

УДК 614.841.11

DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2025.73.38.002>

EDN: <https://elibrary.ru/lfpqgc>

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАТУРАЛЬНЫХ, СИНТЕТИЧЕСКИХ И ИСКУССТВЕННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Юрий Кузьмич Нагановский, Андрей Борисович Сивенков

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Аннотация. В работе представлены результаты термического анализа образцов тканых и текстильно-войлочных материалов в инертной и воздушной среде. В исследовании применены методы термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Проанализированы особенности термических превращений различных образцов тканых, ковровых и текстильно-войлочных материалов. Получены термогравиметрические зависимости, характеризующие поведение натуральных, синтетических и искусственных волокон в условиях повышенных температур.

Ключевые слова: текстильные материалы, натуральные, синтетические и искусственные волокна, термический анализ, термодеструкция, тепловой эффект плавления, тепловыделение

Для цитирования: Нагановский Ю.К., Сивенков А.Б. Термогравиметрические характеристики натуральных, синтетических и искусственных текстильных материалов различной химической природы // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2025. № 1 (23). С. 25–33. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2025.73.38.002. EDN LFPQGC.

THEρμοGRAVIMETRIC CHARACTERISTICS OF NATURAL, SYNTHETIC AND ARTIFICIAL TEXTILE MATERIALS OF VARIOUS CHEMICAL NATURE

Yury K. Naganovsky, Andrey B. Sivenkov

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

Abstract. The paper presents the results of thermal analysis of samples of woven and textile-felt materials in an inert and air medium. The methods of thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC) were used in the study. The features of thermal transformations of various samples of woven, carpet, and textile-felt materials are analyzed. There are obtained thermogravimetric dependences characterizing the behavior of natural, synthetic and artificial fibers in conditions of elevated temperatures.

Keywords: textile materials, natural, synthetic and artificial fibers, thermal analysis, thermal degradation, thermal effect of melting, heat release

For citation: Naganovsky Yu.K., Sivenkov A.B. Thermogravimetric characteristics of natural, synthetic and artificial textile materials of various chemical nature. Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2025, no. 1, pp. 25-33. (In Russ.). DOI 10.37657/vniipo.avpb.2025.73.38.002. EDN LFPQGC.

В настоящее время в качестве декоративных отделочных материалов для зданий и сооружений различного функционального назначения часто используются настенные цельнотканые и сшивные ковровые изделия (ворсовые ковры и безворсовые ковровые ткани), многовариативные тканые и нетканые изделия из различного волокнистого состава, вышитые хлопчатобумажными и шелковыми нитями, различающиеся качеством нити, внешним видом, структурой, схемой плетения и свойствами.

Одним из важнейших недостатков тканых, ковровых и текстильно-войлочных материалов является их высокая горючесть с повышенным дымообразованием и образованием токсичных продуктов горения. Поэтому изучение показателей пожарной опасности таких материалов и изделий, с учетом их свойств и структурных особенностей, а также возможность прогнозирования опасности и скорости распространения пожара является одной из важнейших научных и практических задач.

Сложность решения данной задачи заключается в том, что ассортимент текстильной продукции насчитывает большое количество изделий, различающихся как по составу используемых волокнистых материалов, так и по конструктивному исполнению (собственно волокно, нетканые материалы, ткани различного переплетения и поверхностной плотности и т. д.) [1]. Данный факт объясняется рядом причин, основными из которых являются:

- широкий ассортимент номенклатуры текстильных материалов, отличающихся по своей структуре (волокна, пряжа, ткани, нетканые материалы);
- разделение материалов на синтетические, искусственные и природные, что определяет их механические и физико-химические свойства;
- функциональное назначение и области использования сырья и готовых изделий;
- выбор способа снижения пожарной опасности [2].

Следует отметить, что вопросы выбора эффективных способов огнезащиты текстильных материалов напрямую связаны с вопросами объективной оценки их пожароопасных свойств. В настоящее время данной проблеме уделяется значительное внимание. Выработке подходов к оценке пожарной опасности текстильных материалов, которая позволяла бы проводить их сравнительный анализ, посвящено достаточно большое количество работ [3–7].

Цель настоящего исследования заключается в установлении влияния химической природы текстильных материалов различного компонентного состава и особенностей термических превращений тканых, ковровых, текстильно-войлочных материалов из натуральных, синтетических и искусственных волокон в условиях повышенных температур.

На показатели пожарной опасности готового тканого, коврового и текстильно-войлочного материала, выработанного из различных гибких, мягких волокон и нитей могут влиять как внешние факторы, так и характеристики самого материала. Свойства, проявляющиеся при изменении температуры материала в определенных условиях, отражают их поведение при воздействии этого фактора.

С целью определения закономерностей термического разложения тек-

стильных изделий проведена серия испытаний образцов тканых, ковровых, текстильно-войлочных материалов, применяемых в интерьере различных помещений. Указанные образцы по характеру происхождения имеют природные (натуральные), искусственные и синтетические волокна, различающиеся по химическому составу, также по конструктивному исполнению (собственно волокно, ткани различного переплетения и поверхностной плотности и т. д.). В качестве объектов исследования были выбраны два образца ковровых покрытий (ковровая дорожка: полипропилен, джут, ворс – полипропилен; ковровая дорожка: хлопок, шерсть, безворсовый), которые отличаются друг от друга по сырьевому составу, по характеру формирования, по композиционному построению и отделке, по высоте ворсовых пучков, и образец войлока технического грубошерстного марки А (толщина 10–15 мм, плотность $0,32 \pm 0,02$ г/см³). В работе использовалась аппаратура термического анализа: термоанализатор Q600 для определения теплоты фазовых переходов в материале при нагревании, а также совмещенная система с анализатором горючих газов (АГГ) для определения тепловыделения в газовой фазе. Условия проведения испытаний: скорость нагревания 20 °С/мин; атмосфера – воздух.

На рис. 1 представлены ТГ, ДТГ, ДСК кривые образцов ковровых покрытий в атмосфере воздуха.

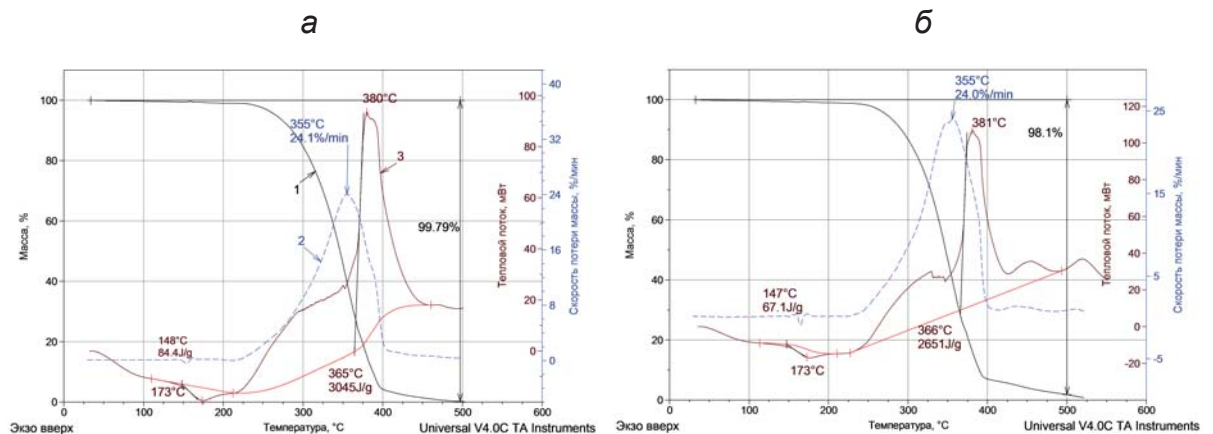


Рис. 1. ТГ (1), ДТГ (2) и ДСК (3) кривые образца ворса ковровой дорожки, материал ворса – полипропилен (а) и образца ковровой дорожки, безворсовый (б) (20 °С/мин; атмосфера – воздух)

Для образца коврового покрытия (полипропилен, джут, ворс – полипропилен) пожарная опасность во многом зависит от химической природы и высоты ворса. Наблюдаются типичные кривые ТГ, ДТГ, ДСК для полипропилена с температурой начала разложения порядка 200 °С и максимальной скоростью разложения при температуре 355 °С (кривая ДТГ). Данная температура для полипропилена, по сути, находится в границах реализации пламенного горения [8]. При нагревании имеется фазовый переход плавления (-84,4 кДж/г), начало которого лежит в интервале 140...150 °С. Для образца хлопково-шерстяного коврового покрытия (хлопок, шерсть, безворсовый) при температуре 100–110 °С происходят фазовые превращения влаги в пар (-67,1 кДж/г). Термическое разложение начинается при температуре 250 °С, что свойственно для целлюлозо-содержащих материалов. Очевидно, что при нагревании подобных материалов при температурах выше 200 °С в ограниченном помещении могут образовываться летучие продукты, оказывающие токсическое действие на организм человека

(монооксид углерода, ацетальдегид и др.). По кривым выделения горючих газов (сигнал ТХД) были определены граничные значения температур образования летучих продуктов разложения. Кроме того, данные материалы при горении являются одним из основных источников поддержания теплового баланса пожара. В токе азота теплота пиролиза составляет 445,6 и 550,3 Дж/г, а в токе воздуха тепловыделение в твердой фазе составляет 3045 и 2651 Дж/г, в газовой 3114 и 4173 Дж/г соответственно для ковровых материалов (основа – полипропилен, джут, ворс – полипропилен и основа – хлопок, шерсть, безворсовый). Образец в токе азота деструктурирует в инертной среде с максимумом ДТГ 480/53,5 и 479/41,3, в токе воздуха – 355/24,1 и 355/24,1 соответственно. Происходит смещение максимальной скорости разложения в область более низких температур, при этом деструкция в инертной среде выше более чем в два раза по сравнению с разложением на воздухе. Тепловыделение в газовой и твердой фазе составило 6159 и 6778 Дж/г, 4137 и 6788 Дж/г соответственно.

На рис. 2 представлены ТГ, ДТГ, ДСК кривые образцов ковровой дорожки (полипропилен, джут, ворс – полипропилен) в атмосфере воздуха. Для образца ковровой дорожки с ворсом на основе полипропилена и хлопка наблюдаются типичные кривые ТГ, ДТГ, ДСК для полипропилена с температурой начала разложения порядка 150 °С и максимальной скоростью разложения при температуре 391 °С (кривая ДТГ). Поведение образца ковровой дорожки (полипропилен, джут, ворс – полипропилен) как смешанного текстильного материала при нагревании имеет некоторые особенности, а именно: более устойчивый к термическому воздействию волокнистый компонент, как правило, стабилизирует термические превращения другого, менее устойчивого волокнистого компонента.

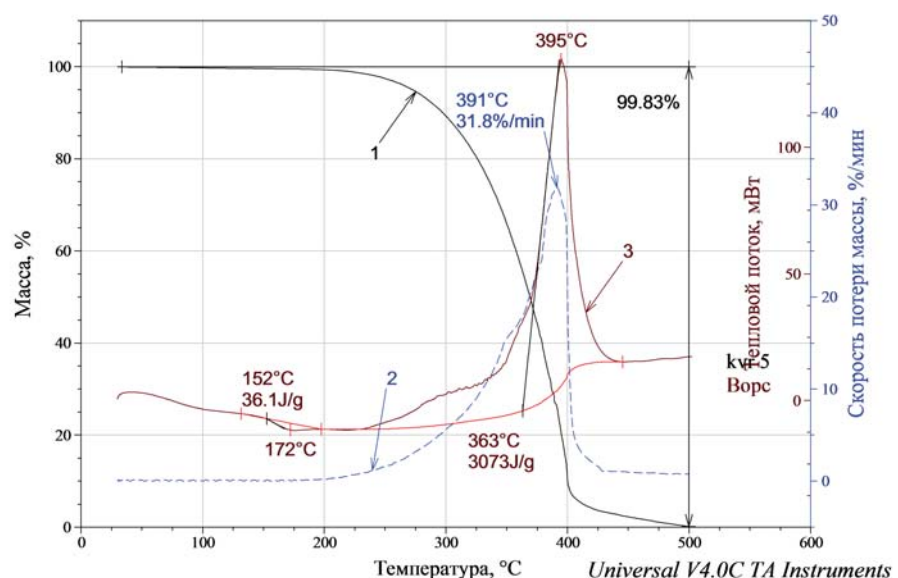


Рис. 2. ТГ (1), ДТГ (2) и ДСК (3) кривые образца ковровой дорожки (полипропилен, джут, ворс – полипропилен) (20 °С/мин; атмосфера – воздух)

На рис. 3 представлены результаты совмещенного термического анализа (термогравиметрические кривые ДТГ, ДСК и кривые выделения горючих газов) для ковровой дорожки (полипропилен, джут, ворс – полипропилен) в атмосфере воздуха.

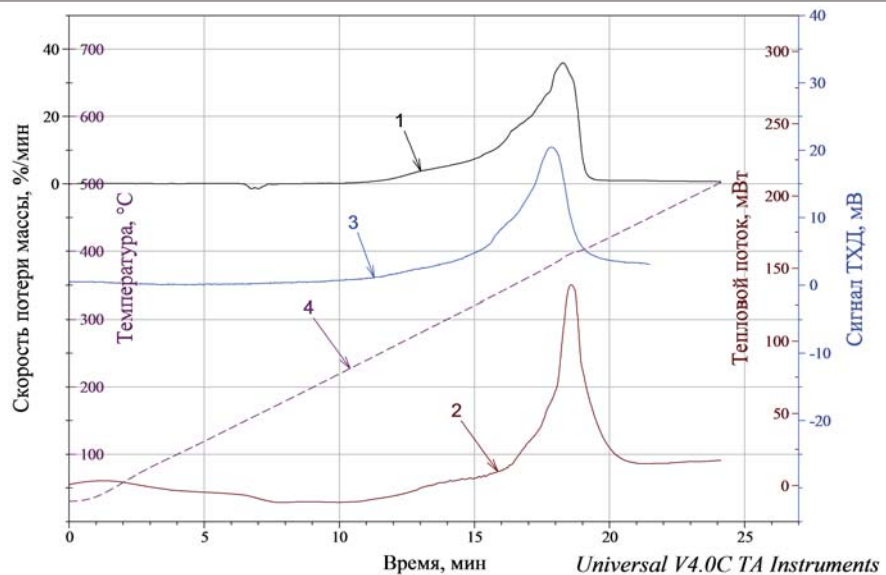


Рис. 3. ДТГ (1), ДСК (2) и кривая выделения горючих газов (3) образца ковровой дорожки (полипропилен, джут, ворс – полипропилен), температура (4) (20 °С/мин, воздух)

Интервал реакции для кривой ДТГ (1) и сигнала ТХД (рис. 3) составил 350–670 °С, а наиболее интенсивная скорость потери массы и максимальный выход ТХД достигнуты при температуре около 540 °С. Это является экспериментальным подтверждением того, что основу выделяющихся из образца ковровой дорожки летучих веществ составляют горючие газы. В сравнении с ковровыми покрытиями натуральные волокна войлока деструктируют в интервале 250–400 °С с постепенным возрастанием показателей потери массы (кривые ТГ, ДТГ) и тепловыделения (кривая ДСК), что представлено на рис. 4.

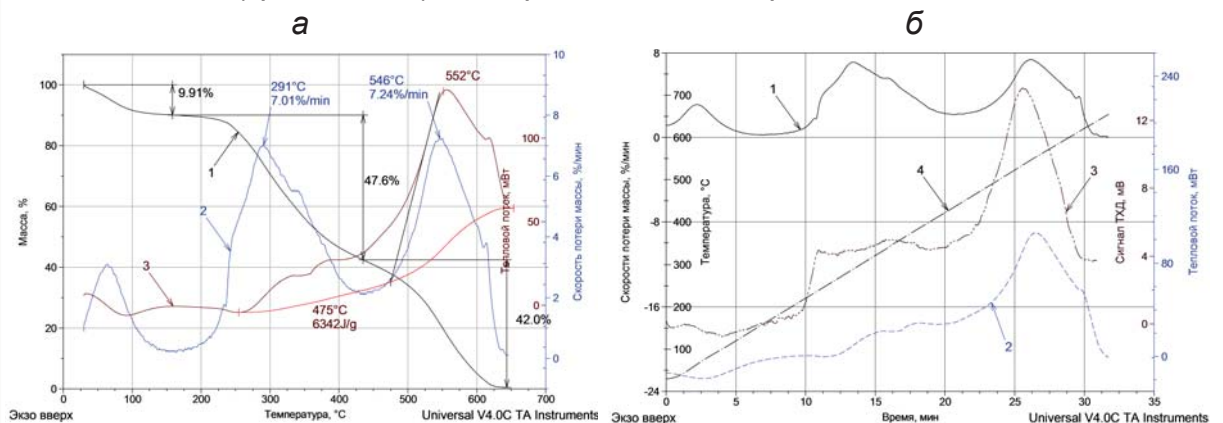


Рис. 4. Результаты термического анализа образца войлока (марка А): а – ТГ (1), ДТГ (2) и ДСК (3) кривые; б – ДТГ (1), ДСК (2), кривая выделения горючих газов (3) и температура (4) (20 °С/мин, воздух)

Основная экзотермика для разложения войлочного материала приходится на температурный интервал 450–600 °С с максимальной скоростью разложения при температуре 552 °С. Устойчивость данного материала к горению обусловлена достаточно высокими значениями кислородного индекса $KI = 25\%$. Тем не менее необходимо отметить повышенные значения общего тепловыделения 9149 Дж/г (в газовой и твердой фазе тепловыделение составило 2807 и 6342 Дж/г). Значительное повышение теплового эффекта и выход летучих продуктов разложения в результате процесса термодеструкции войлока могут наблюдаться при температурах выше 500 °С, что в ограниченном объеме с уче-

том нерегламентируемого количества горючей нагрузки может играть ключевую роль с точки зрения интенсивности развития пожара.

Для термического разложения исследуемых войлочных материалов как нетканого текстильного материала в виде полотна из шерсти высокой плотности: войлока серого технического грубошерстного марки А и войлока белого технического грубошерстного, приходится на температурный интервал 450–600 °С с максимальной скоростью разложения при температуре 552 °С. Устойчивость данного материала к горению обусловлена достаточно высокими значениями кислородного индекса $KI = 25\%$.

С целью получения расширенных термогравиметрических данных для тканых и нетканых материалов различной химической природы проведены исследования методами термического анализа. В качестве объектов исследования в работе использовали шесть образцов натуральных и синтетических тканей из трех видов волокон (натуральное, искусственное и синтетическое): хлопок (волокно растительного происхождения, основным компонентом которого является натуральная целлюлоза (94–96 %), состоящее из тонких, коротких, мягких волокон, скрученных вокруг своей оси); вискоза (искусственное волокно, получаемое в результате химической переработки жидкой целлюлозы); полиэстер (синтетическое полиэфирное волокно): вельвет, плюш (велюр), ткань полиэстер, ткань бархатная, атласный шелк стрейч, атлас. Указанные образцы тканей имеют различный состав нитей, способ переплетения, расположение волокон, количество и толщину нитей, плотность, стойкость к механическим воздействиям и гигроскопичность. Полученные термогравиметрические кривые образцов исследуемых тканей в атмосфере – азот до 650 °С, далее – воздух представлены на рис. 5.

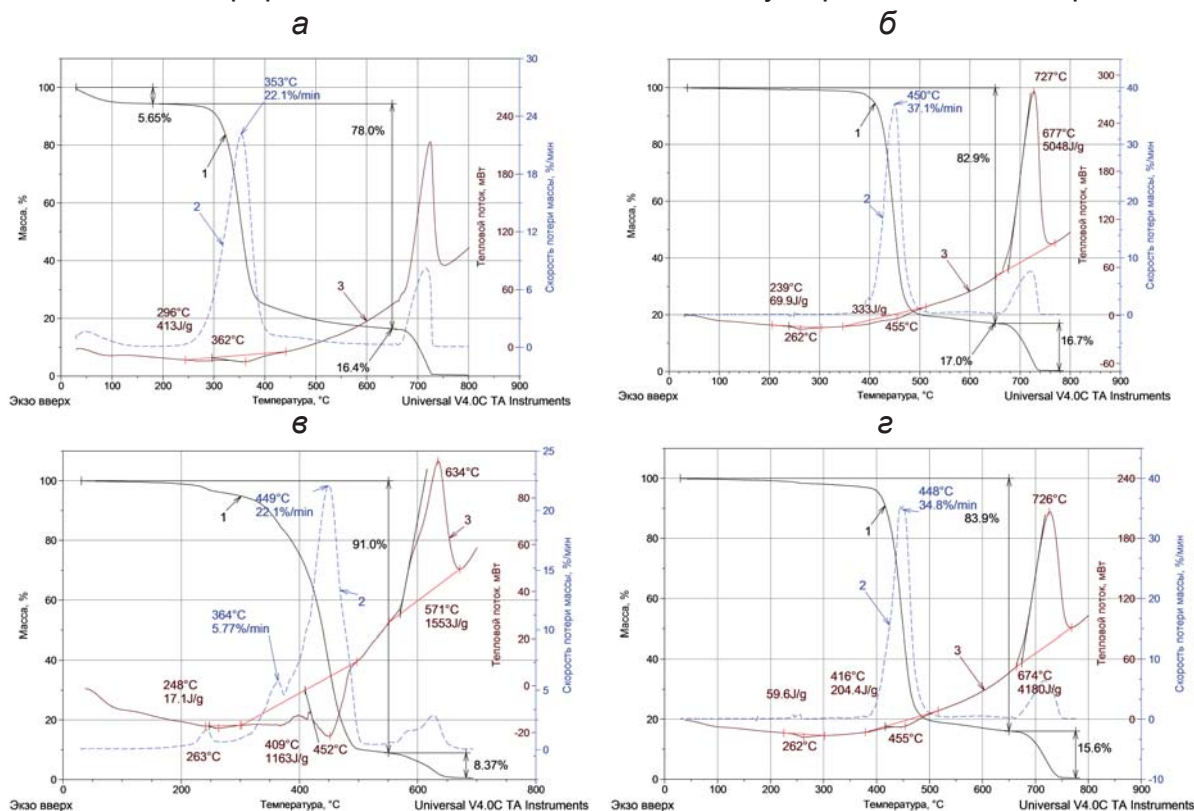


Рис. 5. ТГ (1), ДТГ (2) и ДСК (3) кривые образцов тканей при 20 °С/мин; атмосфера – азот до 650 °С, далее – воздух: а – вельвет; б – плюш (велюр); в – ткань полиэстер; г – бархат (начало; окончание рисунка на следующей странице)

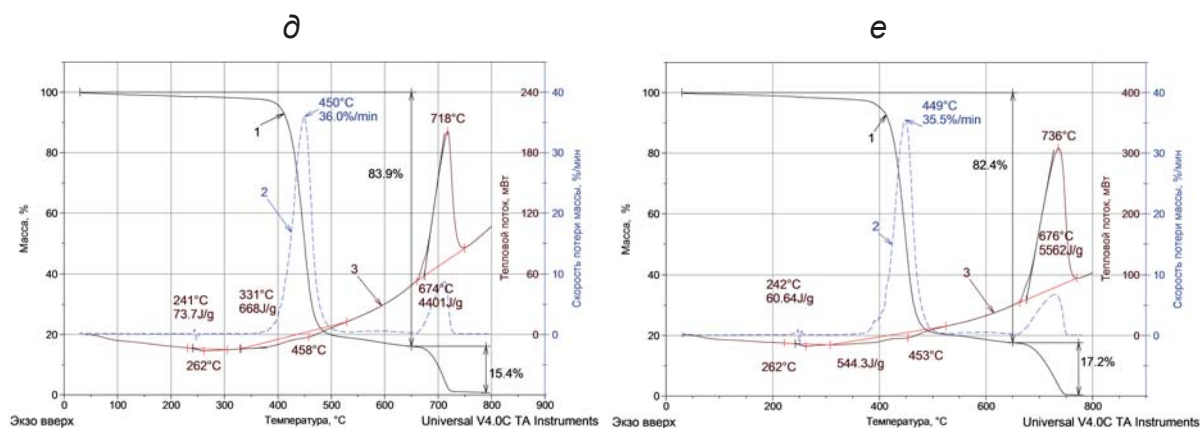


Рис. 5. ТГ (1), ДТГ (2) и ДСК (3) кривые образцов тканей при 20 °С/мин; атмосфера – азот до 650 °С, далее – воздух: д – атласный шелк стрейч; е – атлас (окончание; начало рисунка на предыдущей странице)

При обработке полученных экспериментальных данных были определены температуры, при которых образцы тканей значительно теряли в массе от 78 до 91 %. Результаты исследования показали, что начало термического разложения образцов тканей происходит при 353–450 °С (кривые ТГ). Процесс термоокислительной деструкции протекает в интервале температур от 353 до 450 °С. Представленные данные начального этапа термического разложения показывают, что образцы тканей, в составе которых имеются натуральные волокна хлопка (плюш (велюр), бархат, атлас) имеют более высокую термическую стабильность (около 410–420 °С).

Высокую температуру плавления порядка 240...250 °С имеют образцы материалов на основе синтетических полиэфирных волокон: ткань полиэстер, ткань бархатная, атласный шелк стрейч и атлас. Из полученных данных видно, что температура плавления данных исследуемых образцов текстильных материалов изменяется в зависимости от природы мономеров, являющихся основой всех синтетических текстильных волокон:

- если мономер с четным числом атомов углерода, то полимер плавится при более высокой температуре, чем с нечетным числом атомов углерода;
- с увеличением числа амидных групп, за счет возрастания количества водородных связей, температура плавления полиамидов повышается [9].

Наиболее показательными являются дифференциальные термогравиметрические зависимости (ДТГ). Характер кривых ДТГ показывает, что минимальная скорость термического разложения для вельвета имеет место при температуре 353 °С. Для остальных тканей температура разложения составляет около 420–450 °С. Полученные результаты объясняются тем, что исследуемые образцы тканей (ткань полиэстер, бархат, атласный шелк стрейч, атлас), в составе которых имеются синтетические волокна, имеют сопоставимую температуру плавления.

На кривой теплового потока наибольший тепловой эффект плавления установлен для шелка стрейч 73,7 Дж/г. Термопластичные волокна в данных образцах тканей (полиэфирные, полиамидные и др.) при нагревании плавятся, структура тканей из таких полимерных волокон разрушается резко, при этом теряются основные морфологические признаки и возникают новые, вторичные, весьма характерные для каждого ряда волокнообразующих полимеров. Карбонизованные остатки текстильных материалов из термопластичных полимеров в интервале

температур 250–350 °С представляют собой тонкие пленки затвердевшего расплава, а в интервале 350–550 °С – пористо-ячеистую массу.

Результаты проведенного исследования показывают практическую возможность использования метода термогравиметрии для оценки пожарной опасности тканей на основе различного волокнистого состава. В ходе термогравиметрического исследования была определена температура, при которой достигается максимальная скорость термического разложения, а также процент убыли массы образца ткани в результате теплового воздействия. Установлено, что наибольшее влияние на термическую устойчивость из исследуемых текстильных материалов обнаружено для образца ткани полиэстер (синтетическая ткань, произведенная из полиэфирных волокон), для которого потеря массы составила максимальное значение 91,0 %. Характер полученных термогравиметрических зависимостей для образцов тканей на основе волокна хлопка (плюш (велюр), бархат, атлас) свидетельствует о том, что до температуры 400–450 °С природная целлюлоза, являющаяся основой хлопка, не претерпевает каких-либо изменений, что доказывает горизонтальный участок зависимости, идущий параллельно температурной оси.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что химическая природа и состав текстильных материалов оказывают значительное влияние на температурные показатели, характеризующие процессы, протекающие при терморазложении материала. Получены и проанализированы термогравиметрические зависимости и определен достаточно высокий показатель кислородного индекса для войлока серого технического грубошерстного марки А и войлока белого технического грубошерстного, который определил устойчивые условия к горению. Полученные данные свидетельствуют о том, что на результаты ТГА оказывают значительное влияние природа, компонентный состав ковровых и текстильно-войлочных материалов.

Список литературы

1. Разработка подходов к определению пожарной опасности текстильных материалов / *Д.В. Сорокин, И.А. Роммель, А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина, С.Н. Ульева, Л.В. Шарнина* // Пожарная и аварийная безопасность. 2019. № 1 (19). С. 80–89.
2. Обоснование актуальных подходов к оценке пожароопасных свойств текстильных материалов и способов огнезащиты тканей различного функционального назначения / *В.Г. Спиридонова, Д.В. Сорокин, А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина* // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (47). С. 125–132.
3. *Болодьян Г.И.* Комплексный подход к созданию пожаробезопасных текстильных материалов и изделий: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. Москва, 2003. 177 с. РГБ ОД, 61:04-5/2502.
4. Новые подходы к оценке пожароопасных свойств текстильных материалов / *А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина, С.Н. Ульева, В.Г. Спиридонова* // Пожарная и аварийная безопасность. 2019. № 4 (15). С. 11–18.
5. Комплексная оценка пожарной опасности текстильных и кожевенных материалов: рекомендации / *Н.В. Смирнов, Н.И. Константинова, И.С. Семибратова, Н.А. Терешина, Е.А. Поединцев*. Москва: ФГБУ ВНИИПО ВНИИПО МЧС России, 2014. 28 с.
6. Исследование воспламеняемости текстильных материалов / *В.И. Бесшапошникова, М.В. Загоруйко, Т.В. Александрова, О.М. Сладков, К.И. Пулина* // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. № 5 (347). С. 11–13.

7. Методы испытания воспламеняемости материалов / *Р.Ш. Еналеев, И.В. Красина, В.С. Гасилов, Ю.С. Чистов, Л.И. Хайруллина* // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. Вып. 13. С. 73–78.

8. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд. в 2 кн. / *А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук* и др. Москва: Химия, 1990. 496 с.

9. *Кудрявцев Г.И., Носов М.П., Волохина А.В.* Полиамидные волокна. Москва: Химия. 1976. 264 с.

**Статья поступила в редакцию 10.12.2024;
одобрена после рецензирования 10.01.2025;
принята к публикации 10.02.2025.**

Нагановский Юрий Кузьмич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; **Сивенков Андрей Борисович** – доктор технических наук, профессор, начальник ФГБУ ВНИИПО МЧС России.

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Yury K. Naganovsky – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher; **Andrey B. Sivenkov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Institute.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.