УДК 504.5:621.565.8
DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.54.698

ОЦІНКА РИЗИКУ ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ У ВИПАДКУ АВАРІЙНОГО ГОРІННЯ

БІЛЯЄВ М. М.[1], *докт. техн. наук, проф.,*
БЕРЛОВ О. В.[2*] , *канд. техн. наук, доц.,*
БІЛЯЄВА В. В.[3], *канд. техн. наук, доц.,*
ЧЕРЕДНИЧЕНКО Л. А.[4] , *канд. техн. наук, доц.*

[1] Кафедра гідравліки та водопостачання, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCIDID: 0000-0002-1531-7882
[2*] Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548
[3] Кафедра «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124
[4] Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: cherednychenko.liudmyla@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1457-9282

Анотація. ***Постановка проблеми.*** Розглядається задача оцінювання ризику термічного ураження людей під час пожежі на залізничному транспорті. Ставиться задача визначення температурних полів під час пожежі та прогнозування на базі цієї інформації ризику термічного ураження людей. ***Мета роботи*** – розробка числової моделі для оцінювання ризику термічного ураження людей. ***Методика.*** Для моделювання процесу теплового забруднення атмосферного повітря використано двовимірне рівняння енергії. Поле швидкості повітряного потоку розраховується на базі гідродинамічної моделі безвихрових течій ідеальної рідини. Для числового інтегрування цього рівняння застосовується метод Річардсона. Для числового інтегрування рівняння енергії здійснюється розщеплення цього рівняння на два диференціальні рівняння. Перше рівняння описує поширення температури внаслідок руху повітряних мас. Друге рівняння описує поширення температури внаслідок теплопровідності. Для числового інтегрування першого рівняння використано неявну різницеву схему розщеплення. Для числового інтегрування другого рівняння застосовується метод Річардсона. ***Наукова новизна***. Розроблено ефективну числову модель, що дозволяє методом обчислювального експерименту визначати ризик термічного ураження людей у разі виникнення пожежі в транспортному коридорі. Модель базується на числовому інтегруванні фундаментальних рівнянь гідроаеродинаміки та тепломасопереносу, яка дозволяє врахувати деформацію полів температури в повітрі внаслідок впливу різного роду перешкод. ***Практична значущість.*** Розроблена модель дозволяє прогнозувати динаміку зміни температурних полів у повітрі, що виникають під час пожежі. Модель може бути використана для серійних розрахунків з метою визначення зон ризику термічного ураження людей. ***Висновки.*** Створено код для проведення обчислювального експерименту на базі розроблених числових моделей, який дозволяє швидко, на комп'ютерах середньої потужності, розрахувати температурні поля, що формуються під час пожежі. На основі цієї інформації прогнозується ризик термічного ураження. Наведені результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: *числове моделювання; ризик ураження; аварійне горіння; теплове забруднення повітря*

ОЦЕНКА РИСКА ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ В СЛУЧАЕ АВАРИЙНОГО ГОРЕНИЯ

БЕЛЯЕВ Н. Н.[1*], *докт. техн. наук, проф.,*
БЕРЛОВ А. В.[2*], *канд. техн. наук, доц.*
БЕЛЯЕВА В. В.[3], *канд. техн. наук, доц.*
ЧЕРЕДНИЧЕНКО Л. А.[4], *канд. техн. наук, доц.*

[1*] Кафедра гидравлики и водоснабжения, Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днипро, Украина, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

[2*] Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднипровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID ID:0000-0002-7442-0548
[3*] Кафедра «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днипровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49000, Днипро, Украина, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124
[4*] Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднипровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: cherednychenko.liudmyla@pgasa.dp.ua, ORCID ID:0000-0002-1457-9282

Аннотация. ***Постановка проблемы.*** Рассматривается задача оценки риска термического поражения людей при пожаре на железнодорожном транспорте. Ставится задача определения температурных полей при пожаре и прогнозирования на базе этой информации риска термического поражения людей. ***Цель работы*** – разработка численной модели для оценки риска термического поражения людей. ***Методика.*** Для моделирования процесса теплового загрязнения атмосферного воздуха использовано двухмерное уравнение энергии. Поле скорости воздушного потока рассчитывается на базе гидродинамической модели безвихревых течений идеальной жидкости. Для численного интегрирования этого уравнения используется метод Ричардсона. Для численного интегрирования уравнения энергии осуществляется расщепление этого уравнения на два дифференциальных уравнения. Первое уравнение описывает распространение температуры вследствие движения воздушных масс. Второе описывает распространение температуры вследствие теплопроводности. Для численного интегрирования первого уравнения используется неявная разностная схема расщепления. Для численного интегрирования второго уравнения используется метод Ричардсона. ***Научная новизна.*** Разработана эффективная численная модель, позволяющая методом вычислительного эксперимента определять риск термического поражения людей при возникновении пожара в транспортном коридоре. Модель базируется на численном интегрировании фундаментальных уравнений гидроаэродинамики и тепломассопереноса, и позволяет учесть деформацию полей температуры в воздухе в результате воздействия разного рода препятствий. ***Практическая значимость.*** Разработанная модель позволяет прогнозировать динамику изменения температурных полей в воздухе, возникающих при пожаре. Модель может быть использована для проведения серийных расчетов с целью определения зон риска термического поражения людей. ***Выводы.*** Создан код для проведения вычислительного эксперимента на базе разработанных численных моделей. Разработанный код позволяет быстро на компьютерах средней мощности рассчитать температурные поля, формирующиеся при пожаре. На основе этой информации прогнозируется риск термического поражения. Представлены результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: *численное моделирование; риск поражения; аварийное горение; тепловое загрязнение воздуха*

RISK ASSESSMENT OF THERMAL DAMAGE IN THE EVENT OF EMERGENCY BURNING

BILIAIEV M.M.[1], *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BERLOV O.V. [2*], *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BILIAIEVA V.V.[3],*Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*
CHEREDNYCHENKO L.A.[4], *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

[1] Department of Hydraulics and Water Supply, Dniprovskyi National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana Str., 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882
[2*] Departmentof Workplace Safety and Health, State Higher Education Institution "Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548
[3] Department of «Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer», Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Av., 49000, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124
[4] Department of Workplace Safety and Health, State Higher Education Institution "Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: cherednichenko@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1457-9282

Abstract. ***Problem statement.*** The task of assessing the risk of thermal damage to people in case of fire is considered. We consider a fire in the railway transport. The task is to determine the temperature fields in a fire and predict the risk of thermal damage to people based on this information. ***The purpose of the article.*** Development of a numerical model for assessing the risk of thermal damage to people. ***Methodology.*** To simulate the process of thermal pollution of atmospheric air, a two-dimensional energy equation is used. The air velocity field is calculated on the basis

of a hydrodynamic model of irrotational flows of an ideal fluid. For the numerical integration of this equation, the Richardson method is used. For the numerical integration of the energy equation, this equation is split into two differential equations. The first equation describes the distribution of temperature due to the movement of air masses. The second equation describes the distribution of temperature due to thermal conductivity. For the numerical integration of the first equation, an implicit difference splitting scheme is used. For numerical integration of the second equation, the Richardson method is used. ***Scientific novelty.*** An effective numerical model has been developed that allows the method of computational experiment to determine the risk of thermal injury to people in the event of a fire in the transport corridor. The model is based on the numerical integration of the fundamental equations of hydroaerodynamics and heat and mass transfer. The model allows to take into account the deformation of temperature fields in the air due to the influence of various obstacles. ***Practical significance.*** The developed model allows to predict the dynamics of changes in temperature fields in the air that occur during a fire. The model can be used for serial calculations to determine areas of risk of thermal injury to humans. ***Conclusions.*** The code for carrying out computational experiment on the basis of the developed numerical models is created. The developed code allows you to quickly, on medium-power computers, calculate the temperature fields generated by a fire. Based on this information, the risk of thermal damage is predicted. The results of a computational experiment are presented.

Keywords: *numerical simulation; risk of injury; accidental burning; thermal air pollution*

Постановка проблеми. Прогнозування ризику ураження людей у різних аварійних ситуаціях відносять до класу дуже складних, тому що величина цього ризику залежить від багатьох факторів [1−3]. Серед задач цього класу необхідно виділити окремо термічне ураження людей.

Рис.1. Пожежа на залізничній станції (https://delo.ua/econonomyandpoliticsinukraine/v-cherkasskoj-oblasti-soshli-s-relsov-vagony-s-neftju-gorjat-zhi-245148/)

Небезпека термічного ураження людей виникає за різних аварійних ситуацій (пожежі на транспорті, рис. 1, тощо) і це створює проблему адекватного визначення ризику такого ураження за впливу різних фізичних факторів.

Температура повітря біля місця горіння може бути дуже високою. Рух повітряних мас спричинює формування зон термічного ураження на певній відстані від місця горіння. В цій зоні небезпеки можуть бути різні об’єкти, що мають соціальне значення.

Для оцінювання ризику можливого термічного ураження людей потрібно розробляти спеціалізовані математичні моделі.

Аналіз останніх досліджень. Для оцінювання техногенних ризиків широко використовуються три класи моделей: емпіричні, аналітичні, числові [4; 6; 8; 9−12]. Моделі кожного класа мають свої переваги та недоліки. Але наразі існує певний дефіцит моделей, що дозволяють визначити техногенний ризик з урахуванням комплексу фізичних факторів, які впливають на його величину (наприклад, урахування рельєфу місцевості, наявність різного роду перешкод та т. ін.). Тому розроблення таких моделей стає актуальним науковим завданням.

Мета статті – побудова CFD моделі для експрес- оцінювання ризику термічного ураження під час пожежі у транспортному коридорі.

Методика. Ризик термічного ураження виникає у разі аварійного горіння вантажів, що транспортуються в значній кількості залізницею. У цьому випадку виникає задача оцінювання ризику ураження з метою визначення небезпечних зон біля транспортного коридору. Будемо враховувати, що якщо температура повітря в робочій зоні складає понад 100 ^{0}C, за якої має місце повна денатурація білка), то в цій точці робочої зони приймається, що ризик ураження дорівнює 100 %.

Базовим рівнянням для розрахунку теплових полів є рівняння енергії [2; 5; 7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}=div\left(a\, grad\, T\right), \qquad (1)$$

де T– температура; u,v – складові вектора руху повітряного потоку; $a=\left(a_x,a_y\right)$ – коефіцієнти температуропровідності; x_i, y_i– декартові координати; t – час.

Розглянемо граничні умови для рівняння (1) [7]:

1. На межі, де повітряний потік входить в область:

$$T=T_{in},$$

де T_{in} – фонова температура повітря.

2. На межі, де повітряний потік виходить із розрахункової зони:

$$T_{i+1,j}=T_{i,j},$$

де $T_{i+1,j}$ – температура в останній різницевій комірці; $T_{i,j}$ – температура в попередній комірці.

3. На поверхні об'єктів $\frac{\partial T}{\partial n}=0$.

Початкова умова ($t=0$): $T=T_0$, де T_0 – температура повітря там, де має місце пожежа, в іншій частині розрахункової області температура дорівнює фоновій температурі [7].

Оскільки ми будемо розглядати процес формування температурних полів в області, де є різного роду перешкоди – наприклад, вагони, потрібно врахувати в математичній моделі деформацію поля температури за взаємодії нагрітого потоку з перешкодами. Врахування цього впливу можливо здійснити, якщо ми розрахуємо деформацію поля швидкості повітряного потоку під час обтікання перешкод. Для розв'язання цієї задачі будемо використовувати таке рівняння гідродинаміки

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}=0; \qquad (2)$$

$$u=\frac{\partial P}{\partial x}, \quad v=\frac{\partial P}{\partial y}, \qquad (3)$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови [2; 5; 7]:

1. $\frac{\partial P}{\partial n}=0$ – на твердих границях;

2. $\frac{\partial P}{\partial n}=V_n$ – на границі, де потік, V_n – відома швидкість повітря;

3. P = const – на границі «виходу» потоку.

На базі рівняння (2) та залежностей (3) визначається деформація поля швидкості повітряного потоку за наявності перешкод.

Методика розв'язання. Для числового інтегрування рівнянь (1), (2) застосовується скінчено - різницевий метод розв'язання. Числове інтегрування здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Температура повітря та значення потенціалу швидкості повітряного потоку розраховуються в центрах різницевих комірок. Компоненти вектора швидкості визначаються на сторонах різницевих комірок.

Для числового інтегрування (2) приведемо його до вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \qquad (4)$$

де t – фіктивний час.

Для числового інтегрування цього рівняння застосовуємо метод Річардсона. Розрахункова залежність у такому випадку має вигляд:

$$P_{i,j}^{n+1}=P_{i,j}^{n}+\mathrm{V}t\frac{P_{i+1,j}^{n}-2P_{i,j}^{n}+P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2}+ \\ +\mathrm{V}t\frac{P_{i,j+1}^{n}-2P_{i,j}^{n}+P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}. \qquad (5)$$

Процедура визначення потенціалу швидкості закінчується, коли:

$$\left|P_{i,j}^{n+1}-P_{i,j}^{n}\right|\le \varepsilon,$$

де ε – мале число. Для початку розрахунку приймаємо $t=0$: $P=0$.

Далі здійснюється розрахунок швидкості повітряного потоку:

$$u_{ij}=\frac{P_{i,j}-P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{ij}=\frac{P_{i,j}-P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Після розрахунку швидкості повітряного потоку починається розв'язання рівняння енергії. Для нього також використовуємо неявну різницеву схему розщеплення. Спочатку виконаємо таке розщеплення:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}=0, \qquad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(a_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(a_y\frac{\partial T}{\partial y}\right). \qquad (7)$$

Для числового інтегрування рівняння (6) ми використовуємо такі залежності [2; 5; 7]:

$$\frac{\partial uT}{\partial x}=\frac{\partial u^+T}{\partial x}+\frac{\partial u^-T}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vT}{\partial y}=\frac{\partial v^+T}{\partial y}+\frac{\partial v^-T}{\partial y},$$

$$u^+=\frac{u+|u|}{2},\, u^-=\frac{u-|u|}{2},$$

$$v^+=\frac{v+|v|}{2},\, v^-=\frac{v-|v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+T}{\partial x}\approx\frac{u^+_{i+1,j}T^{n+1}_{i,j}-u^+_{i,j}T^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x}=L^+_xT^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^-T}{\partial x}\approx\frac{u^-_{i+1,j}T^{n+1}_{i+1,j}-u^-_{i,j}T^{n+1}_{i,j}}{\Delta x}=L^-_xT^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+T}{\partial y}\approx\frac{v^+_{i,j+1}T_{i,j}-v^+_{i,j}T_{i,j-1}}{\Delta y}=L^+_yT^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^-T}{\partial y}\approx\frac{v^-_{i,j+1}T_{i,j+1}-v^-_{i,j}T_{i,j}}{\Delta y}=L^-_yT^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння (6) записується так [2; 5; 7]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{T^k_{i,j}-T^n_{i,j}}{\Delta t}+L^+{}_xT^k+L^+{}_yT^k=0; \qquad (8)$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{T^{n+1}_{i,j}-T^k_{i,j}}{\Delta t}+L^-{}_xT^{n+1}+L^-{}_yT^{n+1}=0; \qquad (9)$$

$$\frac{T^{n+1}_{i,j}-T^k_{i,j}}{\Delta t}+L^-{}_xT^{n+1}+L^-{}_yT^{n+1}=0. \qquad (10)$$

Для числового інтегрування рівняння (10) застосовується метод Річардсона. Розрахункова залежність має вигляд:

$$T^{n+1}_{i,j}=T^n_{i,j}+\mathrm{V}t\frac{T^n_{i+1,j}-2T^n_{i,j}+T^n_{i,j}}{\Delta x^2}a_x+ +\mathrm{V}t\frac{T^n_{i,j+1}-2T^n_{i,j}+T^n_{i,j-1}}{\Delta y^2}a_y. \qquad (11)$$

Невідоме значення температури T в кожному рівнянні обчислюється за формулою «біжучого рахунку».

Здійснено програмну реалізацію розглянутих різницевих залежностей. Для програмування використанио мову FORTRAN.

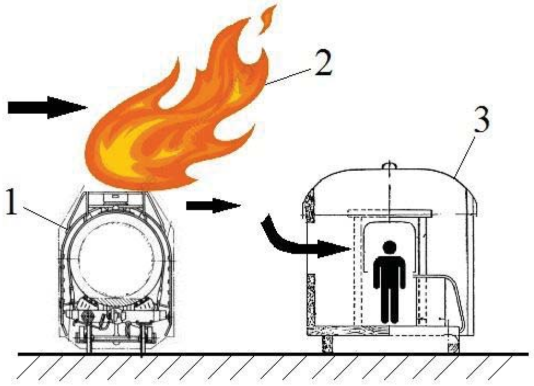

Рис. 2. Схема розрахункової області: 1 – місце горіння; 2 – полум'я; 3 – пасажирський вагон

Результати. На базі розробленої числової моделі проведено обчислювальний експеримент.

На рисунку 2 показано схему розрахункової області.

На рисунках 3 – 5 показано зміну температури в розрахунковій області. Кожне число показує температуру у відсотках, від максимальної $T=1000^{\mathrm{o}}C$, тобто, наприклад, числу 47 на рисунку відповідає температура $T=470^{\mathrm{o}}C$. Такий друк температурного поля дуже зручний для швидкого аналізу теплового забруднення повітря та визначення меж зони ризику термічного ураження, тобто зони, де температура перевищує $T=100^{\mathrm{o}}C$.

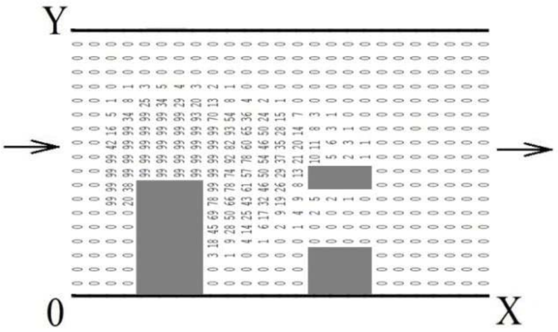

Рис. 3. Зона теплового забруднення (ізотерми), t = 5 с

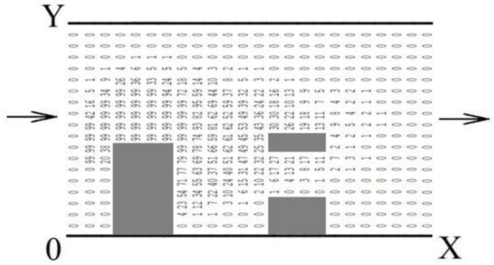

Рис. 4. Зона теплового забруднення (ізотерми), t = 10 с

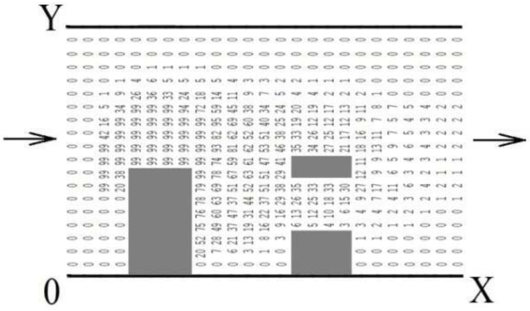

Рис. 5. Зона теплового забруднення (ізотерми), t = 15 с

Як бачимо з наведених рисунків, біля місця пожежі формується інтенсивна зона теплового забруднення. Дуже швидко нагріте повітря потрапляє всередину пасажирського вагона, що викликає ризик термічного ураження людей у вагоні. Для аналізу ризику термічного ураження людей у вагоні побудовано графік зміни температури із часом усередині вагона (рис. 6).

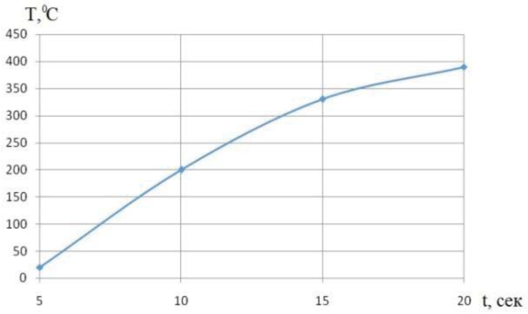

Рис. 6. Зміна температури повітря в середині вагону

Із рисунка 6 видно, що приблизно за 8 с після початку пожежі температура всередині вагона перевищує $T = 100^{o} C$. Тобто це момент часу, коли виникає ризик термічного ураження людей у вагоні, з тяжкими наслідками.

Зазначимо, що час розрахунку склав 4 секунди.

Висновки. 1. Розроблено ефективну числову модель для оцінювання ризику термічного ураження людей у випадку пожежі на залізничному транспорті.

2. Розроблена модель базується на використанні рівняння енергії та рівняння руху повітряних мас. Особливість моделі полягає у швидкості розрахунку на комп’ютері.

3. Результати обчислювального експерименту показали, що для сценарію, який розглядався, під час пожежі в транспортному коридорі, протягом 10 с виникає ризик термічного ураження людей в пасажирському вагоні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алымов В. Т., Тарасова Н. П. Техногенный риск: Анализ и оценка : учеб. пособ. для вузов. Москва : ИКЦ «Академкнига», 2004. 118 с.

2. Беляев Н. Н., Гунько Е. Ю., Росточило Н. В. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография. Днипро : «Акцент ПП», 2014. 136 с.

3. Беляев Н. Н., Гунько Е. Ю., Кириченко П. С., Мунтян Л. Я. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте. Кривой Рог : изд. Р. А. Козлов, 2017. 127 с.

4. Стоецкий В. Ф., Голинько В. И., Дранишников Л. В. Оценка риска при авариях техногенного характера. *Науковий вісник НГУ.* 2014. № 3. С. 117–124.

5. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст]. Київ : Наук. думка, 1997. 368 с.

6. Anthony Michael Barret. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectivness. Dissertation. *(Pittsburg, Pennsylvania, USA)*, 2009. 123 p.

7. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. 2012. Pp. 87–91.

8. Chan W. R., Nazaroff W. W., Price P. N., Gadgil A. J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place. II: Residental Districts, 2008. 31 p. URL: http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/928232 (Accessed 29 March 2014). doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.

9. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool. ALOHA Software, Quality of Life. 9. 2018. Pp. 38–45.

10. John S. Nasstrom, Gayle Sugiyama, Ronald L. Baskett, Shawn C. Larsen and Michael M. Bradley. The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Supports System for Radiological and NUCLEAR Emergency Preparedness and Response. *Int. J. Emergency Management.* 2007. № 3, vol. 4. Pp. 1–32.

11. Lacome J.-M., Truchot D., Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 2017. Pp. 1–5.

12. Cejun Cao and others. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. 2017. Vol. 9, iss.11. doi: 10.3390/su9112103.

REFERENCES

1. Alymov V.T. and Tarasova N.P. *Tekhnogennyy risk: Analiz i otsenka: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Technogenic risk: Analysis and evaluation : A manual for higher education institutions]. Moscow : IKTs «Akademkniga», 2004, 118 p. (in Russian)

2. Belyayev N.N., Gunko E.Yu. and Rostochilo N.V. *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv* : *monografiya* [Protection of buildings from the penetration of hazardous substances into them : monograph]. Dnipropetrovsk : «Aktsent PP», 2014, 136 p. (in Russian)

3. Belyaev N.N., Gun'ko E. Yu., Kirichenko P.S. and Muntyan L.Ya. *Otsenka tekhnogennogo riska priemissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte* [Assessment of man-made risk in the emission of hazardous substances in railway transport]. Krivoy Rog : Kozlov R. A. Publ., 2017, 127 p. (in Russian)

4. Stoetskiy V.F., Golin'ko V.I. and Dranishnikov L.V. *Otsenka riska pri avariyakh tekhnogennogo kharaktera* [Risk assessment for accidents of anthropogenic nature]. *Naukovyi visnyk NHU* [Scientific bulletin of NMU]. 2014, no. 3, pp. 117–1124. (in Russian)

5. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K. .and Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spreading in the environment]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian)

6. Anthony Michael Barret. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectivness. Dissertation. Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2009, 123 p.

7. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. 2012, pp. 87–91.

8. Chan W.R., Nazaroff W.W., Price P.N. and Gadgil A.J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place. II: *Residental Districts*, 2008. 31 p. URL: http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/928232 (Accessed 29 March 2014). doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.

9. Danijela Ilić Komatina, Jovana Galjak and Svetlana Belošević. Simulation of chemical accidents with acetylene in „messer tehnogas“ kraljevo plant by „aloha“ software program. Publication in Natural Sciences. 2018, 8(2). doi:10.5937/univtho8-18014.

10. John S. Nasstrom, Gayle Sugiyama, Ronald L. Baskett, Shawn C. Larsen and Michael M. Bradley. The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Supports System for Radiological and NUCLEAR Emergency Preparedness and Response. Int. J. Emergency Management. 2007, no. 3, vol. 4, pp. 1–32.

11. Lacome J.M., Truchot D. and Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. 2017.

12. Cao C., Li C., Yang Q. and Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. Sustainability. 2017, 9 (11). doi: 10.3390/su9112103.

Надійшла до редакції: 12.09.20.