УДК 614.841.123.24

Анна Борисова,

ORCID iD [0000-0002-8700-0761](https://orcid.org/0000-0002-8700-0761)

**Вадим Ніжник, канд. техн. наук,
старш. наук. співроб.,**

ORCID iD [0000-0003-3370-9027](https://orcid.org/0000-0003-3370-9027)

Дмитро Середа

ORCID iD [0000-0002-9645-5864](https://orcid.org/0000-0002-9645-5864)

*Інститут державного управління
та наукових досліджень з цивільного
захисту, E-mail: borysova_anna@ukr.net*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ В УМОВАХ ВІТРОВОГО ВПЛИВУ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.107-115>

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 11.10.2020

Пройшла рецензування: 19.10.2020

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

критична поверхнева
густина теплового потоку,
тепловий потік, теплообмін,
променевий теплообмін

АНОТАЦІЯ

В статті наведено результати експериментального дослідження тривалості займання п'ятишарового гофрокартону залежно від поверхневої густини теплового потоку та в умовах вітрового впливу. Досліджено збіжність отриманих експериментальних даних, в кожному із окремих експериментів. Встановлена залежність часу настання передумов для поширення пожежі з урахуванням теплового потоку та тривалості займання від параметрів вітрового впливу та визначена регресія, яка описує таку залежність із відповідними коефіцієнтами.

Постановка проблеми. В процесі розвитку відкритої пожежі променистий тепловий потік від факела полум'я падає на навколишні будівлі чи горючі матеріали. Необхідна і достатня умова загоряння будь-якої поверхні горючого матеріалу виражається співвідношенням $q_p \geq q_{кр}$ (q_p - падаючий потік на поверхню матеріалу, що опромінюється Вт/м²; $q_{кр}$ - критичний тепловий потік, при якому виникає загоряння поверхні даного виду горючого матеріалу, Вт/м²). Однак вплив умов навколишнього середовища, зокрема вітру, на значення критичної поверхневої густини теплового потоку при якому відбувається займання речовин і матеріалів залишаються науково не обґрунтованими. З цієї причини авторами проведено експериментальні дослідження тривалості займання п'ятишарового гофрокартону залежно від поверхневої густини теплового потоку та в умовах вітрового

впливу. Дослідження проводились відповідно до методики описаної в [1].

Аналіз досліджень і публікацій. Відповідно до [2] критична поверхнева густина теплового потоку (далі – $q_{кр}$) величина, що відноситься до параметрів займистості матеріалів та визначається експериментальним методом.

Проаналізовані методи визначення критичної поверхневої густини теплового потоку

[3-5] мають суттєвий недолік, вони не враховують вплив умов середовища, а саме вплив вітру та його характеристики на величину критичного значення поверхневої густини теплового потоку для речовин і матеріалів, що може істотно вплинути на значення променевого теплового потоку та на займистість речовин і матеріалів.

Авторами [6] визначено наявність такого впливу, але не знайдено відповідних залежностей.

У роботі авторів [7] досліджено та визначено, що густина теплового випромінювання різко зменшується у разі збільшення відстані від джерела випромінювання, а також при введенні у простір дрібно розпиленої води. Однак вплив вітру, як умова зміни залежності значення теплового потоку, авторами не досліджувалася.

У працях [8, 9] авторами описується проблема нагріву резервуарів з нафтопродуктами. Акцент приділено в основному розробленню математичних моделей для розрахунку температури нагрівання поверхневого шару нафтопродукту від сусіднього палаючого резервуара під час пожежі в резервуарному парку. Модель створена для розрахунку максимально досяжної температури нафтопродукту і небезпеки займання. В [9] авторами побудована математична модель нагріву резервуара з нафтопродуктами під дією випромінювання від полум'я палаючого сусіднього резервуара. Модель визначає час досягнення вибухонебезпечної температури. Проте дані моделі не враховують дію потоку повітря на резервуар, автори лише згадують його дію, як нездатну до зміни картини величину, виключенням є лише ураганний вітер який може нахилити факел полум'я майже горизонтально. Також в переважній більшості моделі оснований на теорії, в той час коли експериментальні дослідження подібних питань показують істотно інші результати.

Автори [10] запропонували експериментальні методи спрямовані на визначення ефективності загорання матеріалу під дією падаючого теплового потоку, що складався з випробувань, які використовують встановлений конусометричний калориметр для отримання показників запалювання, виділення енергії та маси. Однак описані методи не враховували дію вітрового впливу на досліджуваний зразок.

Виходячи з вищенаведеного можна стверджувати, що встановлення даних та залежності зміни $q_{кр}$ від вітрового впливу є актуальною науковою задачею.

Формулювання цілей дослідження.

Мета роботи: визначити залежність критичної поверхневої густини теплового потоку від вітрового впливу.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

провести експериментальні дослідження визначення залежності значення критичної поверхневої густини теплового потоку від вітрового впливу;

оцінити та проаналізувати результати експериментальних досліджень;

обробити результати за статистичними показниками (абсолютні, відносні, середньоквадратичні відхилення, критерій Граббса та Фішера);

виявити залежність $q_{кр}$ від вітрового впливу.

Виклад основного матеріалу. Для отримання даних щодо зміни критичної поверхневої густини теплового потоку від вітрового впливу проведено експериментальні дослідження. Сутність методу експериментальних досліджень полягала у моделюванні джерела теплового випромінювання, визначенні проміжку часу від початку дослідження до настання нормованого для речовин і матеріалів граничного стану за ознакою початку полум'яного горіння під дією на поверхню дослідного зразка променистого теплового потоку та потоку повітря з різною швидкістю. В якості досліджуваного зразка в цьому разі було взято гофрокартон п'ятишаровий у формі квадрату зі стороною розміром (165 ± 5) мм товщиною 6 мм.

Діапазон швидкості вітру в межах $0...4,5$ м/с для дослідження обрано на основі дослідження статистичних даних Українського гідрометеорологічного центру [11] та кліматичних даних за період з 1899 по 2019 роки, згідно з якими середня швидкість вітру на території України в залежності від регіону коливається в межах $2,5...4,5$ м/с. [12].

Експериментальне дослідження починалось з вмикання електроживлення та по регулюючому термоелектричному перетворювачу задавалась встановлена при калібруванні величину термоелектрорушійної сили, що відповідає

поверхневій густині теплового потоку (далі – ПГТП) 30 кВт/м² (646±3° С), у цьому заданому режимі установку витримували 5 хвилин. Після чого регулюючи противагу зразок встановлювали під дію радіаційної панелі. У разі спалахування досліджуваного зразка або закінчення часу дослідження (20 хв експериментальне дослідження припинялось. Діапазон впливу ПГТП радіаційної панелі: 5-50 кВт/м². У разі відсутності займання протягом 20 хв, величину ПГТП збільшували на – 5 кВт/м²

та повторювали експериментальне дослідження. У разі наявності займання, значення ПГТП зменшували на – 5 кВт/м² та продовжували дослідження.

Всі зразки досліджувалися на значеннях поки не було визначено критичну поверхневу густину теплового потоку. Далі експеримент повторювався з урахуванням впливу потоку повітря у діапазоні від 0...4,5 м/с, а саме зі швидкістю 1,0 м/с, 1,5 м/с, 3 м/с, 4,5 м/с.

Хід проведення експериментальних досліджень зображено на рис. 1.

Рисунок 1 – Хід проведення експериментального дослідження

За результатами проведення трьох експериментів отримані дані щодо зміни критичної поверхневої густини теплового потоку для різних швидкостей вітру, що наведено на рис. 2.

Результати експериментальних досліджень свідчать, що зі зміною швидкості потоку повітря відбувається зменшення критичної поверхневої густини теплового потоку внаслідок чого займання відбувається пізніше.

Для оцінювання збіжності експерименту визначені абсолютні, відносні, середньоквадратичні відхилення та критерії Граббса та Фішера.

Відповідно до ДСТУ ГОСТ ISO 5725-2 для перевірки результатів випробувань на наявність викидів та квазिवикидів застосовують критерій Граббса, що розраховується за формулою:

$$G_{i\max} = \frac{t_{i\max} - \bar{t}_i}{\sigma_i}, (1)$$

де $\bar{t}_i$ і σ_i - відповідно середнє значення та середньоквадратичне відхилення часу займання за дії теплового потоку.

Рисунок 2 – залежність часу настання передумов для поширення пожежі з урахуванням теплового потоку та тривалості займання від параметрів вітрового впливу:

а) без впливу потоку вітру; б) з впливом потоку вітру зі швидкістю 1,0 м/с; в) з впливом потоку вітру зі швидкістю 1,5 м/с; г) з впливом потоку вітру зі швидкістю 3,0 м/с; д) з впливом потоку вітру зі швидкістю 4,5 м/с; 1,2,3- результати окремого експерименту.

Значення критерія Граббса визначали за формулою (2), а середньоквадратичні відхилення розраховували за формулою (3):

$$G_{i \min} = \frac{\bar{t}_i - t_{i \min}}{\sigma_i} \quad (2)$$

$$\sigma = \left(\sum_{i=1}^n \frac{(t - \bar{t}_i)^2}{n} \right)^{-0.5} \quad (3)$$

де, n – кількість експериментів (n = 3)

Знайдені значення $G_{\max}$ і $G_{\min}$ порівняли з 5% ($G_{кр5\%}$) та 1% ($G_{кр1\%}$) критичними табличними значеннями [13], що однакові та становлять 1,155.

Таким чином якщо після порівняння $G_{\max}$ і $G_{\min}$ з критичним значенням визначено, що значення коефіцієнтів становлять більше 5%-го значення і менше або дорівнює 1%-му значенню, тоді значення $Q_{\max}$ або $Q_{\min}$ вважали викидами. В тому випадку коли розрахункові значення $G_{\max}$ і $G_{\min}$ були меншими чи дорівнювали табличним значенням критерію Граббса, вважали, що експериментальні дані викидів та квазिवикидів не містять (рис. 3). Експериментальні дані, які відносилися до викидів не враховувалися для подальших досліджень.

Рисунок 3 – Результати оцінки присутності викидів та квазівикидів в експериментальному дослідженні за критерієм Граббса зі швидкістю вітру 1,0 м/с.

Таблиця 1 – Максимальні абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення

Швидкість потоку повітря м/с	Абсолютні відхилення, с	Відносні відхилення, %	Середньоквадратичні відхилення, с
0	1.238	3.585	1.358
1,0	1.429	4.635	1.512
1,5	2.19	4.067	2.076
3,0	1.611	3.513	1.529
4,5	1.778	3.728	1.846

Таблиця 2 – Дані щодо оцінки дисперсій результатів експериментальних досліджень до однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера

Швидкість потоку повітря м/с	Табличне значення критерію Фішера	Розрахункове значення критерію Фішера
0	6,39	1.609
1,0		1.235
1,5		0.44
3,0		1.738
4,5		1.306

Абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення результатів експериментальних досліджень від усередненого наведені у табл. 1.

Отримані результати свідчать, що абсолютні відхилення експериментальних даних кожного експерименту від усереднених значень не перевищують 2,19 с, що у відсоткових значеннях становить 4,067%, а максимальне середньоквадратичне відхилення дорівнює 2,076, с що свідчить про задовільну

збіжність отриманих експериментальних даних.

Для оцінювання дисперсій висувають нуль-гіпотезу, тобто припускають, що різниця між дисперсіями результатів випробувань дорівнює нулю і отримані експериментальні дані, є вибірками з генеральної сукупності. При цьому розраховують дисперсії за формулою (4):

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n_i} (t_i - \bar{t})^2 \quad (4)$$

Результати щодо оцінки дисперсій результатів експериментальних досліджень до однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера наведені у табл. 2.

Так як розрахункові значення критерію Фішера менші за табличні, [13], то отримані результати не заперечують нуль-гіпотезі, а їх відмінності можна вважати не суттєвими. Тому можна

вважати дані отримані за результатами експериментальних досліджень вибірками з однієї генеральної сукупності, що доводить загальну збіжність кожного окремого експерименту. Це означає що усереднені дані експериментальних досліджень можуть бути використані для встановлення залежностей критичної поверхневої густини теплового потоку від вітрового впливу, рис. 4.

Рисунок 4 – Середні значення залежності часу настання передумов для поширення пожежі з урахуванням теплового потоку та тривалості займання від параметрів вітрового впливу:

Графік 1 – швидкість вітру 4,5 м/с.

Графік 2 – швидкість вітру 3,0 м/с. 3.

Графік 3 – швидкість вітру 1,5 м/с.

Графік 4 – швидкість вітру 1,0 м/с.

Графік 5 – без вітрового впливу.

Таким чином враховуючи вищенаведену інформацію, для подальшої обробки даних застосовували середні значення отримані за даними трьох експериментів для певної швидкості вітру. Результати цих значень наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати середніх значень отриманих за даними експериментів

v, м/с	Тепловий потік, q, кВт/м²							
	Час займання, t, с							
	10	15	25	30	35	40	45	50
0	-	200	72	44	24	18	16	10
1	-	204	74	45	30	25	23	16
1,5	-	206	77	47	33	34	33	19
3	-	-	79	50	39	36	34	26
4,5	-	-	82	55	46	43	39	27

Рисунок 5 – залежність зміни значення критичної поверхневої густини теплового потоку від швидкості вітру, при якому відбувається займання матеріалу,

Використовуючи табличні значення побудовано залежність часу настання передумов для поширення пожежі з урахуванням теплового потоку та тривалості займання від параметрів вітрового впливу рис. 5.

Зазначену залежність можна описати у вигляді рівняння числової регресії (5)

$$f(t) := a_0 + a_1 t \quad (5)$$

де a_0 , a_1 – константи рівняння числової регресії

Константи для $f(t)$ наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Дані констант рівняння числової регресії

a_0	a_1
9,88	3,36t

На рис. 6 зображено залежність між швидкістю вітру, критичної поверхневої

густини теплового потоку та часу впродовж якого відбувається займання матеріалу.

Рисунок 6 – залежність між швидкістю вітру, критичною поверхневою густиною теплового потоку та часом займання матеріалу.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Встановлено, що абсолютні відхилення експериментальних даних кожного експерименту від усереднених значень не перевищують 2,19 с, що у відсоткових значеннях становить 4,067%, а максимальне середньоквадратичне відхилення дорівнює 2,076, с що свідчить про задовільну збіжність отриманих експериментальних даних.

Встановлено залежність часу настання передумов для поширення пожежі з урахуванням теплового потоку та тривалості займання від параметрів вітрового впливу, яка може бути описана рівнянням числової регресії $f(t) := a_0 + a_1 t$ із коефіцієнтами 9,88, 3,36t.

Результати отриманих даних доцільно використати під час повного факторного експерименту з метою обґрунтування табличних даних залежності критичної поверхневої густини теплового потоку від швидкості вітру.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Борисова А. С., Ніжник В. В. Методика експериментальних досліджень залежності критичної поверхневої густини теплового потоку від вітрового впливу. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. Серія: технічні науки та архітектура. 2020. №2. С. 200–203.
2. ДСТУ Б В.1.1.2-97. Матеріали будівельні, Методи випробувань на займистість [Чинний від 1998-01-01.]. К., 1997. / Будстандарт. Сервіс документів он-лайн. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=40059 (дата звернення 28.10.2020).
3. Пожарная профилактика в строительстве. / Грушевский. Б. В. и др. под ред. В.Ф. Кураленкина. М.: ВИПТШ, 1985. 451 с.
4. Еврокод 1 Воздействия на конструкции Часть 1-2. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости. [Eurocode 1. Actions on structures General actions. Actions on structures exposed to fire [Released 2013-02-28]]. Минск, 2010. 42 с. URL: <https://cutt.ly/PgRdcYv> (дата звернення 28.10.2020).
5. ДСТУ Б В.1.1-10:2004. Захист від пожежі. Матеріали будівельні. Метод випробування на поширення полум'я по вертикальних поверхнях у горизонтальному напрямку. [Чинний від 2005-04-01]. К., 2004 / Законодавча база ДНОАП. URL: https://dnaop.com/html/41028/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_%D0%91_%D0%92.1.1-10_2004 (дата звернення 28.10.2020).
6. Жартовський С. В., Поздеев С. В., Ніжник В. В. Фещук Ю. Л. Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку. *International Scientific Journal "Internauka"*. URL: <https://www.inter-nauka.com/uploads/public/15639942773628.pdf> (дата звернення 28.10.2020).
7. Лабай В. Й., Гудим В. І., Гаврилюк А. Ф. Дослідження та шляхи зменшення теплового випромінювання під час пожеж. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*. 2013. № 755. С. 221-226. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2013_755_42.
8. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Оценка пожарной опасности резервуара с нефтепродуктом при его нагреве от пламени соседнего горящего резервуара. *Радиоэлектроника и информатика*. Харьков: ХНУРЕ, 2005. №2. С. 110-112.
9. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Тепловые процессы в нагреваемом резервуаре. *Коммунальное хозяйство городов : научно-технический сборник*. Киев: Техника, 2006. Вып. 67. С. 357-362.
10. Panagiotou J., Quintiere J. G. Fire performance as a Function of Incident Heat Flux. *The Fifth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference*, 31.10 2007. URL: https://fire.tc.faa.gov/2007Conference/files/Fire_Resistant_Materials/WedPM/PanagiotouFireperformance/PanagiotouFireperformancePaper.pdf (дата звернення 28.10.2020).
11. Шкала Бофорта / Вебсайт Українського гідрометеорологічного центру. URL: <https://meteo.ua/ua/vocabulary/shkala-boforta-539> (дата звернення 28.10.2020).
12. Інформаційний сервер погоди Українського гідрометеорологічного центру. URL: https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate_stations/ (дата звернення 28.10.2020).
13. Про затвердження Інструкції з проведення міжлабораторних порівняльних випробувань у сфері пожежної безпеки: наказ МНС України від 27.08.2007 р. № 581.

REFERENCES

1. Borysova A S, Nizhnyk V V 2020 Methods of experimental studies of the dependence of the critical surface heat flux density on wind exposure Scientific and technical collection "Municipal utilities". Series: technical sciences and architecture 2 200–203.
2. DSTU B V.1.1.2-97, Building materials, Flammability test methods.
3. Hrushevskiy B V, Yakovklev A I, Krivosheyev I A. and others Edited by Kuralenkin V F 1985 Fire Prevention in Construction M., HEFES, 451
4. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-2. General influences. Actions to determine fire resistance: TKP EN 1991-1-2-2009. Minsk, 2009 52 p
5. DSTU B V.1.1-10: 2004. Fire protection. Building materials. Test method for flame propagation on

- vertical surfaces in the horizontal direction.
6. Zhartovskyy S.V., Pozdeev, S.V. Nizhnyk VV and. Feshchuk Yu.L Assessment of the risk of fire spreading to adjacent construction sites according to the criterion of heat flow / International Scientific Journal "Internauka" [http: //www.inter-nauka.com/](http://www.inter-nauka.com/).
 7. Gudym V I, Labay V Y, Gavrilyuk A F 2013 Research and ways to reduce thermal radiation during fires Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" Theory and practice of construction **755** 221-226
 8. Abramov Yu.A., Basmanov A E 2005 Estimation of fire danger of the tank with oil product at its heating from a flame of the next burning tank Radioelektronika i informatika №2. 110-112
 9. Abramov Yu.A, Basmanov A E 2006 Thermal processes in a heated tank Municipal economy of cities. Scientific and technical collection, Issue 67. 357-362
 10. Panagiotou J., Quintiere J.G. Fire performance as a Function of Incident Heat Flux, The Fifth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference, 31X 2007;10
 11. Website of the Ukrainian Hydrometeorological Center. URL : <https://meteo.ua/ua/vocabulary/shkala-boforta-539>.
 12. Weather information server of the Ukrainian Hydrometeorological Center URL : https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate_stations/
 13. Pro zatverdzhennia Instruksii z provedennia mizhlaboratornykh porivnialnykh vyprobuvan u sferi pozhezhnoi bezpeky: nakaz MNS Ukrainy vid 27.08.2007 r. № 581.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SURFACE HEAT FLUX DENSITY AND IN WIND CONDITIONS

*A.Borysova, V. Nizhnyk, Cand. Sc. (Eng.) SRF, D. Sereda,
Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

KEYWORDS	ANNOTATION
critical surface heat flux density, heat flux, heat transfer, radiant heat transfer.	<p>The article presents the results of an experimental research of the duration of ignition of five-layer corrugated cardboard depending on the surface heat flux density and wind conditions. The convergence of the obtained experimental data in each of the individual experiments was investigated. The dependence of the critical surface heat flux density on wind influence is established and the regression is defined, which describes such dependence with the corresponding coefficients. To obtain data on the change in the critical surface heat flux density from wind exposure, experimental studies were performed. The essence of the experimental research method was to model the source of thermal radiation, determine the time interval from the beginning of the research to the onset of normalized for substances and materials limit state on the basis of flame combustion under the action on the surface of the test sample. In this case, a five-layer corrugated cardboard in the shape of a square with a side size (165 ± 5) mm and a thickness of 6 mm was used as a test sample. According to the results of three experiments, data were obtained on the change in the critical surface heat flux density for different wind speeds.</p> <p>To assess the convergence of the experiment, absolute, relative, standard deviations and Grabbs and Fisher criteria were determined. The results show that the absolute deviations of the experimental data of each experiment from the average values do not exceed 2.19 s, which is a percentage of 4.067%, and the maximum standard deviation is 2.076 s, which indicates a satisfactory convergence of the obtained experimental data. The results of experimental research show that with a change in air flow rate, the critical surface heat flux density decreases, as a result of which ignition occurs later.</p> <p>It is expedient to use the results of the obtained data during a full-factor experiment in order to substantiate the tabular data of the dependence of the critical surface heat flux density on the wind speed.</p>