УДК 614.8

С. А. Виноградов, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-2569-5489)*
С. М. Шахов, *PhD, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0003-3914-2914)*
Д. І. Савельєв, *к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-4310-0437)*
А. С. Мельниченко, *ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-7229-6926)*
О. Г. Поліванов, *викл. каф.(ORCID 0000-0002-6396-1680)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ У FIRE DYNAMICS SIMULATOR

Виявлено особливості методів моделювання швидкості тепловиділення у Fire Dynamic Simulator. Порівняно зміну швидкості тепловиділення у часі в залежності від методу моделювання та практично реалізовано методи на прикладі типового приміщення для виявлення впливу швидкості тепловиділення на розвиток небезпечних чинників пожежі. Під час застосування Fire Dynamic Simulator для дослідження небезпечних чинників у повному обсязі не зрозуміло, яке значення швидкості тепловиділення слід використовувати при вивченні динаміки розвитку пожежі, що впливає на оцінювання отриманих результатів. Виявлення особливостей кожного з методів надасть змогу ефективно застосовувати їх з метою забезпечення рівня пожежної безпеки. В результаті порівняння зміни швидкості тепловиділення у часі в залежності від методу моделювання розроблено класифікацію методів моделювання. Під час практичної реалізації методів на прикладі типового приміщення встановлено, що при застосуванні першого метода моделювання у порівнянні з другим, підвищення температури нарізних інтервалах часу зростає швидше у 1,5–3 рази відповідно. Під час аналізу втрати видимості, встановлено, що при використанні сталої швидкості тепловиділення зниження видимості на різних інтервалах часу досягається швидше, ніж при швидкість тепловиділення, яка змінюється у часі, відповідно у 1,6–3 рази. Під час аналізу зниження концентрації кисню встановлено, що при застосуванні першого методу моделювання, значення концентрації кисню у повітрі знижується у 1,2–1,6 разів швидше на різних інтервалах часу у порівнянні з показниками другого методу. Завдяки виявленим особливостям кожного з методів моделювання розроблені рекомендації щодо їх використання у Fire Dynamic Simulator. Це надає змогу ефективно застосовувати методи та проводити оцінку результатів з прийняттям подальших рішень для забезпечення належного рівня пожежної безпеки.

Ключові слова: дослідження пожеж, пожежна безпека, швидкість тепловиділення, Fire Dynamics Simulator, PyroSim

1. Вступ

Математична модель та розрахунковий код Fire Dynamics Simulator (FDS) розроблені у Національному інституті стандартів та технологій США (NIST). FDS – програмне забезпечення, що вільно розповсюджується і постійно розвивається. FDS широко застосовується як для вирішення практичних завдань (прогноз небезпечних факторів пожежі, планування евакуації, оцінка вогнестійкості конструкцій, визначення безпечних відстаней, розслідування пожеж та ін.), так і в наукових дослідженнях.

Результати польової моделі FDS можуть бути використані для забезпечення пожежної безпеки будівель під час проектування та визначення рівня пожежної безпеки існуючих будівель. Пожежна безпека будівель полягає у виконанні двох умов, що забезпечують безпеку людей та збереження цілісності конструкцій. У першому випадку основний інтерес представляє прогноз часу блокування шляхів евакуації, що визначається досягнення граничних значень небезпечних чинників пожежі. У другому випадку забезпечення цілісності конструкцій передбачає, що несучі конструкції приміщення повинні зберігати свої властивості протягом тривалого часу (до кількох годин) в умовах, характерних для розвиненої повністю пожежі.

При виборі сценарію можливої пожежі важливу роль відіграє визначення параметрів вогнища. Концепція проектної пожежі полягає у тому, що для опису динаміки осередку пожежі використовують наперед задані залежності швидкості тепловиділення у часі. Таким чином, концепція проектної пожежі полягає в апріорному завданні швидкості тепловиділення з пожежного навантаження, яке відбувається в результаті термічного розкладання твердого палива або випаровування паливної рідини. Від швидкості тепловиділення залежить динаміка розвитку небезпечних чинників пожежі та вплив повністю розвиненої пожежі на спроможність несучих конструкцій зберігати свою цілісність.

Таким чином, проблема ефективного використання методів моделювання швидкості тепловиділення при дослідженні розвитку пожеж за допомогою FDS є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [1] проведено аналіз рівня пожежної небезпеки в гуртожитку університету з використанням Pyrosim. Досліджено розвиток небезпечних чинників пожежі при умовах коли всі вікна та двері відчинені, і порівняно їх з умовами, коли кімната, у якій виникла пожежа, мала закриті вікна. Також проведено розрахунок часу евакуації з будівлі гуртожитку, який дорівнює 164,8 с. Надано рекомендації щодо об'ємно-планувальних рішень, а саме, ширина вихідних дверей повинна бути забезпечена не менше 3 м, а ширина сходів – не менше 1,75 м. Але не зрозуміло, як зростала швидкість тепловиділення умовної пожежі, чи змінювалась, або була постійною, що є недоліком при оцінюванні результатів моделювання розвитку небезпечних чинників пожежі і визначення безпечного часу евакуації.

Авторами [2] створена інформаційна модель будівлі корпусу коледжу. Промодельована пожежа, враховує місце розташування джерела вогню, тип зростання вогню та максимальну швидкість тепловиділення за допомогою PyroSim і Pathfinder. Результати моделювання показують, що задимленість на сходах першого і другого поверху досягла критично допустимого значення, на 63 с, і 76 с, відповідно. Незважаючи на відносно велику відстань від пожежі в класі, задимленість сходів другого поверху досягла критичної висоти на 123 с, що заблокувало сходи. Серед чотирьох евакуаційних виходів на 86 с було заблоковано перший вихід. Інші виходи та сходи на першому поверсі були частково блоковані, але все ще забезпечували евакуаційну спроможність. Недоліком є те, що у дослідженні не висвітлено, динаміку розвитку швидкості тепловиділення, що має вплив час блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі.

У роботі [3], як об'єкт взято загальну модель автобуса, а програмне забезпечення Pyrosim використано, як інструмент для реалізації симуляції пожежі. Шляхом досліджень встановлено, що пожежа автобуса має свої особливості, які можуть можна розділити на чотири стадії. Проведено аналіз розповсюдження небезпечних чинників пожежі та теплової потужності. Під час дослідження було встановлено, що застосування програмного забезпечення Pyrosim має певні обмеження в моделюванні симуляції автомобільної пожежі. Але результати дослідження можуть служити довідкою для оцінки автомобільних пожеж за допомогою моделювання. Дослідниками отримано залежність теплової потужності у часі, але не зрозуміло, який метод моделювання швидкості тепловиділення обраний при симуляції. Після 200 секунди швидкість тепловиділення стала незмінною, що в свою чергу є недоліком, оскільки впливає на аналіз розповсюдження небезпечних чинників пожежі у моделі.

Авторами [4] досліджено будівлю великого театру, з місткістю понад

© С. А. Виноградов, С. М. Шахов, Д. І. Савельєв, А. С. Мельниченко та ін.

1500 осіб. Побудовано 3D модель театру та використано програмне забезпечення Pyrosim і Pathfinder для моделювання розповсюдження небезпечних чинників пожежі та евакуації персоналу у випадку пожежі в будівлі. Початкові умови моделювання PyroSim обрані наступні: температура повітря 20 °С, відносна вологість 50 %, швидкість вітру 0 м/с, атмосферний тиск 101325 Па. За цієї умови відбувалося моделювання пожежі протягом 600 с. Проаналізовано розвиток концентрації чадного газу, видимість на шляхах та евакуаційних виходах, та температуру у приміщеннях. До недоліків слід віднести, що у роботі не зазначено, яка обрана пожежна навантага, у тому числі швидкість та динаміка зміни тепловиділення, що впливає на розрахунок розвитку небезпечних чинників пожежі.

У роботі [5] змодельоване пожежу на стоянці для легкового транспорту за допомогою PyroSim. Для пожежної навантаги обрано максимальну потужність пожежі 4 МВт, та зміну швидкості прискорення тепловиділення, яка дорівнює 0,044 кВт/с^2. Тип розвитку вогню – швидкий. Оцінювались параметри видимості, концентрації чадного газу, та температури. Визначений доступний час евакуації, який становить 190 с. Але не зрозуміло, з яких міркувань обрано саме цю швидкість тепловиділення, коли вона досягає пікового значення, чи залишається вона сталою, чи починає знижуватися. Це в свою чергу впливає на результати зниження видимості, концентрації кисню та інших небезпечних чинників пожежі. Це є недоліком для оцінки результатів моделювання та прийняття відповідних заходів для підвищення пожежної безпеки.

У роботі [6] побудовано модель розповсюдження пожежі на лісових дорогах за допомогою програмного забезпечення динамічного розвитку пожежі PyroSim. Параметри дослідження враховували схили доріг 25 °, 35 ° та 45 °, швидкість вітру 1, 2,5 та 4,5 м/с та ширину лісової дороги 2 , 4,5 і 6 м. Як пожежу було обрано стрічку вогню довжиною 12 м і шириною 6 м і тепловиділення 4,6×104 кВт/м^2, що відповідає середньої інтенсивності. Метою дослідження було вивчення вогнеізолюючої здатності різних лісових доріг. Але авторами не зазначено, як саме змінювалась швидкість тепловиділення у часі, від якої залежить температура горіння в різний проміжок часу, тому не можливо остаточно стверджувати про достовірність отриманих результатів.

Авторами [7] проведено порівняння експериментальних результатів горіння пожежної навантаги у вигляді тканої стрічки, та відповідної створеної моделі у Pyrosim. Встановлено, що зі збільшенням часу горіння експериментальної та модельованої ділянок, зростання температури в осередку пожежі припинилося на 12-й хв. від початку займання. Температура становила 720 °С/731 °С, що перевищує цей показник на 2-й хв. на 76,39 %/70,73 % відповідно. Вказано, що параметри горючої речовини, завантажувались із бібліотек PyroSim. Але не зазначено, як змінювалась швидкість тепловиділення у часі при моделювання горіння, яка має влив на температуру, що вимірювалась під час експерименту. Тому не можна у повному обсязі підтвердити достовірність отриманих результатів моделювання.

У роботі [8] виконано математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні в ній повномасштабних пожежних випробувань. Досліджено параметри температурних режимів пожежі в окремих приміщеннях будівлі. Для розрахунку температури у моделях приміщень із пожежею застосовувалася комп'ютерна система Pyrosim. Авторами зазначено швидкість тепловиділення 1907 кВт/м^2, але не зрозуміло, з якої площі пожежі, та як вона змінюється у часі при проведенні експерименту. Отже, не можливо повноцінно стверджувати про достовірність отриманих результатів.

У роботі [9] проведено дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будинків. В якості пожежного навантаження, а саме горючого матеріалу в квартирі обрано займання пінополіуретанового виробу (зазвичай становить 60–70 % складу для м'яких меблів) та шерсті. Пожежа виникає в центрі кімнати та умовно рівновіддалена від усіх стін приміщення, пожежне навантаження якого становить 365 кВт/м^2 із максимальною температурою горіння 1190 °С. Поширенню полум'я по поверхні кімнати відбувається із швидкістю 0,22 м/с. Загальна тривалість розрахунків становила 600 с. Недоліком є знехтування площею пожежі, оскільки від цього залежить значення тепловиділення. Також не висвітлено, до якого часу відбувалося підвищення швидкості тепловиділення, тому оцінювати результати, як близькі до реальних у повному обсязі не можливо.

Авторами [10] досліджено час розвитку небезпечних чинників під час виникнення пожежі у приміщені будівлі за допомогою Pyrosim. Результати моделювання показали, що час блокування шляхів евакуації у бібліотеці складає 280 с, з потужністю пожежі 4 МВт, а в приміщенні читального залу 126 с, при потужності пожежі 8 МВт. Швидкість зростання пожежі встановлено α=0,04689. У дослідженні не висвітлено, яка площа горіння враховувалась, та до якого часу зростала швидкість тепловиділення, і чи вона залишалася сталою після досягнення пікової потужності, чи знижувалась не зрозуміло. Отже оцінювати достовірність результатів, щодо блокування шляхів евакуації у повному обсязі не можливо.

З аналізу досліджень [1–10] встановлено, що у переважній більшості наукових праць не зазначено, яке значення швидкості тепловиділення використовується під час моделювання та яким чином змінюється у часі, чи змінюється взагалі. Це є суттєвим недоліком при дослідженні динаміки розвитку пожежі та оцінюванні отриманих результатів.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є виявлення особливостей методів FDS, що дозволить ефективно досліджувати розвиток пожеж із забезпеченням належного рівня пожежної безпеки будівель.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є виявлення особливостей методів моделювання швидкості тепловиділення у Fire Dynamic Simulator. Це дозволить ефективно застосувати Fire Dynamic Simulator під час проведення дослідження розвитку пожеж та вивчення розвитку небезпечних чинників пожежі для якісного оцінювання рівня пожежної безпеки.

Для досягнення мети були поставленні наступні завдання:

– порівняти зміну швидкості тепловиділення у часі в залежності від методу моделювання;

– практично реалізувати методи моделювання швидкості тепловиділення на прикладі типового приміщення для виявлення впливу швидкості тепловиділення на розвиток небезпечних чинників пожежі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є методи моделювання швидкості тепловиділення та їх вплив на розвиток небезпечних чинників пожежі. Предмет дослідження – особливості методів моделювання швидкості тепловиділення у FDS при дослідженні розвитку пожеж.

Основна гіпотеза полягає в наявності відмінностей в результатах моделювання швидкості тепловиділення з використанням різних методів. При цьому ви-

© С. А. Виноградов, С. М. Шахов, Д. І. Савельєв, А. С. Мельниченко та ін.

користання неналежного методу призводить до похибки значень небезпечних чинників пожежі, і як наслідок невідповідної оцінки рівня пожежної безпеки.

Дослідження проводили методом комп'ютерного моделювання із використанням програмного апаратного засобу Fire Dynamics Simulator (США), користуючись інтерфейсом PyroSim (США).

5. Результати виявлення особливостей методів моделювання швидкості тепловиділення

5.1. Порівняння зміни швидкості тепловиділення у часі в залежності від методу моделювання

Розглядаються методи моделювання горіння у газоподібній фазі.

Перший метод моделювання.

При використанні цього метода HRR зростає до максимального значення від першої секунди з початку моделювання. Особливістю є корегування значення HRR програмою, яка враховує площу горіння матеріалу. З метою отримання необхідної швидкості тепловиділення HRR, як результату, потрібно враховувати параметр HRRUPA та площу горіння, оскільки програма самостійно розраховує остаточне значення HRR. На рис. 1, наведено залежність швидкості тепловиділення, враховуючи параметр HRRUPA, який дорівнює 10кВт/м^2·с. Площа горіння відповідно складає 0,4 м^2. Відповідне стале значення HRR дорівнює 1,5 кВт.

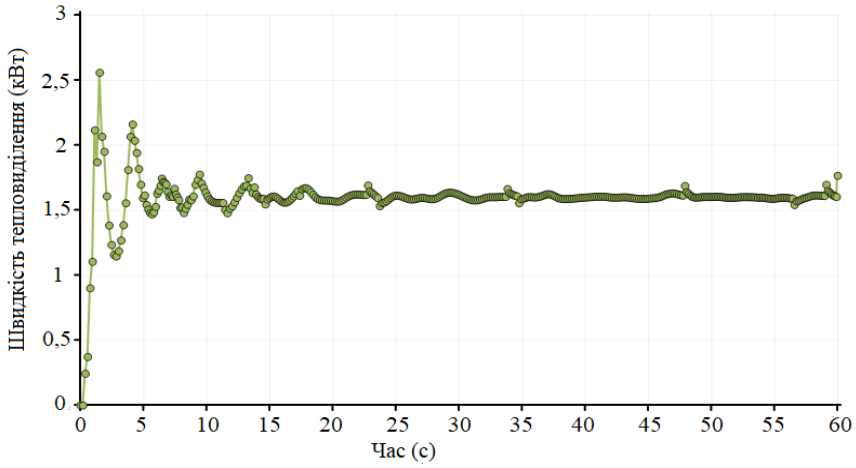

Рис. 1. Графік постійної швидкості тепловиділення, яка не змінюється у часі

Під час моделювання на протязі перших секунд розрахунок процесу горіння корегується кількістю кисню у приміщенні і можлива невелика розбіжність (рис. 1, 2), від максимального значення HRR. Далі, на протязі усього часу моделювання значення HRR залишається постійним, та не змінюється у часі.

На рис. 3 наведено залежність HRR, враховуючи параметр HRRUPA, який дорівнює 10 кВт/м^2·с, від площі горіння. У цьому випадку площа горіння складає 2 м^2, отже HRR постійна, та дорівнює 20 кВт/м^2.

Наведений метод моделювання дозволяє задавати постійну HRR_{const}, у часі. При цьому враховується площа пожежі, від якої залежить отримання теплового результату значення HRR. В свою чергу для отримання необхідного значення HRR необхідно використовувати параметр HRRUPA, для розрахунку якого потрібна інформація про питому масову швидкість вигорання та питому теплоту згорання речовини, що досліджується.

Другий метод моделювання.

У другому випадку моделювання також використовується HRR_{const}, яке не

змінюється у часі, але підвищення HRR за вказаний проміжок часу до пікового значення буде зростати за квадратичним законом.

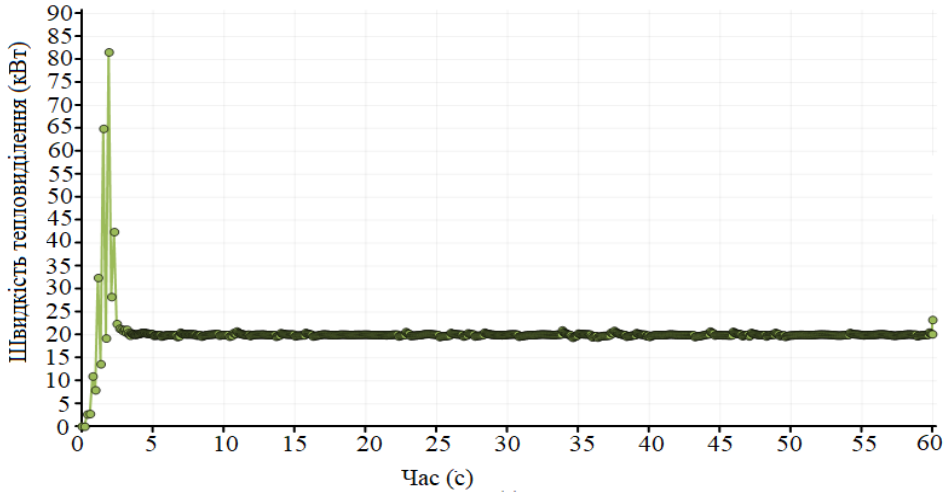

Рис. 2. Залежність швидкості тепловиділення, враховуючи параметр HRRUPA, який дорівнює 10 кВт/м^2·с, від площі горіння

Під час моделювання цим методом слід зазначати HRR і також враховувати площу горіння. Відповідне значення часу, за який відбувається зростання HRR до пікового значення слід обирати на основі результатів експериментальних досліджень згорання різноманітних речовин та матеріалів. На рис. 5 наведено відповідне зростання HRR по квадратичному закону, від початку горіння до пікового значення, яке складає 10 кВт з площі горіння 2 м^2, протягом 20 с, від початку моделювання. Значення HHRUPA відповідно складає, 5 кВт/м^2·с.

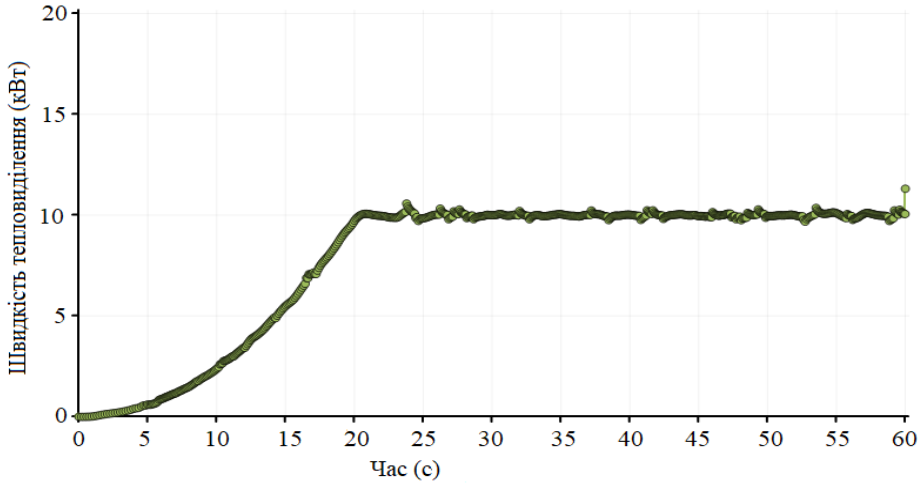

Рис. 3. Зростання швидкості тепловиділення до пікового значення по квадратичному закону

В даному прикладі, HRR досягає пікової потужності в той момент часу, який вказується самостійно, і далі залишається незмінним.

Третій метод моделювання.

При використанні цього метода, також застосовується HRR_{const}, з поверхні горіння. Але особливістю є те, що розвиток HRR у часі регулюється за рахунок поширення швидкості полум'я по поверхні горіння. У цьому випадку FDS самостійно розраховує, як швидко зростає значення HRR, спираючись на задану лінійну швидкість поширення полум'я. У цьому випадку, при розрахунку в FDS також застосовується закон t^2.

© С. А. Виноградов, С. М. Шахов, Д. І. Савельєв, А. С. Мельниченко та ін.

На рис. 4 наведено відповідно зростання HRR по квадратичному закону, від початку горіння до пікового значення, яке складає 10 кВт з площі горіння 2 м^2. При розвиток швидкості тепловиділення у часі значення 10 кВт обчислюється FDS. Швидкість поширення полум'я складає 0,1 м/с. Значення HHRUPA відповідно складає, 5 кВт/м^2·с.

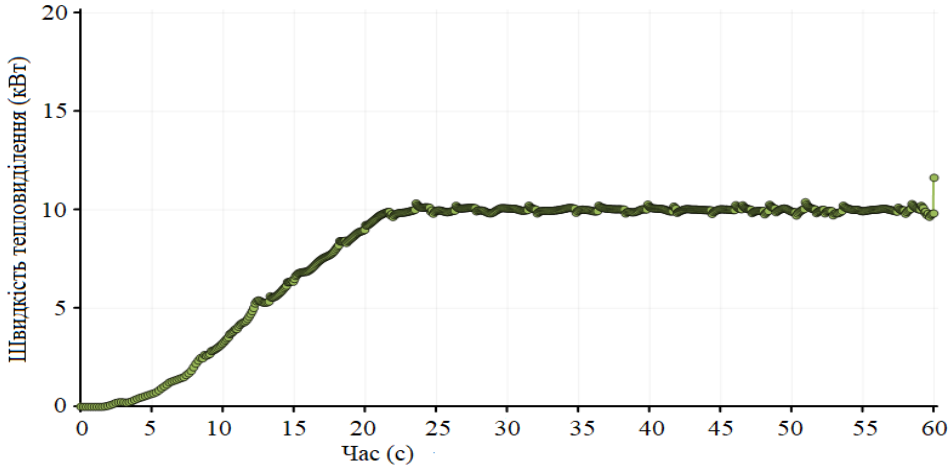

Рис. 4. Зростання швидкості тепловиділення по квадратичному закону, від початку горіння до пікового значення, яке складає 10 кВт з площі горіння 2 м^2

Четвертий метод моделювання.

Четвертий варіант є індивідуальним. У цьому разі крива зміни HRR у часі завдається спираючись на експериментальні дані, отримані в результаті досліджень проведених у калориметричних камерах. Таким чином повністю контролюється процес горіння, а саме коли починається тепловиділення, як зростає швидкість тепловиділенням, скільки триває пікова потужність горіння, коли починає знижуватися, і час повного вигоряння.

На рис. 5 наведено приклад моделювання розвитку швидкості тепловиділення у часі, використовуючи індивідуальний метод. Як пожежну навантагу було обрано окремий предмет. Використовуючи експериментальні дані подані у [12] та застосувавши розрахунковий калькулятор від Thunderhead Engineering Consultants, отримано дані для побудову кривої. Завдяки проведеному аналізу класифіковано методи моделювання швидкості тепловиділення у часі. Результати подані у подано у табл. 1. Наступним кроком є практична реалізація методів моделювання швидкості тепловиділення на прикладі типового приміщення.

5.2. Практична реалізація методів моделювання швидкості тепловиділення на прикладі типового приміщення

Четвертий метод моделювання є найбільш ефективним для використання, оскільки для побудови кривої застосовуються експериментальні результати, які отримані під час дослідження горіння пожежної навантаги. Отже його недоцільно порівнювати з іншими методами. У другому та третьому методі використовується постійна HRR, але її підвищення до пікового значення відбувається по квадратичному закону і регулюється або швидкістю прискорення горіння або швидкістю розповсюдженням полум'я. Отже при однакової сталою HRR і коефіцієнтах прискорення горіння або швидкості поширення полум'я, значення яких будуть відповідати один одному, зростання HRR у часі буде однакове, виходячи з цього порівнювати їх не має необхідності.

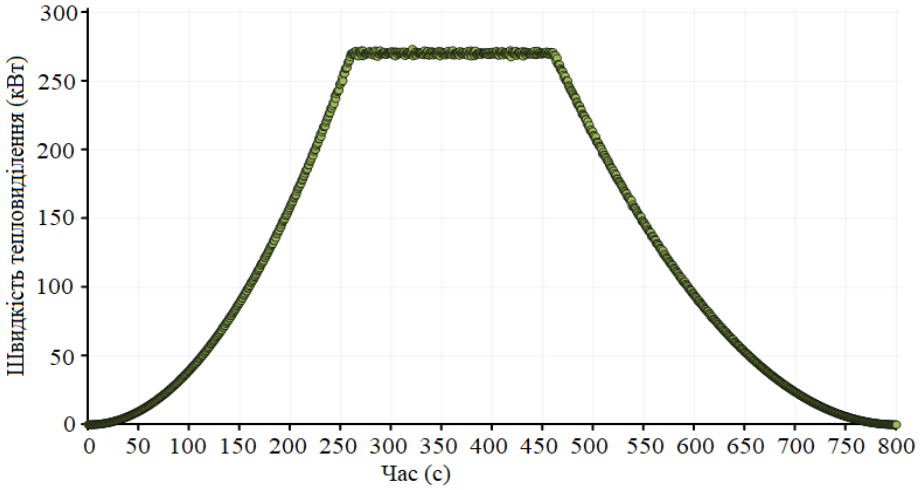

Рис. 5. Приклад моделювання розвитку швидкості тепловиділення у часі, використовуючи індивідуальний метод

Табл. 1. Класифікація методів моделювання швидкості тепловиділення у FDS

Номер методу	Особливості	Позначення
Перший метод моделювання	Стала швидкість тепловиділення, яка не змінюється у часі та зростає з першої секунди моделювання	HRR_{const}
Другий метод моделювання	Стала швидкість тепловиділення, яка змінюється у часі до пікового значення по квадратичному закону	$HRR^{t^2}_{const}$
Третій метод моделювання	Стала швидкість тепловиділення, яка змінюється у часі до пікового значення по квадратичному закону, час зростання визначається швидкість поширення полум'я по поверхні горіння	$HRR^{t^2}_{const,spreadrate}$
Четвертий метод моделювання	Змінна швидкість тепловиділення, яка зростає та знижується на основі даних, заданих в моделі	$HRR_{individual}$.

Отже, доцільно порівняти перший метод, де HRR постійна та не змінюється протягом часу із другим або третім методом.

Відповідно під час дослідження проводилося порівняння впливу HRR_{const} та $HRR^{t^2}_{const}$ (зростає по квадратичному закон з 0 до 20 с), на розвиток небезпечних чинників пожежі. В дослідженні завдані однакові умови для вивчення впливу HRR на розвиток небезпечних чинників пожежі. Як об'єкт змодельоване приміщення, розмірами 2,2x5x2,2 м. У об'єкті наявний дверний пройм розмірами 2x1 м, який сполучений з атмосферою. Під час дослідження вимірювали температуру (T), видимість (VIS), та щільність кисню (O_2) за допомогою датчиків, розташованих на висоті 1,6 м біля дверного пройму. Пожежа починається з першої секунди моделювання, площа пожежі відповідно 2 м^2. HRR=100 кВт/м^2. Час моделювання t=60 с. Створена модель подана на рис. 6.

У табл. 2 подано вибірку значень у період часу від 0 с, до 60 с, з інтервалом часу 5 с, з розрахункових даних дослідження зростання температури T від $HRR^{t^2}_{const}$ та HRR_{const}.

Аналізуючи графіки на рис. 8 встановлено, що температура у період часу з 1

© С. А. Виноградов, С. М. Шахов, Д. І. Савельєв, А. С. Мельниченко та ін.

по 10 с, при HRR_{const} зростає до 62 °С, що у 3 рази більше, ніж температура при $HRR^{t^2}_{const}$, оскільки значення температури на 10 с, залишається не змінною від початку моделювання та становить 20 °С. На 15 с різниця температури більше ніж у 2 рази, та становить 98°С для HRR_{const}, і 43 °С для $HRR^{t^2}_{const}$. Відповідно на 25 с різниця між температурами становить 44 °С. Значення температури 141 °С для HRR_{const} досягається на 35 с моделювання, коли для $HRR^{t^2}_{const}$, температура до такого значення підвищується лише на 55 с моделювання, різниця у часі відповідно 1,5 рази. На підставі аналізу з'ясовано, що при застосування HRR_{const} у порівнянні з $HRR^{t^2}_{const}$ підвищення температури у відповідних інтервал часу більше у 1,5–3 рази.

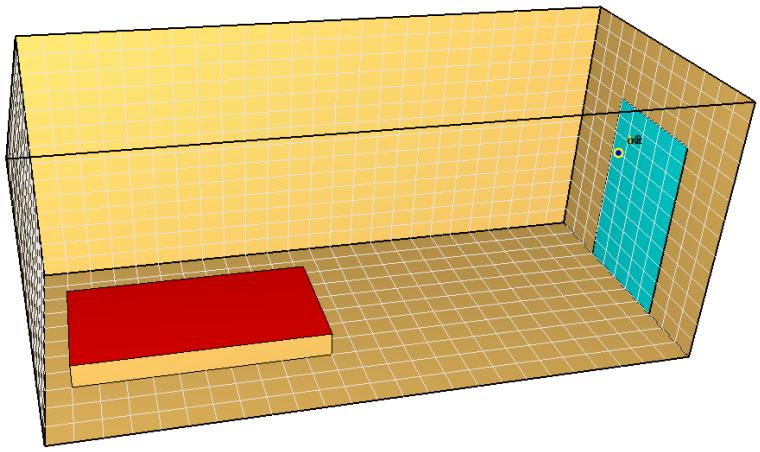

Рис. 6. Створена модель для дослідження впливу швидкості тепловиділення на небезпечні чинники пожежі

Табл. 2. Вибірка з розрахункових даних дослідження зростання температури T від $HRR^{t^2}_{const}$ та HRR_{const}

HRR_{const}		$HRR^{t^2}_{const}$	
Час, с	Температура, °С	Час, с	Температура, °С
0	20	0	20
5	20	5	20
10	62	10	20
15	98	15	43
20	97	20	56
25	117	25	73
30	133	30	111
35	141	35	116
40	133	40	128
45	143	45	128
50	143	50	138
55	142	55	141
60	143	60	144

На рис. 7 наведено графіки зміни температури t, від HRR_{const} та $HRR^{t^2}_{const}$.

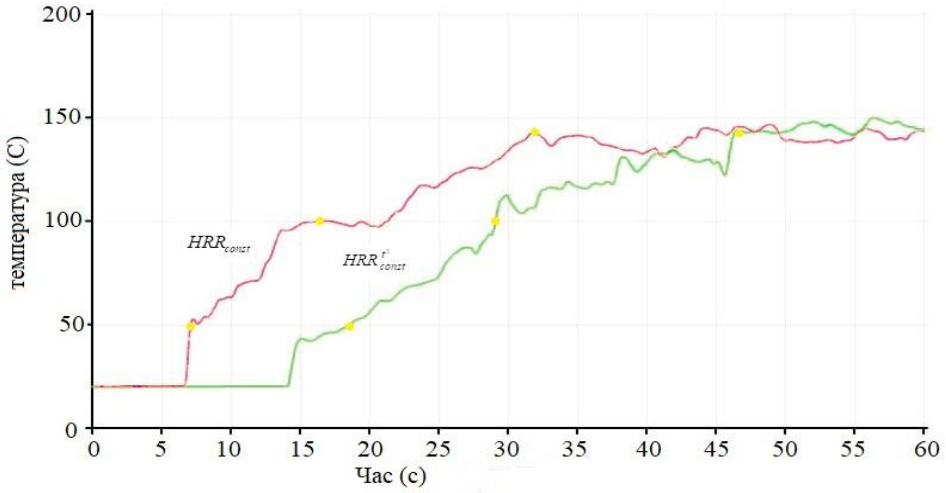

Рис. 7. Залежність зростання температури у часі при $\mathrm{HRR}_{\mathrm{const}}$ **та** $\mathrm{HRR}^{t^2}_{\mathrm{const}}$

У табл. 3 подано вибірку значень з інтервалом часу від 0 с до 60 с з інтервалом часу 5 с.

Табл. 3. Вибірка з розрахункових даних дослідження зниження видимості VIS від $\mathrm{HRR}^{t^2}_{\mathrm{const}}$ **та** $\mathrm{HRR}_{\mathrm{const}}$

$\mathrm{HRR}_{\mathrm{const}}$		$\mathrm{HRR}^{t^2}_{\mathrm{const}}$	
Час, с	Видимість, м	Час, с	Видимість, м
0	30	0	30
5	30	5	30
10	10	10	30
15	7	15	20
20	6	20	12
25	5	25	9
30	4,8	30	6,5
35	4,4	35	5,9
40	4	40	4,9
45	4,2	45	4,5
50	4	50	4,5
55	4	55	4,1
60	4	60	4,1

На рис. 8 подано залежність зниження видимості у моделі, протягом 60 с моделювання, з $\mathrm{HRR}_{\mathrm{const}}$, та зі $\mathrm{HRR}^{t^2}_{\mathrm{const}}$, яка зростає протягом 20 с, від 0 до пікового значення.

Під час аналізу втрати видимості, встановлено, що на протягом перших 5 с видимість не знижується як для, $\mathrm{HRR}_{\mathrm{const}}$ так і для $\mathrm{HRR}^{t^2}_{\mathrm{const}}$. Подалі протягом інтервалу часу з 5 с, до 10 с, при $\mathrm{HRR}_{\mathrm{const}}$ видимість знижується на 20 метрів, а при $\mathrm{HRR}^{t^2}_{\mathrm{const}}$ залишається незмінною. На 10 с видимість із застосуванням $\mathrm{HRR}_{\mathrm{const}}$ у 3 рази менша у порівнянні з застосуванням $\mathrm{HRR}^{t^2}_{\mathrm{const}}$. На 20 с моделювання спостерігається різниця у зниженні видимості при $\mathrm{HRR}_{\mathrm{const}}$ відносно $\mathrm{HRR}^{t^2}_{\mathrm{const}}$ у 2 рази,

© С. А. Виноградов, С. М. Шахов, Д. І. Савельєв, А. С. Мельниченко та ін.

та становить 10 м та 12 м відповідно. Погіршення видимості до 5 метрів при HRR_{const} досягається на 25 с, у свою чергу при $HRR^{t^2}_{const}$ таке значення фіксується лише на 40 с, що у 1,6 раз більше. Отже, при використані HRR_{const} має місце суттєве зниження видимості, яке досягається на різних інтервалах часу швидше ніж при $HRR^{t^2}_{const}$ у 1,6–3 рази.

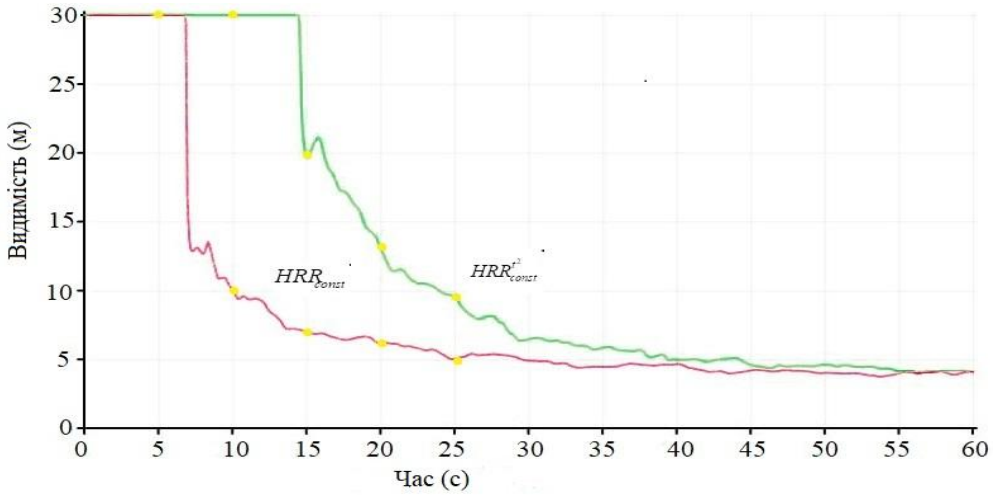

Рис. 8. Залежність зниження видимості у часі при HRR_{const} **та** $HRR^{t^2}_{const}$

У табл. 4 подано вибірку значень у період часу від 0 с, до 60 с, з інтервалом часу 5 с.

Відповідні графіки зміни концентрації кисню O_2, від HRR_{const} та $HRR^{t^2}_{const}$ подано на рис. 9.

Під час аналізу графіку протягом перших 5 с зниження концентрації кисню не спостерігається. На 10 с для HRR_{const} значення концентрації кисню складає 0,228 кг/м^3, що у порівнянні з значенням концентрації кисню для $HRR^{t^2}_{const}$ більше у 1,2 рази. Наступна суттєва різниця фіксуєте через 5 с, відповідно різниця між концентрацією кисню із HRR_{const} та $HRR^{t^2}_{const}$ становить 0,47 кг/м^3. На 30 с для HRR_{const} концентрація кисню знижується до 0,180 кг/м^3, коли для $HRR^{t^2}_{const}$ таке значення зафіксовано на 20 с пізніше, що у 1,6 швидше. Сталого мінімального значення концентрації кисню для HRR_{const} досягає на 45 с, а у випадку моделювання з $HRR^{t^2}_{const}$, відповідне значення спостерігається на 15 с пізніше, що у 1,5 рази повільніше. Завдяки аналізу встановлено, що при застосуванні HRR_{const} значення концентрації кисню у повітрі знижується у 1,2–1,6 разів швидше на різних інтервалах часу.

У табл. 5 подано рекомендації щодо застосування методів з урахування проведеного дослідження впливу швидкості тепловиділення на небезпечні чинники пожежі.

Під час дослідження підтверджено, що зміна швидкості тепловиділення у часі суттєво впливає на розвиток небезпечних чинників пожежі. Це необхідно враховувати під час дослідження розвитку небезпечних чинників пожежі, оскільки, від цього залежить прийняття відповідних рішень для забезпечення належного рівня пожежної безпеки.

Табл. 4. Вибірка з розрахункових даних дослідження зниження концентрації кисню від $HRR^{t^2}_{const}$ та HRR_{const}

HRR_{const}		$HRR^{t^2}_{const}$	
Час, с	Густина кисню, кг/м^3	Час, с	Густина кисню, кг/м^3
0	0,276	0	0,276
5	0,276	5	0,276
10	0,228	10	0,276
15	0,205	15	0,252
20	0,205	20	0,235
25	0,190	25	0,220
30	0,178	30	0,201
35	0,177	35	0,194
40	0,174	40	0,183
45	0,174	45	0,186
50	0,174	50	0,178
55	0,174	55	0,176
60	0,174	60	0,174

6. Обговорення результатів виявлення особливостей методів моделювання швидкості тепловиділення

Результатом порівняння методів моделювання швидкості тепловиділення у FDS у газоподібній фазі є розкриття особливостей кожного з методів, спираючись на теоретичний аналіз та практичне відпрацювання у програмному забезпеченні. На підставі отриманих результатів (табл. 1) упорядковано та класифіковано на чотири групи методи моделювання швидкості тепловиділення. Розкриття особливостей (табл. 1) надає можливість ефективно використовувати кожен з методів FDS під час проведення дослідження розвитку пожеж та вивчення розвитку небезпечних чинників пожежі з метою якісного оцінювання рівня пожежної безпеки.

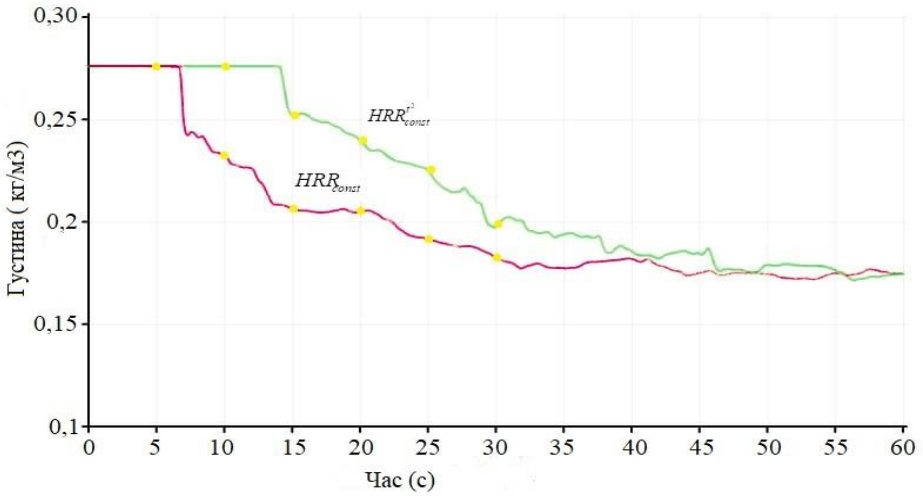

Рис. 9. Зміна концентрації кисню у часі з використанням HRR_{const} та $HRR^{t^2}_{const}$

При практичній реалізації методів моделювання швидкості тепловиділення на прикладі типового приміщення досліджено вплив швидкості тепловиділення

© С. А. Виноградов, С. М. Шахов, Д. І. Савельєв, А. С. Мельниченко та ін.

на зміну небезпечних чинників пожежі у часі. Встановлено (рис. 7–9), що у випадку застосування першого другого та третього методу, результати моделювання у повному обсязі не можна прирівнювати до реальних. На основі результатів не можлива ефективна оцінка з подальшим наданням відповідних рекомендацій, спрямованих на забезпечення рівня пожежної безпеки. Це зумовлено впливом швидкості тепловиділення на небезпечні чинники пожежі, а саме похибкою у результаті вимірювання. Тобто постійна швидкість тепловиділення, або швидкість тепловиділення, яка зростає за певний інтервал часу і потім стає постійною, підтримує постійну концентрацію небезпечних чинників у повітрі табл. 2–4, які не змінюються протягом часу. Цей висновок враховувався при наданні відповідних рекомендацій (табл. 5) щодо використання методів моделювання.

Табл. 5. Рекомендації щодо застосування методів моделювання

Метод	Недоліки	Висновок
HRR_{const}	1. Результати застосування такого методу спотворюють зміну на кінцеві результати гранично допустимих значень небезпечних чинників пожежі та їх оцінку	Не рекомендовано використовувати
$HRR^{t^2}_{const}$	1. Необхідна велика кількість теоретичних даних для застосування. 2. Швидкість тепловиділення з проміжком певного часу зростає і залишається постійною, що в свою чергу спотворює зміну на кінцеві гранично допустимі значення небезпечних чинників пожежі та їх оцінку.	Рекомендовано використовувати, але з певними обмеженнями (до моменту настання початку сталої швидкості тепловиділення, або до моменту, настання початку зниження від постійної швидкості тепловиділення)
$HRR^{t^2}_{const,spreadrate}$	1. Швидкість тепловиділення з проміжком певного часу зростає і залишається постійною, що в свою чергу також спотворює зміну та кінцеві гранично допустимі значення небезпечних чинників пожежі та їх оцінку.	Рекомендовано використовувати, але з певними обмеженнями (до моменту настання початку сталої швидкості тепловиділення, або до моменту, настання початку зниження від постійної швидкості тепловиділення)
$HRR_{individual}$.		Для моделювання вхідні дані використовують з проведених експериментів горіння існуючих речовин та матеріалів. Рекомендовано використовувати.

На відміну від [1–10], де застосовується не зрозуміле у повному обсязі значення зміни швидкості тепловиділення у часі, результат виявлення особливостей методів з розробленими рекомендаціями на підставі порівняння, дозволяє ефективно їх застосовувати при дослідженні пожеж.

Виявлення особливостей та розроблені рекомендації (табл. 5) застосування методів швидкості тепловиділення вирішують проблемну частину використання цих їх у FDS.

При застосуванні сформульованих рекомендацій в подальших дослідженнях розвитку пожеж до обмежень слід віднести недостатню базу експериментальних результатів горіння речовин, які необхідні для застосування четвертого методу моделювання.

Недоліком дослідження є знехтування методу моделювання розвитку пожежі у твердій фазі, що також є можливим із застосування FDS, але це питання пот-

ребує окремого вивчення, що є напрямком подальших досліджень.

Розвиток дослідження лежить у галузі оцінювання поширення небезпечних чинників при пожежі, що дозволить ефективно перевіряти та забезпечувати належний рівень пожежної безпеки.

7. Висновки

1. Проведено порівняння методів моделювання швидкості тепловиділення у Fire Dynamic Simulator у газоподібній фазі:

– перший метод моделювання (стала швидкість тепловиділення, яка не змінюється у часі), HRR_{const}. Результати застосування такого методу спотворюють зміну на кінцеві результати гранично допустимих значень небезпечних чинників пожежі та їх оцінку. Не рекомендовано використовувати.

– другий та третій метод моделювання (стала швидкість тепловиділення, яка змінюється у часі до пікового значення по квадратичному закону), $HRR^{t^2}_{const}$ та $HRR^{t^2}_{const,spreadrate}$. Недоліком другого методу є необхідна велика кількість теоретичних даних для застосування. Для використання третього методу, немає необхідності мати велику кількість даних, що є перевагою у порівнянні з другим методом. Методи можуть бути застосовані, але з певними обмеженнями, оскільки швидкість тепловиділення з проміжком певного часу зростає і залишається постійною, що в свою чергу також спотворює зміну та кінцеві гранично допустимі значення небезпечних чинників пожежі та їх оцінку. Рекомендовано використовувати, але з певними обмеженнями (до моменту настання початку сталої швидкості тепловиділення, або до моменту, настання початку зниження від постійної швидкості тепловиділення)

– четвертий метод моделювання (індивідуальний), $HRR_{individual}$. Цей метод є універсальним інструментом та володіє перевагами у порівнянні з усіма іншими, які полягають у контролюванні процесу горіння речовини, а саме швидкості тепловиділення кожну одиницю часу. Застосовуючи цей метод, відтворюється умови згорання пожежної навантаги, які є близькими до реальних, оскільки для моделювання вхідні дані використовують з проведених експериментів горіння існуючих речовин та матеріалів. Рекомендовано використовувати.

2. Практично реалізовано методи моделювання швидкості тепловиділення на прикладі типового приміщення. Виявлено вплив швидкості тепловиділення на небезпечні чинники пожежі. Встановлено, що при застосування HRR_{const} у порівнянні з $HRR^{t^2}_{const}$ підвищення температури у відповідних інтервал часу більше у 1,5–3 рази. Під час аналізу втрати видимості, встановлено, що при використані HRR_{const} має місце суттєве зниження видимості, яке досягається на різних інтервалах часу швидше ніж при $HRR^{t^2}_{const}$ у 1,6–3 рази. Під час аналізу зниження концентрації кисню встановлено, що при застосуванні HRR_{const} значення концентрації кисню у повітрі знижується у 1,2–1,6 разів швидше на різних інтервалах часу у порівнянні з показниками при застосуванні $HRR^{t^2}_{const}$ Завдяки проведеному дослідженню виявлено що зміна швидкості тепловиділення у часі суттєво впливає на розвиток небезпечних чинників пожежі. Це необхідно враховувати під час моделювання та проведення досліджень, оскільки, від цього залежить достовірна оцін-

© С. А. Виноградов, С. М. Шахов, Д. І. Савельєв, А. С. Мельниченко та ін.

ка рівня прийняття відповідних рішень для забезпечення належного рівня пожежної безпеки.

Література

1. Xinfeng L., Xueqin Z., Bo L. Numerical simulation of dormitory building fire and personnel escape based on Pyrosim and Pathfinder. Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2017. № 40:3. P. 257–266. doi: 10.1080/02533839.2017.1300072

2. Xu M., Peng D. PyroSim–Based Numerical Simulation of Fire Safety and Evacuation Behaviour of College Buildings. International Journal of Safety and Security Engineering. 2020. № 10. P. 293–299. doi:10.18280/ijsse.100218

3. Jian Z. Fire Simulation Research on a Bus Based on Pyrosim. J. Phys. 2020. Conf. Ser. 1678 012100. P. 1–7. doi:10.1088/1742–6596/1678/1/012100

4. Hui Z. Evacuation Simulation of Large Theater Based on Pyrosim and Pathfinder. Journal of Physics. 2022. Conference Series 2289. 012017. P. 1–7. doi:10.1088/1742–6596/2289/1/012017

5. Yanjie J. A fire simulation method of urban light rail station hall based on building information model and pyrosim software. J. Phys. 2021. Conf. Ser. 1903 012065. P. 1–7. doi:10.1088/1742–6596/1903/1/012065

6. Gao Z., Li Z., Wei J., Long T., Wang Q., Shu L. Study on forest road of fireproof blockade functions based on PyroSim. Journal of Beijing Forestry University. 2020. Vol. 42(9). P. 51–60. doi: 10.12171/j.1000–1522.20200140

7. Товарянський В. В , Адольф І. І. Дослідження температур в середовищі горіння експериментальної швейно–виробничої ділянки. Пожежна безпека. 2022. № 40. С. 92–97. doi: 10.32447/20786662.40.2022.11

8. Шналь Т. М., Поздєєв С. В., Яковчук Р. С., Некора О. В. Математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні у ній повномасштабних вогневих випробувань. Пожежна безпека. 2020. № 36. С. 121–130. doi: 10.32447/20786662.36.2020.14

9. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Ніжник В. В., Сізіков О. О., Кузик А. Д. Дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будинків. Пожежна безпека. 2020. № 37. С. 16–23. doi: 10.32447/20786662.37.2020.03

10. D Ming–xin Li, Shun–bing Zhu, Jing–hong Wang, Zheng Zhou.Research on Fire Safety Evacuation in a University Library in Nanjing, Procedia Engineering. 2018. Vol. 211. P. 372–378. doi. 10.1016/j.proeng.2017.12.025

11. Fire Calorimetry Database (FCD). doi: 10.18434/mds2–2314

S. Vinogradov, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
S. Shakhov, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
D. Saveliev, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
A. Melnychenko, *Senior Lecturer of the Department*
O. Polivanov, *Lecturer of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

FEATURES OF HEAT RELEASE RATE SIMULATION METHODS IN FIRE DYNAMICS SIMULATOR

The peculiarities of the methods of modeling the rate of heat release in the Fire Dynamic Simulator have been revealed. The change in the rate of heat release over time was compared, depending on the modeling method, and methods were practically implemented on the example of a typical room to identify the influence of the rate of heat release on the development of dangerous fire factors. When using the Fire Dynamic Simulator to study hazardous factors in full, it is not clear what value of the

heat release rate should be used when studying the dynamics of fire development, which affects the evaluation of the obtained results. Identifying the features of each of the methods will make it possible to use them effectively in order to properly assess the results obtained and further ensure the level of fire safety. As a result of the comparison of the change in the rate of heat release over time, depending on the modeling method, a classification of modeling methods was developed. During the practical implementation of the methods on the example of a typical room, it was found that when the first modeling method is used compared to the second, the temperature rise in the threaded time intervals increases by 1,5–3 times faster, respectively. During the analysis of the loss of visibility, it was found that when using a constant rate of heat release, the reduction of visibility at different time intervals is achieved faster than when the rate of heat release changes over time, respectively, by 1,6–3 times. During the analysis of the decrease in oxygen concentration, it was established that when using the first modeling method, the value of the oxygen concentration in the air decreases 1,2–1,6 times faster at different time intervals compared to the indicators of the second method. Thanks to the identified features of each of the modeling methods, recommendations for their use in FDS have been developed. This makes it possible to effectively apply methods and evaluate the results with subsequent decisions to ensure an adequate level of fire safety.

Keywords: fire research, fire safety, heat release rate, Fire Dynamics Simulator, PyroSim

Referense

1. Xinfeng, Long, Xueqin, Zhang, Bo, Lou. (2017). Numerical simulation of dormitory building fire and personnel escape based on Pyrosim and Pathfinder, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 40:3, 257–266. doi: 10.1080/02533839.2017.1300072

2. Xu, M., Peng, D. (2020). PyroSim–Based Numerical Simulation of Fire Safety and Evacuation Behaviour of College Buildings. International Journal of Safety and Security Engineering, 10, 293–299. doi:10.18280/ijsse.100218

3. Jian, Zhang et al. (2020). Fire Simulation Research on a Bus Based on Pyrosim J. Phys.: Conf. Ser. 1678 012100, 1–7. doi:10.1088/1742–6596/1678/1/012100

4. Hui, Zhang et al. (2022). Evacuation Simulation of Large Theater Based on Pyrosim and Pathfinder Journal of Physics: Conference Series 2289, 012017, 1–7. doi:10.1088/1742–6596/2289/1/012017

5. Yanjie, Ju. (2021). A fire simulation method of urban light rail station hall based on building information model and pyrosim software. J. Phys.: Conf. Ser. 1903 012065, 1–7. doi:10.1088/1742–6596/1903/1/012065

6. Gao, Z., Li, Z., Wei J., Long T., Wang Q., Shu L. (2020). Study on forest road of fireproof blockade functions based on PyroSim. Journal of Beijing Forestry University, 42(9), 51–60. doi: 10.12171/j.1000–1522.20200140

7. Tovarianskyi, V. V , Adolf, I. I. (2022). Research of temperatures in the combustion environment of the experimental sewing and production section. Fire Safety, 40, 92–97. doi: 10.32447/20786662.40.2022.11

8. Shnal, T. M., Pozdieiev, S. V., Yakovchuk, R. S., Nekora, O. V. (2020). Mathematical modeling of fire development in a three–storey residential building during full–scale fire tests. Fire Safety, 36, 121–130. doi: 10.32447/20786662.36.2020.14

9. Ballo, Ya. V., Yakovchuk, R. S., Nizhnyk, V. V., Sizikov, O. O., Kuzyk, A. D (2020). Investigation of design parameters facade fire–fighting eaves for prevent the spread of fires on facade structures of high–rise buildings. Fire Safety, 37, 16–23. doi: 10.32447/20786662.37.2020.03

10. D., Ming–xin Li, Shun–bing, Zhu, Jing–hong, Wang, Zheng, Zhou. (2018). Research on Fire Safety Evacuation in a University Library in Nanjing, Procedia Engineering, 211, 372–378. doi. 10.1016/j.proeng.2017.12.025

11. Fire Calorimetry Database (FCD). doi: 10.18434/mds2–2314

© С. А. Виноградов, С. М. Шахов, Д. І. Савельєв, А. С. Мельниченко та ін.

Надійшла до редколегії: 06.03.2023
Прийнята до друку: 11.04.2023