



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.16>

О. В. Шаповалов, С. Я. Вовк, А. П. Кушнір, Н. О. Ференц
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8444-2006> – О. В. Шаповалов

<http://orcid.org/0000-0001-5278-3754> – С. Я. Вовк

<http://orcid.org/0000-0002-6946-8395> – А. П. Кушнір

<http://orcid.org/0000-0003-3139-0921> – Н. О. Ференц

✉ o1972@ukr.net

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПОВІТРООБМІНУ НА УТВОРЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ЧИННИКІВ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕННІ КВАРТИРИ ВИСОТНОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

Проблема. Урбанізаційні процеси у багатьох регіонах України призвели до міграції населення та суттєвого зростання чисельності мешканців міських населених пунктів. Особливо відчутними ці тенденції стали у західних регіонів України, що значною мірою зумовлено наслідками повномасштабне вторгнення росії. Самостійне переселення громадян, примусова евакуація населення та релокація підприємств у більш безпечні регіони спричинило збільшення активності будівельних робіт з метою забезпечення житлом усіх громадян, які його потребують.

Індивідуальні архітектурні рішення та поєднання різноманітних конструктивних елементів у будівництві висотних житлових будинків, а також вплив людського фактору суттєво впливають на безпеку проживання. У разі виникнення пожежі ці фактори можуть зумовлювати складність прогнозування розвитку небезпечних чинників пожежі та їхнього впливу на людей.

Мета. Проведення аналізу динаміки зміни параметрів небезпечних чинників пожежі, що утворюються в квартирі житлового будинку з змінними параметрами обміну повітряних мас пов'язаних з різним положенням стулки вікна та часу настання їх критичних значень що впливає на безпеку евакуації людей.

Методи дослідження. У роботі використано метод математичного моделювання за допомогою програмного комплексу Fire Dynamics Simulator (FDS) процесів утворення і розповсюдження небезпечних чинників пожежі (CO_2 , CO , $^\circ\text{C}$, видимість).

Основні результати дослідження. На настання граничних значень небезпечних чинників пожежі впливає не тільки висота, на якій відбувався контроль вказаних значень, а й повітрообмін, який присутній на момент пожежі. Так значення видимості досягає критичних значень на всіх контрольованих висотах при повністю закритих вікнах і зовсім не настає при повністю відкритих вікнах. Небезпечно для життя значення температури настає при повністю закритих вікнах тільки на великих висотах, а при повністю відкритому вікні зовсім не настає. Небезпечні концентрації двооксиду вуглецю і монооксиду вуглецю, не настає у жодному сценарії розвитку пожежі.

Висновки. Аналіз комп'ютерного моделювання в програмного комплексу FDS PyroSim показав, що визначальними чинниками пожежі, які можуть вплинути на безпеку евакуування людей є видимість і температура. При пожежі в приміщенні кухні, видимість та температура досягає граничних значень тільки у приміщенні передпокою 1. При зачиненому вікні в кухні граничне значення видимості на висоті 1,7 м настає на 118 с, а на висоті 0,4 м на 142 с. Граничне значення температури настає на висоті 1,7 м настає на 124 с. При відчиненій стулці вікна на 8° в приміщенні кухні граничні значення видимості та температури на висоті 1,7 м настає на 133 с. При повністю відчиненому вікні в кухні граничне значення видимості та температури не настає на жодній контрольованій висоті. Граничні значення концентрації CO і CO_2 не настають у всіх приміщеннях за будь яких умов, крім кухні.

Ключові слова: протипожежний захист, висотний будинок, небезпечні чинники пожежі, FDS, комп'ютерне моделювання.

MATHEMATICAL MODELING OF THE IMPACT OF AIR EXCHANGE ON THE FORMATION OF HAZARDOUS FIRE FACTORS IN THE APARTMENT OF A HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDING

The Problem. Urbanization processes in many regions of Ukraine have led to population migration and a significant increase in the number of residents in urban areas. These trends have been particularly pronounced in the western regions of Ukraine, largely due to the consequences of Russia's full-scale invasion. Voluntary relocation of citizens, forced evacuation of the population, and the relocation of businesses to safer regions have led to an increase in construction activity aimed at providing housing for all citizens in need.

Individual architectural solutions and the combination of various structural elements in the construction of high-rise residential buildings, as well as the human factor, significantly influence residential safety. In the event of a fire, these factors can make it difficult to predict the development of fire hazards and their impact on people.

Objective. To analyze the dynamics of changes in the parameters of hazardous fire factors generated in an apartment of a residential building with variable air exchange parameters associated with different window sash positions and the time at which their critical values are reached, which affects the safety of human evacuation.

Research methods. The study employs mathematical modeling using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software package to simulate the formation and propagation of hazardous fire factors (CO₂, CO, °C, visibility).

Key findings of the study. The occurrence of critical levels of fire hazards is influenced not only by the height at which these levels were monitored, but also by the air exchange taking place at the time of the fire. Thus, visibility reaches critical levels at all monitored heights when windows are fully closed, and does not reach critical levels at all when windows are fully open. Life-threatening temperature levels occur with fully closed windows only at high altitudes, and do not occur at all with fully open windows. Dangerous concentrations of carbon dioxide and carbon monoxide do not occur in any fire development scenario.

Conclusions. Analysis of computer simulations using the FDS PyroSim software package showed that the determining factors of a fire that can affect the safety of evacuation are visibility and temperature. In the event of a fire in the kitchen, visibility and temperature reach critical values only in the hallway 1. With the kitchen window closed, the critical visibility value at a height of 1.7 m is reached at 118 seconds, and at a height of 0.4 m at 142 seconds. The critical temperature value is reached at a height of 1.7 m in 124 seconds. With the kitchen window sash open 8° into the room, the critical visibility and temperature values at a height of 1.7 m are reached in 133 seconds. With the kitchen window fully open, the limit values for visibility and temperature are not reached at any monitored height. The limit values for CO and CO₂ concentrations are not reached in any room under any conditions, except in the kitchen.

Key words: fire protection, high-rise building, fire hazard factors, FDS, computer modeling.

Постановка проблеми. Житловий фонд у деяких регіонах України розвивається швидкими темпами. У відповідь на потреби ринку забудовники реалізують сміливі проекти, які пов'язані з обмеженням площ земельних ділянок під забудову. Збільшується поверховість житлових будинків, набувають різноманітних форм конфігурації житлових помешкань, приміщень загального та комерційного призначення, збільшується довжина евакуаційних шляхів, деякі приміщення не мають природнього освітлення (вікон). Усе це впливає на безпеку людей, які в них проживають.

Аналіз статистичних даних свідчить про стійку тенденцію до збільшення кількості пожеж у житловому секторі. Станом на 1 січня 2026 з моменту повномасштабного вторгнення в Україні було зареєстровано 201211 випадок загорянь у житлових будинках [1].

Розвиток пожежі має непередбачуваний характер. На поширення небезпечних чинників пожежі

(диму, температури, токсичних газів) в просторі житлової квартири, а також в інших приміщеннях та на шляхах евакуації людей впливають конвективні потоки, які розповсюджуються у вертикальній і горизонтальній площинах.

Тому дослідження розподілу вказаних небезпечних чинників пожежі по висоті приміщення є актуальною проблемою. Її вирішення дасть можливість визначати зони накопичення небезпечних чинників та місця досягнення ними критичних значень, які створюють небезпеку для людей, а також знайти шляхи усунення вищезгаданих небезпек при плануванні помешкань будь-якої складності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема забезпечення пожежної безпеки у висотних житлових будинках перебуває в центрі уваги багатьох дослідників. Автори [3] провели аналіз небезпек висотних житлових будинків на прикладі будинків розташованих у Львові.

Спираючись на інформацію надану працівниками підрозділів Головного управління ДСНС України у Львівській області основними чинниками, які впливають на безпеку людей у житлових будівлях є невідповідність будівельних конструкцій нормованим межах вогнестійкості, неналежний захист металевих елементів будівель, недостатня кількість протипожежних дверей, люків, воріт та вікон, недостатня кількість або незадовільний стан шляхів евакуації (двері сходових кліток та ліфтових холів не обладнані пристроями для самозачинення та ущільненнями в притулах, мешканці житлових будинків самовільно проводять перепланування, влаштовуючи комірки, інші приміщення), відсутність евакуаційного освітлення, незабезпеченість об'єктів зовнішнім і внутрішнім протипожежним водопостачанням (не відремонтовані насоси підвищувачі тиску води, внутрішні пожежні крани не укомплектовані рукавами та стволами), непрацездатність системам автоматичної пожежної сигналізації (сигнали від приймальних приладів пожежної сигналізації не виведені на пульти централізованого спостереження), відсутність димовидалення та підпору повітря, оповіщення та управління евакуацією людей. Автори у своїй роботі зробили акцент на проблеми високіх пожежних ризиків у висотних та багатоповерхових житлових будинках та їх зниження шляхом визначення необхідної кількості спеціальної техніки для аварійно-рятувальних робіт та фінансування її придбання з метою забезпечення соціально-гарантованого рівня захисту населення від пожеж та інших надзвичайних ситуацій [3]. Однак, в даній роботі автори визначали пожежні ризики лише з точки зору забезпечення оперативно-рятувальних підрозділів спеціальною технікою за допомогою якої можна ефективно провести евакуацію людей та ліквідувати пожежу, але не врахували можливі впливи на людей небезпечних чинників пожежі, які можуть вплинути на їх самостійне евакуацію з будинку.

У роботі [4] проведено порівняння результатів моделювання пожежі у триповерховій житловій будівлі з результатами повномасштабних пожежних випробувань. Для визначення адекватності результатів моделювання температури при пожежі у приміщеннях із застосуванням комп'ютерної програми Rugosim були досліджені середні абсолютні відхилення, середні відносні відхилення, середні квадратичні відхилення показників термопар для відповідних випробувань. Дослідження дало можливість визначити характер перебігу пожежі, часові залежності її основних параметрів та вплив температури на будівельні конструкції. Проте, в даній роботі автори розглянули лише один

небезпечний чинник пожежі, який може вплинути на безпеку людей при виникненні пожежі, – це температурний режим і не моделювали розвиток інших небезпечних чинників.

Дослідниками [5–7] розглянуто безпеку висотних будівель через розповсюдження вогню системою фасадного утеплення на основі пінополістиролу та можливість розповсюдження пожежі на інші поверхи і приміщення, що може створювати небезпеку для людей. Їх результати досліджень показали, що різна конструкція фасадів по різному впливає на розповсюдження вогню у вертикальній площині з утворенням різної кількості теплоти. Автори у своїх роботах не розглянули розповсюдження продуктів горіння, які містять небезпечні речовини, наявність яких може вплинути на безпеку евакуації з будівлі.

У роботі [8] створено модель розвитку пожежі в житловій квартирі, осередок якої знаходився в кухні. Дослідниками проаналізовано час розвитку пожежі, ступінь небезпеки, температуру та видимість. Також було проаналізовано архітектурні рішення, які можна було б розглянути для запобігання та розвитку пожежі в представлених ситуаціях. В процесі моделювання автори врахували лише два небезпечних чинники пожежі, не врахувавши інші небезпечні чинники, такі як утворення СО, зменшення концентрації O_2 , збільшення концентрації CO_2 , що також впливає на безпеку людей, які перебувають в будівлі.

У роботі [9] досліджено розповсюдження небезпечних чинників пожежі, яка виникла в приміщенні кухні квартири висотного житлового будинку за трьома сценаріями. Граничні значення небезпечних чинників пожежі приведено в [10]. Сценарії розвитку пожежі передбачали зміну швидкості вітру ззовні будівлі при повністю відчиненій і повністю зачиненій стулці вікна в приміщенні кухні. Результати дослідження показали, що швидкість вітру ззовні будівлі впливає на утворення небезпечних чинників пожежі. Однак, авторами не досліджено утворення і розповсюдження небезпечних чинників пожежі у безвітряну погоду і при всіх можливих положеннях стулки вікна.

У роботі [11] автори дослідили вплив небезпечних чинників пожежі, які утворюються під час пожежі в цеху паперової фабрики. Дослідження показали, що найбільш небезпечною стадією пожежі є в період триває від 5 до 30 хвилин. А максимальний час евакуації з усіх виробничих приміщень становитиме 190 секунд. Авторами встановлено, що найнебезпечнішим фактором пожежі на вказаному підприємстві, де питоме пожежне навантаження перевищує 500 МДж/м^2 є втрата видимості, яка настає після 331 секунди.

Однак, вказані результати дослідження не можна застосувати до приміщень висотного житлового будинку.

В роботі [12] автори розробили «критичний час пожежі» та обґрунтували інженерний спосіб розрахунку часу евакуації людей до моменту впливу небезпечних чинників пожежі, таких як полум'я та іскри, знижена концентрація кисню, токсичність продуктів горіння та термічного розкладання, дим, підвищена температура у приміщенні лакової та фарбувальної дільниці. Свої розрахунки вони підтвердили математичним моделюванням із застосуванням FDS. В інженерному розрахунку «критичного часу пожежі» автори не врахували час утворення критичних значень інших небезпечних чинників пожежі, таких як CO, CO₂, видимість, які можуть вплинути на безпечну евакуацію людей.

Автори [13] дослідили температурні характеристики пожежі у підвальному приміщенні житлового будинку та вплив дрібнорозпиленої води на їх граничні значення. Дослідженням було встановлено, що у підвальному приміщенні при вільному розвитку пожежі через 7 хв. досягається максимальна температура, яка становить 600–800 °С. Значення температури, яка небезпечна для людини, настає через близько 30 с. Застосування дрібнорозпиленої води дає можливість зменшити максимальну температуру в приміщенні об'ємом 12 м³ на 300–350 °С впродовж 2–3 хвилин. Повторна подача дрібнорозпиленої води впродовж 2 хвилин дала змогу знизити температуру до 100 °С. Автори у своїй роботі передбачають утворення дрібнорозпиленої води за допомогою ствола-пробійника і пропонують його застосовувати для ліквідації пожежі оперативно-рятувальними підрозділами. Однак, автори не дослідили вплив дрібнорозпиленої води на збільшення параметру видимості та застосування вказаної води з використанням стаціонарного обладнання для забезпечення безпеки евакуування людей з першого та вищих поверхів житлової будівлі.

У роботі [14] розглянуто вплив природної вентиляції на поширення диму, показана її роль у формуванні умов для евакуації людей при пожежі. Для досягнення поставленої мети автори проаналізували масив даних, отриманих за результатами 140 числових симуляцій у PyroSim (FDS), які враховували різні сценарії виникнення пожеж у житлових приміщеннях із змінними площами відкритих дверей (0–2 м²) і вікон (0–2,5 м²), відстані від осередку до евакуаційного виходу та форму поширення вогню (90, 180, 360°). Автори встановили, що відстань до евакуаційного виходу є вирішальним параметром блокування евакуаційних

виходів, тоді як форма пожежі та вентиляція мають менший, але також значний вплив. У своїх дослідженнях автори не врахували вплив повітрообміну в результаті природної вентиляції через віконні отвори при стандартних (фіксованих) положеннях стулки металопластикового вікна, а також не визначили значення небезпечних чинників пожежі – температури, CO, CO₂.

Мета. Проведення аналізу динаміки зміни параметрів небезпечних чинників пожежі, що утворюються в квартирі житлового будинку з змінними параметрами обміну повітряних мас пов'язаних з різним положенням стулки вікна та часу настання їх критичних значень, що впливає на безпеку евакуації людей.

Виклад основного матеріалу. З метою проведення чисельного моделювання розповсюдження небезпечних чинників, які можуть вплинути на безпеку евакуування мешканців житлового будинку, за допомогою програмного забезпечення Fire Dynamics Simulator (FDS), було обрано введений в експлуатацію висотний житловий будинок розташований у м. Львів (рис. 1), як об'єкт для подальших досліджень.



Рис. 1. Загальний вигляд житлового будинку у м. Львові

Житлова будівля має 22 поверхи та підземний паркінг. Перший і другий поверхи займають приміщення загального користування. З третього до останнього поверху розташовуються житлові квартири з висотою до стелі 2,7 м. Огороджувальні конструкції стін і перегородок виконані

у відповідності до [15]. Світлопрозорі огорожувальні конструкції виконані з одинарного склопакета у п'ятикамерному профілі. У кімнатах, в кухні, на балконі та у передпокоях, розміщено давачі небезпечних чинників пожежі, а саме монооксида вуглецю, двооксида вуглецю, температури і видимості. Вказані давачі згруповані в блоки давачів (БД) (розміщені один біля одного – «в одній точці площі приміщення») на розташовані на висотах 0,4 м і 1,7 м від підлоги. Висоти розміщення БД відповідають зросту дитини і дорослої людини відповідно до [10].

Планування приміщень житлової квартири, місця розміщення давачів, за допомогою яких визначаються значення параметрів небезпечних чинників пожежі під час чисельного моделювання і осередок пожежі, показано на рис. 2.

Моделювання розвитку пожежі, а також утворення і розповсюдження небезпечних чинників пожежі в FDS проводилось при наступних початкових умовах. Пожежа виникає в приміщенні кухні розмірами в плані 4 × 2,5 м, матеріал стін: цегла, перекриття залізобетон, вікна металопластикові. Джерело вогню – квадратна плита 0.5 × 0.5 м, потужністю 200 кВт, що відповідає горінню меблів та паперу, температура в приміщеннях квартири 20 °С, відносна вологість 40 %, атмосферний тиск 101 325 Па. Тривалість моделювання розвитку пожежі становить 180 секунд,

що відповідає першому етапу розвитку пожежі (1–3 хв).

Через приміщення передпокою проходить шлях евакуації людей з кімнат за межі квартири. Тому утворення критичних значень небезпечних чинників пожежі в цьому приміщенні може обмежити можливість евакуації з квартири.

Під час моделювання розглядалось три сценарії умов утворення і розповсюдження небезпечних чинників пожежі. Перший сценарій передбачав повністю зачинені всі вікна в квартирі при всіх відчинених міжкімнатних дверях. Другий сценарій передбачав відчинене вікно в приміщенні кухні в положенні провітрювання, при якому стулка вікна відхилена на кут 8 °С при всіх відчинених міжкімнатних дверях. Третій сценарій передбачав повністю відчинену стулку вікна в приміщенні кухні при всіх відчинених міжкімнатних дверях. Криві залежностей змін значень небезпечних чинників пожежі апроксимовані 20-ти кратним лінійним фільтром.

На (рис. 3) показана залежність тепловиділення (HRR) від тривалості пожежі при різних положеннях ступок вікна.

Аналіз отриманих результатів показує, що після короткочасної початкової фази розвитку пожежі тепловиділення різко зростає і впродовж перших секунд досягає квазістаціонарного рівня. У подальшому для всіх розглянутих вентиляційних



Рис. 2. План житлової квартири та місця розміщення блоків давачів

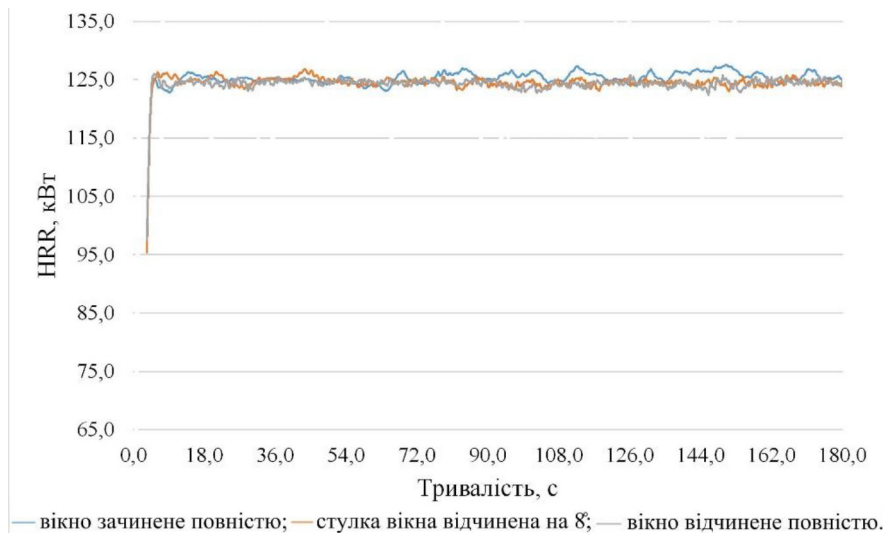


Рис. 3. Залежність тепловиділення (HRR) від тривалості пожежі при різних положеннях ступок вікна

сценаріїв значення тепловиділення HRR залишаються практично сталими та коливаються в межах близько 120–130 кВт. Відмінності між сценаріями вентиляції є незначними і проявляються лише у вигляді малих флуктуацій навколо середнього значення HRR, що свідчить про обмежений вплив вентиляційних умов на інтенсивність тепловиділення за заданого сценарію пожежного навантаження. Це вказує на те, що в даному випадку розвиток пожежі відбувається в режимі, близькому до керованого паливом, а не вентиляцією.

При близьких значеннях тепловиділення для усіх трьох сценаріїв, значення небезпечних чинників пожежі за умови різних сценаріїв відрізнялись один від одного.

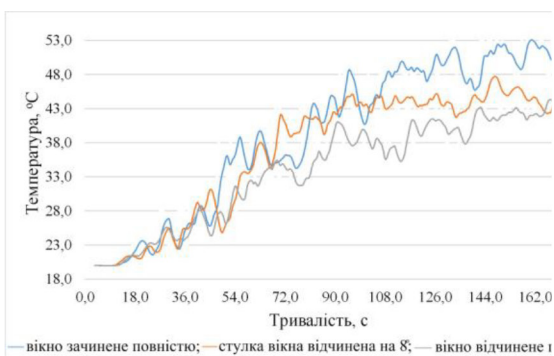
Аналіз графіків (рис. 4) показує, що при моделюванні за першим сценарієм спостерігається найбільш інтенсивне зростання температури та досягнення граничного значення 60 °С [10]. Зокрема, на висоті 0,4 м від підлоги максимальна температура у 54 °С досягається через 145 с, а на висоті 1,7 м граничне значення температури

настає вже через 124 с, що пов'язано з обмеженим тепло- та газообміном і накопиченням тепла в приміщенні.

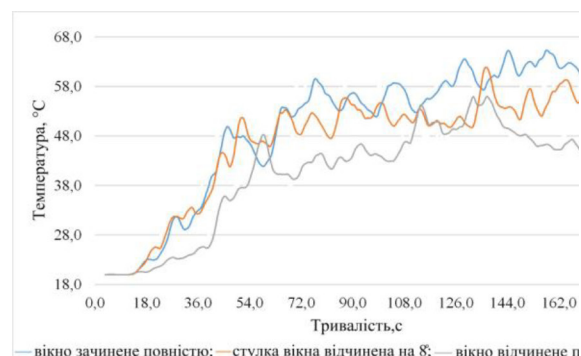
У разі моделювання за другим сценарієм розвитку пожежі крива залежностей має більш згладжений характер. Це говорить про те, що температура зростає повільніше, а її пікові значення є нижчими, що свідчить про часткове відведення тепла завдяки вентиляції, а саме максимальне значення температури у 46 °С досягається на 137 с на висоті 0,4 м від підлоги, а на висоті 1,7 м граничне значення температури настає вже на 133 с.

За умов повністю відчиненого вікна (третій сценарій) фіксуються найнижчі температурні значення протягом усього періоду спостережень, що пояснюється інтенсивним припливом свіжого повітря та ефективним відведенням тепла з приміщення – температура 44°С досягається на 139 с на висоті 0,4 м від підлоги і 57 °С – на 135 с на висоті 1,7 м від підлоги.

Таким чином, результати моделювання показують, що на початковому етапі розвитку пожежі



а)



б)

Рис. 4. Залежність зміни температури в передпокої 1 від тривалості пожежі на різних висотах: а – 0,4 м від підлоги, б – 1,7 м від підлоги

(до 30–40 с) зростання температури повітря спостерігається для всіх сценаріїв, а можливість досягнення критичних значень температури настає тільки на висоті 1,7 м при повністю закритих вікнах в квартирі та відкритій на 8° стулці вікна на кухні. Обмін повітряних мас між приміщеннями житлової квартири та зовнішнім середовищем суттєво впливає на безпеку евакуування людей з приміщень квартири.

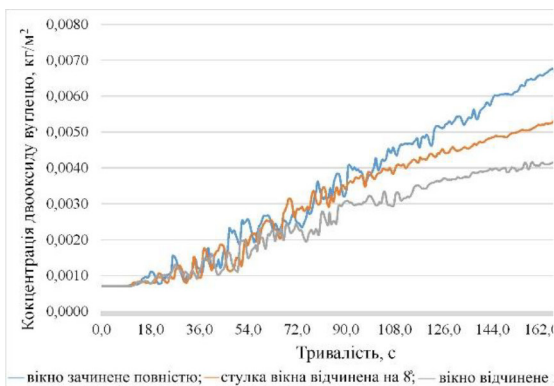
Аналізуючи залежність зміни концентрації двооксиду вуглецю, яка утворюється на висоті 0,4 м, за контрольований час (рисунок 5 (а)), можна зробити висновок, що за різних сценаріїв розвитку пожежі відбувається монотонне зростання концентрації CO₂, що обумовлено перебігом процесів горіння. Максимальні значення концентрації двооксиду вуглецю протягом усього періоду експерименту властиві сценарію із закритим вікном.

На рисунку 5 (б), показана залежність зміни концентрації двооксиду вуглецю на висоті 1,7 м від часу розвитку пожежі. Динаміка збільшення концентрації CO₂ на вказаній висоті відповідає динаміці збільшення концентрації на висоті 0,4 м. Концентрація CO₂ на висоті 1,7 м збільшилась незначно.

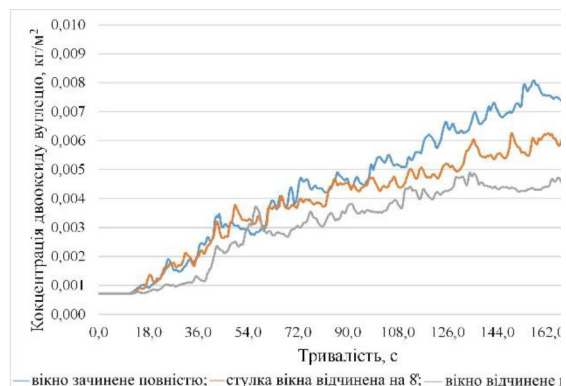
Отримані результати зміни концентрації CO₂ підтверджують, що ступінь відкриття віконного прорізу істотно впливає на динаміку утворення двооксиду вуглецю під час пожежі, але за контрольований час значення концентрації CO₂ не досягло критичної величини. Таким чином, можна зробити висновок, що CO₂ не створить суттєвих перешкод для проведення евакуації людей.

Аналіз результатів моделювання утворення монооксиду вуглецю при розвитку пожежі за трьома сценаріями показує поступове зростання концентрації CO впродовж усього періоду спостереження для всіх сценаріїв і на всіх контрольованих висотах (рис. 6). Найвищі значення концентрації фіксуються за умов зачиненого вікна, що зумовлено обмеженим повітрообміном і накопиченням продуктів неповного згорання. Найінтенсивніше зростання концентрації CO реєструється у зоні дихання на висоті 1,7 м від підлоги (рис. 6, б), що пояснюється тими ж чинниками.

Як показано, за час спостереження концентрація монооксиду вуглецю (CO) на контрольованих висотах не досягла граничного значення ($1,16 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ [10]). Однак, отримані результати

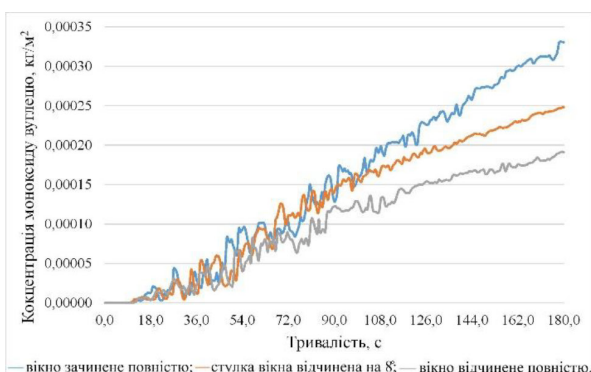


а)

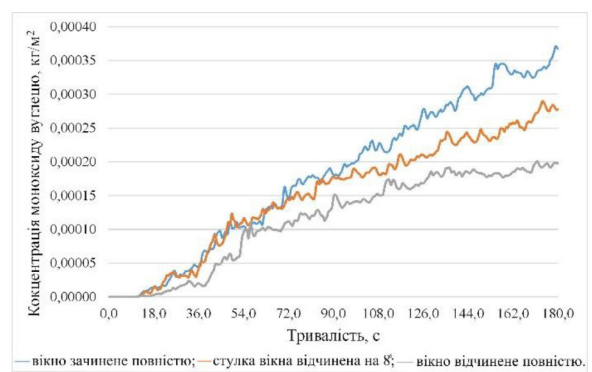


б)

Рис. 5. Залежність зміни концентрації двооксиду вуглецю в передпокої 1 від тривалості пожежі на різних висотах: а – 0,4 м від підлоги, б – 1,7 м від підлоги

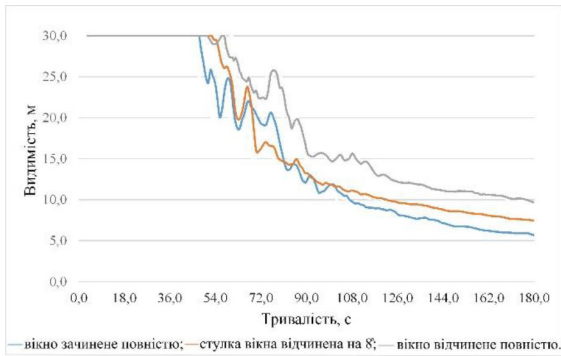


а)

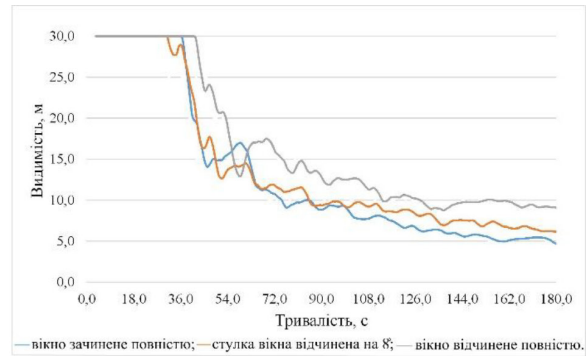


б)

Рис. 6. Залежність зміни концентрації монооксиду вуглецю в передпокої 1 від тривалості пожежі на різних висотах: а – 0,4 м від підлоги, б – 1,7 м від підлоги



а)



б)

Рис. 7. Залежність зміни видимості в передпокої 1 від тривалості пожежі на різних висотах: а – 0,4 м від підлоги, б – 1,7 м від підлоги

підтверджують, що ступінь відчинення віконного прорізу має істотний вплив на рівень концентрації монооксиду вуглецю у зоні дихання, при цьому повністю відчинене вікно є найбільш ефективним з точки зору зниження токсичного впливу під час пожежі. Це має принципове значення для оцінювання небезпеки для людей під час пожежі та умов евакуації.

На рисунку 7 наведено зміну видимості за контрольований час розвитку пожежі.

Аналізуючи інтенсивність зменшення видимості у передпокої 1 можна зробити висновок, що на характер зміни вказаного параметру суттєво не впливають ні висота, ні повітрообмін.

Але цього не можна сказати про значення видимості, які сягають критичних величин (7 м [10]). Як показано на рисунку 7 (а), критичне значення видимості настає тільки у першому сценарії (всі вікна закриті) на 142 с. Із аналізу залежностей показаних на рисунку 7 (б) випливає, що на висоті 1,7 м критичне значення видимості настає вже у двох сценаріях – на 118 с у першому сценарії та 133 с у другому сценарії.

Найбільш безпечним сценарієм, з точки зору параметру видимості є третій сценарій (студка вікна в кухні повністю відкрита). За цього

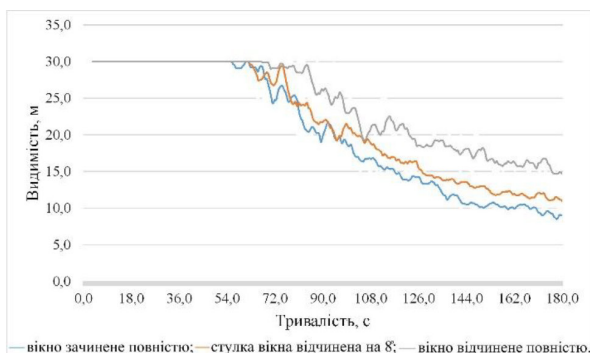
сценарію критичне значення видимості не настає на жодній контрольованій висоті.

Отримані результати підтверджують істотний вплив ступеня відчинення віконного прорізу на динаміку погіршення видимості під час пожежі та свідчать, що інтенсивний повітрообмін забезпечує найбільш сприятливі умови для збереження орієнтації та безпечної евакуації людей.

Порівнюючи утворення граничних значень небезпечних чинників пожежі, можна зробити висновок, що найбільш несприятливий сценарій для проведення евакуації людей з квартири є перший сценарій коли усі вікна в квартирі закриті, тобто обміну повітря між об'ємом квартири і зовнішнім середовищем не відбувається. Найбільш вираженими небезпечними чинниками пожежі, значення яких набувають граничних значень є видимість і температура. Окрім того в переважній більшості граничні значення реєструються на висоті 1,7 м від підлоги.

Враховуючи вищевказане, в інших приміщеннях квартири, які розташовані на більшій відстані від осередку пожежі ніж передпокій 1, визначались значення тільки температури і видимості на висоті 1,7 м.

Зміна видимості і температури у приміщенні передпокою 2 показані на (рис. 8).



а)



б)

Рис. 8. Залежність зміни небезпечних чинників пожежі (а – видимості, б – температури) в передпокої 2 від тривалості пожежі

На рисунку наведено результати моделювання зміни видимості в коридорі квартири на висоті 1,7 м залежно від часу розвитку пожежі на кухні за трьох режимів вентиляції: повністю зачинене вікно, часткове відкривання стулки (8°) та повністю відчинене вікно. Оскільки, коридор є транзитною зоною між осередком пожежі (кухнею) та іншими приміщеннями, динаміка його задимлення є критичною для забезпечення безпечної евакуації.

На рисунку 8 (а) наведено залежності зміни видимості в передпокої 2 на висоті 1,7 м. Аналізуючи залежності було встановлено, що для сценарію 3 спостерігається найменша інтенсивність зниження видимості. Наприкінці контрольованого періоду часу її значення знаходиться в межах 15–18 м.

Моделювання за умов сценарію 2 погіршення видимості починається раніше – приблизно на 65–70 с. На 180-й секунді її значення становить близько 11–12 м.

Найменше значення видимості настає за умов сценарію 1. Вже після 55-ї секунди розпочинається стрімке падіння видимості. Наприкінці розрахункового інтервалу видимість досягає мінімального значення – близько 8,5–9,0 м, але враховуючи, що граничне значення видимості для передпокою 2 становить 3 м, відповідно до вимог [10], можна зробити висновок, що граничне значення видимості на висоті 1,7 м не настане за будь-яких сценаріїв.

На рисунку 8 (б) наведено зміну температури в передпокої 2 на висоті 1,7 м при повністю зачиненому вікні, частковому відкриванні стулки (8°) та повністю відчиненому вікні. Для сценарію 3 характерне повільне збільшення температури. Після 18-ї секунди спостерігається поступове підвищення показників, які наприкінці періоду моделювання (180 с) стабілізуються на рівні 32–34 $^\circ\text{C}$.

За умов сценарію 2 динаміка прогріву є вищою. Температура починає активно зростати

після 15-ї секунди і наприкінці розрахункового інтервалу досягає значень 37–38 $^\circ\text{C}$. Як і для параметру видимості, найбільш несприятливий сценарій спостерігається у випадку № 1. Відсутність шляхів відведення тепла спричиняє швидку термічну деградацію середовища. Вже на 145-й секунді зафіксовано найвищі значення температури близько 41–42 $^\circ\text{C}$, а наприкінці дослідження показник коливається в межах 40–42,5 $^\circ\text{C}$.

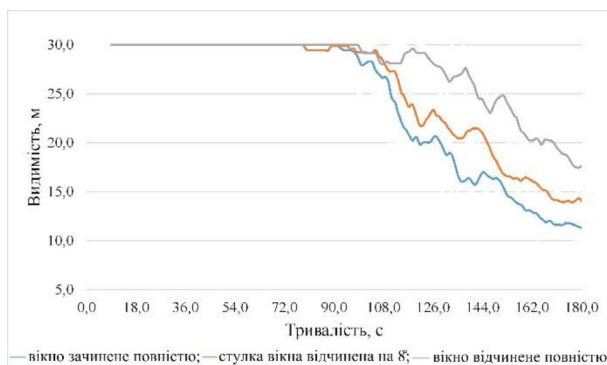
Отримані результати демонструють, що в передпокої 2, як у транзитній зоні, видимість і температурний режим критично залежить від умов вентиляції приміщення, в якому знаходиться осередок пожежі. Це підкреслює визначальну роль повітрообміну у сповільненні темпів досягнення критичних параметрів середовища на шляхах евакуації.

Динаміка зміни видимості у кімнаті 1 за різних сценаріїв представлена на рисунку 9.

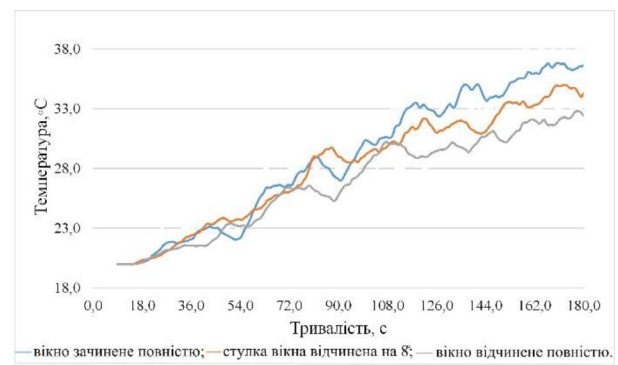
У початковий проміжок часу значення показника для всіх трьох сценаріїв залишаються практично сталими та близькими між собою, що свідчить про відсутність суттєвого впливу повітрообміну на початковому етапі моделювання. Після приблизно 90 с спостерігається значне зниження видимості, інтенсивність якої залежить від ступеня відчиненої стулки вікна. Найшвидше зменшення значень видимості зафіксовано для сценарію 1, тоді як за сценарію 3 спостерігається найповільніша зміна видимості та збереження вищих значень протягом усього часу моделювання.

На рисунку 9 (б) наведено часову залежність температури повітря, виміряної у кімнаті 1. Як і у випадку видимості на початковій стадії розвитку пожежі, до приблизно 25 с значення зміни температури для всіх сценаріїв є близькими. Із збільшенням тривалості горіння спостерігається стале зростання температури повітря.

Найвищі значення температури протягом усього періоду спостережень зафіксовано

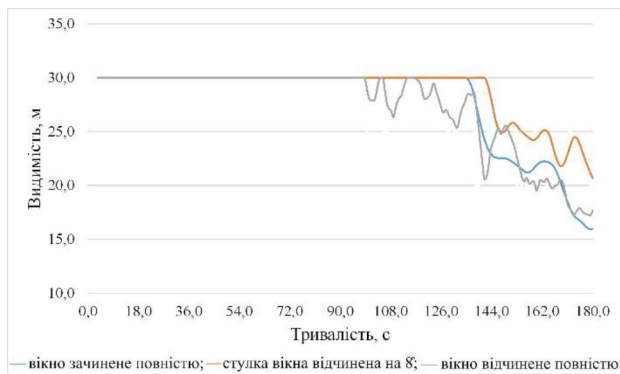


а)

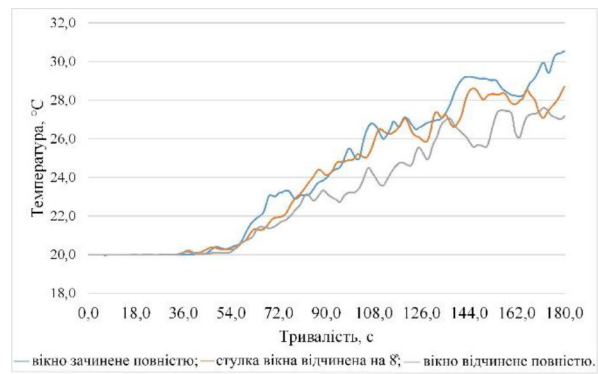


б)

Рис. 9. Залежність зміни небезпечних чинників пожежі (а – видимості, б – температури) в кімнаті 1 на висоті 1,7 м від тривалості пожежі



а)



б)

Рис. 10. Залежність зміни небезпечних чинників пожежі (а – видимості, б – температури) в кімнаті 2 на висоті 1,7 м від тривалості пожежі

у сценарії 1. Найнижчі температурні значення спостерігаються у випадку сценарію 3.

Значення видимості і температури протягом усього контрольованого часу знаходяться у допустимих межах.

На рисунку 10 (а) змодельована залежність зміни видимості в приміщенні 2 на висоті 1,7 м за умов різних сценаріїв.

Якщо у квартирі усі вікна закриті, що відповідає сценарію 1, значення видимості протягом тривалого періоду моделювання (130 с) залишалися практично незмінними і тільки після завершення цього періоду зменшуються до 16 м в кінці контрольованого періоду часу. Це свідчить про відсутність суттєвого проникнення продуктів горіння до вказаної кімнати та обмежений масообмін між приміщеннями. Аналогічна картина спостерігається у випадку часткового відкривання вікна на 8°. Незначний приплив повітря не призводить до інтенсифікації горіння настільки, щоб спричинити помітне поширення диму в суміжне приміщення, але параметр видимості в кінці контрольованого періоду часу має більше значення – 20 м.

Принципово інша динаміка зафіксована при повністю відчиненому вікні. До приблизно до 90 с розвитку пожежі видимість у спальні залишалася на рівні, близькому до початкового. Після цього відбувається плавне зниження показника – до 18 м із помітним коливаннями. Така поведінка пояснюється переходом пожежі в більш інтенсивну фазу внаслідок покращення умов аерації, що сприяє збільшенню тепловиділення та формуванню стійких конвективних потоків, які транспортують продукти горіння до спальні. Наявність коливань кривої свідчить про нестационарний характер процесів димоутворення та перерозподілу повітряних мас.

Отримані результати демонструють визначальну роль вентиляційного режиму у формуванні умов задимлення суміжних приміщень.

Повне відкривання вікна в зоні пожежі суттєво підсилює димоперенесення, тоді як обмежена або відсутня аерація сприяє локалізації продуктів горіння в межах приміщення осередку пожежі на початковому етапі її розвитку.

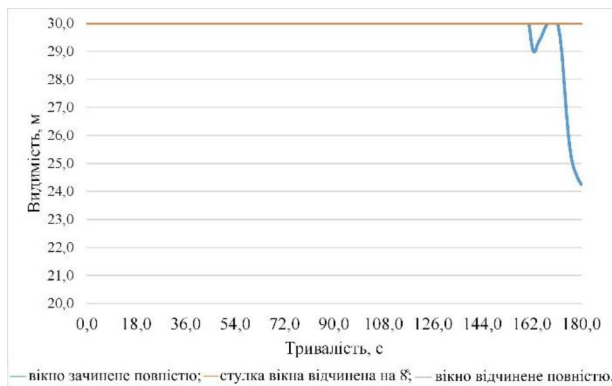
На рисунку 10 (б) представлено зміну температури повітря у кімнаті 2 на висоті 1,7 м.

За умов сценарію 1 температура у вказаній кімнаті протягом перших 36 с практично не відрізняється від початкового значення (20 °C). Надалі спостерігається поступове зростання температури з досягненням наприкінці розрахункового періоду значень близько 31 °C. Плавний характер кривої свідчить про обмежений теплообмін між приміщеннями та стриманий розвиток пожежі внаслідок дефіциту окисника.

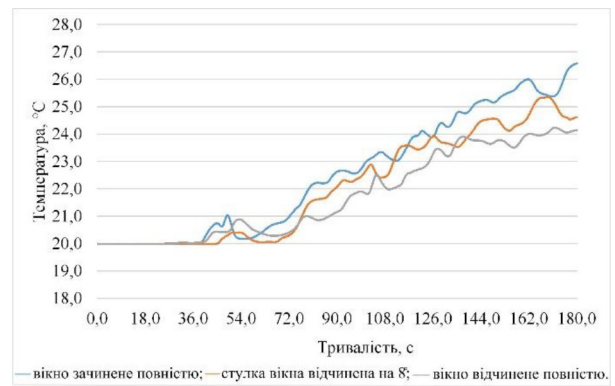
У випадку часткового відкривання (сценарій 2) температурна динаміка має подібний характер, однак максимальні значення є дещо нижчими та становлять близько 29 °C. Незначний приплив повітря не призводить до істотної інтенсифікації горіння, а формування конвективних потоків, здатних переносити нагріті продукти горіння до спальні, залишається обмеженим.

Інша картина спостерігається за умови повністю відчиненого вікна (сценарій 3). Починаючи з того ж часу що і в попередніх сценаріях розвитку пожежі, фіксується більш інтенсивне зростання температури у кімнаті 2 з періодичними коливаннями, що свідчить про нестационарний характер процесів тепло- та масообміну. Наприкінці досліджуваного інтервалу температура досягає 31 °C. Така динаміка пояснюється покращенням умов аерації осередку пожежі, що сприяє збільшенню тепловиділення та формуванню стійких конвективних потоків, які транспортують нагріті гази в суміжні приміщення.

Хоча параметри небезпечних чинників пожежі не досягають граничних значень, отримані результати підтверджують, що вентиляційний режим



а)



б)

Рис. 11. Залежність зміни небезпечних чинників пожежі (а – видимості, б – температури) в кімнаті 3 на висоті 1,7 м від тривалості пожежі

є визначальним чинником формування температурного поля в приміщеннях, суміжних із осередком пожежі. Повне відкриття вікна істотно підсилює тепловий вплив на спальню, тоді як обмежена або відсутня аерація сприяє локалізації теплового навантаження в межах приміщення загоряння на початковій стадії розвитку пожежі.

На рисунку 11 (а) наведено залежності зміни видимості у кімнаті 3 на висоті 1,7 м за умов різного положення ступки вікна приміщення кухні, що відповідає різним сценаріям моделювання розвитку пожежі і розповсюдження небезпечних чинників пожежі.

За умов сценарію 2 і 3 видимість протягом усього періоду моделювання залишається сталою на рівні близько 30 м. Це свідчить про відсутність суттєвого надходження продуктів горіння до дитячої кімнати та стабільний аеродинамічний режим, за якого поширення диму в суміжні приміщення є мінімальним. Така поведінка може бути зумовлена формуванням переважаючого напрямку конвективних потоків, що забезпечують переміщення продуктів горіння через проріз кухонного вікна без їх інтенсивного проникнення до кімнати 3.

Інша динаміка спостерігається у випадку сценарію 1. Приблизно до 155–160 с видимість залишається стабільною (≈ 30 м), після чого відбувається її різке зниження до 24–25 м наприкінці досліджуваного періоду. Така затримка в часі свідчить про поступове накопичення продуктів горіння у квартирі в умовах обмеженої вентиляції та їх подальше перетікання до суміжних приміщень після досягнення певного критичного значення об'єму димових газів у проміжному приміщенні (передpokій 2).

Аналізуючи отримані залежності можна зробити висновок, що характер задимлення суміжних приміщень визначається не лише інтенсивністю горіння, а й конфігурацією повітрообміну

та просторовим розташуванням кімнат відносно осередку пожежі.

На рисунку 11 (б) зображено результати моделювання залежності температурного режиму в кімнаті 3 на висоті 1,7 м.

Для сценарію 3 зафіксовані показники із найменшими змінами за час спостереження. Після 36-ї секунди спостерігається плавне зростання температури, яка наприкінці розрахункового періоду сягає близько 24 °C. Така динаміка зумовлена інтенсивним масообміном повітря із зовнішнім середовищем, що забезпечує ефективне відведення надлишкового тепла та приплив холодного повітря, обмежуючи прогрів приміщення.

За умов часткового відкриття вікна під кутом 8° (сценарій 2) характер зміни температури є подібним, проте значення температури отримані за час спостереження є вищим і становить приблизно 25,5 °C. Обмежена аерація дещо стримує тепловий вплив порівняно з герметичним приміщенням, але не забезпечує достатнього охолодження конвективних потоків, що надходять з осередку пожежі.

Найбільше збільшення температури спостерігається у випадку сценарію 1. Відсутність вентиляції призводить до інтенсивного акумулювання теплової енергії у внутрішньому об'ємі квартири. Після початкової затримки (до 36 с) температура стрімко зростає, досягаючи свого максимального значення у 26,5 °C на 180-й секунді. Це свідчить про швидке прогрівання повітряного шару простору кімнати 3 під стелею та їх подальше і поступове підвищення температури на контрольованій висоті.

Аналізуючи результати моделювання можна зробити висновок, що незважаючи на те, що в жодному сценарії досягнення граничних значень видимості і температури не відбулось, величина відкритого віконного прорізу у приміщенні, у якому виникла пожежа, безпосередньо визначає

Зведені дані про настання граничних значень небезпечних чинників пожежі

Небезпечний чинник пожежі	Висота, м	Сценарій 1					Сценарій 2					Сценарій 3				
		Передпокії 1	Передпокії 2	Кімната 1	Кімната 2	Кімната 3	Передпокії 1	Передпокії 2	Кімната 1	Кімната 2	Кімната 3	Передпокії 1	Передпокії 2	Кімната 1	Кімната 2	Кімната 3
Видимість	0,4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	1,7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Температура	0,4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	1,7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CO	0,4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	1,7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CO ₂	0,4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	1,7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

швидкість досягнення граничних значень видимості і температури суміжних приміщеннях.

Зведені дані про настанні граничних значень небезпечних чинників пожежі наведено у таблиці 1 (настання граничного значення виділено червоним, ненастання – зеленим).

Висновки. Комп'ютерне чисельне моделювання різних сценаріїв розвитку пожеж у приміщеннях житлової квартири за допомогою програмного комплексу (FDS) PyroSim дало можливість проаналізувати розповсюдження продуктів горіння і утворення граничних значень небезпечних чинників пожежі та показати їх вплив на безпеку евакуації людей.

Аналіз моделювання показав, що визначальними чинниками пожежі, які можуть вплинути на безпеку евакуування людей є видимість і температура. При пожежі в приміщенні кухні, видимість та температура досягає граничних значень тільки у приміщенні передпокою 1. При зачиненому вікні в кухні граничне значення видимості на висоті 1,7 м настає на 118 с, а на висоті 0,4 м на 142 с. Граничне значення температури на висоті 1,7 м настає на 124 с. При відчиненій стулці вікна на 8° в приміщення кухні граничні значення видимості та температури на висоті 1,7 м настає на 133 с. При повністю відчиненому вікні в кухні граничне значення видимості та температури не настає на жодній контрольованій висоті. Граничні значення концентрації CO і CO₂ не настають у всіх приміщеннях за будь яких умов, крім кухні.

Аналізуючи динаміку зміни значень небезпечних чинників пожежі, враховуючи різні умови розвитку пожежі, пов'язані з різним положення стулки вікна приміщення кухні, можна зробити висновок, що отримані результати підтверджують суттєвий вплив вентиляції на температурний режим у зоні дихання людини під час пожежі

в житловому приміщенні та мають важливе значення для оцінювання умов евакуації і рівня пожежної безпеки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Інформаційно-аналітична довідка про надзвичайні ситуації в Україні, що сталися упродовж 2025 року. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/4/5/2/2/7/12-2026.pdf>.

2. Вовк С. Я., Шаповалов О. В., Кушнір А. П., Ференц Н. О. Аналіз шляхів забезпечення протипожежного захисту висотних будівель. *Пожежна безпека*. 2025. № 46. С. 30–44. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.03>

3. Ємельяненко С. О., Харчук А. І., Міллер О. В., & Мартин О. М. Аналіз пожежних ризиків висотних та багатоповерхових житлових будинків м. Львова. *Пожежна безпека*. 2015. № 27. С. 57–63. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/249>.

4. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Яковчук Р. С., Некора О. В., Сідей С. О. Математична модель розвитку пожежі у триповерховій будівлі при проведеному у ній повномасштабних вогневих випробувань. *Пожежна безпека*. 2020. № 36. С. 121–130. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/6941>

5. Yakovchuk R., Kuzyk A., Skorobagatko T., Yemelyanenko S., Borys O., Dobrostan O. Computer simulation of fire test parameters façade heat insulating system for fire spread in fire dynamics simulator (FDS). *News of the national academy of sciences of the republic of kazakhstan series of geology and technical sciences*: 2020. P. 35–44. DOI:10.32014/2020.2518-170X.82

6. Yakovchuk R., Kuzyk A., Kagitin O., Ivanusa A., Yemelyanenko S. FDS simulation of fire spreading on facade heat insulating system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Conference on Sustainable Future and Environmental Science*. 2020. 16–18 October 2020, Bucharest, Romania. pp. 1–13. DOI: 10.1088/1755-1315/635/1/012009

7. Karunaratne T. L. W., Chow C. L. Upward fire spread hazard of vertical greenery systems: A comparative study with external thermal insulation composite system and double-skin façade. *Fire*. 2023. 6(5), 200. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6050200>

8. Enaru I., Chereches N. C., Hudişteanu S. V., Turcanu E. F., Ancas A. D., Verdeş M., Ciocan V. Numerical simulation evaluation of fire spreading in a building using fire dynamics simulator (FDS). *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2023. 13(1). P. 65–72. DOI: 10.2478/jaes-2023-0009

9. Vovk S., Kopchak B., Kushnir A., Shapovalov O., Ferents N. (2025). Research into the dynamics of fire development and the efficiency of the fire alarm system in a high-rise building. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*. 2025. 79 (5–6), P. 289–301. DOI: 10.2478/prolas-2025-0024

10. Пожежна безпека. Загальні положення: ДСТУ 8828:2019 [Чинний від 2020–01–01]. *Держстандарт України*, 2019. 84 с.

11. Ференц Н. О., Вовк С. Я., Керод І., Артеменко Б. Дослідження можливості евакуації з виробничого цеху паперової фабрики. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія «Архітектура та будівництво»*. 2024. (23). С. 76–83. DOI: 10.31734/architecture2022.23.076.

12. Hulida E., Pasnak I., Koval O., Tryhuba A. Determination of the critical time of fire in the building and ensure successful evacuation of people. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019. 63(1). С. 308–316. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPci.12760>

13. Лазаренко О. В., Сукач Р. Ю., Великий Я. Б., Бойчук Б. Я. Оцінка ефективності застосування дрібнорозпиленних струменів води під час гасіння пожеж у підвальних приміщеннях. *Пожежна безпека*. 2025. № 46. С. 72–77. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.07>

14. Хлевной О. В., Вовк С. Я., Жезло-Хлевна Н. В., Харишин Д. В. Вплив природної вентиляції на блокування за втрати видимості евакуаційних виходів на початковій стадії розвитку пожежі. *Пожежна безпека* 2025. № 47. С. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.12>

15. Висотні будівлі. Основні положення: ДБН В.2.2-41:2019 [Чинний від 2020–01–01]. *Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України* 2019. 47с.

REFERENCES

1. Informatsiino-analitychna dovidka pro nadzvychaini sytuatsii v Ukraini, shcho stalysia uprodovzh 2025 roku. [Information and analytical report on emergencies in Ukraine that occurred during 2025]. Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/4/5/2/2/7/12-2026.pdf>. [in Ukrainian].

2. Vovk S. Y., Shapovalov O. V., Kushnir A. P. & Ferents N. O. (2025). Analiz shliakhiv zabezpechennia

protypozhezhnoho zakhystu vysotnykh budivel. [Analysis of methods for ensuring fire protection of high-rise buildings]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 46, 30–44. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.03>

3. Yemelyanenko S. O., Kharchuk A. I., Miller O. V. & Martyn O. M. (2015). Analiz pozhezhnykh ryzykiv vysotnykh ta bahatopoverkhovykh zhytlovykh budynkiv m. Lvova. [Analysis of fire risks in high-rise and multi-storey residential buildings in Lviv]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 27, 57–63. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/249>. [in Ukrainian].

4. Shnal T. M., Pozdieiev S. V., Yakovchuk R. S., Nekora O. V., & Sidei S. O. (2020). Matematychna model rozvytku pozhezhi u trypoverkhovii budivli pry provedenni u nii povnomasshtabnykh vohnevykh vyprobuvan. [Mathematical model of fire development in a three-story building during full-scale fire testing]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 36, 121–130. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/6941>. [in Ukrainian].

5. Yakovchuk R., Kuzyk A., Skorobagatko T., Yemelyanenko S., Borys O. & Dobrostan, O. (2020). Computer simulation of fire test parameters façade heat insulating system for fire spread in fire dynamics simulator (FDS). *News of the national academy of sciences of the republic of kazakhstan series of geology and technical sciences*, 2020, 35–44. DOI:10.32014/2020.2518-170X.82

6. Yakovchuk R., Kuzyk A., Kagitin O., Ivanusa A. & Yemelyanenko, S. (2021). FDS simulation of fire spreading on facade heat insulating system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (pp. 1–13). 16–18 October 2020, Bucharest, Romania. DOI:10.1088/1755-1315/635/1/012009

7. Karunaratne T. L. W., & Chow C. L. (2023). Upward fire spread hazard of vertical greenery systems: A comparative study with external thermal insulation composite system and double-skin façade. *Fire*, 6(5), 200. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6050200>

8. Enaru I., Chereches N. C., Hudişteanu S. V., Turcanu E. F. & Ancas A. D., Verdeş M. et al. (2023). Numerical simulation evaluation of fire spreading in a building using fire dynamics simulator (FDS). *Journal of Applied Engineering Sciences*, 13(1), 65–72. DOI: 10.2478/jaes-2023-0009

9. Sergiy V., Kopchak B., Kushnir A., Shapovalov O. & Ferents N. (2025). Research into the dynamics of fire development and the efficiency of the fire alarm system in a high-rise building. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 79 (5–6), 289–301. DOI: 10.2478/prolas-2025-0024

10. Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia DSTU 8828:2019. [Fire Safety. General Provisions: State Standard 8828: 2019]. (2019): from 1th January 2020. Derzhstandart Ukraine [in Ukrainian].

11. Ferents N., Vovk S., Kerod I. & Artemenko B. (2024). Doslidzhennia mozhlyvosti evakuatsii z vyrob-

nychoho tsekhu paperovoi fabryky. [Study of the possibility of evacuation from the production workshop of a paper mill]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ekolohichnoho universytetu. Seriiia "Arkhitektura ta budivnytstvo"* – *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series "Architecture and Construction"*, 23, 76–83. DOI: 10.31734/architecture2022.23.076 [in Ukrainian].

12. Hulida E., Pasnak I., Koval O. & Tryhuba A. (2019). Determination of the critical time of fire in the building and ensure successful evacuation of people. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(1), 308–316. <https://doi.org/10.3311/PPci.12760>

13. Lazarenko, O., Sukach, R., Velykyi, Y. & Boichuk, B. (2025). Otsinka efektyvnosti i zastosuvannya dribnorozpylenykh strumeniv vody pid chas hasinnia pozhezh u pidvalnykh prymishcheniakh. [Assessment of the effectiveness of using finely atomized water jets during fire extinguishing in basement premises].

Pozhezhna bezpeka – Fire safety, 46, 72–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.07> [in Ukrainian].

14. Khlevnoi, O. V., Vovk, S. Y., Zhevlo-Khlevna, N. V. & Kharyshyn, D. V. (2025). Vplyv pryrodnoi ventyliatsii na blokuvannya za vtraty vydy-mosti evakuatsiinykh vykhodiv na pochatkovii stadii rozvytku pozhezhi. [The influence of natural ventilation on the blockage due to loss of visibility of evacuation exits at the initial stage of fire development]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 47, 113–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.12>. [in Ukrainian].

15. Vysotni budivli. Osnovni polozhennia: DBN B.2.2-41:2019. [High-rise buildings. Basic principles-from: building codes B.2.2-41:2019] from 1th January 2020. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. [in Ukrainian].

© О. В. Шаповалов, С. Я. Вовк, А. П. Кушнір, Н. О. Ференц

Науково-методична стаття

Дата першого надходження статті до видання: 04.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026