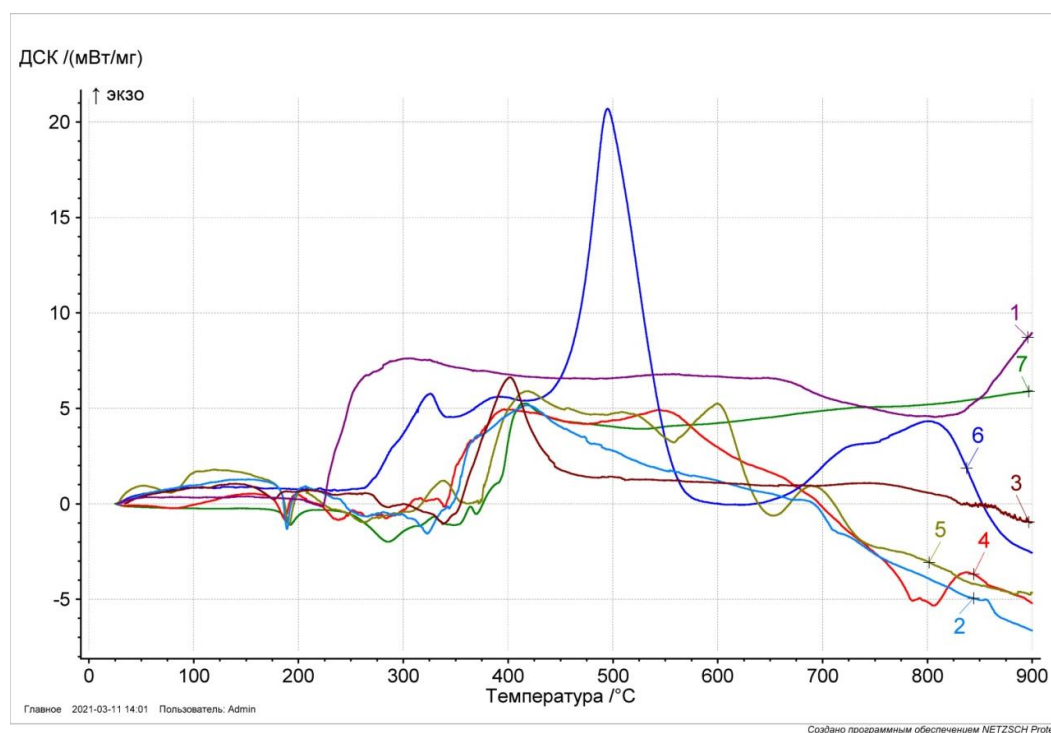


Рисунок 3. Термограммы ДСК-анализа ОКП различной химической природы: 1 – ОКП на основе органического растворителя; 2, 3, 4, 5, 6 – ОКП на основе водной полимерной дисперсии; 7 – ОКП на основе низкомолекулярного каучука

Метод дифференциальной сканирующей калориметрии позволил дополнить имеющиеся представления о протекании процессов формирования пенококса у исследуемых видов ОКП различной химической природы. В целях уточнения интервалов температур, указывающих на наступление процессов фазовых переходов в огнезащитных композициях при термическом воздействии, могут быть использованы температуры максимумов ДСК-эндотермических пиков. Значимый эндопик ($T_{ДСК1}$) при температуре 185 °С и выше на кривых ДСК-анализа, предположительно, описывает процесс начала морфологического перехода ПЭР, который завершается к 250 °С [9, 10].

Следующая стадия наступает в интервале температур 230–280 °С и завершается к 350 °С. Подавляющая часть данной стадии заключается в протекании последовательных и параллельных реакций выстраивания углеродного каркаса пенококса с образованием газов (CO , CO_2 , NH_3) для осуществления его вспучивания. Как принято считать, в этом интервале температур наступает интенсивное разложение ПФА на аммиак и полифосфорную кислоту в среде меламина.

Для целей определения влияния термоаналитических характеристик на термостойкость ОКП в условиях стандартного пожара применялся корреляционный анализ. В качестве возможных критериев оценки термостойкости ОКП интумесцентного типа для температурных условий стандартного пожара рассматривались следующие показатели:

- значение потери массы при температуре 200 °С (Δm_{200});
- значение потери массы при температуре 600 °С (Δm_{600});
- зольный остаток при температуре 900 °С ($3O^{900}$);
- температуры максимумов ДТГ пиков ($T_{ДТГ1}$ в интервале температур 200–

300 °С, $T_{ДТГ2}$ в интервале температур 300–450 °С, $T_{ДТГ3}$ в интервале температур 500–700 °С);

- скорости потери массы ДТГ-пиков ($v_{ДТГ1}$ в интервале температур 200–300 °С, $v_{ДТГ2}$ в интервале температур 300–450 °С, $v_{ДТГ3}$ в интервале температур 500–700 °С);
- суммарный эндотермический эффект ($\sum Q_{эндо}$).

Изначально строились диаграммы разброса и устанавливался коэффициент достоверности аппроксимации (R^2), после чего определялась сила корреляционных связей посредством получения коэффициента корреляции Пирсона (r_{xy}) для каждой термоаналитической характеристики. Оценка статистической значимости корреляционных связей осуществлялась после нахождения значения t-критерия Стьюдента.

Проведя анализ литературных источников и полученных эмпирических данных с использованием методов корреляционного анализа, было установлено, что целесообразнее всего использовать в качестве критериев оценки термостойкости огнезащитных кабельных покрытий интумесцентного типа различной химической природы для температурных условий стандартного пожара следующие термоаналитические характеристики:

- значение потери массы при температуре 280 °С (Δm_{280}), где $R^2=0,94$, $r_{xy}=-0,97$, $t_{расч}=-8,92$ при $t_{табл}=2,57$;
- значение потери массы при температуре 600 °С (Δm_{600}), где $R^2=0,86$, $r_{xy}=-0,93$, $t_{расч}=-5,65$ при $t_{табл}=2,57$;
- температура максимума ДТГ-пика ($T_{ДТГ1}$) в интервале температур 200–300 °С, где $R^2=0,83$, $r_{xy}=0,91$, $t_{расч}=4,91$ при $t_{табл}=2,57$.

Критерии оценки термостойкости ОКП методами термического анализа для условий стандартного режима пожара представлены в таблице 1.

Таблица 1

Критерии оценки термостойкости огнезащитных кабельных покрытий различной химической природы интумесцентного типа

Критерий оценки	Значение	Степень термостойкости
Потеря массы, % при 280 °С	≥ 17	3
	11–16	2
	≤ 10	1
Потеря массы, % при 600 °С	≥ 70	3
	51–69	2
	≤ 50	1
Температура максимума ДТГ-пика в интервале температур 200–300 °С, °С	≤ 250	3
	251–268	2
	≥ 269	1

Оценка термической стойкости проводится на основании предложенных выше критериев по результатам проведения испытаний исследуемого огнезащитного состава методами термического анализа.

В качестве примера рассмотрены результаты исследований ОКП различной химической природы интумесцентного типа методами термического анализа (рис. 1-3), которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка термостойкости ОКП различной химической природы интумесцентного типа

Критерий	ОКП № 1	ОКП № 2	ОКП № 3	ОКП № 4	ОКП № 5	ОКП № 6	ОКП № 7
Δm_{280} , %	17,23 (3*)	13,15 (2*)	17,10 (3*)	15,10 (2*)	15,30 (2*)	15,02 (2*)	6,26 (1*)
Δm_{600} , %	45,28 (1*)	62,05 (2*)	56,45 (2*)	67,31 (2*)	70,42 (3*)	80,39 (3*)	46,05 (1*)
$T_{ДТГ}$ (200÷300 °С), °С	281 (1*)	264 (2*)	232 (3*)	239 (3*)	256 (2*)	-	272 (1*)
Степень термостойкости	1**	2	3	2	2	3	1

* Примечание: в скобках указана степень термостойкости в соответствии с предложенными критериями.

** Данный огнезащитный состав по критерию Δm_{280} имеет 3 степень огнестойкости, однако это происходит из-за отсутствия в его составе классических компонентов огнезащитных композиций и перехода во вспученное состояние одномоментно, вместе с этим огневые испытания демонстрируют защитное действие, сопоставимое с ОКП № 7.

Оценка термостойкости ОКП различной химической природы методами термического анализа позволила определить степень термостойкости исследуемых ОКП. Наивысшей степенью термостойкости обладают ОКП на основе низкомолекулярного каучука и органического растворителя, тогда как наименьшей степенью обладают со-

ставы на водной основе, что нашло подтверждение и при проведении натурных огневых испытаний в условиях стандартного режима пожара у исследуемых ОКП.

Выводы

Результаты экспериментов, анализ литературных источников и проведение корреляционного анализа эмпирических

данных позволили дополнить представления о «работе» огнезащитных составов интумесцентного типа, предназначенных для защиты кабельной продукции от термического воздействия.

Произведен выбор наиболее оптимальных термоаналитических характеристик ОКП, получаемых методами термического анализа, которые возможно использовать в качестве критериев оценки термостойкости ОКП различной химической природы методами термического анализа. В качестве критериев были выбраны:

- значение потери массы при температуре 280 °С (Δm_{280});
- значение потери массы при температуре 600 °С (Δm_{600});
- температура максимума ДТГ пика ($T_{дтг1}$) в интервале температур 200–300 °С.

На основании предложенных критериев была выработана классификация степеней термостойкости ОКП различной химической природы методами термического анализа от наивысшей (первой) степени до наименьшей (третьей) степени термостойкости. Данная классификация апробирована на ОКП различной химической природы и показала удовлетворительные результаты, подтвержденные использованием методов огневых испытаний при температурном режиме стандартного пожара для исследуемых ОКП.

Разработанную классификацию термостойкости ОКП предлагается использовать при разработке методики оценки термостойкости ОКП различной химической природы интумесцентного типа для условий стандартного режима пожара как в целях определения времени защиты ОКП от термического воздействия стандартного пожара, так и в исследовательских целях.

Литература

1. Мансуров Т. Х., Беззапонная О. В., Головина Е. В., Контобойцева М. Г. Исследование огнезащитных кабельных покрытий методами термического анализа и огневых испытаний // Техносферная безопасность. 2020. № 1 (26). С. 62–70.
2. Мансуров Т. Х., Беззапонная О. В., Головина Е. В., Сафронова И. Г. Исследование кабельного изделия с огнезащитными покрытиями различной химической природы при температурном режиме стандартного пожара // Техносферная безопасность. 2020. № 3 (28). С. 108–120.
3. Мансуров Т. Х., Беззапонная О. В., Головина Е. В., Контобойцева М. Г. Огневые испытания кабельного изделия с огнезащитными покрытиями различной химической природы при температурном режиме стандартного пожара // Техносферная безопасность. 2020. № 4 (29). С. 106–118.
4. Мансуров Т. Х., Беззапонная О. В., Головина Е. В. Исследование огнезащитного кабельного покрытия на основе органического растворителя и интеркалированного графита при температурном режиме стандартного пожара и методами термического анализа // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXII Международной научно-практической конференции. М., 2020. С. 527–534.
5. Мансуров Т. Х., Беззапонная О. В., Головина Е. В. Исследование огнезащитного кабельного покрытия на основе водной полимерной дисперсии методами синхронного термического анализа и огневых испытаний при температурном режиме стандартного пожара и методами термического анализа // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности: сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, 30 ноября 2020 года. Железногорск, 2020. С. 215–221.
6. Мансуров Т. Х., Беззапонная О. В., Головина Е. В. Исследование термоаналитических характеристик огнезащитных кабельных покрытий различной химической природы методами синхронного термического анализа // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 30-летию МЧС России (14–16 декабря 2020 г.). Екатеринбург, 2021. Ч. 1. С. 103–108.
7. Химическая энциклопедия: в 5 т. / гл. ред. Н. С. Зефирова и др. М., 1998. Т. 4. С. 546.
8. Головина Е. В., Беззапонная О. В., Мансуров Т. Х. Критерии оценки термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для объектов нефтегазового комплекса // Техносферная безопасность. 2018. № 3 (20). С. 133–138.
9. Ненахов С. А., Пименова В. П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 8. С. 11–58.
10. Зыбина О. В. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов. дисс. ... д-ра тех. наук: 05.17.06. СПб, 2015. 260 с.

11. Оценка огнезащитных свойств покрытий в зависимости от сроков их эксплуатации: методика. М., 2015. 31 с.
12. ГОСТ 30247.0–94 (ИСО 834–75) Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

References

1. Mansurov T. H., Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V., Kontobojceva M. G. Issledovanie ognezashchitnyh kabel'nyh pokrytij metodami termicheskogo analiza i ognevnyh ispytaniy // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2020. № 1 (26). P. 62–70.
2. Mansurov T. H., Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V., Safronova I. G. Issledovanie kabel'nogo izdeliya s ognezashchitnymi pokrytiami razlichnoj himicheskoj prirody pri temperaturnom rezhime standartnogo pozhara // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2020. № 3 (28). P. 108–120.
3. Mansurov T. H., Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V., Kontobojceva M. G. Ognevye ispytaniya kabel'nogo izdeliya s ognezashchitnymi pokrytiami razlichnoj himicheskoj prirody pri temperaturnom rezhime standartnogo pozhara // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2020. № 4 (29). P. 106–118.
4. Mansurov T. H., Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V. Issledovanie ognezashchitnogo kabel'nogo pokrytiya na osnove organicheskogo rastvoritelya i interkalirovannogo grafita pri temperaturnom rezhime standartnogo pozhara i metodami termicheskogo analiza // Aktual'nye problemy pozharnoj bezopasnosti: materialy XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. M., 2020. P. 527–534.
5. Mansurov T. H., Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V. Issledovanie ognezashchitnogo kabel'nogo pokrytiya na osnove vodnoj polimernoj dispersii metodami sinhronnogo termicheskogo analiza i ognevnyh ispytaniy pri temperaturnom rezhime standartnogo pozhara i metodami termicheskogo analiza // Molodye uchenye v reshenii aktual'nyh problem bezopasnosti: sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 30 noyabrya 2020 goda. ZHeleznogorsk, 2020. P. 215–221.
6. Mansurov T. H., Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V. Issledovanie termoanaliticheskikh harakteristik ognezashchitnyh kabel'nyh pokrytij razlichnoj himicheskoj prirody metodami sinhronnogo termicheskogo analiza // Aktual'nye problemy i innovacii v obespechenii bezopasnosti: sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii c mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 30-letiyu MCHS Rossii (14–16 dekabrya 2020 g.). Ekaterinburg, 2021. CH. 1. P. 103–108.
7. Himicheskaya enciklopediya: v 5 t. M., 1998. P. 546.
8. Golovina E. V., Bezzaponnaya O. V., Mansurov T. H. Kriterii ocenki termostojkosti ognezashchitnyh sostavov intumescenentnogo tipa dlya ob"ektov neftegazovogo kompleksa // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2018. № 3 (20). P. 133–138.
9. Nenahov S. A., Pimenova V. P. Fiziko-himiya vspenivayushchihsya ognezashchitnyh pokrytij na osnove polifosfata ammoniya // Pozharovzryvbezopasnost'. 2010. T. 19, № 8. P. 11–58.
10. Zybina O. V. Teoreticheskie principy i tekhnologiya ognezashchitnyh vspuchivayushchihsya materialov. diss. ... d-ra tekhn. nauk: 05.17.06 / Zybina Ol'ga Aleksandrovna. SPb., 2015. 260 p.
11. Ocenka ognezashchitnyh svojstv pokrytij v zavisimosti ot srokov ih ekspluatatsii: metodika. M., 2015. 31 p.
12. ГОСТ 30247.0–94 (ISO 834–75) Конструкции строител'ные. Методы испытаний на огнестойкость. Общечие требования.