

УДК 502.36/.504.3.054:656.2

М. М. БІЛЯЄВ – д.т.н., професор, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, кафедра «Гідравліка та водопостачання», gidravlika2013@mail.ru

О. В. БЕРЛОВ – здобувач, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, кафедра «Гідравліка та водопостачання», berlov_81@mail.ru

ЗАСІБ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ІМПУЛЬСНІЙ ЕМІСІЇ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Постановка проблеми

Залізничний транспорт здійснює перевезення в великих масштабах хімічно небезпечних вантажів. Зокрема, існує реальна загроза поширення забруднюючих речовин у випадку аварійної ситуації при транспортуванні твердого ракетного палива (ТРП) залізничним транспортом та невідворотно, в цьому випадку, токсичного ураження людей. Використання емпіричних моделей для прогнозу наслідків аварій, які застосовуються в Україні при надзвичайних ситуаціях на транспорті, на даний час не застосовується за кордоном для розв'язання таких відповідальних задач [6,7,11]. Це обумовлено тим, що ці методики засновані на використанні малоінформативних моделей і не відповідають сучасним вимогам до прогнозної інформації [11]. Окрім того аналіз наукової літератури показав, що відсутній опис технологій та способів по захисту атмосфери від забруднення продуктами горіння ТРП. Тому актуальною задачею є розробка моделей для прогнозу забруднення атмосферного повітря та способів його захисту у разі виникнення надзвичайної ситуації при транспортуванні ТРП залізничним транспортом, що враховують специфіку об'єкта та емісію небезпечних речовин (емісія забруднювача відбувається в залізничному вагоні, напівбезперервний викид небезпечної речовини, тощо).

Мета

Метою даної роботи є оцінка рівня захищеності вагона, в якому знаходиться ТРП та розробка засобу захисту атмосфери від забруднення продуктами горіння ТРП і створення чисельної моделі для обґрунтування прийнятих технічних рішень.

Оцінка вразливості вагона

Розглядалася ступінь захищеності ТРП в вагоні при ініційованому впливі в разі пострілу з автомату АК-47 в стінку вагона (рис.1) [1].



Рис. 1. Пробиття кулею сталевого листа

Для оцінки рівня вразливості вагона спочатку була розрахована швидкість кулі за перешкодою. Якщо ця швидкість досить висока, то куля пошкодить корпус ТРП і викличе його загоряння. Для розрахунку швидкості за перешкодою використовувалась залежність [1]:

$$v_{over} = \alpha (v^p - v_{min}^p)^{1/p}.$$

Для розрахунку параметра v_{min} використана формула Жакоб-де-Марра [1,10]:

$$v_{\min} = 141 \frac{d_c^{0,75} b^{0,5}}{m_c^{0,5}},$$

де d_c і m_c – характеристики сердечника кулі; b – товщина перешкоди; p – функція, залежить від кута обстрілу Θ , $p = 1,5 + z/3$, $z = \frac{b}{R}(\sec \Theta)^{0,75}$; R – калібр кулі; α – параметр, що залежить від механізму руйнування броні при пробитті за типом проколювання ($\alpha = 1$ для конічної форми кулі).

Розрахункова схема задачі представлена на рис. 2.

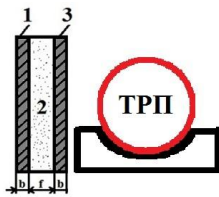


Рис. 2. Розрахункова схема задачі:

1, 3 – сталеві стінки корпусу залізничного вагона товщиною b ; 2 – внутрішній простір між листами сталі товщиною f

Використовуючи наведені вище залежності, був виконаний розрахунок швидкості за перешкодою для кожного сталевих листів. Так як стінка залізничного вагона представляє з себе рознесену перешкоду з двох сталевих листів, то розрахункове значення швидкості за першою перешкодою склало – $v_{1over} = 554$ м/с; за другою перешкодою – $v_{2over} = 356$ м/с. Таким чином, при такій швидкості кулі відбудеться механічне пошкодження корпусу з ТРП.

Далі проведено оцінку значення температури кулі, після проходження другої сталеві перепони, тобто температури з якою куля впливає на корпус ТРП. Для цього використовують залежність [8]:

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{c},$$

де ΔE – енергія, яка припадає на 1 г свинцю (маса свинцевої сорочки становить близько 4 г), $c = 0,155$ Дж/(г×К) – теплоємність свинцю.

Для визначення величини ΔE спочатку необхідно розрахувати величину повної енергії:

$$E = \frac{m_c v_{2over}^2}{2}.$$

Таким чином, при значеннях $m_c = 7,9$ г, $v_{2over} = 356$ м/с отримуємо $E = 500,6$ Дж.

Тоді питома енергія, яка припадає на 1 г свинцю складе $\Delta E = E/4 \approx 125$ Дж. Значення шуканого параметра – температури, становить порядку 800 °С, а загоряння ТРП відбувається при температурі близько 200 °С. Це означає, що куля викличе не тільки механічне пошкодження корпусу ТРП, але і такий тепловий вплив, що призведе до спалаху ТРП і емісії небезпечних речовин в атмосферу.

На другому етапі досліджень розв'язана задача по підвищенню ступеня захищеності ТРП в вагоні. Пропонується всередині, біля другої стінки вагона поставити керамічний захист. Цей захист є шаром бронекераміки завтовшки h (рис. 3).

В цьому випадку куля, після проходження другої стінки «загрузне» в керамічному захисті. Для забезпечення такого захисту слід визначити необхідну товщину шару бронекераміки (рис. 4).

Для визначення мінімальної товщини шару бронекераміки h , що забезпечує зупинку кулі, застосовувалась формула Томпсона [8, 10]:

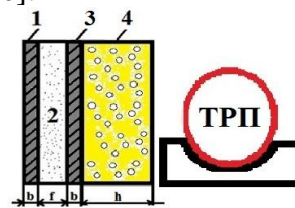


Рис. 3. Пропонований варіант захисту ТРП в вагоні:

1, 3 – сталеві стінки корпусу залізничного вагона товщиною b ; 2 – внутрішній простір між листами сталі товщиною f ; 4 – шар бронекераміки товщиною h

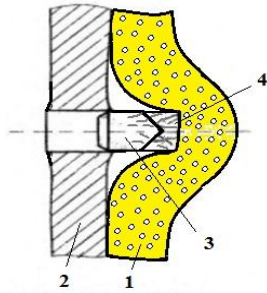


Рис. 4. Модель гальмування кулі в шарі бронекераміки:

1 – шар бронекераміки; 2 – сталевий лист стінки вагона; 3 – сердечник кулі; 4 – осколки сердечника кулі [10]

$$E = \pi R^2 h \left[\frac{1}{2} \sigma + \rho \left(\frac{v_{2over} \cdot R}{L} \right)^2 \right],$$

де $E = \frac{m_c v_{2over}^2}{2}$, R – калібр кулі, σ – граничне напруження для середовища (захисний шар бронекераміки), $\sigma = 350$ МПа; ρ – щільність середовища (захисний шар бронекераміки), $\rho = 2440$ кг/м³; v_{2over} – швидкість кулі за другою сталевую стінкою обшивки вагона; L – довжина головної частини кулі, $L = 12$ мм.

Виходячи з формули Томсона, визначимо товщину h :

$$h = \frac{m_c v_{2over}^2}{2} \left/ \left(\pi R^2 \left[\frac{1}{2} \sigma + \rho \left(\frac{v_{2over} \cdot R}{L} \right)^2 \right] \right) \right.$$

Розрахунки показують, що мінімальне значення h шару бронекераміки становить близько $h = 22$ мм.

Застосування бронекераміки дозволяє уникнути установки додаткових сталевих пластин всередині вагона.

У випадку надзвичайної ситуації при транспортуванні ТРП буде мати місце масштабне забруднення навколишнього середовища [3-5,12,14,15]. Тому виникає проблема по підвищенню екологічної безпеки в разі надзвичайної ситуації при транспортуванні ТРП.

В роботі запропонований засіб підвищення екологічної безпеки при загорянні

ТРП в вагоні на етапі руху потягу. Технологічна схема за якою реалізується запропонований засіб в процесі руху потягу показано на рис. 5.

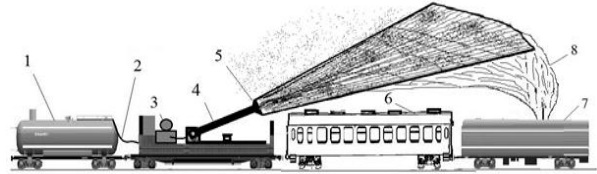


Рис. 5. Схема подачі нейтралізатора в струмінь продуктів горіння ТРП при русі потягу:

1 – ємність з реагентом; 2 – трубопровід; 3 – насосна установка; 4 – підйомні шогли з напірними трубопроводами; 5 – насадок; 6 – вагон (буфер); 7 – залізничний вагон з палаючим ТРП; 8 – шлейф продуктів горіння ТРП

Проведена оцінка ефективності застосування нейтралізатора (NaOH) для захисту атмосфери від забруднення при емісії продуктів горіння (НСІ) ТРП. На першому етапі досліджень був проведений фізичний експеримент по моделюванню процесу взаємодії струї реагенту з шлейфом продуктів горіння ТРП, тобто була виконана перевірка робочої гіпотези. Схема експериментальної установки приведена на рис. 6.

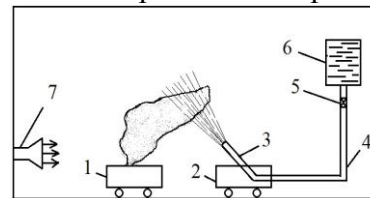


Рис. 6. Схема експериментальної установки: 1 – модель вагона з палаючим вантажем; 2 – модель вагона з струменевою установкою; 3 – насадок, що подає реагент в шлейф забруднювача; 4 – напірний трубопровід; 5 – засувка на напірному трубопроводі; 6 – ємність з водою; 7 – повітродувка

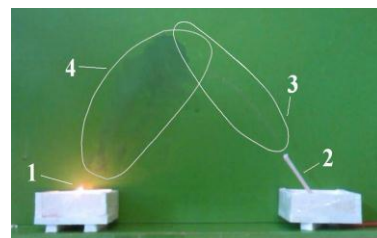


Рис. 7. Фото проведення експерименту: 1 – модель вагона з палаючим вантажем, 2 – модель вагона з струменевою установкою, 3 – струмінь реагенту, 4 – шлейф продуктів горіння

Як видно з рис. 7 відбувається перетин шлейфу продуктів горіння (лінія 4) зі струменем реагенту (лінія 3). Таким чином, результати проведеного фізичного експерименту підтверджують висунуту робочу гіпотезу про можливість нейтралізації продуктів горіння під час руху поїзда.

Чисельна модель

Процес розсіювання токсичних продуктів горіння ТРП в атмосфері ґрунтується на застосуванні усередненого по висоті перенесення Н рівняння Г. І. Марчука [2, 9, 13]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q(t) \cdot \delta(x - x_i(t)) \cdot \delta(y - y_i(t)), \quad (1)$$

де C – концентрація домішки (небезпечна речовина); u, v – компоненти вектора швидкості руху вітрового потоку; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти атмосферної дифузії; t – час; Q – інтенсивність емісії; $x_i(t), y_i(t)$ – координати джерела емісії; $\delta(x - x_i(t)), \delta(y - y_i(t))$ – дельта функція Дірака.

Похідну за часом апроксимуємо розділеною різницею «назад»:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Конвективні похідні запишемо у вигляді [2,9,13]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

де $u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}; \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2};$
 $v^- = \frac{v - |v|}{2}.$

Апроксимуємо конвективні похідні розділеними різницями «проти потоку» на

верхньому часовому шарі наступним чином [2,9,13]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Компоненти швидкості u визначатимемо на вертикальних гранях різницевих комірок, а компоненти швидкості v – на горизонтальних гранях. Індеси цих граней відповідають індексам комірок, розташованих правіше або вище відповідної межі.

Для апроксимації других похідних використовуються такі залежності [2, 9, 13]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

В даних залежностях $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-, M_{yy}^+, M_{yy}^-$ – умовні позначення різницевих операторів. Використовуючи ці позначення, запишемо різницеву апроксимацію рівняння переносу:

$$\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} + L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + \delta_{i,j}$$

Тут використано позначення $\delta_{i,j}$ – це число 1 або 0, в залежності від того, розташоване чи ні в різницевій комірці « i, j » джерело забруднення.

Виконаємо розщеплення отриманого різницевого рівняння на чотири різницевих рівняння наступним чином [2,9,13]:

на першому кроці розщеплення $k = \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + \\ + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{q_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

на другому кроці розщеплення $k = n + \frac{1}{2}$,

$c = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + \\ + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{q_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

на третьому кроці розщеплення $k = n + \frac{3}{4}$,

$c = n + \frac{1}{2}$:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + \\ + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{q_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

на четвертому кроці розщеплення $k = n + 1$,

$c = n + \frac{3}{4}$:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + \\ + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{q_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

Для програмування розробленої чисельної моделі використовувалась алгоритмічна мова FORTRAN.

Результати досліджень

На другому етапі дослідження для підтвердження висунутої робочої гіпотези про можливість нейтралізації продуктів горіння ТРП при русі потягу було проведено обчислювальний експеримент.

В роботі представлені результати обчислювального експерименту при нейтралізації хлороводню (HCl) в процесі руху потягу. При моделюванні змінювалась інтенсивність подачі нейтралізатора Q.

Нижче на рисунках зображено динаміку зміни зони забруднення HCl при відсутності подачі реагенту. Ця інформація дозволяє оцінити характер формування зони забруднення при викиді HCl з вагона, що рухається.



Рис. 8. Розрахункова область:
1 – поїзд з ТРП



Рис. 9. Зона забруднення атмосфери для моменту часу:

а) $t = 2$ с; б) $t = 5$ с (немає подачі реагенту, ● – джерело емісії продуктів горіння ТРП)

Далі на рисунках зображено динаміку зміни зони забруднення (HCl) при подачі реагенту.

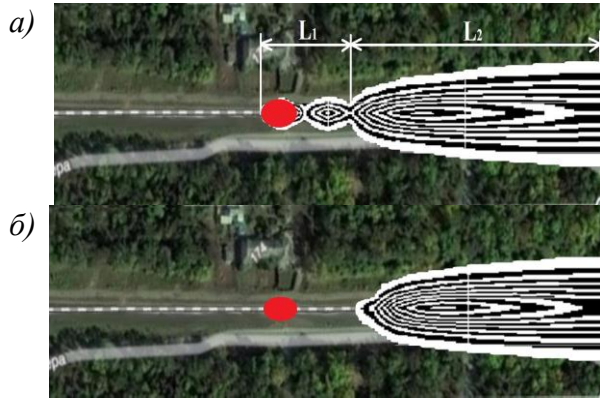


Рис. 10. Зона забруднення атмосфери для моменту часу $t = 11$ с (йде подача реагенту):
а) $Q = 12$ кг/с, L_1 – зона забруднення потрапила під вплив нейтралізатора, L_2 – зона забруднення не потрапила під вплив нейтралізатора; б) $Q = 25$ кг/с

Виходячи з наведених рисунків слідує, що для забезпечення необхідного рівня екологічної безпеки, необхідно якомога швидше розпочати подачу реагенту в шлейф продуктів горіння ТРП і забезпечити необхідну інтенсивність подачі реагенту.

Висновки

Досліджена вразливість залізничного вагона до зовнішнього ініційованого впливу (постріл з автомату), що дало змогу науково-обґрунтовано вдосконалити конструкцію вагону для транспортування ТРП.

Вперше розроблено спосіб захисту атмосфери від забруднення при надзвичайній ситуації на етапі транспортування ТРП, який дозволяє суттєво підвищити рівень екологічної безпеки у разі виникнення надзвичайної ситуації.

Бібліографічний список

1. Алексенцева, С. Е. Ударно-волновые процессы взаимодействия высокоскоростных элементов с конденсированными средами [Электронный ресурс] // Автореферат. – Самара, 2015. – 44 с. – URL: http://d21221701.samgtu.ru/sites/d21221701.samgtu.ru/files/aleksentseva_avt.pdf
2. Беляев, Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загряз-

- нения атмосферы: монография [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машина. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 127 с.
3. Беляев, Н. Н. Моделирование аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, А. В. Шевченко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 5 (53). – С. 29–38. Doi 10.15802/stp2014/29973
4. Беляев, Н. Н. Защита атмосферы от загрязнения при чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте [Текст] / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. С. Кириченко // Збірник наукових праць «Науковий вісник будівництва» – Х.: Харківський національний університет будівництва та архітектури, 2016 – №1(83). – С.203 – 207.
5. Берлов, А. В. Расчет загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива [Текст] / А. В. Берлов // 36. наук. пр. НГУ «Науковий вісник буд-ва». – Харків, 2014. – №1 (75). – С. 185–189.
6. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1985. – 273 с.
7. Бруязкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов [Текст] / Е. В. Бруязкий – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
8. Калашников, В. В. Исследование влияния конструкции пули на процесс пробивания стальной преграды [Текст] / В. В. Калашников, С. Е. Алексенцева // Вестн. самар. гос. техн. ун-та. Сер. технические науки. – 2009. – Вып. № 2 (24). – С.99 – 105.
9. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук – Москва: Наука, 1982. – 320 с.

10. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования [Текст] / В. А. Григорян, И. Ф. Кобылкин, В. М. Маринин, Е. Н. Чистяков. Под ред. В. А. Григоряна. – М.: Изд. РадиоСофт, 2008. – 406 с.
11. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті [Текст] – К.: 2001. – 33 с.
12. Уорк, К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль [Текст] / К. Уорк, С. Уорнер – М.: Мир, 1980. – 539 с.
13. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ: Наук. думка, 1997. – 368 с.
14. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo [Text] / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. Екологія на транспорті. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. академіка В. Лазаряна. – 2016. – Вип. 1 (61). – С. 48 – 54. Doi 10.15802/stp2016/60953
15. Biliaiev, M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollu-

tion for Regions Having Complex Topography [Text] / M. Biliaiev // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15.

Ключові слова: захист вагону від пробивання, аварії на залізничному транспорті; спосіб захисту атмосферного повітря; нейтралізація забруднювача; чисельне моделювання.

Ключевые слова: защита вагона от пробивания, аварии на железнодорожном транспорте; способ защиты атмосферного воздуха; нейтрализация загрязнителя; численное моделирование.

Keywords: protection of railway carriage by puncturing, accident on the railways; method of protection of atmospheric air; neutralization of polluter; numerical simulation.

Рецензенти:

д.т.н., проф. С. З. Поліщук,
д.ф.-м.н., проф. С. О. Пічугов.

Надійшла до редколегії 05.01.2016.
Прийнята до друку 21.01.2016.