

**ОСОБЛИВОСТІ ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПРИ
ТЕМПЕРАТУРНОМУ ВПЛИВІ НА ВОГНЕЗАХИЩЕНУ ТКАНИНУ**

**FEATURES OF REDUCTION OF THERMAL CONDUCTIVITY UNDER
TEMPERATURE INFLUENCE ON FIREPROOFFABRIC**

^{1,2}Цапко Ю.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-0625-0783, ²Бондаренко О.П., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8164-6473, ³Цапко О.Ю., к.т.н., с.н.с., ORCID: 0000-0003-2298-068X, ⁴Гулик Ю.Б., наук. співроб., ORCID: 0000-0003-4633-1369 (¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, ²Науково-дослідний інститут в'язучих речовин і матеріалів ім. В.Д. Глуховського, Київський національний університет будівництва та архітектури, ³Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс", м. Київ, ⁴Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, м. Київ)

^{1,2}Tsapko Yu., Doctor of Technical Sciences, ORCID: 0000-0003-0625-0783, ²Bondarenko O., PhD, Associate Professor, ORCID: 0000-0002-8164-6473, ³Tsapko A., PhD, Senior Research Fellow, ORCID: 0000-0003-2298-068X, ⁴Gulyk Yu., Researcher, ORCID: 0000-0003-4633-1369 (¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, ²Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv National University of Construction and Architecture, ³Ukrainian State Research Institute "Resource", ⁴Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection)

В роботі було досліджено парусинову тканину, вогнезахищену інтумесцентним покриттям. Доведено, що в процесі термічного впливу на тканину проходить процес перенесення високої температури та її загорання. А саме, з наростанням температури густина теплового потоку на необробленій тканині збільшується до значення понад 60 кВт/м², що достатньо для її займання. Натомість, густина теплового потоку через інтумесцентне покриття на початку термічної дії становила понад 20 кВт/м², а потім наступив процес утворення теплоізолювального шару пінококсу і значення густини теплового потоку не перевищило 8,2 кВт/м², що недостатньо для її займання.

The analysis of fire-resistant materials for fabrics was carried out and it was established that the paucity of data for explaining and describing the fire protection process, the neglect of elastic coatings, leads to the ignition of fabric structures under the influence of flame. The development of reliable methods of researching the conditions of flame protection of fabrics leads to the

creation of new types of flame retardant materials. Therefore, there is a need to determine the conditions for the formation of a barrier for burning and flame propagation through the fabric and to establish a mechanism for inhibiting the transfer of temperature to the material. In the work, canvas fabric, fireproofed with an intumescent coating, was investigated. It has been proven that in the process of thermal impact on the fabric, the process of transfer of high temperature and its ignition takes place. Namely, as the temperature rises, the heat flux density on untreated fabric increases to a value of more than 60 kW/m^2 , which is enough for its ignition. On the other hand, the heat flux density through the intumescent coating at the beginning of the thermal action was more than 20 kW/m^2 , and then the process of formation of the heat-insulating layer of foam coke began and the heat flux density did not exceed 8.2 kW/m^2 , which is not enough for its ignition.

Ключові слова:

Вогнезахист тканини, спучуючі покриття, теплопровідність, оброблення поверхні, теплофізичні властивості.

Fire protection of fabrics, intumescent coatings, thermal conductivity, surface treatment, thermophysical properties.

Вступ. Текстильні вироби з природніх волокон все частіше використовуються в різних типах будівельних конструкцій, як у постійних, так і зокрема в тимчасових спорудах [1-2]. Під час проживання і опалювання таких споруд можливе займання та швидке поширення пожежі, оскільки, тканина утворює значне пожежне навантаження. З огляду на той факт, що саме цей матеріал чутливий до впливу високої температури, підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовуються будівельні конструкції з текстильних матеріалів, можливо за допомогою їх вогнезахисного оброблення [3]. Прикладом є пожежа, яка виникла у будові Хартфордського цирку, штат Коннектикут (США) під час його роботи, що привело до масової загибелі глядачів. Необхідність вогнезахисту актуальна і для об'єктів масового перебування людей, які виготовлені з горючих текстильних матеріалів. Зокрема, у 2005 році в одному з театрів м. Каїра (Єгипет) від звичайної свічки виникло загоряння порт'єр, куліс та декорацій з паперу. Однією з причин швидкого розвитку пожежі була відсутність протипожежного захисту виробів з текстильних матеріалів.

Для комплексного захисту целюлозовмісних матеріалів від загоряння запропоновано використовувати суміші неорганічних солей, але вогнезахисне оброблення цими речовинами для текстильних матеріалів не придатне, тому що на поверхні спостерігається утворення висолів, які осипаються, а з часом матеріал втрачає захисні властивості, що приводить до займання горючих конструкцій при дії високотемпературного полум'я. Окрім того, деякі композиції через низьку змочуваність не ефективно покривають

тканину, а відповідно утворюють захисну плівку.

Тому дослідження, що направлені на визначення особливостей зниження теплопровідності при температурному впливі на вогнезахищену тканину є невирішеною складовою забезпечення пожежобезпеки. А також визначають необхідність розроблення та використання спеціальних захисних засобів. Що і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Огляд останніх досліджень та публікацій. Як зазначено у роботі [4], вогнестійкість стала ключовою властивістю структурних легких сендвіч-компонентів в авіації, судноплаванні, залізничному транспорті та будівництві. Розробка майбутніх композиційних матеріалів і компонентів вимагає відповідних процедур випробувань для одночасного застосування стиснення та повного розгортання вогню. Для цього застосовується проміжний підхід (розмір зразка = 500×500 мм) із стискаючими навантаженнями (до 1 МН) і прямим прикладанням пальника до однієї сторони зразка. Вплив різних структур серцевини досліджувався для армованих скловолокном сендвіч-зразків з антипіренами та без них, нанесених на тканини, в матрицю та на поверхню для кожного зразка. Встановлено, що спучуюче покриття значно подовжує час до виходу з ладу. Тому постає необхідність дослідження умов утворення бар'єру для теплопровідності та встановлення ефективної дії покриття з утворенням шару пінококсу.

В роботі [5] показано, що для захисту натуральних волокон від пожежі використовуються антипірени, роль яких полягає у затримці часу займання, зменшенні тепловиділення та поверхневого поширення полум'я, а також у зниженні швидкості втрати маси та поширення вогню. Останнім часом застосування природних біоцидів набуло популярності. До цієї групи входять природні алкалоїди, флавоноїди, терпени, дубильні речовини, ефірні олії, хітозан з антимікробною дією та активні пептиди, такі як цитопін, протегрин, темпорин, аміганан і периганан. Однак, існують деякі занепокоєння щодо біодоступності різних біоцидів та їхньої мутагенної активності. У роботі представлені властивості горючості різних натуральних волокон у порівнянні зі штучними. Також увага приділяється вогнестійкості тканин через її широке використання, особливо в оздобленні салону. Крім того, враховуючи значення ефекту «мікробіологічного розпаду», описано методи розробки й введення антимікробних агентів у натуральні волокна, текстиль та шкіру, та надано інформацію про тенденції досліджень. Але не наведені відповідні фізико-хімічні дані щодо зміни тканини в процесі експлуатації.

В роботі [6] досліджувалися теплоізоляційні властивості необроблених і оброблених тришарових трикотажних тканин різної товщини (2 мм, 3 мм і 4 мм) за допомогою кремнеземних аерогелів. Три зразки спейсерних тканин (300GSM, 350GSM, 540GSM) були покриті нанопористим силікагелем при температурі 26°C, а потім витримані для старіння, заміни розчинника, модифікації поверхні. Досліджено такі характеристики, як термостійкість, теплопровідність, кут розташування ниток, пористість, повітропроникність

зразків прокладочної тканини. Аналіз за допомогою скануючої електронної мікроскопії та інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є були проведені для дослідження морфології та зміни поверхні, ініційованої кремнеземним покриттям. Експериментальні результати показали, що оброблені уточні трикотажні розділові тканини з 350GSM мають вищий термічний опір ($0,09131 \text{ м}^2 \cdot \text{кВт}^{-1}$), вищий коефіцієнт пористості, вищу повітропроникність, більший кут розташування та меншу щільність.

Вогнестійкі системи, що спучуються, відомі вже кілька років у сфері покриття для захисту будівельних конструкцій від вогню [7]. Зовсім недавно ця концепція була застосована до полімерів і гнучких структур, таких як текстиль. Процес спучення є результатом поєднання обвуглювання та спінювання поверхні палаючого полімеру. Отриманий спінений обвуглений шар, щільність якого зменшується з температурою, відмінно ізолює покритий матеріал від надмірного підвищення температури, проникнення кисню і таким чином захищає його від термічного розкладання. Слід зазначити, що обмеженими факторами для застосування цього процесу до текстилю є довговічність систем, жорсткість через поверхневе нанесення обробки та здатність до прядіння розбухаючих композицій для масової обробки.

Основною метою дослідження в [8] є з'ясування можливості поліпшення теплозахисних характеристик (ТПП) пожежного захисного одягу (ПВПК) при впливі на нього теплоти потоку випромінювання 10 кВт/м^2 . Розширення ТЕС пов'язане зі збільшенням періоду часу, коли під впливом випромінюваної теплової потокової щільності може забезпечуватися надлишковий час для виконання пожежниками пожежонебезпечних травм. Кожен зразок FFPC складається із зовнішньої оболонки, вологозахисного та теплового бар'єрів. Однак, ковдру з аерогелю також використовували як заміну теплового бар'єру через його чудові теплоізоляційні властивості та горючість. Попередні випробування стосувалися оцінки теплового опору та теплопровідності. Пізніші експерименти включають вплив багат шарового зразка FFPC на щільність теплового потоку випромінювання в 10 кВт/м^2 . Було показано, що ті комбінації, в яких було використано ковдру з аерогелю, забезпечують більший тепловий опір, тобто $0,1748 \text{ м}^2/\text{кВт}$, та покращують поведінку ТЕС з точки зору щільності теплового потоку Q_c ($0,7 \text{ кВт/м}^2$) та коефіцієнта передачі у відсотках (6,7%).

Робота [9] присвячена визначенню теплопровідності рідкофазних матеріалів зі зміною фази (PCM) поблизу точки плавлення шляхом вивчення процесу еволюції поверхні розділу «тверда речовина-рідина». Було запропоновано теоретичну модель, яка дозволяє визначати теплопровідність за характеристики зміщення поверхні розділу під час процесу плавлення. Експерименти проводилися з використанням добре розробленої системи тестування для двох видів неорганічних PCM, і експериментальні результати узгоджувалися з літературними значеннями в діапазоні $\pm 6\%$. Калібровані значення теплопровідності були отримані ітераційно з порівняння кривих

руху межі розділу між експериментами та моделюванням, а розбіжності між каліброваними результатами та еталонними значеннями були обмежені до $\pm 3\%$.

Таким чином, з літературних джерел встановлено, що вогнезахисні покриття здатні захищати поверхню текстильного матеріалу від впливу вогню при експлуатації, але потребують значної кількості захисту та здатні до підвищення жорсткості тканин. Крім того, не визначені параметри, які забезпечують стійкість до втрати вогнезахисних властивостей. Мізерність даних для пояснення і опису процесу передавання тепла, нехтування застосуванням речовин для утворення теплоізолювального шару призводить до неефективного застосування засобів захисту. Тому встановлення параметрів стійкості тканин до високої температури і впливу покриттів на цей процес, обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є встановлення особливостей зниження теплопровідності при температурному впливі полум'я на будівельну конструкцію з вогнезахисної тканини. Це дає можливість розширити область вогнезахисного захисту на об'єктах з застосуванням текстильних матеріалів.

Матеріали і методи досліджень. Для дослідження передачі теплового потоку використовували зразки парусинової тканини (рис. 1) та обробляли модифікованим спучуючим покриттям «Firewall-Wood» виробництва України у кількості 260 г/м².

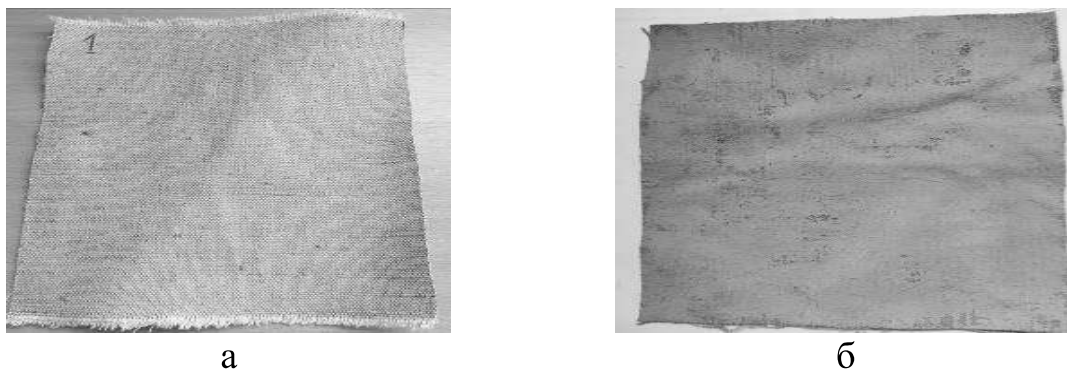


Рис. 1. Модельний зразок тканини: а – до оброблення; б – після оброблення

Визначення захисної ефективності інтумесцентного покриття проводили за робочою методикою, суть якої полягала у експериментальному визначенні температури на оберненій поверхні тканини при впливі на зразок радіаційної панелі з заданими параметрами [10]. Для одержання значень теплопровідності покриттів тканини застосовано спеціальне обладнання, яке було оснащено пристроєм для вимірювання температури на поверхні зразка в ході випробувань за допомогою термопар (рис. 2).

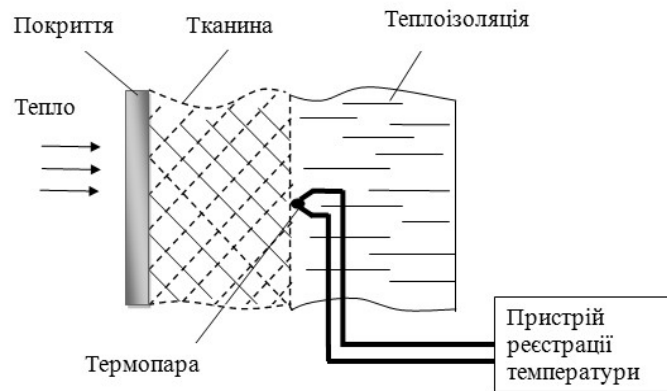


Рис. 2. Пристрій для випробувань теплопровідності вогнезахисної тканини

По вимірній температурі визначали теплоізолювальні властивості покриття та величину теплового потоку, який передається до тканини.

Суть експериментального визначення ефективності вогнезахисту елементів намету, виготовлених з парусинової тканини, які було оброблено вогнезахисним інтумесцентним покриттям, полягає у впливі на зразок полум'я бензину (у якості запалювального пристрою використовували повсть розміром 25x25x25 мм, змочену бензином у кількості 40 мл) з заданими параметрами та реєструванні часу до займання і визначення втрати маси зразка після випробування.

Зразок намету, що виготовлений з парусинової тканини встановлювали на підставку. На зразок елемента намету встановлювали запалювальний пристрій (рис. 3). Підпалювали пальне і зразок намету витримували у полум'ї пального протягом часу вигорання пального та до відсутності самостійного горіння та тління.

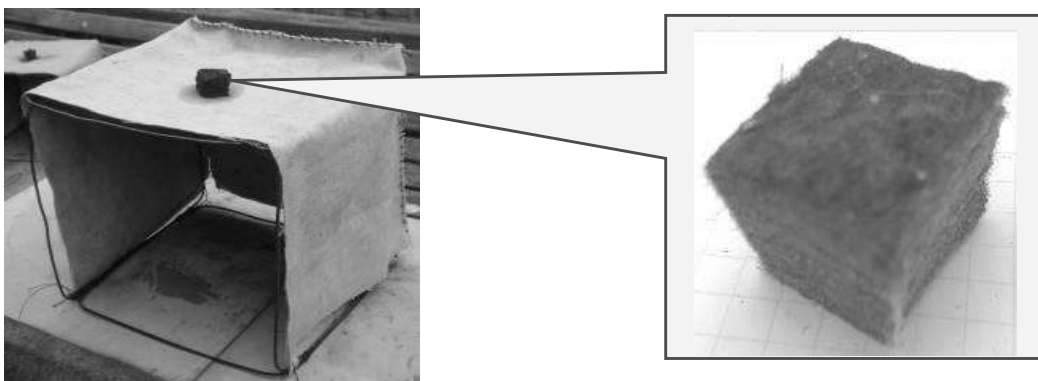


Рис. 3. Модельний осередок пожежі

Критерієм визначення ефективності вогнезахисту зразка намету покриттям є відсутність займання та поширення полум'я поверхнею, значення показника втрати маси зразка намету, яка повинна становити не більше 10%, а також остаточне горіння після вигорання пального.

Результати досліджень. Для визначення температури на поверхні тканини були проведені дослідження щодо передачі температури при дії

полум'я пальника, що імітує джерело високої температури, на вогнезахищену тканину. Результати досліджень з передачі температури, проведені у лабораторних умовах, наведено на рис. 3.

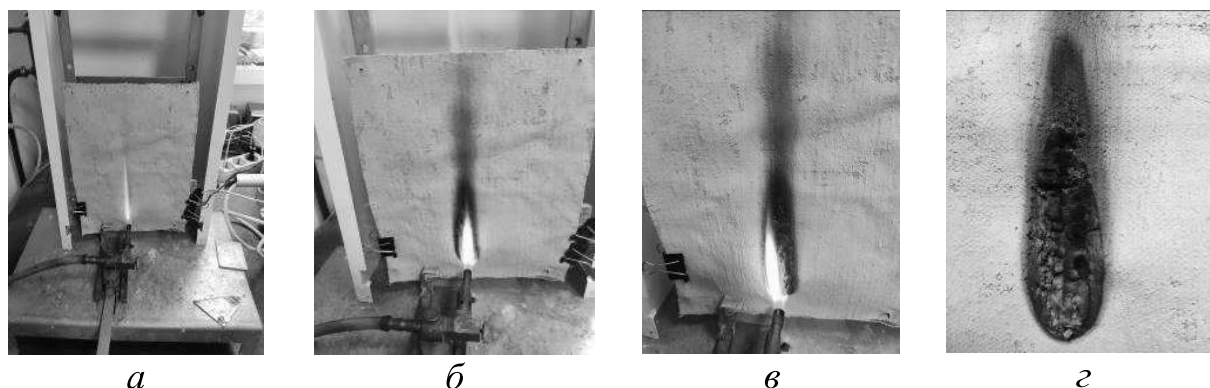


Рис. 4. Результати випробувань по визначенню температури на поверхні тканини: *a* – конструкція для випробувань; *б* – вплив пальника на тканину; *в* – інтенсивне спучення покриття; *г* – шар пінококсу після горіння

Дослідження показали, що при дії полум'я пальника на вогнезахищену тканину почалося інтенсивне спучення покриття, що призвело до утворення теплоізоляційного шару пінококсу.

Результати досліджень з визначення динаміки температури на оберненій поверхні вогнезахищеної тканини проведені у лабораторних умовах, наведено на рис. 5.

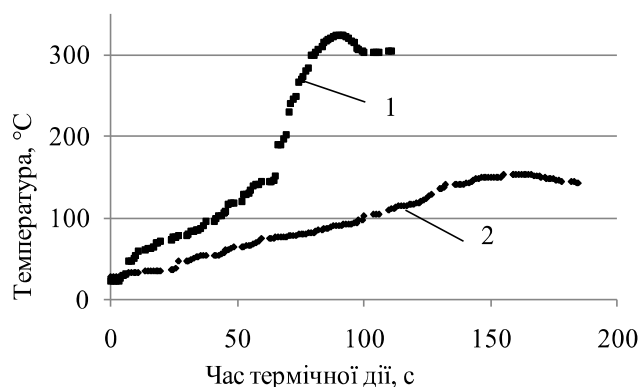


Рис. 5. Динаміка наростання температури на оборотній поверхні тканини: 1 – необроблена; 2 – вогнезахищена

Дослідження показали, що зразок необробленої тканини не витримав температурний вплив (крива 1), при дії пальника відбувалось займання тканини, яке продовжувалося понад 110 с. При дії полум'я на зразок вогнезахищеної тканини (крива 2), температура на оберненій поверхні не перевищила 150 °C, займання тканини не відбулося.

З урахуванням літературних даних встановлено теплофізичні характеристики для тканини та пінококсу (табл. 1).

Дані таблі 1 показують дещо різні теплофізичні характеристики матеріалів, звідки випливає, що і теплова дія на тканину буде різною.

Тепловий потік полум'я газового пальника становила близько 10100 кВт/м², а температура полум'я газового пальника становила близько 1000 °С.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики матеріалів

Матеріал	Показник		
	Товщина, мм	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Коефіцієнт температуропровідності, м/с ²
Тканина	1,0	0,078	16·10 ⁻⁶
Шар пінококсу	7,5	0,034	8,9·10 ⁻⁶

На рис. 6 представлено розрахунок густини теплового потоку залежно від часу впливу на тканину полум'я пальника.

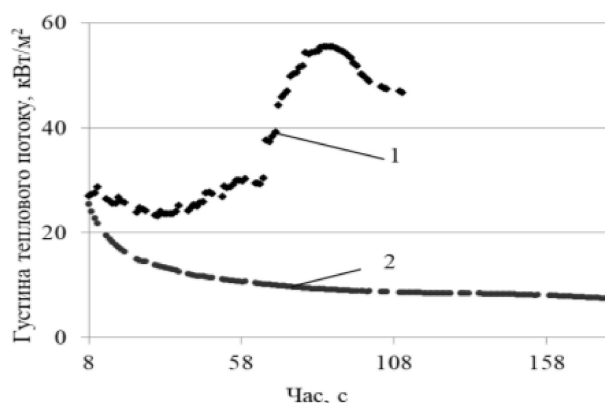


Рис. 6. Залежність густини теплового потоку від часу дії нагрівного середовища: 1 – необроблена тканина; 2 – тканина вогнезахиснена

Як видно з рис. 6, з наростанням температури густина теплового потоку на необроблену тканину збільшується до значення понад 60 кВт/м², що достатньо для її займання (мінімальне значення густини теплового потоку становить близько 12,0 кВт/м²), а потім поступово підвищується у зв'язку з горінням матеріалу. Натомість, густина теплового потоку через інтумесцентне покриття на початку термічної дії становила понад 20 кВт/м², а потім наступив процес утворення теплоізолювального шару пінококсу і значення густини теплового потоку не перевищило 8,2 кВт/м², що недостатньо для її займання.

Висновки. Особливості гальмування процесу передавання тепла до матеріалу, що оброблений інтумесцентним покриттям, полягають в утворенні на поверхні тканини ахисного шару. Механізм дії інтумесцентного покриття є тим фактором регулювання процесу, при якому вогнестійкість матеріалу зберігається. В цьому сенсі має місце інтерпретація результатів визначення

горючості вогнезахищеної тканини після впливу полум'я, а саме утворення теплоізолювального шару пінококсу при термічній дії. Так, на поверхні зразка була створена температура, що значно перевищила температуру займання тканини, а на необігрітій поверхні вона не перевищила 150 °С. Також розраховано об'ємну теплоємність шару пінококсу, що становить 429,5 кДж/(м³·К) та коефіцієнт теплопровідності, що склав 0,078 Вт/(м·К).

Подяка. Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку проекту (реєстраційний номер № 0121U001007), який виконується за рахунок бюджетного фінансування в 2021-2022 р.р., а також на розробку наукових тем у програмі наукового співробітництва COST Action CA20139 «Холістичне проектування більш високих дерев'яних будівель» (HELEN).

1. Blomqvist P., Bergstrand A., Neumann N., Thureson P., Bengtsson S. Fire safety of textile membranes in temporary structures. Fire and Materials / 14th International Conference and Exhibition, Proceedings. – 2015. – pp. 554-567.

2. 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). – pp. 3504-3513.

3. Tsapko Yu., Zavialov D., Bondarenko O., Marchenco N. Determination of thermal and physical characteristics of dead pine wood thermal insulation products / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 4. – 4/10 (100). – 2019. – pp. 37-43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175346>.

4. Höroid A., Schartel B., Trappe V., Korzen M., Bünker J. Fire stability of glass-fibre sandwich panels: The influence of core materials and flame retardant / Composite Structures. – 2017. – Vol. 160. – pp. 1310-1318.

5. Kozłowski R.M., Muzyczek M., Walentowska J. Flame Retardancy and Protection against Biodeterioration of Natural Fibers: State-of-Art and Future Prospects (Book Chapter). Polymer Green Flame Retardants. – 2014. – pp. 801-836.

6. Syed Rashedul Islam, Weidong Yu, Tayyab Naveed. Influence of silica aerogels on fabric structural feature for thermal isolation properties of weft-knitted spacer fabrics / Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2019. – Vol. 14. – pp. 1-11.

7. Kozłowski R., Wesolek D., Władyska-Przybylak M., Bourbigot S., Delobel R. Intumescent Flame-Retardant Treatments for Flexible Barriers / Springer Series in Materials Science. – 2007. – Vol. 9. – pp. 39-61.

8. Xu J., Hong C., Geng J., Luo X., Zhang X. Facile synthesis, mechanical toughening, low thermal conductivity and fire-retardant of lightweight quartz fiber reinforced polymer nanocomposites / Composites Science and Technology. – 2021. – Vol. 211. – 108836. – pp. 1-10.

9. Tian Zhou, Xu Liu, Yuan Li, Zhiqiang Sun. Dynamic measurement of the thermal conductivity of phase change materials in the liquid phase near the melting point / International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 111. – pp. 631-641.

10. Tsapko Yu., Sirko Z., Vasylyshyn R., Melnyk O., Tsapko A., Bondarenko O. Establishing patterns of mass transfer under the action of water on the hydrophobic coating of the fire-retardant element of a tent / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 4/10 (112). – pp. 45-51. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237884.