

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ВОГНЕЗАХИСТУ ТКАНИНИ ІНТУМЕСЦЕНТНИМ ПОКРИТТЯМ^{1, 2}**Цапко Ю.В.**, д.т.н., професор,

juriyts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

¹**Бондаренко О.П.**, к.т.н., доцент,

bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

¹**Цапко О.Ю.**, к.т.н., с.н.с.,

alekseytsapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

³**Сарапін Ю.О.**, фахівець,

sia1@i.ua, ORCID: 0000-0003-3114-5934

¹**Жеребчук Д.С.**, студент,

dianazerebcuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7174-132X

¹*Науково-дослідний інститут в'яжучих речовин і матеріалів ім. В.Д. Глуховського**Київський національний університет будівництва та архітектури*

пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна

²*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

вул. Героїв Оборони, 12в, м. Київ, 03041, Україна

³*Управління пожежної безпеки Збройних сил України*

просп. Повітрофлотський, 6, м. Київ, 03168, Україна

Анотація. Опис поведінки вогнезахисних засобів та покриттів, у тому числі і спучувальних, в момент формування теплоізоляційної структури є окремим і складним завданням. Загалом він охоплює обидві стадії процесу теплозахисту: як правило розклад антипіренів під дією температури з поглинанням тепла та виділенням негорючих газів і в подальшому – спучування покриття, яке утворюється при вогнезахисті. Тому постає необхідність дослідження умов утворення бар'єру для теплопровідності та встановлення механізму вогнезахисту від шару до шару коксу. У зв'язку з цим проведено дослідження процесу вогнезахисту при роботі вогнезахисного покриття. За отриманими даними виявлено, що утворення летких продуктів при дії високої температури на покриття проходить з утворенням негорючих речовин. Експериментально встановлено, що при дії теплового потоку на вогнезахисні зразки відбувається інтенсивне виділення інертних газів та зменшення горючих у оберненому порядку. Це доводить ефективність вогнезахисту. При проведених випробуваннях виявлено, що інтенсивність утворення спученого шару коксу переміщується у сторону підвищеної температури. Результати визначення спучувальної здатності покриття для інтумісцентної системи показали, що при дії високотемпературного потоку вигорання матеріалу та втрата маси покриття знижується більше, ніж у два рази за рахунок утворення високотемпературних сполук, при цьому збільшується і час досягнення граничної температури. Покриття при дії високої температури утворює значний коефіцієнт спучення, сприяє утворенню теплоізолювального шару коксу, що запобігає вигоранню тканини і проходженню високої температури до матеріалу, що підтверджується зниженням теплоти згорання. При цьому визначено, що вогнезахисна тканина має майже в 1,3 рази меншу теплоту згорання та характеризується при термічному розкладі зниженням горючих газів у кількості понад 50 % та підвищенням інертних газів у більше, ніж 8 разів.

Ключові слова: захисні засоби, вогнестійкість, леткі продукти, втрата маси, оброблення поверхні, ефективність захисту.

Вступ. Текстильні вироби з природних волокон все частіше використовуються в різних типах будівельних конструкцій, як у постійних, так і, зокрема, в тимчасових спорудах. Під час проживання і опалювання таких споруд можливе займання та швидке поширення пожежі,

оскільки тканина утворює значне пожежне навантаження. Зокрема, 23 лютого 2017 р. на Прикарпатті (Івано-Франківська обл., м. Коломия) сталася сильна пожежа в наметовому містечку 10-ї окремої гірськоштурмової бригади на території військової частини. Однією з причин швидкого розвитку пожежі була відсутність протипожежного захисту подібних виробів з текстильних матеріалів. В результаті загорання знищені 15 50-містних великих польових наметів, де бійці проживали поки йшов ремонт стаціонарних казарм, з причини прилягання до димової труби клапана отвору для її встановлення. Під час гасіння пожежі 2 військовослужбовці отримали травми. Збитки від пожежі становлять 8 млн. 113 тис. 679 грн. Швидкому поширенню вогню сприяв сильний вітер. Незначні травми (легкі опіки рук) при рятуванні майна отримали п'ять військовослужбовців, які забирали особисті речі і частину майна та техніку.

З огляду на той факт, що саме текстильний матеріал чутливий до впливу високої температури, підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовуються будівельні конструкції з тканин, можливо за допомогою їх вогнезахисного оброблення. Для комплексного захисту целюлозовмісних матеріалів (деревини та виробів) від загорання запропоновано використовувати суміші неорганічних солей, але вогнезахисне оброблення цими речовинами для текстильних матеріалів не придатне, тому що на поверхні спостерігається утворення висолів, які осипаються під впливом коливання конструкції, а з часом матеріал втрачає захисні властивості, що приводить до займання горючих конструкцій при дії високотемпературного полум'я.

Особливість вогнезахисту спучуючими покриттями полягає у створенні на поверхні елементів конструкцій теплоізолюючих екранів, які витримують високі температури й безпосередню дію вогню. Крім того, наявність яких дозволяє сповільнити прогрівання матеріалу й зберігати свої функції при пожежі протягом заданого періоду часу, що тим самим переводить деревину до важкогорючих матеріалів. Тому дослідження, що направлені на визначення механізму вогнезахисту тканини інтумесцентними покриттями, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [1] досліджено поведінку текстильних мембран при взаємодії з вогнем. Класифікаційні випробування проводились із типовими текстильними виробами. Крім того, були проведені широкомасштабні випробування, щоб отримати інформацію про поведінку вогню при загорянні текстильних виробів. Отримані дані використовувались як еталон при оцінці інформації результатів класифікаційних випробувань. Також були розроблені різні сценарії тестування, які моделювали як додатки в будівлях. Масштабні випробування показали важливість вимірювання димоутворення та виникнення полум'яних крапель у класифікаційній схемі. Про те не визначено для яких тканин це притаманно.

В роботі [2] показано виготовлення багатофункціонального захисного текстилю з бавовняної тканини, змішаної з арамідною основою, шляхом осадження тривимірного полімерного покриття тетракіс (гідроксиметил) фосфоний хлорид. Для цього виготовлені змішані тканини з різним складом, ткацькими структурами, товщиною, і щільністю ниток, з подальшим хімічним осадженням полімерного покриття. Результати показують, що найнижча середня довжина вугільної основи при щільності теплового потоку випромінювання ($11,021 \text{ кВт м}^{-2}$) і найвищий кисневий індекс у % (36,8 %) були виявлені в змішаній тканині при застосуванні 40 % бавовни і 30 % арамідної тканини. Ці результати дають фундаментальні підстави для проектування змішаного текстилю з необхідними функціоналами, проте не сказано як експлуатувати такий різновид текстилю.

Вогнезахисний бавовняний тканинний матеріал був отриманий шляхом полімеризації поліаніліну, легованого новою фітиновою кислотою [3]. Експериментальні результати показали, що граничний індекс кисню необробленої тканини збільшився до 32 %, а опір листа зменшився до 1,13 кОм. Під час піролізу необробленої та обробленої тканини максимальна температура розкладання та максимальний викид леткого залишку знизилися від 380 °C до 290 °C, а вміст залишків вуглецю збільшився від 12,6 % до 39,2 % при температурі 700 °C, що вказувало на те, що полімеризація аніліну, легованого фітиновою кислотою, призвела до підвищення вогнезахисних властивостей тканини.

В роботі [4] розглядається використання водно-спиртового розчину тетроексисилану, водного розчину силікату натрію, фосфотримуючих антипіренів для надання вогнезахисних властивостей целюлозним текстильним матеріалам. Досліджуються швидкість тепловиділення, час та пікова швидкість, які є найважливішими факторами при прогнозуванні швидкості зростання пожежі.

В роботі [5] дослідження було спрямовано на розробку нової композиції на основі силікату натрію, сечовини та фосфату натрію для надання вогнезахисних властивостей целюлозним текстильним матеріалам. Необроблена тканина розміром 220×170 мм при випробуванні на горючість під час займання 15 с повністю вигорає за 60 с. У зразках, оброблених антипіреном, при займанні протягом 15 с час тління практично зводиться до нуля. За допомогою електронно-скануючої мікроскопії та енергодисперсійного мікроаналізу було показано, що в целюлозних матеріалах, модифікованих композиціями на основі силікату натрію та сечовини, гідрофосфату натрію, підвищуються вогнезахисні властивості. Проте їх стійкість при експлуатації невідома.

Для забезпечення екологічно чистої альтернативи вогнестійкої обробки бавовняних тканин в роботі [6] було поєднано бор, фенілборазотну кислоту, що було пов'язано з розгалуженим поліетиленіміном. Термогравіметричний аналіз показав, що полімер з етиленіміном у мольному співвідношенні 1:1 демонструє оптимальну термоокислювальну стабільність, легко наноситься на бавовняні тканини простим методом занурення з високим поглинанням в середовищі ацетону. Тканина з такою добавкою у кількості 33,8 мас.% характеризується самозатухаючою здатністю. Аналіз морфології обвуглювання оброблених тканин виявив вогнестійкість покриття за рахунок спучення вогнезахисного механізму.

В роботі [7] була визначена придатність та ефективність деяких біомакромолекул та продуктів біологічного походження зі специфічною хімічною структурою й складом як ефективних антипіренів для природного або синтетичного текстилю. Зокрема, різні білки (такі як білки сироватки, казеїни та гідрофобіни), нуклеїнові кислоти та екстракти з природних джерел були обрані та використані для розробки вогнезахисних обробних процедур для декількох волокон та тканин. Було виявлено, що ці біомакромолекули та продукти біологічного походження, які зазвичай містять ключові елементи (тобто азот, фосфор та сірка), можуть бути легко застосовані для текстилю за допомогою стандартних методів просочення. Крім того, ці вироби в основному відповідають за утворення стійкого захисного вугілля (тобто вуглецевого залишку) в результаті впливу полум'я на текстильний матеріал. Однак, не сказано про вплив зміни середовища на покриття, його руйнування в часі.

В роботі [8] розроблено новий вогнезахисний шар покриття для історичних текстильних тканин. Наночастинки кремнезему додатково просочували органічним боратом, утворюючи вогнезахисний композит. Отриманий композит поєднують із сполучним механічним змішуванням, забезпечуючи вогнезахисну пасту для покриття. Покривальна паста наноситься на тильну поверхню текстильних тканин. Вплив полум'я на зразки тканини із зворотним покриттям показав високий клас вогнезахисних текстильних тканин з нульовою швидкістю горіння, порівняно з 80,3 мм/хв для необробленої тканини. Встановлено синергетичний ефект вогнетривкості між наночастинками та органічним боратом. Однак, не вивчено вплив старіння на вогнезахист та механічні властивості вогнезахисного текстилю із зворотним покриттям.

В роботі [9] досліджено смоли на основі меламіну, які широко використовуються в тканинах для підвищення вогне- і теплостійкості. Модельовані експерименти з пранням припускають, що за один раунд прання водою з одягу було видалено 76...90 % меламіну. А тому постає задача зафіксувати антипірен у матеріалі.

Перспективи використання ІЧ-спектроскопії як експрес-методу для вивчення фазового складу гелевого покриття, ступеня завершення гідролізу кремнійорганічного компонента та коригування параметрів для отримання високоякісного вогнестійкого бінарного покриття золі системи антипірену SiO_2 було показано в роботі [10]. Однак, не сказано про механічні властивості вогнестійкого покриття.

Таким чином, з літературних джерел встановлено, що вогнезахисні покриття здатні

захищати поверхню текстильного матеріалу від впливу вогню при експлуатації, але не визначено параметри, які забезпечують стійкість до втрати вогнезахисних властивостей та механізм їх дії. Тому встановлення механізму дії вогнезахисту текстильних матеріалів і впливу покриттів на цей процес обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Мета дослідження. Метою даної роботи є дослідження окремих параметрів вогнезахисту текстильних виробів інтумесцентними покриттями.

Матеріали і методи досліджень. Для встановлення вогнезахисної ефективності текстильного матеріалу використовували зразки парусинової тканини розміром 220×170 мм, (рис. 1).



Рис. 1. Модельний зразок тканини для випробувань

Зразки парусинової тканини обробляли інтумесцентним покриттям «Firewall-Wood», яке наносили на зразок текстильного матеріалу у кількості 137,0...140,0 г/м² [11]. При цьому товщина вогнезахисного покриття склала близько 40 мкм.

Для визначення механізму вогнезахисту тканин інтумесцентним покриттям проводили термогравіметричний аналіз та спектроскопічні дослідження летких продуктів піролізу зразків парусинової тканини, а також визначення теплоту згорання.

Термогравіметричний аналіз дослідження процесів термічної деструкції в динамічному режимі проводили із застосуванням дериватографа Q-1500 D, швидкість нагрівання – 2,5 градусів на хвилину, зразок порівняння – порошок α -корунду, матеріал тиглів – алунд, чутливість гальванометрів: DTA – 250 мкВ, DTG – 500 мкВ [12].

Спектроскопічний аналіз проводили наступним чином. Для одержання газоподібних продуктів термічної деструкції розроблено і виготовлено спеціальне обладнання на базі трубчатої електричної печі з терморегулятором, у якій можна підтримувати температуру до 800 °С з точністю ± 10 °С [13]. Вловлювання газових сумішей проводили у скляний газозбірник, заповнений насиченим розчином хлориду натрію. Якісний і кількісний склад летких сумішей деструкції тканин визначали газохроматографічним методом з використанням газового хроматографа ЛХМ-7А, виготовленого дослідним підприємством “Хроматограф” (Україна). Газова хроматографія з масоселективним детектиром, який оснащено автосемплером autoinjector 7683b: колонкою HP-5 length 30 m, ID 0,32 mm, film 0,25 μ m. Введення проби – авто, ділення потоку 1:10 ($v=1\mu$ kl).

Визначення теплоти згорання проводили на автоматичному калориметрі ІКА С6000 Isoperibol [14]. Зразки парусинової тканини мали розмір 50×50 мм, товщину – 0,7 мм. Згорання зразка відбувалося у ємності для розкладання в атмосфері чистого кисню, який подавався в калориметр під тиском 4 МПа. Режим випробування – ізопериболічний при постійній температурі 22 °С. Підпалювання зразка тканини відбувалося за допомогою бавовняної скрутки. Одержані значення величин вищої теплоти згорання є середнім арифметичним трьох паралельних дослідів з відносним стандартним відхиленням RSD не більше 0,03%.

Результати досліджень. Результати аналізу термогравіметричних досліджень тканин показано на рис. 2, 3.

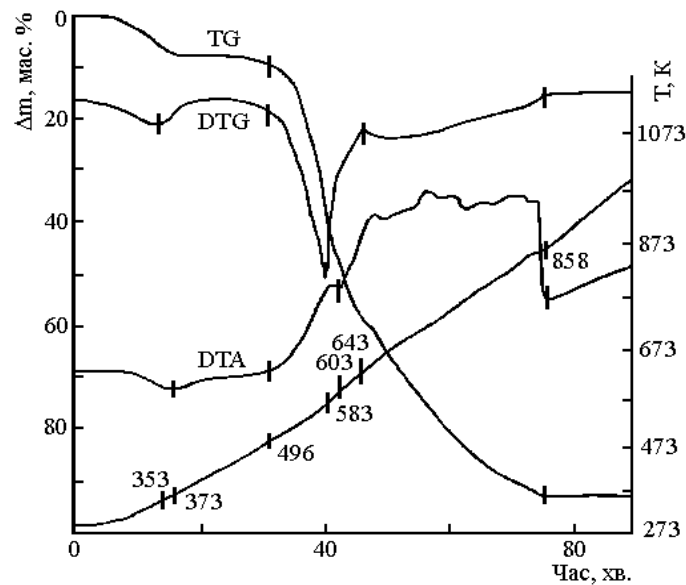


Рис. 2. Криві термогравіметричного аналізу зразків необробленої тканини в нормальній повітряній атмосфері

Для зразка необробленої тканини при температурі, близької до 373 К, відбуваються ендотермічні процеси, які супроводжуються втратою маси та випаровуванням хімічно незв'язаної води без деструкції матеріалу зразків. Окрім того, тканина втрачає конституційну воду за 463 К з додатковою втратою маси. Температура, при якій починається інтенсивна деструкція тканини, становить 488...523 К. Так, у зразку тканини поряд з ендотермічними процесами піролізу (відщеплення легких продуктів) навіть при порівняно невисоких температурах відбуваються екзотермічні окиснювальні процеси, про що свідчить хід кривої DTA в області першого піка кривої DTG (рис. 2), а саме наявність помітного екзоефекту починаючи з температури 496 К, на який накладається менший за величиною ендоефект з максимумом в області 603 К. Зокрема, для зразка тканини характерними є стадія інтенсивної втрати маси до температур 643 К, яка може бути зумовлена утворенням і полуменевим горінням газоподібних продуктів, та повільніша стадія (за більш високих температур – після того, як величина відносної втрати маси вже досягла 60...70 %), яка зумовлена здебільшого вигоранням карбонізованого залишку і характеризується більшим екзотермічним ефектом. Таке співвідношення величин термічних ефектів спостерігається внаслідок того, що полуменеве горіння (перша стадія) відбувається переважно за межами тигля. Друга стадія – гетерогенний процес окиснення карбонізованого залишку на межі розділу “тверда речовина – газ” менше впливає на показання термопар. Завершення процесу зафіксовано при температурі 858 К.

В ході подальших досліджень на рис. 3 показано криві нагрівання зразка інтумесцентного покриття в атмосфері повітря нормального складу (вміст кисню – 21 % об.). При цьому маса зразка становила 196 мг, швидкість нагрівання 10 град/хв, чутливість гальванометрів: DTA – 500 мкВ, DTG – 1 мВ.

Окремого аналізу потребують зміни характеру кривих термогравіметричного аналізу зразка вогнезахисного покриття (особливо кривих TG і DTA). Для них відмічено різну температуру початку деструкції компонентів: до 368 К – випаровування води та 463...483 К – розклад компонентів та виділення хімічно зв'язаної води (рис. 3). Максимальна швидкість деструкції спостерігається при 483...518 К, величина цієї швидкості також суттєво не змінюється (максимальні відхилення відповідних кривих DTG близькі за величиною). Натомість процеси деструкції на другій стадії у значній мірі залежать від ефекту спучення покриття. Так, в міру його вогнезахисної дії сповільнюється втрата маси. Відповідно

змінюється і вигляд кривих DTA, а саме зменшується висота і збільшується ширина піків, які характеризують протікання ендотермічних перетворень, внаслідок чого закінчення процесу термоокиснювальної деструкції фіксується за вищих температур, а завершення процесу зафіксовано при температурі 873 К.

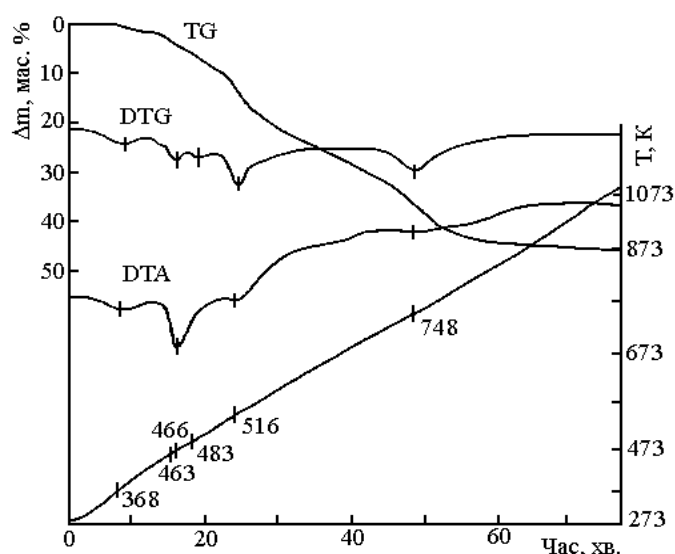


Рис. 3. Термогравіметричні криві нагрівання зразка інтумесцентного покриття

Але на основі отриманих термогравіметричних досліджень важко встановити механізм вогнезахисту тканини, тому були проведені хроматографічні дослідження та визначено теплоту згорання. У табл. 1 наведено результати газохроматографічного аналізу продуктів термодеструкції тканини.

Таблиця 1 – Результати газохроматографічного аналізу продуктів термодеструкції тканини

Матеріал	Вміст компонентів (% об.) в летких продуктах деструкції матеріалів									
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	O ₂	N ₂	CO	H ₂
Тканина необроблена	4,23	0,42	0,20	0,12	0,18	35,50	0,82	3,40	49,26	4,87
Тканина, оброблена інтумесцентним покриттям	0,20	1,06	0,25	0,05	0,21	71,00	0,22	25,84	1,040	0,13

При термічній деструкції необроблених зразків тканин характерною є стадія, коли іде інтенсивний процес піролізу зі значним газовиділенням та стрибком температури. Ця стадія обумовлена розкладом карбонізованого залишку. Як видно з табл. 1, під час піролізу зразків тканини, що оброблені інтумесцентним покриттям, леткі суміші продуктів піролізу суттєво відрізняються за вмістом азоту, діоксиду вуглецю та кількістю горючих газів. Для зразків оброблених тканин в продуктах піролізу значно зменшується кількість водню та метану, зменшується кількість оксиду вуглецю, але збільшується кількість діоксиду вуглецю та азоту, оскільки покриття вміщує значну кількість антипірену.

У табл. 2 наведено результати визначення вищої та нижчої теплоти згорання тканини, у тому числі вогнезахисної інтумесцентним покриттям.

В результаті проведених досліджень встановлено, що вогнезахисне оброблення знижує теплоту згорання матеріалу в 1,3 рази. Так, для необробленої тканини середнє значення вищої теплоти згорання становить 19339 кДж/кг, а для нижчої – 17691 кДж/кг, тоді як при обробленні її інтумесцентним покриттям значення вищої теплоти згорання зменшується до 14023 кДж/кг, а нижчої до 17691 кДж/кг.

Таблиця 2 – Вища та нижча теплота згоряння деревини

Тканина	Маса зразка, г	Теплота згоряння, кДж/кг	
		Вища	Нижча
Необроблена	0,2695	19636	17532
	0,2759	19392	17677
	0,2448	18989	17864
Середнє значення		19339	17691
Оброблена інтумесцентним покриттям	0,4656	13851	11976
	0,3988	13942	11873
	0,4017	14276	12099
Середнє значення		14023	11983

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, проведено дослідження механізму вогнезахисту тканини покриттям та встановлено, що термодеструкція зразків необробленої тканини та покриття проходить за різними механізмами, про що свідчать термоэффекти та залишок неструктурованої маси, яка для інтумесцентного покриття становить понад 50 %. При цьому визначено, що вогнезахисна тканина має в 1,3 рази меншу теплоту згоряння та характеризується при термічному розкладі зниженням горючих газів у кількості понад 50 % й підвищенням інертних газів у більше, ніж 8 разів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на встановлення взаємозв'язку між складовими і властивостями вогнезахисних покриттів, а також їх оптимізацію.

Подяка. Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, виконаної в рамках бюджетного фінансування № 0121U001007, а також на розробку наукових тем у програмі наукового співробітництва COST Action CA20139 «Холістичне проектування більш високих дерев'яних будівель» (HELEN).

Література

1. Blomqvist P., Bergstrand A., Neumann N., Thureson P., Bengtsson S. Fire safety of textile membranes in temporary structures. *Fire and Materials. Proceedings 14th International Conference and Exhibition*. 2015. P. 554-567.
2. Ahmed M.T., Morshed M.N., Farjana S., An S.K. Fabrication of new multifunctional cotton-modal-recycled aramid blended protective textiles through deposition of a 3D-polymer coating: High fire retardant, water repellent and antibacterial properties. *New Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 44 (28). P. 12122-12133.
3. Zhou Q., Shao J., Zhou Q., Chen J., Zhou T. In situ polymerization of polyaniline on cotton fabrics with phytic acid as a novel efficient dopant for flame retardancy and conductivity switching. *New Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 44 (8). P. 3504-3513.
4. Takey Y., Taussarova B.R., Burkytbay A. Investigation of heat processed cellulose textile materials of sol-gel composition. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2020. Vol. 6. P. 236-240.
5. Tausarova B.R., Stasenko A.Yu. Giving flame retardant properties to cellulosic textile Materials using Sol-gel technology. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*. 2020. Vol. (4). P. 365-372.
6. Chan Y. Sh., Si L., Lee I. K., Ng P. F., Chen L., Yu B., Hu Yu., Yuen R. K. K., Xin J. H., Fe B. A novel boron – nitrogen intumescent flame retardant coating. *Cellulose*. 2018. Vol. 25. P. 843-857.
7. Malucelli G. Biomacromolecules and bio-sourced products for the design of flame retarded fabrics: Current state of the art and future perspectives. *Molecules*. 2019. Vol. 24 (20). P. 3774-3784.
8. Attia N., Ahmed H., Yehia D., Hassan M., Zaddin Y. Novel synthesis of nanoparticles-based back coating flame-retardant materials for historic textile fabrics conservation. *Journal of Industrial Textiles*. 2017. Vol. 46 (6). P. 1379-1392.
9. Zhu H., Kannan K. Determination of melamine and its derivatives in textiles and infant clothing purchased in the United States. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 710. 136396. P. 1-10.

10. Skorodumova O., Tarakhno O., Chebotaryova O., Hapon Y., Emen F.M. Formation of fire retardant properties in elastic silica coatings for textile materials. *Materials Science Forum*. 2020. 1006 MSF. P. 25-31.
11. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O., Chudovska V., Sotnikova I., Sotnikov D. Thermophysical characteristics of the formed layer of pinocox in fire protection of fabric by composition based on modified phosphorus-ammonied. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. No 10 (111). P. 34-41.
12. Paulik F., Paulik K., Erdey L. Derivatografy. A complex method in thermal analysis. *Jalanta*. 1966. Vol. 13 (10). P. 1405-1430.
13. Откідач Д.М., Цапко Ю.В., Соколенко К.І. Флегматизування горючих газових середовищ. Київ: Пожінформтехніка, 2005. 196 с.
14. ДСТУ Б EN ISO 1716:2011 Випробування виробів щодо реакції на вогонь. Визначення вищої (нижчої) теплоти згорання. Київ: Мінрегіонбуд, 2012. 37 с.

References

- [1] P. Blomqvist, A. Bergstrand, N. Neumann, P. Thureson, S. Bengtsson, "Fire safety of textile membranes in temporary structures", *Fire and Materials. Proceedings 14th International Conference and Exhibition*, pp. 554-567, 2015.
- [2] M.T. Ahmed, M.N. Morshed, S. Farjana, S.K. An, "Fabrication of new multifunctional cotton-modal-recycled aramid blended protective textiles through deposition of a 3D-polymer coating: High fire retardant, water repellent and antibacterial properties", *New Journal of Chemistry*, vol. 44 (28), pp. 12122-12133, 2020.
- [3] Q. Zhou, J. Shao, Q. Zhou, J., T. Zhou, "In situ polymerization of polyaniline on cotton fabrics with phytic acid as Chen a novel efficient dopant for flame retardancy and conductivity switching", *New Journal of Chemistry*, vol. 44 (8), pp. 3504-3513, 2020.
- [4] Y. Takey, B.R. Taussarova, A. Burkytbay, "Investigation of heat processed cellulose textile materials of sol-gel composition", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, vol. 6, pp. 236-240, 2020.
- [5] B.R. Tausarova, A.Yu. Stasenکو, "Giving flame retardant properties to cellulosic textile Materials using Sol-gel technology", *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, vol. (4), pp. 365-372, 2020.
- [6] Sh. Y. Chan, L. Si, K. I. Lee, P. F. Ng, L. Chen, B. Yu, Yu. Hu, R. K. K. Yuen, J. H. Xin, B. Fe, "A novel boron – nitrogen intumescent flame retardant coating", *Cellulose*, vol. 25, pp. 843-857, 2018.
- [7] G. Malucelli, "Biomacromolecules and bio-sourced products for the design of flame retarded fabrics: Current state of the art and future perspectives", *Molecules*, vol. 24 (20), pp. 3774-3784, 2019.
- [8] N. Attia, H. Ahmed, D. Yehia, M. Hassan, Y. Zaddin, "Novel synthesis of nanoparticles-based back coating flame-retardant materials for historic textile fabrics conservation", *Journal of Industrial Textiles*, vol. 46 (6), pp. 1379-1392, 2017.
- [9] H. Zhu, K. Kannan, "Determination of melamine and its derivatives in textiles and infant clothing purchased in the United States", *Science of the Total Environment*, vol. 710, 136396, pp. 1-10, 2020.
- [10] O. Skorodumova, O. Tarakhno, O. Chebotaryova, Y. Hapon, F.M. Emen, "Formation of fire retardant properties in elastic silica coatings for textile materials", *Materials Science Forum*, 1006 MSF, pp. 25-31, 2020.
- [11] Yu. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, V. Chudovska, I. Sotnikova, D. Sotnikov, "Thermophysical characteristics of the formed layer of pinocox in fire protection of fabric by composition based on modified phosphorus-ammonied", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 10 (111), pp. 34-41, 2021.

- [12] F. Paulik, K. Paulik, L. Erdey, "Derivatografy. A complex method in thermal analysis". *Jalanta*, vol. 13 (10), pp. 1405-1430, 1966.
- [13] D.M. Otkidach, Yu.V. Tsapko, K.I. Sokolenko, *Flehmatyzuvannya horyuchykh hazovykh seredovyshch*, Kyiv: Pozhinformtekhnika, 2005.
- [14] DSTU B EN ISO 1716:2011, Vyprobuvannya vyrobiv shchodo reaktsiyi na vohon'. Vyznachennya vyshchoyi (nyzhchoyi) teploty z horannya, Kyiv: Minrehionbud, 2012.

RESEARCH OF THE MECHANISM OF FIRE PROTECTION OF FABRICS WITH INTUMESCENT COATINGS

^{1,2}**Tsapko Yu.**, Doctor of Technical Sciences,
juriyts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

¹**Bondarenko O.**, PhD, Associate Professor,
bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

¹**Tsapko A.**, PhD, Senior Research Fellow,
alekseytsapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

³**Sarapin Yu.**, specialist,
sya1@i.ua, ORCID: 0000-0003-3114-5934

¹**Zherebchuk D.**, student
dianazerebcuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7174-132X

¹*Scientific Research Institute for Binders and Materials,
Kyiv National University of Construction and Architecture
Povitroflotsky ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine*

²*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Heroiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine*

³*Fire Safety Department of the Armed Forces of Ukraine
Povitroflotsky ave., 6, Kyiv, 03168, Ukraine*

Abstract. Describing the behavior of fire retardants and coatings, including swelling, at the time of formation of the insulating structure is a separate and complex task. In general, it covers both stages of the heat protection process: as a rule, the decomposition of flame retardants under the action of temperature with heat absorption and the release of non-combustible gases, and then - swelling of the coating formed by fire protection. Therefore, it is necessary to study the conditions for the formation of a barrier to thermal conductivity and the establishment of a fire protection mechanism from layer to layer of coke. In this regard, a study of the process of fire protection during the operation of the fire protection coating. According to the data obtained, it is found that the formation of volatile products under the action of high temperature on the coating takes place with the formation of non-combustible substances. It has been experimentally established that under the action of heat flow on fire-retardant samples there is an intensive release of inert gases and a reduction of combustibles in reverse order. This proves the effectiveness of fire protection. During the tests it was found that the intensity of the formation of the swollen layer of coke moves in the direction of elevated temperature. The results of determining the swelling capacity of the coating for the intumescent system showed that under the action of high-temperature flow the burnout of the material and the loss of coating weight are reduced more than twice due to the formation of high-temperature compounds. The coating under the action of high temperature forms a significant coefficient of swelling, promotes the formation of a heat-insulating layer of coke, preventing burnout of the fabric and the passage of high temperature to the material, which is confirmed by reduced heat of combustion. It was determined that the fire-retardant fabric has almost 1.3 times less heat of combustion and is characterized by thermal decomposition by reducing flammable gases by more than 50% and increasing inert gases by more than 8 times.

Keywords: protective equipment, fire resistance, volatile products, weight loss, surface treatment, protection efficiency.

Стаття надійшла до редакції 3.05.2022