

## ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 535.37:544.164

DOI 10.55421/3034-4689\_2025\_28\_7\_153

А. А. Халилова, Н. В. Тихонова, Е. А. Сергеева

### ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВОДООТТАЛКИВАЮЩИМ СОСТАВОМ НА ОСНОВЕ АМИНОСИЛАНА И ХЛОРОПАРАФИНА

*Ключевые слова:* хлопок, аминосилан, хлорпарафин, термогравиметрия, дифференциальный термический анализ.

*В статье изучено влияние водоотталкивающей композиции на термические свойства целлюлозосодержащего материала. Основное внимание уделяется изучению изменений теплового поведения материала, вызванных нанесением композиции на основе смеси аминосилана и хлорпарафина. Использование синхронного термоанализа, включающего термогравиметрию (ТГ), дифференциально-термический анализ (ДТА) и дифференциально-термогравиметрический анализ (ДТГ), позволяет выявить стадии термического разложения материала, а также оценить влияние пропиточного состава на стабильность материала при нагревании. Результаты экспериментов показывают три характерные температурные области с различной интенсивностью потери массы, что отражает процесс испарения влаги, термоокислительное разложение целлюлозы и образование коксового остатка. Нанесение водоотталкивающей композиции на основе аминосилана и хлорпарафина приводит к снижению потери массы на ранних этапах нагрева, что связано с вытеснением адсорбционной влаги и формированием пространственно-сшитых термостойких структур. Хлорпарафин дополнительно выступает в качестве антипирена, повышая огнестойкость целлюлозосодержащих материалов за счет образования защитного коксового слоя, что подтверждается смещением температурных пиков в сторону более высоких значений и увеличением количества остатка после термического разложения.*

А. А. Khalilova, N. V. Tikhonova, E. A. Sergeeva

### THERMAL ANALYSIS OF CELLULOSE-CONTAINING TEXTILE MATERIALS WITH WATER-REPELLENT COMPOSITION BASED ON AMINOSILANE AND CHLOROPARAFFIN

*Keywords:* cotton, aminosilane, chlorinated paraffin, thermogravimetry, differential thermal analysis.

*The influence of a water-repellent composition on the thermal properties of cellulose-containing material has been studied. The main focus is on investigating changes in the thermal behavior of the material caused by the application of a composition based on a mixture of aminosilane and chlorinated paraffin. The use of synchronous thermal analysis, including thermogravimetry (TG), differential thermal analysis (DTA), and differential thermogravimetric analysis (DTG), allows the stages of thermal decomposition of the material to be identified and the influence of the impregnating composition on the stability of the material during heating to be assessed. The results of the experiments show three characteristic temperature ranges with different intensities of mass loss, reflecting the process of moisture evaporation, thermo-oxidative decomposition of cellulose, and the formation of coke residue. The application of a water-repellent composition based on aminosilane and chlorinated paraffin leads to a decrease in mass loss in the early stages of heating, which is associated with the displacement of adsorbed moisture and the formation of spatially cross-linked heat-resistant structures. Chlorinated paraffin additionally acts as a flame retardant, increasing the fire resistance of cellulose-containing materials by forming a protective coke layer, which is confirmed by a shift of temperature peaks towards higher values and an increase in the amount of residue after thermal decomposition.*

#### Введение

При разработке рабочей одежды универсального назначения из целлюлозосодержащих материалов важным является сохранение присущих для хлопка характеристик воздухопроницаемости и мягкости, а также теплоизолирующих свойств, обеспечивающих комфорт при эксплуатации одежды. При этом требования к универсальной рабочей одежде включают защиту кожных покровов от воздействия вредных производственных и климатических факторов, вследствие чего, поверхность хлопковой ткани на стадии финишной отделки целесообразно обрабатывать водоотталкивающими пропитками [1].

Спектр гидрофобизирующих препаратов для отделки текстильных изделий основан на использовании соединений различной химической природы (эфиров, кислот, металлокомплексных

соединений, каучуков и смол), снижающих исходную способность хлопка к впитыванию влаги. Одним из вариантов гидрофобизации поверхности текстиля остается нанесение кремнийорганических соединений, в частности аминосиланов, за счет сочетания эффективности их водоотталкивающего действия с технологичностью нанесения и безопасностью для кожных покровов в процессе носки. В ранних исследованиях установлено, что применение силанов дает устойчивый эффект гидрофобизации, сохраняющийся в процессах стирки, сушки, эксплуатация хлопковых материалов, без ухудшения эксплуатационных и гигиенических характеристик текстиля [2].

Однако существует проблема снижения огнестойкости целлюлозосодержащих материалов при нанесении гидрофобизирующих аппретов, вследствие горючести компонентов

гидрофобизаторов [3]. Одновременно, важным остается повышение огнезащитных характеристик рабочей одежды универсального назначения, для ее эксплуатации в условиях стихийных возгораний на производствах и предотвращения повреждения кожных покровов рабочих в условиях высокотемпературного воздействия и открытого огня. Соответственно, актуальным является решение задачи выбора аппретов, обеспечивающих сохранение исходных свойств хлопковых тканей с улучшением их водоотталкивающих и огнезащитных свойств.

Вариант решения, ранее предложенный авторами [1], заключается в нанесении на целлюлозосодержащий материал смеси силана и хлорпарафина в составе водной эмульсии. Установлено, что разработанный аппрет не ухудшает гигиенических и прочностных характеристик хлопкового материала, улучшает водоотталкивание и стойкость к воздействию открытого пламени. При этом опытные образцы с покрытием, включающим силан и хлорпарафин, обладают до двух раз более высоким краевым углом смачивания и до 19 раз большим значением водоупорности, относительно хлопковой ткани без отделки, и превосходят по данным показателям существующие на рынке промышленные аналоги тканей для рабочей одежды.

Огнестойкость материала с разработанной пропиткой в два раза превышает значение данного параметра у исходного материала и до 1,6 раз образцов-аналогов с одновременным эффектом самозатухания и отсутствием остаточного горения. Такой эффект обусловлен влиянием хлорпарафиновой компоненты, выступающей антипиреном в разработанном аппрете. Механизм действия, вероятно, основан на разбавлении объема продуктов горения хлопковой ткани с пропиткой выделяющимся из хлорпрофина инертными газообразными веществами [4].

Одним из методов оценки изменения поведения материалов при высокотемпературных воздействиях является комплексный термический анализ, позволяющий выявить характер тепловых эффектов и изменение массы в ходе нагрева до деструкции образца. Целью данного исследования являлась интерпретация результатов синхронных термоаналитических исследований, включающих термогравиметрию и дифференциальный термический анализ для выявления изменений в термических свойствах целлюлозосодержащих материалов, обработанных водоотталкивающим составом на основе силана и хлорпарафина

### Материалы и методы

Материалами для изготовления опытных образцов служили:

- Ткань 100% хлопок, саржевого переплетения, производства компании «Балтийский текстиль» (Россия), соответствует ГОСТ 21790-2005.
- Аминосилан марки А-1100 производства ООО «Силан» (Россия) по ТУ 6-02-724-77.
- Хлорпарафин марки ХП-470А производства АО «Каустик» (Россия) по СТО 002-03-275-234-2009.

Пропиточный состав наносился на текстильный материал в виде водной эмульсии: дистиллированная вода комнатной температуры (92,50 мл), аминосилан А-1100 (5,00 мл) и хлорпарафин ХП-470 А (2,50 мл) [3].

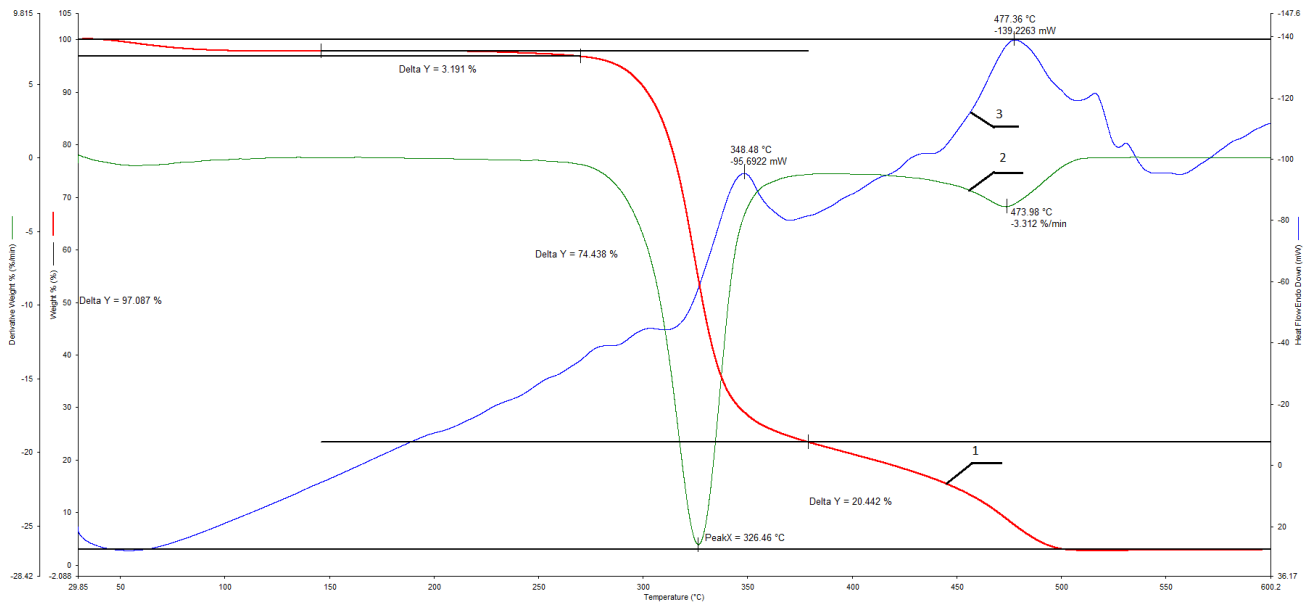
Термический анализ произведен на синхронном термоанализаторе STA 6000 в аналитическом исследовательском центре КНИТУ «Наноаналитика». Исследования проведены в интервале температур 29-600°C, со скоростью 10 град/мин в воздушной среде.

Данные термических исследований на совмещенном термоанализаторе позволяют выявить характер потери массы при нагревании образца и величину теряемой массы  $\Delta m$  в определенных интервалах температур по термогравиметрическим (ТГ) кривым [5]. Кроме того, по дифференциальным (деривативным) термогравиметрическим (ДТГ) кривым, отражающим производную от потери массы и характеризующим скорость ее изменения во времени  $\Delta m/\Delta t$ , оценивают температурные интервалы, где изменение массы происходит наиболее интенсивно. Одновременно совмещенный анализатор регистрирует результаты дифференциально-термического анализа (ДТА), отражающего тепловые эффекты (энтальпию) процессов, происходящих в материале образца при нагревании [6].

### Результаты экспериментов и обсуждение

Согласно результатам ТГ-ДТГ, приведенным на рисунке 1 для образца текстильного материала без пропитки, на ТГ-кривых можно выделить три температурных области, в которых с разной интенсивностью происходит потеря массы. Так, первая область от температуры начала эксперимента до 146°C характеризуется плавной потерей массы на 3,19%. При этом на ДТГ-кривой в рассматриваемом диапазоне регистрируется слабо выраженный пик, что свидетельствует о малом изменении скорости процесса во времени. Существенных тепловых эффектов на кривых ДТА не наблюдается, за исключением слабого эндоэффекта, завершающегося до 100°C.

Такие изменения массы в первой температурной области согласуются с ранними исследованиями автора [7], где в ходе ТГ анализа установлены аналогичные значения потери массы в пределах 3-4% для целлюлозосодержащих материалов, которая происходит вследствие выделения адсорбционной влаги. Авторы [8], исследуя целлюлозы различной природы методом ДСК, обнаружили в рассматриваемом диапазоне температур эндотермические пики, наблюдающиеся при 70-80°C и близкие по характеру к изменениям, полученным методом ДТА для хлопковой ткани. Авторы также связывают эндоэффект с испарением влаги и постепенным удалением из хлопка адсорбированной воды. Схожий эндоэффект в низкотемпературной области на ДСК-кривых при исследовании брезентовых целлюлозосодержащих материалов зарегистрирован авторами [9] и обусловлен поглощением тепла в процессах дегидратации влаги.



**Рис. 1 – Кривые ТГ (1, красная), ДТГ (2, зеленая), ДТА (3, синяя) образца хлопковой ткани**  
**Fig. 1 – TG (1, red), DTG (2, green), and DTA (3, blue) curves of a cotton fabric sample**

Вторая температурная область с интенсивной потерей массы регистрируется в диапазоне 275-379°C, когда образец ткани, согласно ТГ-кривым теряет 74,44% массы. Процесс происходит со стремительным изменением массы во времени и максимальной скоростью ее потери по данным ДТГ 26,7%/мин при 326°C. Такой эффект в узком интервале температур в виде остроконечного и симметричного пика указывает на «взрывной» характер превращения. На кривой ДТА наблюдается экзоэффект, свидетельствующий о выделении тепла, с максимумом при 348°C. В данном случае протекает процесс термоокисления целлюлозы хлопковой ткани, сопровождающийся высвобождением тепла, являющийся конкурирующим процессом для эндотермических реакций разложения целлюлозы [9].

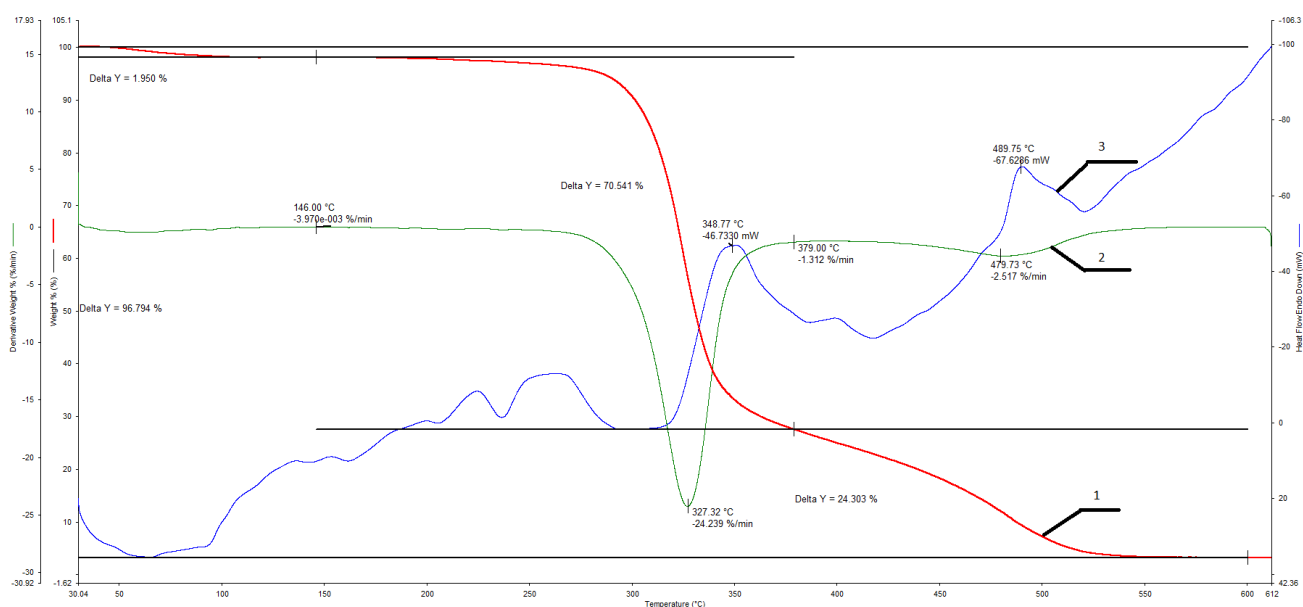
Третья область в высокотемпературной зоне эксперимента 379-500°C характеризуется дополнительной потерей массы на 20,44% (согласно ТГ исследованиям). Общая потеря массы в исследуемом диапазоне 30-500°C составляет 97,09% с образованием коксового остатка в 2,91% от исходной массы вещества. По данным ДТГ-анализа процесс потери массы на третьей стадии, относительно второй температурной области, происходит с существенно меньшей скоростью – 3,3 %/мин. Экзотермический пик на кривой ДТА имеет максимум при 477°C.

Полученные результаты согласуются с ранними исследованиями целлюлозы и целлюлозосодержащих материалов, где также отмечалась потеря массы в два этапа – интенсивная в пределах 280°C с экзоэффектом при 325°C и плавная в области 440°C за счет окисления продуктов распада материала [7] вследствие разрушения кристаллических структур целлюлозы [8].

Анализ данных рисунка 2 для образца ткани с пропиткой аminosиланом  $C_9H_{23}NO_3Si$  показал наличие аналогичных материалов без пропитки областей на кривых ТГ-ДТГ с близким характером и

интенсивностью потери массы. Первая область от температуры начала эксперимента до 146°C характеризуется незначительной потерей массы на 2,09%, что на 1,1 % ниже, чем у образца материала без пропитки, с ее слабым изменением во времени. Малый эффект с поглощением тепла на кривой ДТА, полученные значения и характер потери массы аналогичны результатам для материала без пропитки и связаны с выделением влаги из целлюлозной основы. Меньшая на 1,1% процент потеря массы в этой области у образца с аminosиланом, вероятно, обусловлена вытеснением части адсорбционной влаги на этапе пропитки ткани.

Вторая температурная область с интенсивной потерей массы регистрируется в диапазоне 260-371°C, когда образец материала с аminosиланом, согласно ТГ-кривым, теряет 71,35% массы. Процесс происходит со стремительным изменением массы во времени и максимальной скоростью ее потери по данным ДТГ 24,2%/мин при 326°C, имея схожий характер кривых с материалом без пропитки. Однако по данным ДТА регистрируется как эндо, так и экзо эффект в этой области в отличие от единичного пика с выделением тепла для материала без пропитки. Эндоэффект регистрируется в интервале 260-326°C с минимумом при 300°C, экзоэффект в интервале 326-370°C с максимумом при 345°C. По наличию выраженных эффектов можно заключить, что в образце с пропиткой аminosиланом при нагревании происходят существенные, относительно материала без пропитки, конкурирующие процессы, требующие как затрат энергии, например, образования дополнительных структур, так и происходящие с ее выделением, например, при окислительной деструкции материалов. Процессы, регистрируемые при ДТА исследованиях и реализующиеся с поглощением тепла, также могут быть связаны с плавлением, испарением, десорбцией и с термическим разложением, а с выделением тепла – с хемосорбцией и окислительным разложением [10].



**Рис. 2 – Кривые ТГ (1, красная), ДТГ (2, зеленая), ДТА (3, синяя) образца хлопковой ткани с силаном**  
**Fig. 2 – TG (1, red), DTG (2, green), and DTA (3, blue) curves of a cotton fabric sample with silane**

Так, авторами [11] указывается на возможность участия целлюлозных и силанольных структур в формировании пространственной сетки с повышением термоокислительной стойкости. Исследуя процессы модификации алкксиланами, установила механизм преимущественного образования силоксановых связей вследствие реакционной способности структур Si-OR по сравнению со связью C-OR. Вероятно, аналогичные превращения происходят на начальной стадии во второй температурной области с поглощением тепла за счет формирования пространственно-сшитых структур с редкими силоксановыми мостиками [12]. Так же отмечается, что при пропитке снижается содержание кислорода в межволоконном пространстве, что замедляет окислительное разложение с превалированием на начальной стадии превращений с поглощением тепла во второй температурной области [9].

В исследованиях отмечается, что использование с целлюлозами аминоксодержащих веществ, к которым можно отнести аminosилан, выделяющих при тепловом воздействии инертные (негорючие) газы, обуславливает при их нагревании разбавление газовой фазы и влияет на процессы поликонденсации как с гидроксильными группами целлюлозы, так и с полифункциональными соединениями пропитки. Например, в композициях целлюлозы с триметилоламином, меламинам, дициандиамидом установлено формирование сетчатого более термостойкого полимера. В таком случае на начальном этапе выражено протекание процессов дегидратации, внутримолекулярного превращения целлюлозы в дегидроцеллюлозу, далее разрыва связей основных макромолекулярных цепей и деполимеризации с итоговым распадом на  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и углерод [13].

При этом аминоксодержащие группы обуславливают формирование  $\text{NO}_2$  при термических превращениях с последующими преобразованиями при нагревании

по схемам восстановления водородом и вытеснения кислорода из окислов углерода. Кроме того, если на начальных стадиях окислительные процессы затруднены и более выражены процессы разложения и десорбции, то вероятно большая выраженность превращения целлюлозы в смолы левоглюкозан, на образование которого и требуется поступление тепла [14]. Вероятно, такие превращения с развитием более стабильных структур при нагреве материала обусловили чуть меньшую потерю массы в данной температурной области на 3,09%, чем у образцов материала без пропитки. На второй стадии в рассматриваемой температурной области в образце материала с пропиточным составом происходит интенсивный окислительный распад с выделением тепла.

Третья высокотемпературная область в диапазоне 371-550°C характеризуется дополнительной потерей массы согласно данным ТГ анализа на 23,84%. Общая потеря массы в исследуемом диапазоне 30-550°C составляет 97,28% с образованием коксового остатка в 2,72% от исходной массы вещества. По данным ДТГ-анализа процесс потери массы на третьей стадии относительно второй температурной области происходит с существенно меньшей скоростью до 2,5%/мин. Экзотермический пик на кривой ДТА имеет максимум при 489,75°C, что выше на 10°C, относительно максимума при 477°C для материалов без пропитки. Процесс потери массы завершается при 550°C, в то время как для материалов без пропитки при 500°C, что подтверждает возникновение в ходе термических превращений целлюлозы с аminosиланом более устойчивых к высокотемпературному воздействию фрагментов.

Согласно результатам ТГ-ДТГ, приведенным на рисунке 3 для образца хлопковой ткани с пропиткой смесью аminosилана и хлорпарафина, на ТГ-кривых можно выделить три температурных области близкие по интервалам к результатам для предыдущих

образцов. В первой области от температуры начала эксперимента до 146°C наблюдается плавная потеря массы на 1,94%, что на 1,25% меньше, чем для материалов без пропитки. ДТГ-кривая демонстрирует малую выраженность скорости изменения массы во времени. Существенных тепловых эффектов на кривых ДТА, не наблюдается,

за исключением слабого эндоэффекта, завершающегося до 100°C, что аналогично поведению предыдущих образцов. Поскольку данная область потери массы связана с десорбцией влаги, то меньшие значения ее потери относительно не пропитанного материала обусловлены вытеснением влаги пропиточной смесью.

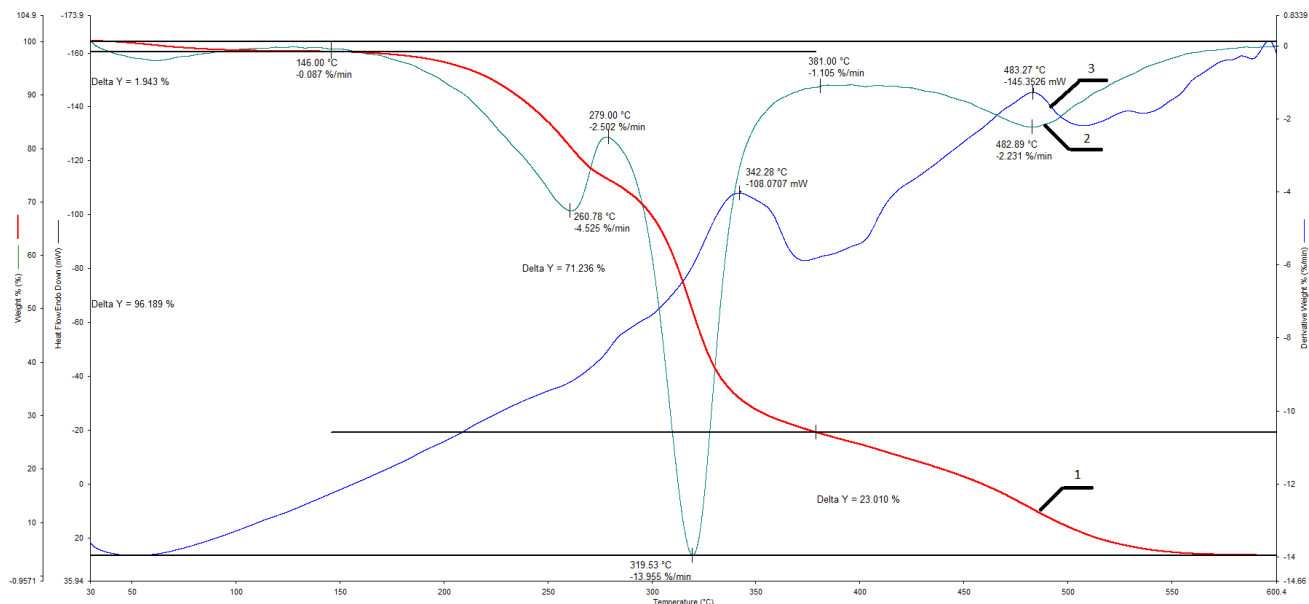


Рис. 3 – Кривые ТГ (1, красная), ДТГ (2, зеленая), ДТА (3, синяя) образца хлопковой ткани с силаном и хлорпарафином

Fig. 3 – TG (1, red), DTG (2, green), and DTA (3, blue) curves of a cotton fabric sample with silane and chlorinated paraffin

Вторая температурная область отличается характером потери массы от образца материала без пропитки и материала с аминсиланом и имеет 2 ступени потери массы:

(1) 146-279° с наибольшей интенсивностью ее потери (минимум на ДТГ-кривой) при 261°C;

(2) 279-371°C с максимальной ее скоростью при 319°C, когда образец материала, согласно ТГ-кривым теряет 71,24% массы, что на 3,2% меньше, чем у исходного материала без пропитки. Скорость процесса потери массы - 13,9%/мин, что в 2 раза ниже, чем у образца без пропитки и образца материала с аминсиланом. На кривой ДТА на этапе (1) изменений практически нет, т.е. процессы происходят без изменения энтальпии; на этапе (2) наблюдается экзоэффект, свидетельствующий о выделении тепла, с максимумом при 342°C.

Температурные границы этапа (1) и максимальная скорость потери массы при 261°C, вероятно, связаны с частичным выделением хлорсодержащих компонентов при нагревании образцов с хлорпарафином, что согласуется с данными производителя о выделении хлористого водорода при переработке хлорпарафина выше 200°C.

Этап (2) аналогичен по характеру к результатам для образцов материалов без пропитки и с аминсиланом, когда, среди совокупности конкурирующих процессов, рассмотренных выше, преимущественно протекает процесс

термоокисления целлюлозы хлопковой ткани, сопровождающийся высвобождением тепла [9]. Поведение образцов при нагревании в присутствии хлорпарафина может рассматриваться на основе механизма его действия как аддитивного антипирена, не вступающего в реакции с целлюлозой ткани [13]. К такому типу антипирентов относят галлоген-, в частности хлор-, содержащие вещества с высокой полярностью, препятствующей развитию устойчивых внутри- и межмолекулярных взаимодействий [15]. Меньшая на 3,2% потеря массы в целом по второму температурному интервалу относительно материала без пропитки происходит вследствие того, что действие аддитивных антипирентов, в частности хлорпарафина, направлено на формирование при нагревании коксообразной закапсулированной поверхности из-за обугленного остатка, ограничивающего распространение процесса горения.

Третья область в высокотемпературной зоне эксперимента 379-560°C характеризуется дополнительной потерей массы согласно ТГ-кривой на 23,01% согласно ТГ анализу. Общая потеря массы в исследуемом диапазоне 30-560 °C составляет 96,19%, с образованием кокса в 3,81%, что на 0,9% выше, чем у ткани без пропитки за счет дополнительного остатка от разложения парафиновой компоненты хлорпарафина. Именно за счет образования термостойкой капсулы при разложении хлорпарафина, температура окончания

термодеструкции сместилась на 60°C в высокотемпературную область относительно ткани без пропитки и оставила 560°C относительно 500°C для исходной ткани.

По данным ДТГ-анализа скорость потери массы на третьей стадии составила 2,2%/мин и наиболее интенсивна при 483°C, что на 9°C выше, чем у ткани без пропитки. Экзотермический пик на кривой ДТА имеет максимум при 483°C, что свидетельствует о смещении процессов с выделением тепла на 6°C в высокотемпературную область, относительно пика на кривой ДТА для ткани без пропитки, что обусловлено формированием слоя обугленного хлорпарафина, сдерживающего окислительные и деструктивные процессы в материале ткани. Вследствие сложности процессов, происходящих при нагревании целлюлозной ткани с аminosиланом и хлорпарафином в замкнутой среде воздуха, вероятные механизмы которых охарактеризованных выше, кроме коксового остатка компонентов пропиточной смеси и целлюлозы ткани, по окончании ТГ-ДТГ и ДТА исследований могут регистрироваться: смолистый остаток левоглюкозана, H<sub>2</sub>O, CO и CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, предельные и непредельные углеводороды, спирты, кетоны и альдегиды [13].

### Заключение

На основании проведенного термического анализа целлюлозосодержащих материалов, обработанных водоотталкивающей композицией, выполненного методами термогравиметрии, дифференциально-термического и дифференциально-термогравиметрического анализа, можно сделать следующие выводы:

1) Водоотталкивающая композиция, основанная на смеси аminosилана и хлорпарафина, повышает термическую устойчивость исследуемой ткани в области начала интенсивной термодеструкции (279-371°C), что подтверждается снижением скорости потери массы на кривых ДТГ в 2 раза, относительно образца без пропитки и образца материала с аminosиланом.

2) В образцах ткани с пропиткой аminosиланом при нагревании по данным ДТА регистрируются конкурирующие процессы, требующие как затрат энергии, например, на образование дополнительных структур, так и происходящие с ее выделением при окислительной деструкции материалов. В образцах с пропиткой аminosиланом и хлорпарафином начало процессов интенсивной деструкции с выделением тепла смещено на 19°C в более высокотемпературную область относительно образца с аminosиланом.

3) Хлорпарафин выполняет функцию антипирена, что подтверждается данными ТГ, отображающими смещение окончания процессов потери массы на 60°C в область высоких значений температур у ткани с аminosиланом и хлорпарафином относительно необработанной ткани за счет образования дополнительного защитного коксового слоя, служащего барьером для распространения горения.

Таким образом, водоотталкивающая пропитка, сочетающая в себе аminosилан и хлорпарафин, эффективно улучшает как гидрофобные, так и огнезащитные свойства целлюлозосодержащего материала, не ухудшая при этом ее тепловую стабильность и механические характеристики. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки универсальных материалов для рабочей одежды, сочетающих в себе комфорт хлопка с повышенной защитой от влаги и огня, что актуально для эксплуатации в сложных промышленно-климатических условиях.

### Литература

1. А. А. Халилова, Н. В. Тихонова, *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)*. 1. С. 342-345 (2024).
2. Г. Г. Лутфуллина, Л. Ю. Махоткина, А. А. Халилова, *Костюмология*, 4, 1, С. 7 (2019).
3. А. А. Халилова, Н. В. Тихонова, В сб. *Современные пожаробезопасные материалы и технологии*, Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, Иваново, 2024. С. 530-533.
4. А. А. Халилова, Н. В. Тихонова, И. Ф. Сайфутдинова, *Технологии и качество*, 4(66), 7-13 (2024). DOI: 10.34216/2587-6147-2024-4-66-7-13.
5. Е. А. Сергеева, *Химические волокна*, 3, 24 (2010). Переводной аналог: Е. А. Sergeeva, *Fibre Chemistry*, 42, 3, 152-156 (2010).
6. Е. А. Сергеева, С. В. Илюшина, *Швейная промышленность*, 6, 40-42 (2011).
7. А. А. Азанова, *Вестник Казанского технологического университета*, 15, 13, 158 (2012).
8. А. В. Шахворостов, Ж. Е. Ибраева, С. Е. Кудайбергенов, *Новости науки Казахстана*, 3(133), 132-140 (2017).
9. В. Г. Спиридонова, О. Г. Циркина, А. В. Петров, А. Л. Никифоров, С. Н. Ульева, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 5(389), 92-97 (2020).
10. В. Е. Ситникова, А. А. Пономарева, М. В. Успенская, *Методы термического анализа. Практикум*. Университет ИТМО, СПб, 2021. 152 с.
11. Е. Н. Черезова, Ю. С. Карасева, Н. М. Х. Аль-Базили, К. А. Момзякова, *Вестник Технологического университета*, 23, 10, 30-33 (2020).
12. С. Н. Русанова. Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский гос. технол. ун-т, Казань, 2000. 16 с.
13. А. А. Берлин, А. Б. Сивенков, Г. Ш. Хасанова, *Горение и плазмохимия*, 19, 2, 65-77 (2021). DOI: 10.18321/crc430.
14. Ю. И. Рубцов, А. И. Казаков, Л. П. Андриенко, Г. Б. Манелис, *Физика горения и взрыва*, 29, 6, 49-53 (1993).
15. А. Н. Волоцкой, Ю. В. Юркин, В. Д. Черкасов, В. В. Авдонин, И. А. Мансурова, *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*, 9, 15-23 (2018). DOI: 10.12737/article\_5bab4a18018689.04154876/.

### References

1. A. A. Khalilova, N. V. Tikhonova, *Physics of fibrous materials: structure, properties, high technology and materials (SMARTEX)*. 1. pp. 342-345 (2024).
2. G. G. Lutfullina, L. Yu. Makhotkina, A. A. Khalilova, *Costume design*, 4, 1, P. 7 (2019).

3. A. A. Khalilova, N. V. Tikhonova, I. F. Sayfutdinova, *Technologies and Quality*, 4(66), 7-13 (2024). DOI: 10.34216/2587-6147-2024-4-66-7-13.
4. A. A. Khalilova, N. V. Tikhonova, In the collection. *Modern fireproof materials and technologies*, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation, Ivanovo, 2024. P. 530-533.
5. E. A. Sergeeva, *Chemical fibers*, 3, 24 (2010). Translated analogue: E. A. Sergeeva, *Fibre Chemistry*, 42, 3, 152-156 (2010).
6. E. A. Sergeeva, S. V. Ilyushina, *Sewing industry*, 6, 40-42 (2011).
7. A. A. Azanova, *Herald of Kazan Technological University*, 15, 13, 158 (2012).
8. A. V. Shakhvorostov, Zh. E. Ibraeva, S. E. Kudaibergenov, *Science News of Kazakhstan*, 3(133), 132-140 (2017).
9. V. G. Spiridonova, O. G. Tsirkina, A. V. Petrov, A. L. Nikiforov, S. N. Uleva, *News of higher educational institutions. Textile Technology*, 5(389), 92-97 (2020).
10. V. E. Sitnikova, A. A. Ponomareva, M. V. Uspenskaya, *Methods of thermal analysis. Workshop*. ITMO University, St. Petersburg, 2021. 152 p.
11. E. N. Cherezova, Yu. S. Karaseva, N. M. H. Al-Bazili, K. A. Momzyakova, *Herald of Technological University*, 23, 10, 30-33 (2020).
12. S. N. Rusanova. Abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation, Kazan State Technological University, Kazan, Russia. University, Kazan, 2000. 16 p.
13. A. A. Berlin, A. B. Sivenkov, G. Sh. Khasanova, *Combustion and Plasma Chemistry*, 19, 2, 65-77 (2021). DOI: 10.18321/cpc430.
14. Yu. I. Rubtsov, A. I. Kazakov, L. P. Andrienko, G. B. Manelis, *Combustion and Explosion Physics*, 29, 6, 49-53 (1993).
15. A. N. Volotskoy, Yu. V. Yurkin, V. D. Cherkasov, V. V. Avdonin, I. A. Mansurova, *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 9, 15-23 (2018). DOI: 10.12737/article\_5bab4a18018689.04154876/.

---

© **А. А. Халилова** – старший преподаватель кафедры «Конструирования одежды и обуви» (КОиО), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, KhalilovaAA@corp.knrtu.ru; **Н. В. Тихонова** – д.т.н., профессор кафедры, заведующий кафедрой КОиО КНИТУ, TikhonovaNV@corp.knrtu.ru; **Е. А. Сергеева** – магистрант кафедры КОиО КНИТУ, prof.sergeeva@gmail.com.

© **А. А. Khalilova** – Senior Lecturer, Department of Clothing and Footwear Design (C&FD), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, KhalilovaAA@corp.knrtu.ru; **N. V. Tikhonova** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the C&FD department, KNRTU, TikhonovaNV@corp.knrtu.ru; **E. A. Sergeeva** – Master-Student, the C&FD department, KNRTU, prof.sergeeva@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 10.06.25.

Дата принятия рукописи в печать – 23.06.25.