Розділ ІІ. ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

УДК 614.841

С.Ю. Огурцов, *канд.техн.наук*
(Український науково-дослідний інститут цивільного захисту МНС України)

ОБҐРУНТУВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖ ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ У ПІДЗЕМНИХ ОБ'ЄКТАХ АВТОТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У статті наводяться результати аналітичних досліджень динаміки та параметрів горіння легкових автомобілів, які можуть бути використані при проведенні математичного моделювання пожеж у підземних об'єктах автотранспортної інфраструктури. Узагальнені дані щодо теплової потужності вогнища пожежі легкового автомобіля, закономірностей зміни її в часі. Запропоновано приймати геометричну форму вогнища пожежі при проведенні моделювання, як наближену до вигляду реального автомобіля із деталізацією його окремих елементів з урахуванням розмірів комірки обчислювального домену

Ключові слова: моделювання пожеж, пожежі автомобілів, протипожежний захист паркінгів

Актуальність роботи. Урбанізація є невід'ємною складовою процесів розвитку сучасного суспільства, що викликано зростанням культурних та політичних функцій міст, а також необхідністю концентрації трудового потенціалу, матеріальних та фінансових ресурсів. Однією з найголовніших проблем великих міст є нестача території для будівництва нових об'єктів, зокрема транспортної інфраструктури, що потребує інтенсивного освоєння підземного простору [1]. Разом з тим, підземне розташування транспортних об'єктів має свої специфічні особливості, серед яких значно більший ступінь складності будівництва та, як наслідок, більш високі, по відношенню до аналогічних наземних об'єктів, капітальні та експлуатаційні витрати.

Серед об'єктів підземної автотранспортної інфраструктури можна виділити автомобільні тунелі, що являють собою протяжні підземні споруди, довжина яких набагато більша за вертикального перерізу та підземні споруди обмеженої довжини, у вигляді окремих приміщень чи багатоярусних комплексів (паркінгів), що призначені для зберігання автотранспортних засобів.

Надання пріорітету економічній ефективності та рентабельності над безпекою підземних об'єктів автотранспортної інфраструктури часто спричиняє події, що закінчуються трагічними наслідками. До таких подій можна віднести пожежі у Монбланському тунелі [2] на границі між Францією та Італією (1999 р., 39 загиблих), Сен-Готардському тунелі [3] (2001 р, 11 загиблих) та тунелі Віамала [4] у Швейцарії (2006 р., 9 загиблих).

Розглядаючи чинники, що обумовлюють підвищену пожежну небезпеку об'єктів підземної автотранспортної інфраструктури, можна виділити такі [5]:

- значна швидкість розповсюдження пожежі;
- ускладнення дій пожежно-рятувальних підрозділів через обмеження об'ємно-планувального характеру;
- віддаленість джерел протипожежного водопостачання тощо.

Для підземних автомобільних тунелів ситуація може ускладнюватись наявністю значної кількості людей та виникненням автомобільних заторів, що значно ускладнить доступ пожежно-рятувальних підрозділів до місця виникнення пожежі.

Все це викликає необхідність максимально обґрунтовано підходити до вибору систем протипожежного захисту таких об'єктів, визначення їх параметрів, критеріїв надійності та необхідності дублювання елементів. Зокрема це стосується застосування на таких об'єктах інноваційних систем димо- та тепловидалення, пожежогасіння, управління евакуацією людей при пожежі тощо.

Вирішенням цієї проблеми може бути проведення натурних вогневих випробувань систем протипожежного захисту на вже збудованих спорудах, що майже завжди не є можливим внаслідок їх специфіки та унеможливлює будь-які кардинальні зміни у реалізованих проектних рішеннях. Іншим шляхом обґрунтування, перевірки параметрів та алгоритмів роботи систем протипожежного захисту є проведення математичного моделювання динаміки розповсюдження небезпечних факторів пожеж із використанням польових моделей, що може бути реалізовано за допомогою сучасного програмного забезпечення та відповідного потужного обчислювального обладнання [6]. Разом з тим, застосування таких теоретичних підходів потребує перевірених узагальнених даних щодо динаміки розвитку пожеж автомобілів, параметрів їх горіння тощо. Ці дані мають бути вихідними для проведення математичного моделювання та відповідно закладені у параметри моделі пожежі, що розраховується.

Мета роботи. В рамках цієї статті здійснюється спроба шляхом аналітичних досліджень узагальнити відомі теоретичні й експериментальні відомості щодо горіння автомобілів та сформувати необхідні вихідні дані для моделювання таких пожеж в підземних об'єктах автотранспортної інфраструктури за допомогою програмного забезпечення FDS (Fire Dynamic Simulator), що реалізує підходи обчислювальної гідродинаміки (CFD моделювання).

Теоретичні дослідження. Спроба стандартизувати узагальнені параметри пожеж автомобілів зроблена у британському стандарті BS 7346-6:2006 [7], що встановлює загальні вимоги до методів розрахунку систем тепло- та димовидалення з підземних паркінгів. Згідно з ним, параметри таких пожеж можуть обиратись за результатами відповідних досліджень, або прийматись відповідно до табл. 1 залежно від наявності або відсутності систем водяного пожежогасіння. Для пожеж, що змінюють свої параметри у часі, пропонується опиратись на результати натурних вогневих експериментів, опис яких має бути наведений у проектній документації на системи димо- та тепловидалення.

Таблиця 1

Параметри пожеж автомобілів згідно з BS 7346-6

Параметр пожежі	Паркінг	
	обладнаний спринклерною системою пожежогасіння	не обладнаний спринклерною системою пожежогасіння
Розміри вогнища, м	5x5	2x5
Тепловиділення, МВт	8,0	4,0

Разом з тим, в опублікованих результатах експериментальних досліджень фірми Colt [8] спрямованих на визначення ефективності застосування систем імпульсного димо- та тепловидалення, що були проведені у повнорозмірному макеті паркінгу саме у Великобританії, в якості джерела пожежі приймався піддон із дизельним пальним, розташований у салоні автомобіля, сумарною тепловою потужністю 1 МВт. Фахівцями фірми Colt пожежа автомобіля розташованого біля стіни, приймалась такою, що відповідає пожежі поодинокого автомобіля тепловою потужністю 2 МВт, розташованого по центру паркінгу. Підстави для подібних стверджень не є зрозумілими.

Вибране значення величини теплової потужності пожежі є нижчим, ніж того вимагає BS 7346-6, але на думку фахівців фірми Colt, таке модельне вогнище «є достатньо великим для реалістичної демонстрації та достатньо малим зважаючи на ризик» [8]. Тобто, зрозуміло, що проведений натурний вогневий експеримент мав за мету демонстрацію роботи систем імпуль-

сного димо- та тепловидалення виробництва фірми Colt. Одночасно його результати були використані для валідації CFD аналізу виконаного за допомогою програмного забезпечення FDS (відхилення середньооб'ємного значення температури становило не більше 14,7%, що відповідає значенням отриманим в роботі [6]). Геометрична форма вогнища пожежі приймалась у вигляді паралелепіпеда із п'ятьма палаючими гранями (за винятком нижньої).

В «Рекомендациях по оптимизации роботы систем пожаротушения, дымоудаления и вентиляции при пожарах» [9], що розроблені Всеросійським науково-дослідним інститутом протипожежної оборони (ВНДІПО) наводяться параметри горіння автомобілів (табл.2). Зазначені параметри пожеж можуть застосовуватись у якості вихідних даних при проведенні моделювання розповсюдження небезпечних факторів пожежі за методикою [10].

Таблиця 2

Параметри пожеж легкових автомобілів згідно з методичними рекомендаціями ВНДІПО

Показник	Значення показника
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	31,7
Лінійна швидкість розповсюдження полум'я, м/с	0,0068
Питома швидкість вигоряння, кг/ ($м^2 \cdot с$)	0,0233
Питоме димовиділення, Нп · $м^2$/кг	487
Питоме виділення двоокису вуглецю, кг/кг	1,295
Питоме виділення окису вуглецю, кг/кг	0,097
Питоме споживання кисню, кг/кг	– 2,64

Для оцінки теплової потужності запропонованих значень параметрів горіння автомобілів розрахуємо теплову потужність як:

$$Q_п = Q_н \cdot M_{виг} \cdot S, \quad (1)$$

де $Q_н$ – нижча теплота згоряння, МДж/кг;

$M_{виг}$ – питома масова швидкість вигоряння, кг/($с \cdot м^2$);

S – площа пожежі, $м^2$.

Приймаючи розміри горизонтальної проекції пожежі за 4,145 м×1,620 м (відповідає габаритним розмірам автомобіля ВАЗ 2107) та виходячи із даних, наведених в табл. 2, отримуємо потужність пожежі – 4,95 МВт.

У дослідженнях німецьких фахівців E. Schneeloch , M. Adler та A Schälin [11], що були спрямовані на визначення ефективності роботи системи спринклерного пожежогасіння, призначеної для захисту скляної перегородки, моделювання горіння автомобіля здійснювалось як моделювання горіння бутану із масовою витратою, що збільшувалась від 0 г/с до 56 г/с протягом 10 хв за квадратичною залежністю, після чого залишалась незмінною. Максимальна потужність вогнища пожежі становила 2,52 МВт. Такий спрощений підхід до проведення моделювання може бути пояснений бажанням авторів досліджувати лише процеси теплової взаємодії вогнища пожежі, розпилених струменів води, що утворювались внаслідок роботи спринклерних зрошувачів та скляної перегородки, вогнестійкість якої досліджувалась. Геометрична форма вогнища пожежі задавалась у вигляді, наближеному до зовнішнього вигляду автомобіля з кузовом типу «хетчбек».

Фахівцями Національної лабораторії цивільного будівництва Португалії [12] проводилось моделювання пожежі автомобіля в паркінгу за умови роботи вентиляторів імпульсного димовидалення. Було використано програмне забезпечення FDS. Моделювання горіння автомобіля проводилося з використанням джерела з конвективною тепловою потужністю 4 МВт. Геометрична форма вогнища пожежі приймалась як площина розміром 4х2 м.

Французькими дослідниками H. Biollay та E. Casale [13] було проведено моделювання підземного шестирівневого паркінгу з центральним атріумом глибиною 20 м за допомо-

гою програмного комплексу PHOENICS. Місце виникнення пожежі приймалось на найнижчому рівні паркінгу. Протягом перших 10 секунд пожежі потужність тепловиділення лінійно зростала до 5 МВт після чого 20 хв. залишалася постійною. Геометрична форма вогнища пожежі відповідала формі паралелепіпеда.

Також формі паралелепіпеда відповідала форма вогнища у прикладі наведеному E.Gissi [14]. Зростання теплової потужності пожежі приймалось таким, що зростає за квадратичною залежністю протягом 10 хв.

В роботі голландських дослідників L. Noordijk та T. Lemaire [15] присвяченій обґрунтуванню підходів до моделювання поширення пожежі в підземних паркінгах, пропонується приймати геометричну форму вогнища пожежі легкового автомобіля як таку, що наведена на рис.1. Тобто пропонується модель для обчислювальної сітки з доменами кубічної форми, що має складатись із неоднорідних матеріалів (шини, бампер, кузов, кабіна автомобіля), які мають різні властивості стосовно займання та поширення полум'я.

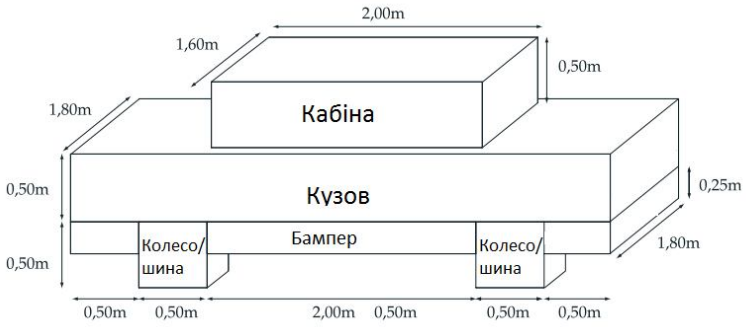
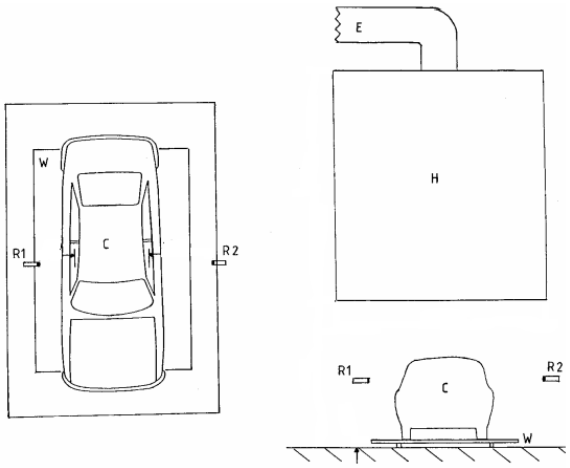


Рис. 1. *Приклад побудови геометричної моделі легкового автомобіля*

Розглянувши декілька наведених вище вихідних даних теплової потужності, що приймались для моделювання пожеж автомобілів, доцільним є звернутись до результатів натурних вогневих експериментальних досліджень з визначення параметрів горіння автомобілів. Враховуючи, що подібні експериментальні дослідження мають значну вартість та складність їх організації й проведення, узагальнення цих даних дасть змогу обґрунтовано підійти до вибору параметрів теплової потужності пожежі легкового автомобіля.

Як правило, експериментальні дослідження з визначення параметрів горіння легкових автомобілів проводяться із використанням обладнання, наведеного на рис.2. Для прикладу обрано схему експериментального обладнання Центру технічних досліджень Фінляндії (VTT) [16].

Запалювання автомобіля проводили за допомогою гептанового пальника потужністю 160 кВт розміщеного в салоні автомобіля. При проведені досліджень визначалась інтенсивність теплового випромінювання під час горіння легкового автомобіля, а також умови розповсюдження полум'я на сусідні автомобілі. Так максимальний тепловий потік на відстані 1 м становив 19-22 кВт/м^2 протягом 4-13 хв. проведення експерименту. На відстані 0,6 м максимальне значення теплового потоку становило 40 кВт/м^2 для 3 хв, а протягом 4-14 хв. – 30 кВт/м^2. При цьому критичний рівень інтенсивності теплового потоку для матеріалів з яких виготовлено автомобіль становить 10-20 кВт/м^2, що сприяє розповсюдженню полум'я на сусідні автомобілі в перші 10 хв пожежі.



C – легковий автомобіль;
*R*1,*R*2 – датчики теплового потоку
H – купол димового каналу
W – вагова платформа
E – димовий канал

Рис. 2. *Схема дослідного обладнання, що використовується для дослідження параметрів горіння легкових автомобілів*

Для порівняння, дані експериментів отримані J. Kruppa [17] у 1998 році при дослідженні горіння автомобілів, виготовлених після 70-80-х років свідчать про максимальну теплову потужність 5 МВт, а автомобілів 90-х – 8,5 МВт. Під час досліджень у половині випадків пожежа розповсюджувалася на сусідні автомобілі розміщені на відстані 0,7 м вже на 12 хв експерименту. Найпершими елементами, що загоряються, є колеса і гумові деталі автомобіля.

C. Steinert [18] виявив, що максимум тепловиділення становить 1,7-4,6 МВт від одного автомобіля, а при горінні двох або трьох – потужність тепловиділення становить 5,5-8,9 МВт. Пожежа розповсюджується на сусідні автомобілі в діапазоні 12-52 хв після загоряння першого автомобіля. В момент розповсюдження полум'я на сусідні автомобілі потужність тепловиділення становила 1,9-4,3 МВт.

Метою роботи англійських дослідників M. Shipp, J.Fraser та ін. [19] було визначення відстаней розповсюдження полум'я при пожежах автомобілів, теплової потужності таких пожеж, визначення кількості утворення диму і токсичних продуктів згоряння. Натурні вогневі випробовування було проведено на стенді розміром 12x6x2,9 м (імітація фрагмента паркінгу) всередині якого розташовувались автомобілі, що досліджувались. В паливному баці кожного автомобіля знаходилось 20 л пального. Загалом протягом 2007-2009 рр. було проведено 14 дослідів, кількість автомобілів в яких варіювалась від 1 до 4.

Були отримані дані щодо критичного рівня інтенсивності теплового потоку для елементів автомобілів, який знаходиться в межах від 8 до 19 кВт/м^2, що корелюється з наведеними вище даними. Визначено, що розповсюдження полум'я на поряд розміщені автомобілі відбувалося вже на 10 хв випробовування. Наведено графічні дані залежності потужності тепловиділення, температури і концентрації токсичних газів від часу після запалювання для різних варіантів випробовування. Так при горінні одного автомобіля максимальна потужність полум'я становить 3,8-4,8 МВт на 40-50 хвилині експерименту. Випробовування з використанням спринклерної системи показали свою ефективність для стримування розповсюдження пожежі (розповсюдження пожежі на сусідні автомобілі не відбулося).

Значний інтерес являє собою магістерська робота виконана в університеті Canterbury (Нова Зеландія) дослідником Y. Li [20]. В ній узагальнено досить значний об'єм відомих даних про дослідження горіння автомобілів, зокрема результати досліджень J. Kruppa [17] та C. Steinert [18], що були наведені вище, а також ряд інших (Butcher (1968), Gewain (1973), Bennetts (1985), Burgi (1971), BHP (1987), Bennetts (1990), Kitano (2000) тощо). Зведені до однієї координатної площини дані свідчать, що тривалість горіння легкового автомобіля не перевищує 50 хв Y. Li вважає, що теплова потужність горіння автомобіля розвивається за квадратичною залежністю до значення піка 4-9 МВт і залежить від виду транспортного засобу.

Згасання пожежі автомобіля супроводжується зниженням теплової потужності за лінійною залежністю протягом 600 с.

Висновки. За результатами аналізу підходів до моделювання пожеж автомобілів, а також узагальнення результатів відповідних експериментальних досліджень можна зробити такі висновки.

1. Горіння у підземних об'єктах автотранспортної інфраструктури такого складного з точки зору неоднорідності пожежного навантаження об'єкта, як легковий автомобіль, з метою проведення моделювання, може бути прийняте як вогнище, теплова потужність якого має становити від 4 МВт (легковий автомобіль середнього розміру) до 9 МВт (легковий автомобіль великого розміру, мікроавтобус, мінівен тощо).

2. Зростання теплової потужності пожежі має здійснюватись за квадратичною залежністю протягом 600 с. Зниження теплової потужності також має відбуватись за лінійною залежністю протягом 600 с. Загальний час горіння автомобіля має прийматись таким, що дорівнює 50 хв.

3. Під час проведення моделювання необхідно враховувати можливість розповсюдження пожежі на близько розташовані автомобілі зважаючи на критичне значення інтенсивності теплового випромінювання, за якого може відбуватись займання автомобіля – 10-20 кВт/м^2.

4. Зважаючи на необхідність врахування розповсюдження пожежі на розташовані поряд автомобілі, доцільним є моделювання поверхні горіння наближеної до вигляду реального автомобіля із деталізацією окремих елементів відповідно до розмірів сітки обчислювального домену.

5. Моделювання розповсюдження диму (втрата видимості) та інших летких продуктів згоряння (CO, CO_2) може бути проведено на підставі даних, наведених в «Рекомендациях по оптимизации действия систем пожаротушения, дымоудаления и вентиляции при пожарах»[9].

Список літератури:

1. **Рудяк М. С.** Эколого-экономическое обоснование рационального использования городского подземного пространства для гражданских объектов : Дис. ... д-ра экон. наук : 08.00.05. – М., 2003. – 227 с.
2. **Монбланский туннель** [Електронний ресурс] Википедия – Режим доступу: http://ru.wikipedia.org/wiki/монбланский_туннель.
3. **Готардский туннель** [Електронний ресурс] Википедия – Режим доступу: http://ru.wikipedia.org/готардский туннель.
4. **Туннели** [Електронний ресурс] Swissword – Режим доступу: http://www.swissworld.org/ru/switzerland/ehkskljuziv/shveicarskie_alpy/tunneli/
5. **Девлишев П. П.** Обеспечение пожарной безопасности в тоннелях [Електронний ресурс] АВОК – Режим доступу: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3998
6. **Огурцов С.Ю.** Сучасні підходи до моделювання розповсюдження небезпечних факторів пожежі // Науковий вісник УкрНДІПБ. – К.: УкрНДІПБ, 2010. – № 2(22). – С.12-18.
7. **BS 7346-7:2006** Component for smoke and heat control system - Part 7: Code practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control system for covered car parks.
8. **Car Park Ventilation (CPV).** Full scale live smoke tests. Impulse ventilation for smoke control/Colt International Limited/ 8 p.
9. **Пузач С. В.,** Чумаченко А. П., Рекомендации по оптимизации действия систем пожаротушения, дымоудаления и вентиляции при пожарах [Електронний ресурс]– Режим доступу http://www.gosthelp.ru/text/RekomendaciiRekomendaciip223.html.
10. **С.В. Пузач,** А.П. Чумаченко, Ю.И. Козлов, В.М. Бубнов, В.С. Родин. Методика расчета с компьютерной программой по определению фактических пределов огнестойкости и моделирования действий систем пожаротушения, механической вентиляции и дымоудаления при пожарах. – М.: ВНДІПО. – 2004.

11. E. Schneeloch, M. Adler, A Schälin Transient burning of a vehicle as a leading edge example of CFD simulations in safety and environment engineering [Електронний ресурс] V конференція ECOMASS – Режим доступу: www.web.univ-ubs.fr/limatb/ EG2M/Disc_Seminaire/...CFD2010/.../01241.pdf

12. João L. Aveiro, João C. Viegas. Smoke control in an underground car park with impulse ventilation. V European Conference on Computational Fluid Dynamics. ECCOMAS CFD 2010. J. C. F. Pereira and A. Sequeira (Eds). Lisbon, Portugal, 14-17 June 2010.

13. H. Biollay, E. Casale. Numerical simulation of fire in the underground parking of Annecy City Hall using the Phoenics code. Scetauroute tunneling and underground works division – Annecy, France. [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.cham.co.uk/PUC/.../Scetaroute.doc.

14. E.Gissi, An inroduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview [Електронний ресурс] Emanuele Gissi – Режим доступу: http:http://sites.google.com/a/corbezzolo.org/pages /Home/download_FSE.

15. T. Lemaire, L. Noordijk, Modelling of fire spread in car parks, TNO Centre for Fire Research, Delft, the Netherlands [Електронний ресурс]– Режим доступу:heron.tudelft.nl/50-4/2.pdf .

16. Johan Mangs. On the fire dynamics of vehicles and electrical equipment. VTT Building and Transport. Departament of Physical Sciences Faculty of Science University of Helsinki. Helsinki, Finland. VTT Publications 521. ESPOO 2004.

17. Kruppa J., Joyex,D.&Zhao,B. 1998 Evaluation of the fire resistance of a car park structure based on experimental evidences. In.:Proceedings of Second International Conference on Fire Research and Engineering (ICFRE2). Gaitheburg,MD, 3-8, August 1997. Beteshda, MD: Society of Fire Protection Engineers. – Pp.416-426.

18. Steinert, C., Experimental Investigation of Burning and Fire Jumping Behavior of Automobiles, VFDB Journal, 4: 163-172.

19. Martin Shipp, Jeremy Fraser-Mitchell, Richard Chitty, Róisín Cullinan, David Crowder, and Phil Clark. Fire spread in car parks; a summary of the CLG/BRE research programme and findings. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.info4fire.com/ internationalfirex/firex-international-content/full/fire-spread-in-car-parks?redirect=%2. Finternationalfirex %2Ffirex -international-content.

20. Yuguang Li. Assessment of vehicle fires in New Zealand parking buildings. Fire engineering research report 04/2. May 2004, [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.civil.canterbury.ac.nz/fire/pdfreports/YLi04%20.pdf.

С.Ю. Огурцов

ОБОСНОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРОВ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В ПОДЗЕМНЫХ ОБЪЕКТАХ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье приводятся результаты аналитических исследований динамики и параметров горения легковых автомобилей, которые могут быть использованы при проведении математического моделирования пожаров в подземных объектах автотранспортной инфраструктуры. Обобщенны данные по тепловой мощности очага пожара легкового автомобиля, закономерностей изменения ее во времени. Предложено принимать геометрическую форму очага пожара при проведении моделирования, как приближенную к виду реального автомобиля с детализацией его отдельных элементов с учетом размеров ячейки вычислительного домена.

Ключевые слова: моделирование пожаров, пожары автомобилей, противопожарная защита паркингов

S.Y. Ogurtsov

VALIDATION OF DATA FOR MODELLING FIRES IN PASSENGER CARS IN UNDERGROUND UNITS OF TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE

The article presents the results of analytical studies of the dynamics and parameters of car fires, which can be used during their mathematical modelling in underground units of transportation infrastructure. Data on the thermal capacity of the seat of car fires, and its changes over time are generalized. It is proposed to use a geometric shape of seat of fire during modelling as approximate to a real car fire with the details of certain items taking account the size of a cell of computing domain.

Key words: fire modelling, fire in vehicles, fire protection of parking lots.

❖ ❖ ❖