

*V. I. Товарианський, І. І. Адольф**Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4484-8164> – В. І. Товарианський<https://orcid.org/0000-0002-9132-673X> – І. І. Адольф

vi_tovarianskyi@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУР В СЕРЕДОВИЩІ ГОРІННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ШВЕЙНО-ВИРОБНИЧОЇ ДІЛЯНКИ

Постановка проблеми. Швейні підприємства належать до категорії промислових об'єктів і є одними з найнебезпечніших з точки зору пожежної безпеки. Продукція, яка виготовляється на таких підприємствах, є горючою, а за умови виникнення пожежі площа горіння може сягати значних розмірів. Тому актуальним є дослідження особливостей впливу на пожежну небезпеку чинників, які виникають на окремих виробничих ділянках швейних підприємств.

Метою роботи є з'ясувати як температура в осередку пожежі залежить від тривалості горіння та від висоти над осередком пожежі і порівняти ці величини з результатами моделювання.

Методи дослідження. Дослідження проводили з використанням методів натурного експерименту, комп'ютерного моделювання та регресійного аналізу.

Основні результати дослідження. Встановлено, що зі збільшенням часу горіння експериментальної ділянки температура в осередку пожежі зростала і досягла максимального значення, яке становило 720°C, на 12-й хв від початку займання. Після цього спостерігалось її поступове зниження. Досліджено значення зміни температур середовища над осередком горіння залежно від висоти вимірювання. Враховуючи те, що висота полум'я була в межах 0,35–0,86 м, вимірювання температур проводили на висотах від 0 до 1,2 м з інтервалом 0,2 м. Отримано залежності зміни температури пожежі експериментальної ділянки від тривалості горіння. Досліджено температури середовища горіння експериментальної ділянки залежно від зміни висоти вимірювань.

Висновки. Встановлено, що зі збільшенням часу горіння експериментальної та модельованої ділянок зростання температури в осередку пожежі припинилося на 12-й хв від початку займання і становило 720°C/731°C, що перевищує цей показник на 2-хвилині на 76,39%/70,73% відповідно. Встановлено, що зі збільшенням висоти над осередком горіння, температури, визначені за результатами експериментального дослідження та моделювання, мають тенденцію до зниження, про що свідчать поліноміальні регресійні моделі.

Ключові слова: швейна промисловість, пожежна безпека, «транспортна стрічка», тканина, осередок горіння, температура, комп'ютерне моделювання.

*V. I. Tovarianskyi, I. I. Adolf**Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

RESEARCH OF TEMPERATURES IN THE COMBUSTION ENVIRONMENT OF THE EXPERIMENTAL SEWING AND PRODUCTION SECTION

Formulation of the problem. Garment factories belong to the category of industrial facilities and are one of the most dangerous in terms of fire safety. The products produced at such plants are combustible, and in the event of a fire, the area of combustion can reach significant sizes. Therefore, it is important to study the features of the influence of factors on fire danger, arising at individual production sites of garment enterprises.

The purpose of the work is to obtain the dependences of the temperature in the fire cell from the time of combustion and the height above the fire and compare these values with the simulation results.

The main results of the experimental study. It was found that with increasing burning time of the experimental area, the temperature in the fire cell increased, and its maximum value was observed for 12 minutes from the beginning of the fire and was 720°C, after which it was gradually reduced. The value of the change in ambient temperatures above the combustion centre depending on the measurement height was studied. Given that the height of the flame was in the range from 0.35 to 0.86 m, temperature measurements were performed at heights from 0 to 1.05 m with an interval of 0.2 m. The temperatures of the combustion medium of the experimental section depending on the change in the height of the measurements were studied.

Results. It has been established that with an increase in the burning time of the experimental and simulated sections, the temperature increase in the fire seat stopped at the 12th minute from the start of ignition and amounted to 720°C / 731°C, which exceeds this indicator at the 120th second by 76.39% / 70.73% respectively. It has been established that with an increase in the height above the combustion source, the temperatures determined from the results of experimental research and modelling tend to decrease, as evidenced by polynomial regression models.

Keywords: garment industry, fire safety, "conveyor belt", fabric, place of burning, temperature, computer simulation.

Постановка проблеми. Швейні підприємства належать до категорії промислових об'єктів і є одними з найнебезпечніших з точки зору пожежної безпеки. Продукція, яка виготовляється на таких підприємствах, є горючою, а за умови виникнення пожежі площа горіння може сягати значних розмірів. Тому актуальним є дослідження особливостей впливу чинників на пожежну небезпеку, які виникають на окремих виробничих ділянках швейних підприємств. Їх виникнення пов'язане із особливостями технологічних процесів, і залежить зокрема від: способу розміщення горючого матеріалу, висоти, площі та конфігурації виробничих ділянок, а також маси пожежного навантаження та нижчої теплоти згорання його складових [1].

Дослідженню процесів виникнення та поширення пожежі в приміщеннях промислових підприємств присвячено низку робіт. Зокрема в [2, 3] автори досліджували питання евакуації персоналу з приміщень підприємств швейної промисловості, в результаті чого було виявлено ряд факторів, які мають різний ступінь впливу на ефективність проведення процесу евакуації. В працях [4–6] досліджено температури займання та самозаймання текстильних виробів з бавовни та поліестеру, розроблено способи підвищення пожежної безпеки цих матеріалів шляхом зниження горючості та займистості. В роботі [7] автори запропонували статистичну модель пожежі у закритому просторі з обмеженим доступом кисню, що дає змогу встановити температури пожежі як в її осередку, так і на різних відстанях від нього. В роботі [8] автори провели експериментальне дослідження з метою виявлення розрахункових температурних кривих пожежі в приміщенні. В роботі [9] автор досліджував фактори впливу, які виникають під час пожеж деревообробних підприємств з метою виявлення можливості запобігання поширенню пожежі на значну площу. В роботі [10] здійснювалось моделювання пожеж у приміщеннях з метою отримання температурних кривих, які якомога краще відображатимуть зміни температурних режимів пожежі.

Враховуючи наукові результати вітчизняних та іноземних авторів в царині пожежної безпеки промислових підприємств, зазначимо, що досліджень, присвячених вивченню особливостей пожежної небезпеки окремих виробничих ділянок швейних підприємств, проведено не достатньо.

Значимі результати можна отримати шляхом досліджень в умовах вогневих випробувань, зокрема експериментальних пожеж, а також моделювання таких пожеж з використанням програмного забезпечення. Актуальність подібних досліджень з використанням моделей підтверджена зокрема результатами в роботі [11].

Метою досліджень є отримання залежностей температури в осередку пожежі від тривалості горіння та від висоти над осередком пожежі і порівняння цих величин із результатами моделювання.

Прилади і методи. Зведений випробувальний полігон, пірометр марки *Benetech GM1150A* з діапазоном вимірювань від -50°C до +1150°C, сукупність нагрівальних екранів, секундомір *Casio*, цифрова фотокамера марки *Canon Powershot a550*, вимірювальна рулетка, газовий пальник. Результати досліджень обробляли з використанням електронних таблиць *Excel*, 3D-моделі «транспортної стрічки» будували в середовищі *PyroSim*, а моделювали пожежу в *FDS* з використанням персонального комп'ютера з процесором *Intel(R) Corei3 M330 2.13 GHz* та оперативною пам'яттю 4,00 ГБ.

Виклад матеріалу. Експериментальне дослідження проводилось на полігоні, стіни та покриття якого виконані з металевих листів. Розміри експериментального полігону – 6×2,5×2,5 м. Цей полігон виконано з трьох стін і стелі, що є своєрідним відтворенням частини-фрагмента швейного приміщення, в якому відбувається виробничий процес. В приміщенні цього полігону повітрообмін наближено відповідає повітрообміну, характерному для приміщень швейних виробництв. Температура навколишнього середовища в час дослідження становила +20°C, відносна вологість повітря – 58%, що наближено відповідає умовам виробничих приміщень швейних підприємств. Експериментальну ділянку, де здійснювався підпал, виконано у вигляді дерев'яної лави, верхня частина якої покрита металевим листом товщиною 0,45 мм. Висота "транспортної стрічки" – 0,63 м, а її ширина – 0,5 м. Площа експериментальної ділянки становила 2,5 м², а пожежне навантаження – 35 кг/м². Зазначену ділянку використовували з метою імітації транспортної стрічки, що призначена для тимчасового розміщення сировини (тканини). Потрібно зазначити, що транспортна стрічка в реальних умовах процесу виробництва розташована в безпосередній близькості до робочих

мість, і за умови пожежі найбільше сприяє поширенню горіння між ними, оскільки проходить біля них нерозривно. Фото полігону з

"транспортною стрічкою" для проведення експериментального дослідження зображено на рис. 1.



Рисунок 1 – Експериментальний полігон з «транспортною стрічкою» до початку проведення експериментальних досліджень

Після завершення етапу підготовки до проведення досліджень, а саме розміщення дослідної ділянки в межах полігону, було проведено експериментальний підпал з допомогою газового пальника. Під час горіння ділянки спостерігалось плавлення тканин з поліестеру з подальшим падінням палаючих капель на підлогу експериментального приміщення, що за реальних

умов виробничих приміщень з горючою підлогою вважається додатковими джерелами займання. Поширення вогню відбувалось таким чином, що на заданій ділянці спостерігалось стале горіння незмінною площею $0,75 \text{ м}^2$ з висотою полум'я в межах від $0,35$ до $0,85$ м. Процес поширення полум'я поверхнею "транспортної стрічки" зображено на рис. 2.



а)



б)

Рисунок 2 – Горіння пожежного навантаження "транспортної стрічки": а) на початку експерименту; б) на 4-ій хв від початку горіння

Конструкція експериментальної ділянки, яка складалась з дерев'яних елементів, покритих металевим листом, зазнала часткових температурних пошкоджень у вигляді звуглення, проте втрати цілісності та несучих властивостей упродовж експерименту не відбулось. Під час горіння експериментальної ділянки не спостерігалось виділення летких продуктів горіння, які здатні переміщуватись тепловими потоками та бути джерелами займання сусідніх ділянок, розташованих на певній відстані від фронту полум'я. З метою виявлення максимальної температури осередку горіння експериментальне дослідження проводили тривалістю 20 хв, що приймається як нормативний та достатній час для доїзду та оперативного розгортання пожежно-рятувального підрозділу на місці пожежі [11].

Встановлено, що зі збільшенням часу горіння експериментальної ділянки температура в осередку пожежі зростала, а її максимальне значення спостерігалось на 12-ій хв від початку займання та становило 720°C, після чого спостерігалось її поступове зниження. Також експериментально досліджено значення зміни температур середовища над осередком горіння залежно від висоти вимірювання. Враховуючи те, що висота полум'я перебувала в межах 0,35-0,86 м, температуру виконували на висотах від 0 до 1,2 м з інтервалом 0,2 м. При цьому значення температури змінювались від 720°C в осередку горіння до 330°C у найвищій точці вимірювання. Зростання температури на проміжку до 12 хв пояснюємо збільшенням швидкості прогрівання пожежного навантаження експериментальної ділянки, що своєю чергою призводить до зростання швидкості піролізу та виділення горючих газів у кількості, достатній для горіння. Зниження температури над

осередком горіння зі зростанням висоти вимірювання можна пояснити охолодженням горючого середовища шляхом його перемішування з повітрям, що надходить у зону горіння.

На наступному етапі досліджень ми виконали креслення моделі полігону з "транспортною стрічкою" в середовищі *PyroSim*, де задали геометричні розміри моделі та параметри просторового розташування. Також, для отримання значень температури в осередку пожежі та над ним, розташували віртуальні термометри на висоті 0-1,2 м з інтервалом 0,2 м. Моделювання процесу виникнення та поширення пожежі "транспортної стрічки" здійснювали з використанням програми *FDS* безпосередньо в середовищі *PyroSim*. Для реалізації моделі окрім геометричних параметрів експериментального полігону застосовували фізико-хімічні властивості горючого навантаження (матеріалу), які відповідають цим горючим речовинам та матеріалам з бібліотеки програмного середовища. Інші значення параметрів моделі взято як стандартні за нормальних умов [12]. Для побудови використано також швидкість вітру, температуру повітря та параметри джерела запалювання. Моделювання здійснено на сітці розмірами 60×25×25, геометричні розміри домену – 6×2,5×2,5 м. Хімічний склад горючого матеріалу на основі бавовни та поліестеру з розподілом атомів карбону, гідрогену та оксигену – $C_{2,1}H_{33,8}O_{1,7}$, теплота згорання матеріалу – 19600 кДж/кг.

В процесі моделювання *FDS* автоматично створює комплекс файлів з результатами. Для візуалізації цих результатів використовували додаток *Smokeview*, який після завантаження файлу з розширенням .smv дає змогу переглядати перебіг процесу горіння у просторі (рис. 3).

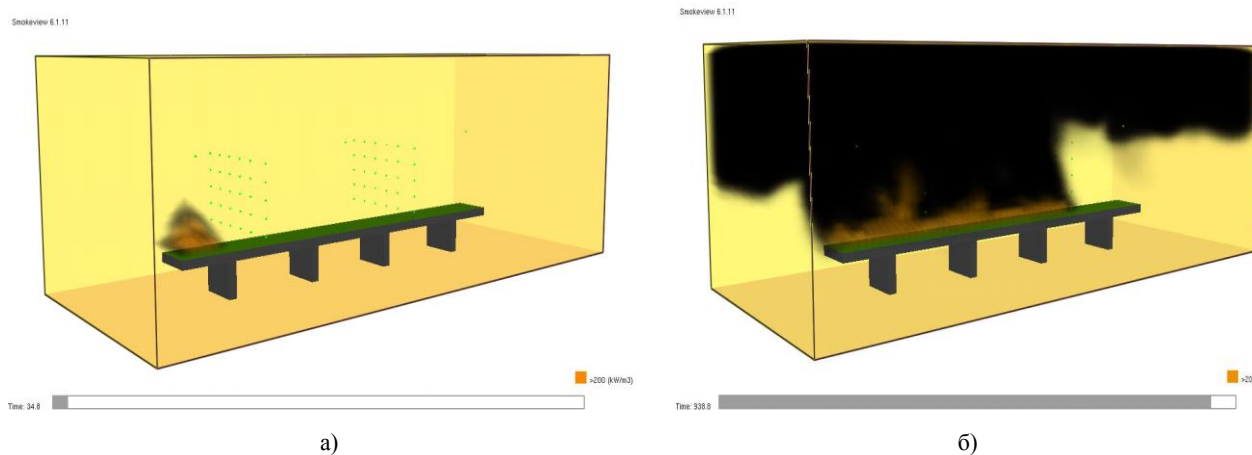
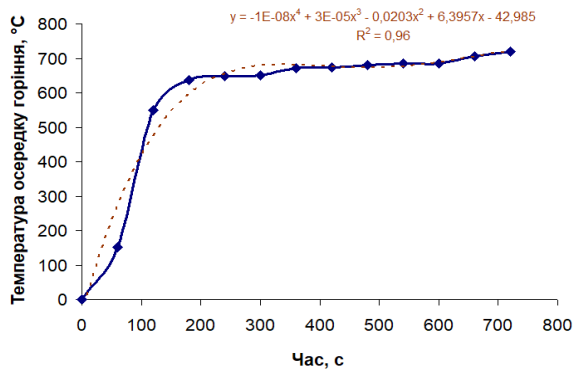


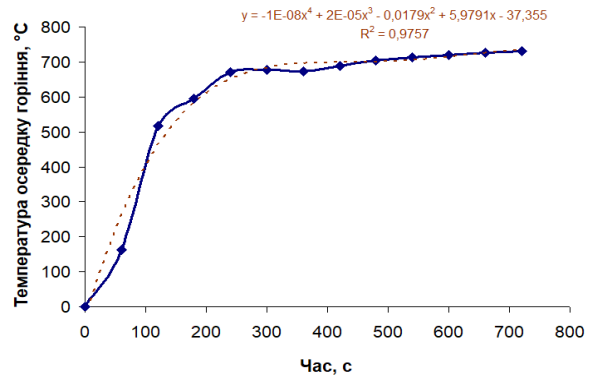
Рисунок 3 – Моделювання пожежі "транспортної стрічки": а) на 1-ій хв від початку горіння; б) на 16-ій хв від початку горіння

Опрацювавши результати експериментального дослідження та моделювання, ми отримали залеж-

ності зміни температури пожежі експериментальної ділянки від тривалості горіння (рис. 4).



а)



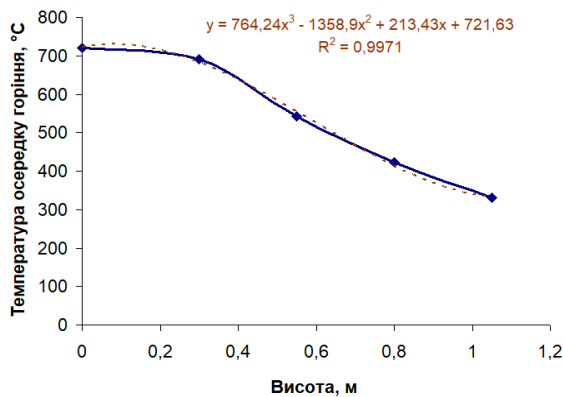
б)

Рисунок 4 – Залежність температури в осередку горіння від часу горіння: а) отримані за результатом експерименту; б) отримані за результатом моделювання

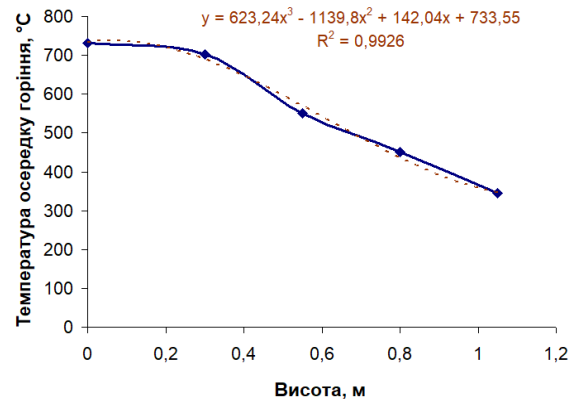
Отримані залежності найкраще відображаються поліноміальними моделями 4-го степеня. В результаті комп'ютерного моделювання, як і у випадку експериментального дослідження, зростання температури відбувалось до 12 хв, а її максимальне значення становило 731°C, що на 1,52% більше від результатів, отриманих під час

вимірювання температур горіння експериментальної ділянки.

Поруч з цим, ми дослідили температури середовища горіння експериментальної ділянки залежно від зміни висоти вимірювань. Після опрацювання результатів отримали залежності як для експериментального дослідження, так і для процесу моделювання (рис. 5).



а)



б)

Рисунок 5 – Залежність температури над осередком горіння від висоти вимірювання: а) отримані за результатом експерименту; б) отримані за результатом моделювання

Отримані залежності найкраще описуються поліноміальними моделями 3-го степеня. Зазначимо, що температури над осередком горіння, отримані за результатами моделювання, зменшувалися зі збільшенням висоти розташування термопар, а їх значення становили в межах від 731°C в нижній точці до 344°C у

верхній точці розміщення термопар.

Для порівняння результатів експериментального дослідження та результатів, отриманих з допомогою моделювання, використали інструментарій середовища електронних таблиць *Excel* та визначили похибки результатів вимірювань (табл. 1).

Таблиця 1

Відносні похибки результатів досліджень

Тривалість досліджень, с	0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720
Відносна похибка \mathcal{E} , %	0	7,2	6,0	6,6	3,5	4,1	1,3	2,2	3,5	4,1	4,8	2,97	1,5

Порівнявши результати експериментального дослідження та комп'ютерного моделювання встановлено, що максимальна похибка результатів не перевищує 7,2 %. Таким чином, отримані за результатами експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання регресійні поліноміальні моделі дають змогу визначати величини температур в осередку горіння від часу та висоти вимірювання.

Висновки

1. В роботі проведено експериментальні дослідження з визначенням температур в осередку горіння швейно-виробничої ділянки, а з метою порівняння результатів виконано моделювання пожежі цієї ділянки в середовищі FDS.

2. Виявлено, що зі збільшенням часу горіння експериментальної та модельованої ділянок зростання температури в осередку пожежі припинилося на 12-й хв від початку займання та становило 720°C/731°C, що перевищує цей показник на 2-хвилині на 76,39%/70,73% відповідно.

3. Встановлено, що зі збільшенням висоти над осередком горіння, температури, визначені за результатами експериментального дослідження та моделювання, мають тенденцію до зниження, про що свідчать поліноміальні регресійні моделі.

Список літератури:

1. Адольф І. І., Гаврилюк А. Ф., Товарианський В. І. Аналіз стану протипожежного захисту підприємств швейної промисловості. Пожежна безпека. 2020. №37. С. 5–10. DOI: 10.32447/20786662.37.2020.01.

2. Firoz A. Design of readymade garments industry for fire safety. A Dissertation for the Degree of Master in Disaster Management. Postgraduate Programs in Disaster Management (PPDM) BRAC University, 2011. 103 p.

3. Shamsul A. Fire and safety engineering in the garment factory of Bangladesh. Department of Mechanical and Chemical Engineering, 2016. 41 p.

4. Wilson A. Reeves and Yvonne B. Marquette Lightweight, Durable-Press Cotton and Polyester/Cotton with Ignition Resistance. Textile Research Journal, 1979. Vol. 49, Issue 3. P. 163–169.

5. Elissa M. Pintauro, David R. Buchanan Ignition Process in Single and Multicomponent Polyester/Cotton Textile Structures. Textile Research Journal, 1979. Vol. 49, Issue 6. P. 326–334.

6. M. A. Khattab Spontaneous Ignition Behavior of Cotton Fabric Having Different Amounts of Polyester. Journal of Applied Polymer Science, 1996. Vol. 62. P. 1503–1507.

7. Гуліда Е. М., Меньшикова О. В., Ренкас А. А. Моделювання пожежі в закритому приміщенні.

Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.6. С. 307–317.

8. Данкевич І. П., Шналь Т. М., Демчина Б. Г. Дослідження температурного режиму пожежі у модельному приміщенні. Львів: Національний університет «Львівська Політехніка» 2013. С. 46–51.

9. Коваль О. М. Процес розвитку та поширення пожежі в приміщеннях будівель деревообробних підприємств. Пожежна безпека. 2013. №22. С. 121–127.

10. Rasbash D., Ramachandran G., Kandola B., Watts J., Law M. Evaluation of Fire Safety. – John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2004.

11. Яковчук Р. С., Балло Я. В., Кузик А. Д., Кагітін О. І., Ковальчук В. М. FDS моделювання ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будівель. Пожежна безпека. 2021. №23. С. 39–45. DOI: 10.32447/20784643.23.2021.06.

12. PyroSim User Manual. URL: https://comexpert.pto.org.ua/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=1373&Itemid=102 (дата звернення 12.04.2022).

References:

1. Adolf I. I., Gavrilyuk A. F., Tovaryansky V. I. Fire protection condition analysis in garment industry enterprises. Fire safety. 2020. No. 37. pp. 5–10. DOI: 10.32447/20786662.37.2020.01.

2. Firoz A. Design of readymade garments industry for fire safety. A Dissertation for the Degree of Master in Disaster Management. Postgraduate Programs in Disaster Management (PPDM) BRAC University, 2011. 103 p.

3. Shamsul A. Fire and safety engineering in the garment factory of Bangladesh. Department of Mechanical and Chemical Engineering, 2016. 41 p.

4. Wilson A. Reeves and Yvonne B. Marquette Lightweight, Durable-Press Cotton and Polyester/Cotton with Ignition Resistance. Textile Research Journal, 1979. Vol. 49, Issue 3. P. 163–169.

5. Elissa M. Pintauro, David R. Buchanan Ignition Process in Single and Multicomponent Polyester/Cotton Textile Structures. Textile Research Journal, 1979. Vol. 49, Issue 6. P. 326–334.

6. Khattab M. A. Spontaneous Ignition Behavior of Cotton Fabric Having Different Amounts of Polyester. Journal of Applied Polymer Science, 1996. Vol. 62. P. 1503–1507.

7. Gulida E. M., Menshikova O. V., Renkas A. A. Simulation of a fire in an enclosed space. Scientific Bulletin of NLTU. – 2012. – Issue. 22.6. P. 307–317.

8. Dankevich I. P., Shnal T. M., Demchina B. G. Investigation of the temperature regime of a fire in

a model room. Lviv: National University "Lviv Polytechnic" 2013. P. 46–51.

9. Koval A. M. The process of development and spread of fire in the premises of buildings of woodworking enterprises. Fire safety. 2013. No. 22. P. 121–127.

10. Rasbash D., Ramachandran G., Kandola B., Watts J., Law M. Evaluation of Fire Safety. – John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2004.

11. Yakovchuk R. S., Ballo Ya. V., Kuzyk A. D., Kagitin O. I., Kovalchuk V. M. FDS simulation of the effectiveness of fire eaves to prevent the spread of fire by facade structures of high-rise buildings. Fire safety. 2021. No. 23. P. 39–45. DOI: 10.32447/20784643.23.2021.06.

12. PyroSim User Manual. URL: https://comexpert.pto.org.ua/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=1373&Itemid=102 (date of application 12.04.2022).

© В. І. Товарянський, І. І. Адольф, 2022

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 08.05.2022.

Прийнято до публікації 17.05.2022.