

УДК 677.494.675

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ, ХЕМОСОРБИРОВАННЫХ НА ПОЛИЭФИРНОМ ВОЛОКНИСТОМ МАТЕРИАЛЕ, НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЕГО ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ

Рева О.В.\*, к.х.н., доцент, Богданова В.В.\*, д.х.н., профессор,  
Назарович А.Н.\*, Шукело З.Н.\*\*

\*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь  
\*\*НИИ физико-химических проблем БГУ

e-mail: volha107@rambler.ru

*Изучена зависимость закономерностей термоокислительной деструкции композиционной нанослоистой системы на основе полиэфирного волокнистого утеплителя с химически привитыми неорганическими антипиренами от химического и гранулометрического состава огнезащитной композиции.*

*The dependence of the thermo-oxidative degradation regularities of composite nano-layered system, based on polyester fiber insulation with chemically grafted to it inorganic flame retardants, from the chemical consist and particle size distribution in the burning protection composition was investigated.*

(Поступила в редакцию 11 декабря 2015 г.)

**Введение.** Волокнистые полиэфирные (ПЭ) материалы, применяемые для изготовления изделий как бытового (одежда, мебель, предметы интерьера), так и технического (канаты, стропы, такелажные ленты, плетеные гибкие рукава) назначения, очень разнообразны по плотности, упругости и другим показателям. Полиэфирные волокна обладают высокими техническими характеристиками: однородность по толщине, высокая прочность, химическая стойкость, устойчивость к многократным деформациям, истиранию, относительно низкая стоимость и доступность сырья [1]. Серьезным недостатком этих материалов является высокая горючесть, причем закономерности термодеструкции и горения полиэфиров существенно отличаются не только от характеристик других полимерных материалов, но и для разных типов ПЭ [2]. Многие вопросы в области снижения горючести и воспламеняемости полиэфирных материалов – в особенности нетоксичными реагентами – остаются до настоящего времени нерешенными, несмотря на обилие работ, посвященных исследованиям замедлителей горения (ЗГ) для полиэфиров.

Часто придание огнестойкости волокнистым полиэфирным материалам осуществляется пропиткой или опрыскиванием растворами и суспензиями антипиренов, однако большинство таких обработок неустойчиво к стирке и недолговечно. Для закрепления ЗГ на поверхности тканей и волокон используют плазменную обработку,  $\beta$ - и  $\gamma$ - облучение (что эффективно только в случае веществ, способных к радиационно-привитой сополимеризации), клеящие композиции и поверхностно-активные вещества [3]. В последние годы появились разработки по повышению гигроскопичности и сорбционной способности полиэфирных нитей [4]; в том числе по отношению к ЗГ органической природы.

Достаточно эффективными методами огнезащиты являются: внесение ЗГ в расплав полимера и модификация химического состава мономеров полиэфира, что разрабатывается уже достаточно долгое время. Известно, что органические производные галогенов, фосфора, азота, сурьмы и висмута обладают наилучшими способностями ингибировать процесс горения полимерных материалов как в газовой, так и в конденсированной фазах [3-8]. В работе [7] доказано, что характер процессов взаимодействия сурьма-галогенсодержащих огнезамедлительных добавок в карбо- и гетероцепных полимерах один и тот же, что позволяет использовать рекомендации по увеличению эффективности этих добавок для полимеров других классов, в том числе полиэфиров.

В значительном количестве работ рассматривается механизм термодеструкции полиэфирных материалов разных типов, модифицированных при синтезе фосфоргалогенсодержащими алкадиенами, галогенпроизводными терефталевой кислоты, фосфор-

содержащими звеньями (типа триалкил- триарил- фосфатов и фосфитов, фосфор-амидов) и др. путем сополимеризации с мономерами полиэфиров [3, 5, 6]. В результате такой модификации при термодеструкции начало термоокислительного распада макромолекул существенно смещается в область более высоких температур путем блокирования обычных для полиэфиров реакций отщепления концевых групп и распада сложноэфирных группировок с образованием радикалов, а также связывания кислородсодержащих радикалов [5, 6].

Весьма продуктивным способом огнезащиты синтетических волокон является крейзинг-модификация: разновидность пластической деформации полимера в адсорбционно-активных средах, содержащих антипирен, в результате которой в объеме полимера возникает уникальная фибриллярно-пористая структура. При снятии механического напряжения происходит коллапс пористой системы с механическим захватом раствора, который после дальнейшей термообработки остается в объеме полимера в виде наноразмерного включения [1]. Однако многие перспективные антипирены при такой обработке разрушаются, а полиэфирные волокна теряют упругость и механическую прочность.

Перечисленные методы позволяют получить термо- и огнестойкие волокна с высокими физико-механическими и технологическими свойствами, однако большинство из них сложны, требуют достаточно дорогих реагентов; а при высоких температурах модифицированные полимеры выделяют токсичные соединения.

Эффективными нетоксичными замедлителями горения являются неорганические соли азота и фосфора; особенно хорошо предотвращают вторичное тление волокнистых горючих материалов комплексные нестехиометрические металлофосфаты аммония [9]. Эти соединения весьма разнообразны по химическому и фазовому составу; а условия синтеза и диспергирования этих веществ определяют их физико-химические и огнезащитные свойства [9]. Закономерности плавления и термодеструкции этих соединений описаны в работах [10, 11]. Так, имеются существенные различия в термическом поведении безводных и гидратированных фосфатов двухвалентных металлов-аммония: в зависимости от количества гидратной воды они претерпевают изменения в различных температурных интервалах. Термолиз безводных солей начинается при температурах выше 350 °С, а моногидратов – начиная с 130-260 °С. Термолиз происходит с постадийным или параллельным выделением в газовую фазу воды и аммиака и поликонденсацией фосфат-ионов, причем выход H<sub>2</sub>O и NH<sub>3</sub> в газовую фазу может продолжаться до 400-450 °С [9-11]. Особо отмечается [12] синергическое действие производных азота и фосфора при разложении неорганического антипирена по отношению к ингибированию горения различных материалов, в том числе тлеющих, в газовой и конденсированной фазе.

Современных оригинальных и обобщающих работ по огнезащитным свойствам металлофосфатов аммония, в особенности в составе полимерной матрицы очень немного. Рекомендации по синтезу соединений определенного состава в виде устойчивых дисперсий для огнезащиты тех или иных материалов отсутствуют.

Кроме того, технологическим недостатком нетоксичных неорганических огнезамедлительных композиций является их плохая совместимость с расплавом полиэфиров: в достаточном для обеспечения термо- и огнестойкости полиэфира количестве они вызывают снижение механической прочности и пластичности полимера. При поверхностных обработках (пропитка, опрыскивание) готового полиэфирного волокна, характеризующегося гладкой и химически инертной поверхностью, эти соединения не закрепляются в достаточных количествах на волокне без дополнительной его активации, либо впоследствии вымываются при стирке.

Нами разработан метод химической пришивки неорганического антипирена к поверхности полиэфирного материала с использованием коллоидных частиц соединений Sn(II) и получением нанослоистой композиционной системы, обеспечивающей полиэфирному волокнистому материалу перманентную огнестойкость [13-15]. Доказано, что обеспечение прочной химической привязки огнезащитной неорганической композиции к полиэфирному материалу зависит от очень большого количества факторов: химического состава огнезащитной композиции; комплексного состава, размеров и концентрации частиц коллоидной фазы в активирующем растворе SnCl<sub>2</sub>; условий предварительного травления и сушки [14, 15].

Механизм взаимодействия неорганического антипирена с полимером, в особенности при его поверхностной химической прививке очень мало изучен, и совершенно неясно влияние комплексного и гранулометрического состава сложносочиненных неорганических замедлителей горения и методов модификации поверхности полимера на закономерности процессов термодеструкции и горения полиэфиров, огнезащищенных по методу «химической микросборки».

Целью данной работы было исследование влияния состава применяемых аммонийно-фосфатных неорганических замедлителей горения на закономерности процесса термоокислительной деструкции огнезащищенных полиэфирных волокнистых материалов.

**Методы исследования.** В данной работе выбор был остановлен на нетканом объемном полиэфирном утеплителе, поскольку для воздушно наполненных волокнистых материалов процесс горения осложняется очень большой площадью поверхности и легкостью тепломассопереноса; придание им огнестойкости является весьма сложной комплексной задачей, так как ряд обработок, традиционных для тканей плотного плетения к ним неприменим.

Огнезащитная обработка включала: предварительное кислое травление полиэфирного материала, нанесение адгезионного подслоя соединений олова из этанольных растворов  $\text{SnCl}_2$  оптимального состава и срока хранения (5-15 суток), пропитку огнезащитными композициями АН-10, CuANS-10 и CuАН 6.5-20, представляющими собой сложносочиненные мелкодисперсные системы на основе фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония различного химического и гранулометрического состава, и сушку при температуре 120 °С в течение 20 мин до полного высыхания нетканого утеплителя. Традиционная после сушки стадия термофиксации [13, 15] не проводилась, поскольку тонковолокнистый воздушно наполненный утеплитель при этом оплавляется, теряет упругость и геометрические характеристики. Стирку материала проводили по СТБ 11.03.02-2011 (30 мин при 60 °С со стиральным порошком 5 г/л). Количество ЗГ, закрепившегося в единице объема утеплителя, определяли на аналитических весах ВРЛ-200, погрешность взвешивания составляет  $\pm 0,05$  мг.

Огневые испытания проводились на горелке Бунзена по СТБ 11.03.02-2011 [16]. Каждый образец утеплителя поджигали не менее 3-х раз с интервалом после затухания 10 сек. В соответствии с требованиями СТБ время самостоятельного горения образца не должно превышать 5 секунд, не должно образовываться горящих капель полимера.

Электронно-микроскопическое исследование размеров, формы и концентрации коллоидных частиц в объеме огнезащитных композиций проводили с использованием просвечивающего электронного микроскопа ЭМВ-100ЛМ. Препарирование частиц твердой фазы проводили следующим способом. Пленку коллодия, полученную растеканием на поверхности дистиллированной воды 2 % раствора коллодия в амилацетате, наносили на медную сеточку и высушивали. После испарения растворителя и сушки наносили на пленку каплю исследуемого раствора. Затем пленку коллодия на сеточке несколько раз ополаскивали дистиллированной водой для удаления растворимых солей и высушивали. Минимально различимые при просмотре на электронном микроскопе частицы имели размер  $\sim 1$  нм.

Дифференциальный термогравиметрический и калориметрический анализ (ДСК) исходного и огнезащищенного полиэфирного утеплителя проводили на приборе NETZSCH STA 449 С с одновременной регистрацией на спектре кривых подъема температуры, потери массы образца и поглощения/выделения теплоты на единицу массы.

**Результаты и обсуждение.** Результаты гравиметрических исследований показали, что в случае огнезащитной композиции АН-10 не обнаружено существенных различий в количестве закрепившегося на поверхности нетканого утеплителя антипирена в зависимости от наличия стадии активации в коллоидном раствор  $\text{SnCl}_2$ . Во всех вариантах обработки оно составляет в среднем 2,0-3,5 мг/см<sup>3</sup>. Тогда как для антипиренов CuАН 6,5-20 и CuANS-10 закрепившееся на полимерной поверхности количество ЗГ в случае применения промежуточной обработки этанольными зольми соединений двухвалентного олова возрастает в 3-4 раза (до 8-12 мг/см<sup>3</sup>). В ряде случаев количество антипиренов CuАН 6,5-20 и CuANS-10, закрепленных на полиэфирной матрице значительно (в 2-3 раза) превышает массу самого образца и составляет 22,2-27,8 мг/см<sup>3</sup>.

Очевидно, это связано с различиями в химическом и гранулометрическом составе исследованных замедлителей горения. Так, огнезащитная композиция АН-10 представляет собой грубодисперсную суспензию плохо растворимого слабого электролита с размерами частиц в десятки микрон. Огнезащитные композиции CuАН 6,5-20 и CuАНС-10 – сложносоставные системы, в которых размер частиц твердой фазы не превышает долей микрона, а в растворной части присутствуют ионы двух- и трехвалентных металлов и округлые коллоидные частицы с размерами 25-75 нм, Рис. 1.

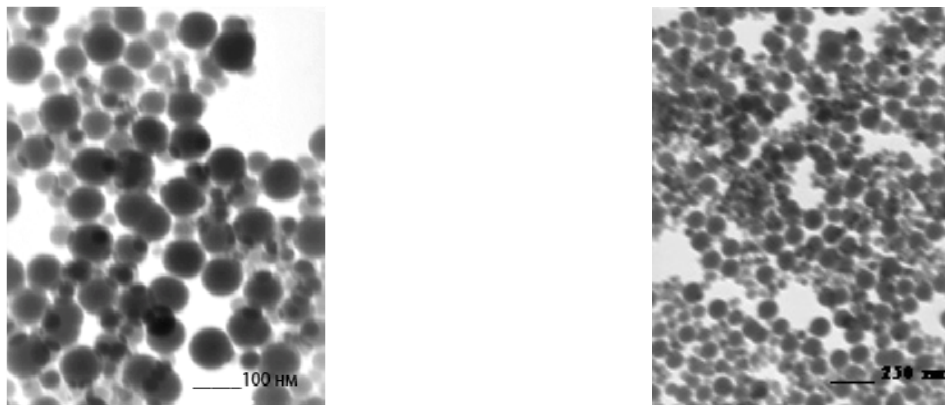


Рисунок 1 – ПЭМ фотографии частиц, формирующихся в растворной части огнезащитных композиций CuАН 6,5-20 и CuАНС-10

По всей вероятности, именно эти частицы сорбируются на поверхности наноразмерного активирующего слоя соединений олова и вступают с ними в химическое взаимодействие. Грубодисперсные частицы композиции АН-10 к такому взаимодействию очевидно не способны не только химически, но и по геометрическим и электрофизическим параметрам. Как следствие, композиция АН-10, в отсутствие в огнезащитной обработке высокотемпературной стадии термофиксации (приплавления ЗГ к полимеру), невозможной для тонковолокнистых объемных материалов, при стирке почти полностью вымывается с поверхности полиэфирного утеплителя. Композиции CuАН 6,5-20 и CuАНС-10, содержащие наночастицы, способные к ионно-обменному и/или донорно-акцепторному взаимодействию с соединениями активатора Sn(II), не только не вымываются при водных обработках, но и, как показано ниже, обеспечивают перманентный огнезащитный эффект путем изменения механизма термодеструкции и горения обработанного полимера. Таким образом, установлено, что количество аммонийно-металлофосфатного антипирена, химически закрепленного на волокнистом материале через активирующий слой соединений Sn(II), принципиальным образом зависит от химического и гранулометрического состава ЗГ.

При изучении закономерностей термоокислительной деструкции объемного полиэфирного утеплителя, модифицированного различными ЗГ, было установлено следующее. Для исходного полиэфирного утеплителя, расплавление без потери массы начинается при 240,5 °С, что требует достаточно незначительных энергетических затрат, ~57,31 Дж/г, как показывает кривая теплообмена, Рис. 2.

Потеря массы полиэфирным материалом за счет отщепления мономеров и дефектных концевых групп начинается при температуре ~320 °С. Процессы образования газообразных продуктов за счет полной термодеструкции макромолекул полиэфира и разрушения мономеров с очень значительной потерей массы ~80 % резко интенсифицируются при достижении 420 °С. При 546,8 °С начинается активное пламенное горение газообразных продуктов разложения полиэфира со значительным выделением тепла – 4476 Дж/г, Рис. 2; остаточная коксовая масса составляет всего 1,44 % от исходной.

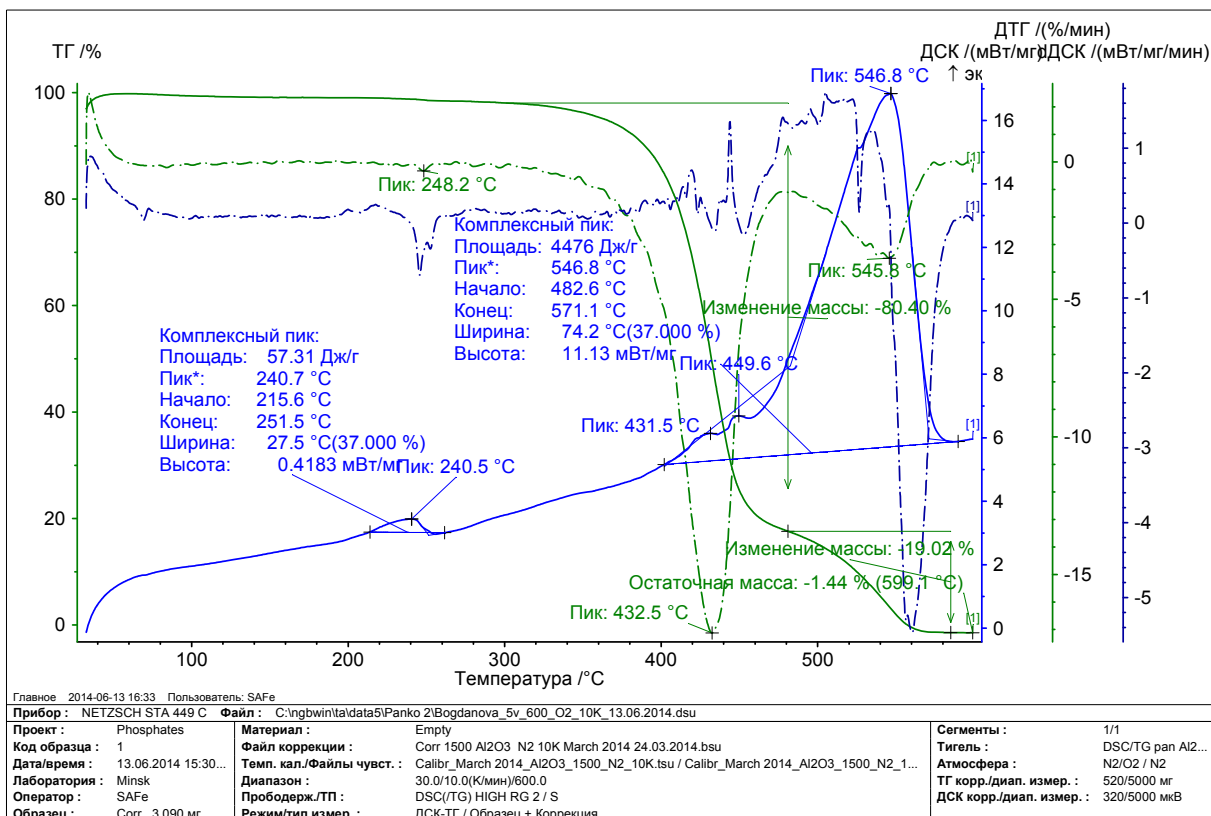


Рисунок 2 – Термогравиметрические кривые для нетканого полиэфирного утеплителя без огнезащитной обработки

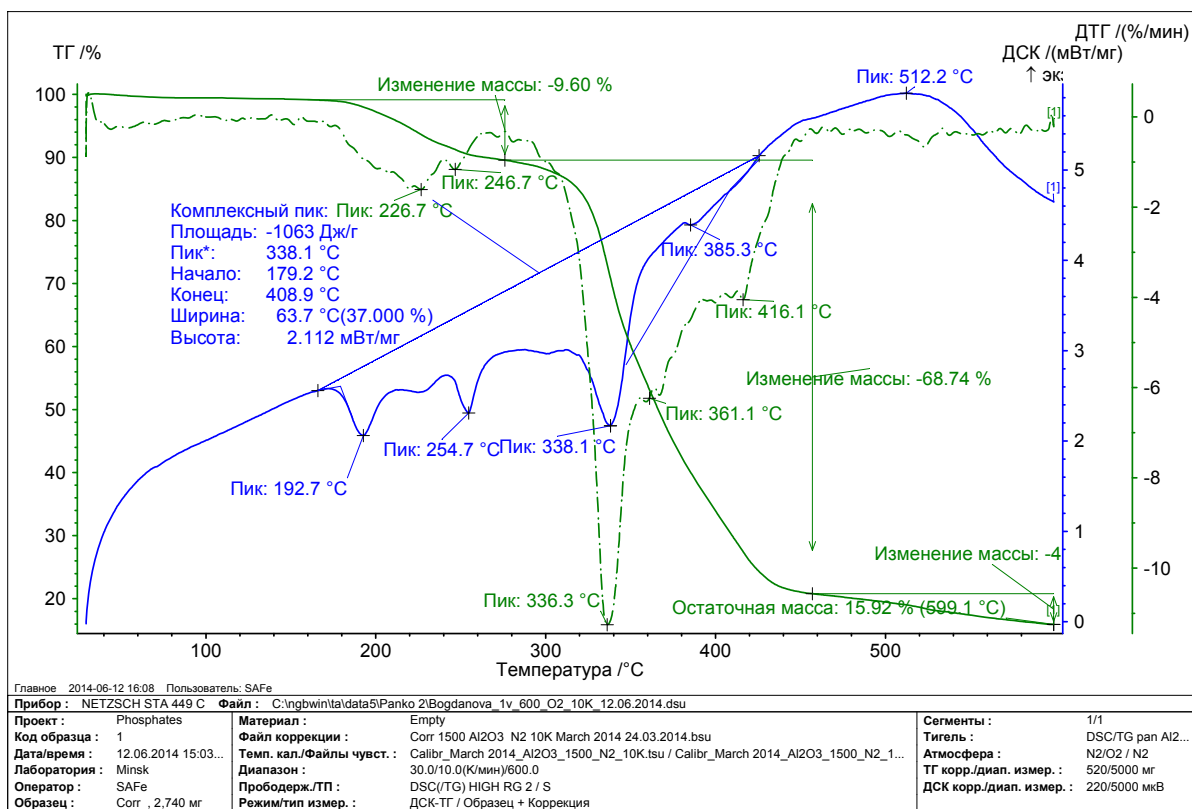


Рисунок 3 – Термогравиметрические кривые для полиэфирного утеплителя, ступенчато обработанного этанольным раствором SnCl<sub>2</sub> и огнезащитной композицией CuAHS-10

В случае ступенчатого нанесения на полиэфирный материал огнезащитной композиции CuAHS-10 с использованием интермедиативного подслоя соединений Sn(II) наблюдается принципиальное изменение механизма термодеструкции материала, Рис. 3. Несмот-

ря на то, что потеря массы образцом начинается при более низкой температуре 180 °С, этот эффект соответствует скорее началу разложения огнезащитной композиции, чем полиэфира, поскольку к 360 °С потеря массы образца составляет всего 9,6 %. Сложный вид дифференциальной кривой в области температур 190-385 °С, включающей несколько отчетливых минимумов при 192, 254.7, 338.1 °С, вне сомнения, отражает процессы расплавления и разложения компонентов огнезащитной композиции с поглощением значительного количества тепла (-1063 Дж/г), которые блокируют процесс деструкции полиэфира. Активное разложение полиэфира на мономеры и их разрушение с потерей массы 68,74 % начинается только после достижения 385 °С; причем пламенное горение продуктов деструкции отсутствует – выделения соответствующего количества теплоты не зафиксировано вплоть до 600 °С, Рис. 3. Остаточная коксовая масса – 15,92 % – практически в 10 раз превышает таковую для исходного полиэфирного утеплителя.

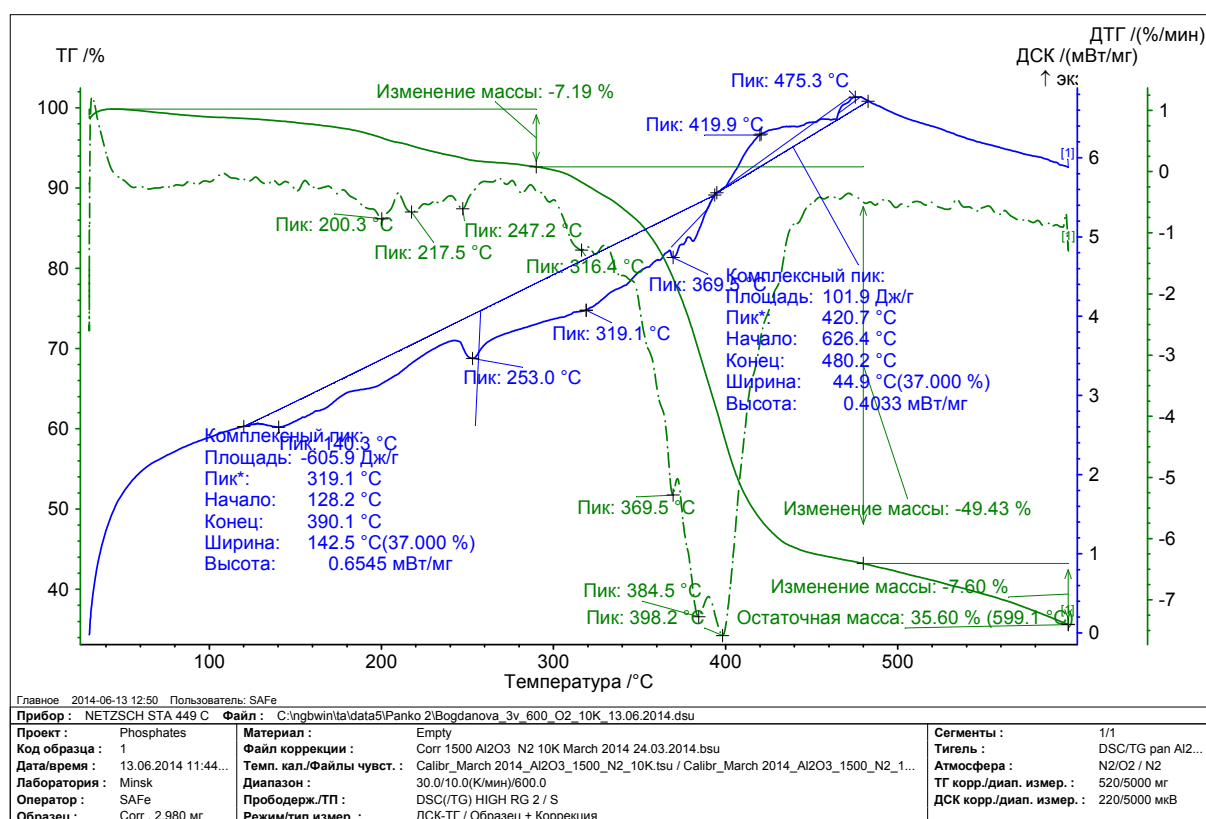


Рисунок 4 – Термогравиметрические кривые для полиэфирного утеплителя, ступенчато обработанного этанольным раствором SnCl<sub>2</sub> и огнезащитной композицией CuAH 6.5-20

В связи с тем, что огнезащитная композиция CuAH 6,5-20 дополнительно к аммонийным металлофосфатам содержит клеящий агент, нами было сделано предположение, что огнестойкость обработанного им полиэфирного нетканого утеплителя должна быть наивысшей.

Исследование показало, что подобно полиэфирному материалу, обработанному композицией CuAHS-10, для утеплителя с антипиреном CuAH 6,5-20 в области температур 140-400 °С происходят сложные процессы одновременного расплавления антипирена и полиэфира и, возможно, их взаимодействия в жидкой фазе, Рис. 4. Хотя эндотермические пики на дифференциальной кривой выражены не столь явно, как в случае огнезащитной композиции CuAHS-10, разрушение полимера и выход продуктов деструкции в газовую фазу еще более замедлены, Рис. 4. Активная потеря массы образцом за счет распада полимерного скелета и деструкции крупных мономеров начинается при 380 °С, пламенное горение продуктов деструкции полиэфира отсутствует, а остаточная коксовая масса достигает 35,5 %.

Эти существенные изменения закономерностей термоокислительной деструкции

модифицированного полиэфирного материала наблюдаются только в случае обеспечения его перманентной огнезащиты. Тогда как в случае отсутствия химической привязки огнезащитной композиции к полиэфирной матрице (композиция АН-10), что иллюстрируется и очень малым количеством закрепленного антипирена, закономерности термодеструкции и горения образца очень мало отличаются от необработанного материала, Рис. 5.

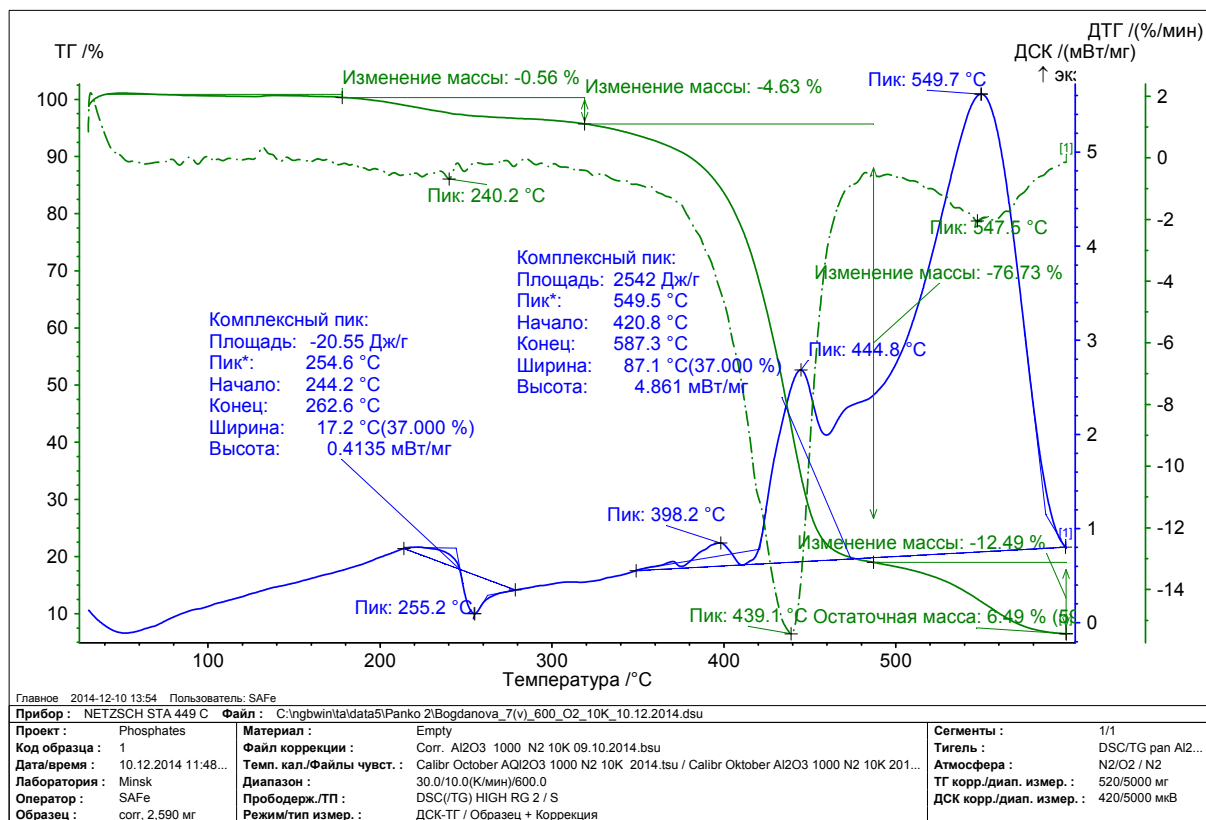


Рисунок 5 – Термогравиметрические кривые для полиэфирного утеплителя, ступенчато обработанного этанольным раствором SnCl<sub>2</sub> и огнезащитной композицией АН-10

По сравнению с необработанным образцом, лишь несколько усложняется процесс термодеструкции полиэфира, активное пламенное горение газообразных продуктов разложения полиэфира со значительным выделением тепла – 2542 Дж/г начинается практически при той же температуре 549,7 °C, Рис. 5; после сгорания полиэфирного утеплителя остаточная коксовая масса составляет всего 6,49 % от исходной. Таким образом, очень малые количества АН-10, закрепившиеся на поверхности полиэфира, хотя и несколько сдвигают разложение полимера в область более высоких температур – до 444 °C, не обеспечивают требуемого огнезащитного эффекта.

Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии свидетельствуют, что механизм плавления, термодеструкции и горения огнезащищенного воздушно наполненного полиэфирного материала существенно изменяется только в случае хемопривязки аммонийно-металлофосфатных неорганических антипиренов к полимерной матрице, для обеспечения которой в составе огнезащитной композиции должны присутствовать частицы и ионы, способные к химическому взаимодействию с активатором – наночастицами соединений Sn(II). В этом случае термодеструкция полиэфира смещается в более высокотемпературные области до 50–60 °C, а также происходит резкое падение количества выделяемого тепла на единицу массы полимера, пламенное горение газообразных продуктов деструкции отсутствует.

Как показали огневые испытания, эта полученная «химической микросборкой» комплексная система с организованными связями, несмотря на относительно небольшое количество ЗГ, обеспечивает перманентную огнезащиту полиэфирных материалов на уровне ПВ-0. Так, исходный образец полиэфирного утеплителя (или без хемопривязки ЗГ через

адгезионный подслои) после кратковременного поджигания продолжает горение с активным растеканием горящих капель, пока не сгорит практически полностью, Рис. 6а, 6б. При оптимальном сочетании условий проведения всех стадий обработки (состава и срока хранения золь SnCl<sub>2</sub>, химического и гранулометрического состава композиции металлофосфатного неорганического антипирена) после отнятия пламени полиэфирный материал сразу же затухает. На фотографии видно, что сгорела только та часть образца, которая находилась непосредственно в пламени горелки, Рис. 6в. Оставшаяся неповрежденная часть утеплителя практически не деформирована и не потеряла функциональных свойств.

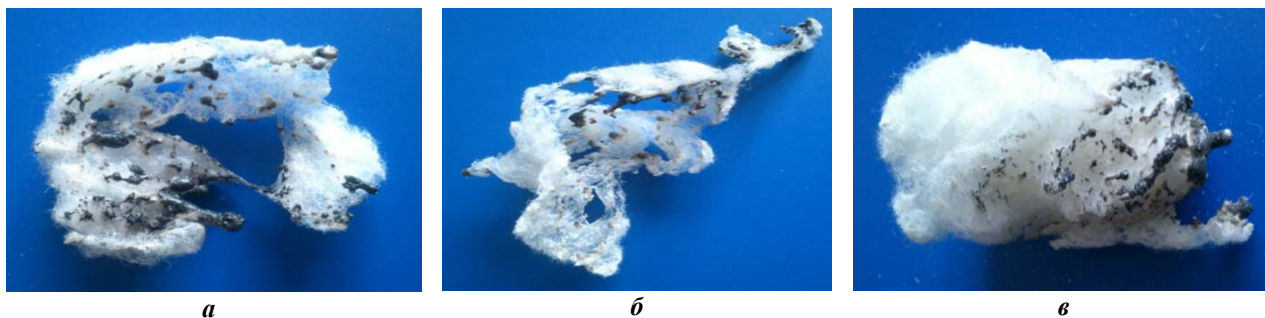


Рисунок 6 – Образцы полиэфирного утеплителя после огневого испытания; а – исходный материал, б – после ступенчатой огнезащитной обработки АН-10, в – CuAHS-10

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлено, что количество аммонийно-металлофосфатного антипирена, химически закрепленного на полиэфирном волокнистом материале через активирующий слой соединений Sn(II), принципиальным образом зависит от химического и гранулометрического состава огнезащитной композиции. Наивысшей способностью к хемосорбции на активированной полимерной поверхности отличаются сложносоставные системы, в которых размер частиц твердой фазы не превышает долей микрона, а в растворной части присутствуют ионы двух- и трехвалентных металлов и коллоидные частицы. Эти композиции (CuAHS-10 и CuAH 6,5-20) обеспечивают закрепление ЗГ на полиэфирной поверхности в 3-5 раз большее, чем грубодисперсные суспензии (АН-10).

Установлено, что в случае химического закрепления на полиэфирном волокне достаточного количества неорганического аммонийно-металлофосфатного антипирена в результате ступенчатой огнезащитной обработки наблюдается принципиальное изменение механизма термодеструкции и окисления материала. Доказано, что поверхностная «химическая сшивка» антипирена с полимером приводит не только к замедлению термодеструкции полиэфира и сдвигу ее в область более высоких температур на 50-60 °С, затруднению выхода продуктов расщепления молекул полиэфира в газовую фазу; но и к формированию массивного коксового слоя на границе раздела фаз (в 10-15 раз большего, чем для исходного материала), и, как следствие, исчезновению пламенного горения.

По результатам огневых испытаний этот полученный «химической микросборкой» композиционный материал на основе полиэфирного волокнистого утеплителя с организованными связями обладает перманентной огнестойкостью на уровне ПВ-0.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Перепёлкин, К.Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности / К.Е. Перепёлкин. // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева) – 2002. – Т. 16, № 1. – С. 31-48.
2. Булгаков, В.К. Моделирование горения полимерных материалов / В.К. Булгаков, В.Н. Кодолов, А.М. Липанов. – М.: Химия, 1990. – 238 с.
3. Баранова, Т.Л. Огнезащищенные полиэфирные волокна / Т.Л. Баранова, Н.А. Смирнова, Э.М. Айзенштейн, М.Н. Горельшева // Обз. Инф. НИИТЭХИМ. Серия: Пром. хим. волокон. – М.: НИИТЭХИМ, 1986. – 41 с.
4. Гоношилов, Д.Г. Новые пропиточные огнезащитные составы на основе фосфор-боросодержащего олигомера полиакриламида / Д.Г. Гоношилов, В.Ф. Каблов, Н.А. Кейбал, С.Н. Бондаренко // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 8. – С. 627–630.



5. Кокорева, О.Н. Влияние фосфорсодержащих реакционноспособных замедлителей горения на термическую деструкцию полиэфиров / О.Н. Кокорева, Н.Г. Кузина, М.В. Виноградов, Л.Н. Машляковский. – М.: НИИТЭХИМ, 1988. – 10 с.
6. Лопатин, Д.В. Химическая модификация полиэтилентерефталата / Изв. АН БССР, Сер. хим. наук. – Деп. 22.06.81.– № 3005-81. – 31 с.
7. Богданова, В.В. Огнегасящее действие сурьма-галогенсодержащих синергических смесей в полимерах различных классов / В.В. Богданова // Вестник БГУ. Сер. 2. – 2000. – № 2. – С. 15–23.
8. Об эффективности сурьма галогенсодержащих антипиренов / В.В. Богданова [и др.] // Высокомолекул. соед. – М.: Наука, 1992. – Т. 34, № 7. – С. 74-81.
9. Богданова, В.В. Синтез и физико-химические свойства фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония (Обзор) / В.В. Богданова, О.И. Кобец // Журн. прикл. Химии. – 2014.– Т 87, Вып.10. – С. 1385–1399.
10. Pujana, A. Synthesis, crystal structure, and magnetic properties of  $\text{NH}_4\text{CuPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  / A. Pujana, J.L. Pizarro, L. Lezama // J. Mater. Chem. – 1998.– Vol. 8, iss. 4. –P. 1055–1060.
11. Touaiher, M. Synthesis and structure of  $\text{NH}_4\text{CoPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  / M. Touaiher [et al.] // Annales de Chimie – Science des Materiaux.– 2001.– Vol. 26, iss. 3. – P. 49–54.
12. Богданова, В.В. Синтез и свойства азот-, фосфорсодержащих замедлителей горения для огнезащиты и тушения древесины и торфа / В.В. Богданова, О.И. Кобец // Полимерные материалы пониженной горючести: Сб. мат. VI межд. конф.– Вологда: ВоГТУ, 2011.– С. 34-36.
13. Рева, О.В. Химическая прививка неорганических функциональных слоев к полимерам / О.В. Рева, В.В. Богданова, З.В. Шукело, Л.В. Радкевич // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2011, Т. 16. – № 3. – С. 90–94.
14. Рева, О.В. Наноинтермедиаторы для прививки огнезащитных композиций к полиэфирным материалам / О.В. Рева, В.В. Богданова, З.В. Шукело, А.С. Лукьянов // Сб. статей по материалам II Всероссийской научно-практ. конференции «Проблемы безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций»: Воронеж, 19 декабря 2013 г.: в 2-х ч. – Ч. 1. – Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России, 2013, – 456 с.– С. 398-403.
15. Рева, О.В. Определение оптимального метода создания наноструктурированных композиций на основе полиэфирных матриц, обладающих перманентной огнестойкостью / О.В. Рева, А.С. Лукьянов // Вестник КИИ МЧС.– 2015. –№ 2 (22). – С.35-43.
16. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний: СТБ 11.03.02-2010. – Введ. 01.01.11 (с отменой на территории РБ НПБ 10-2000, НПБ 12-2000, НПБ 80-2003). – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2011. – 25 с.