

УДК 656.08 : 656.073.436

О.І. Запорожець¹, І.В. Ковалець², М.Д. Кацман³¹ Національний авіаційний університет, Київ² Інститут математичних машин і систем Національної академії наук України, Київ³ Головне управління охорони українських залізниць, Київ

ОЦІНЮВАННЯ НАСЛІДКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ З НЕБЕЗПЕЧНИМИ ВАНТАЖАМИ

В роботі розглядається стан перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом України, динаміка транспортних подій при перевезенні небезпечних вантажів. Запропонована методика оцінювання часової залежності інтенсивності викиду легкозаймистої речовини, яка була інтегрована у сучасну модель атмосферного перенесення небезпечних речовин. Проведено розрахунок зон уражень внаслідок аварійного викиду бензину АІ-95, що дало змогу врахувати часову мінливість джерела викиду та розрахувати часові залежності концентрації бензину в атмосфері на різних відстанях від аварійної залізничної цистерни.

Ключові слова: залізничний транспорт, небезпечний вантаж, транспортна подія, аварійна ситуація, концентрація небезпечної речовини, математична модель.

Аналіз стану перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом

Порушення умов перевізного процесу, спричинене аварійною ситуацією рухомого складу з небезпечними наслідками, викликає появу екологічно небезпечної залізничної аварійної ситуації з пасажирськими або вантажними поїздами, переводить залізничний транспорт у новаційний стан з новими не приаманними залізничному транспорту властивостям.

Динаміка кількості транспортних подій у відношенні до обсягів перевезень за 1996-2014 рр. подана на рис. 1, який засвідчує, що кількість транспортних подій знижується відповідно до зменшення обсягів вантажних перевезень.

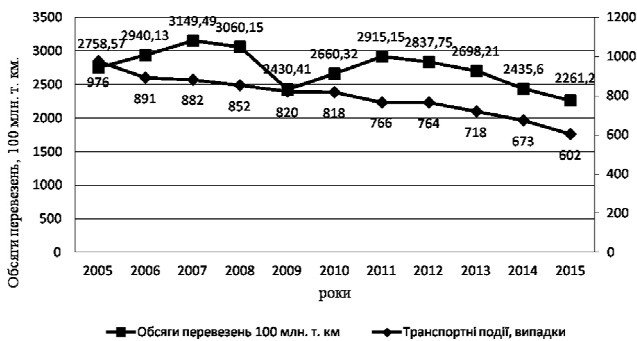


Рис. 1. Динаміка кількості транспортних подій у відношенні до обсягів перевезень за 2005-2015 рр.

На рис. 2 надана динаміка кількості транспортних подій щодо величин балансових збитків від цих подій. З рис. 2 видно, що балансові збитки були найбільшими у 2005р. – 2999 млн. грн., 2007р. – 11,601 млн. грн., 2009р. – 2,534 млн. грн., 2014 – 6,025 млн. грн., та у 2016 р. – 24,649 млн. грн., тобто при зменшенні числа транспортних подій їхні наслідки мали більш негативний характер впливу на навколи-

шнє середовище і залізничну інфраструктуру, для ліквідування цих наслідків яких необхідно було використовувати велику кількість сил і засобів при більших термінах часу на відновлення нормального руху поїздів.



Рис. 2. Динаміка кількості залізничних транспортних подій щодо величин балансових збитків від них

На рис. 3 наведена динаміка вантажних перевезень, у тому числі й небезпечних, за період з 2005р. по 2016 р. Рис. 3 засвідчує, що за період з 2005 р. по 2011 р. частка небезпечних вантажів із загальної кількості вантажних перевезень становила у межах від 7,1% (2005р.) до 8,6 % (2008р.). З 2012 р. намітилася тенденція до зменшення об'ємів вантажних перевезень, так частка небезпечних вантажів від усієї кількості вантажних перевезень становила: 2012 р. – 6,8%, 2013 р. – 6,3%, 2014 р. – 4%, 2015 р. – 3,6%, 2016 р. – 3,5%.

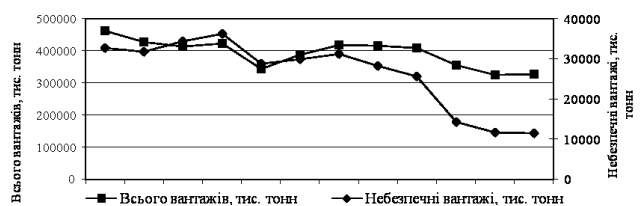


Рис. 3. Динаміка вантажних перевезень за період з 2005р. по 2016 р.

Аналіз транспортних подій при транспортуванні небезпечних вантажів залізничним транспортом

Аналіз залізничних транспортних подій з небезпечними вантажами за період з 2005 р. по 2016 р. подані на рис. 4, з якого видно, що найбільша кількість транспортних подій з небезпечними вантажами припадає на 2007р. (80 випадків) та на 2009р. (79 випадків), а найменша кількість – на 2015р. (14 випадків).

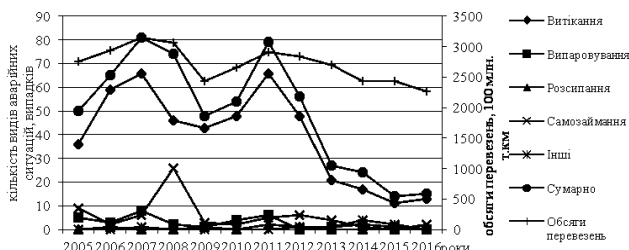


Рис. 4. Динаміка кількості транспортних подій з небезпечними вантажами

Відносна кількість транспортних подій за тяжкістю їх наслідків подана на рис. 5. Діаграма (рис. 5) свідчить про те, що найбільшу частку транспортних подій складають інциденти з небезпечними вантажами (84%), на серйозні інциденти припадає 14%, а на катастрофи – 2%.

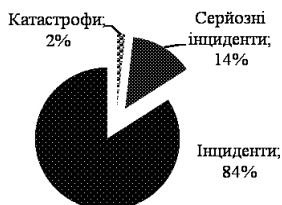


Рис. 5. Відносна кількість транспортних подій за тяжкістю їх наслідків у 2005 – 2016 рр.

Кількість аварійних ситуацій за їх наслідками стосовно стану небезпечного вантажу надана на рис. 6, з якого видно, що найбільша кількість наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами припадає на витікання вантажів із залізничних цистерн (474 випадки або 80,7%). Із самозайманням вантажів пов'язані 66 випадків (11,2%), на випаровування вантажів припадає 5,6% (33 випадки), 5 випадків (майже 1%) пов'язані із розсипанням вантажів, до інших наслідків належать 9 випадків (1,5%).

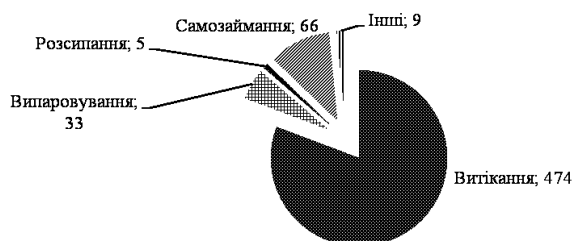


Рис. 6. Кількість аварійних ситуацій за їх наслідками стосовно стану небезпечного вантажу

Витікання небезпечних вантажів, більшість з яких становлять нафтопродукти, характеризується значним шкідливим впливом на довкілля. Цей вплив пов'язаний з токсичністю вуглеводнів і домішок як у рідкому, так й у пароподібному стані, а також з токсичністю деяких продуктів згоряння нафтового палива.

В роботі, на основі статистичних даних результатів вантажних перевезень небезпечних вантажів залізничним транспортом України, побудовані графіки транспортування таких вантажів за період з 2005 по 2016 р. (рис. 7).

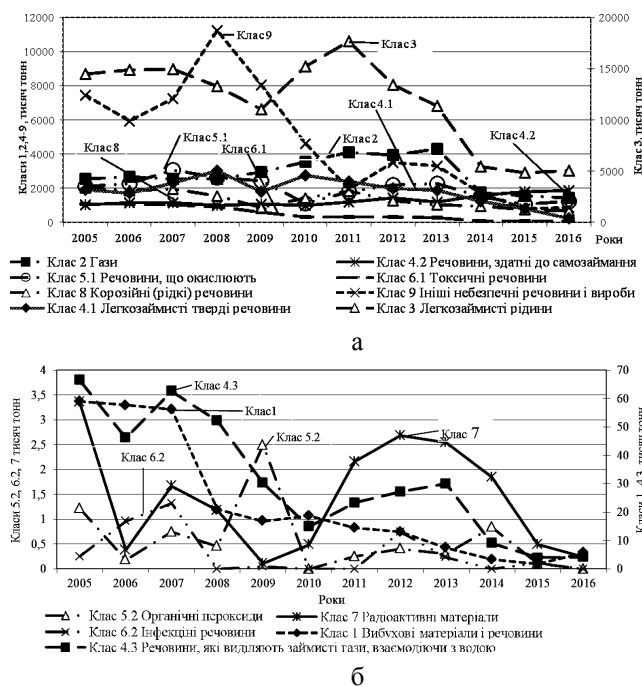


Рис. 7. Динаміка транспортування небезпечних вантажів залізничним транспортом за період з 2005 по 2016 рр.

На рис 7, а подана динаміка транспортування вантажів залізничним транспортом класів 2,3,4.1,4.2, 5.1,6.1, 8 та 9, а на рис. 7б – класів 1, 4.3, 5.2, 6.2 та 7. Відносна кількість вантажів різних класів небезпеки, транспортування яких залізничним транспортом України здійснювалося у період 2005 – 2016 рр., становить : клас 1 – 0,09%, клас 2 – 11%, клас 3 – 45%, клас 4.1 – 7%, клас 4.2 – 5%, клас 4.3 – 0,12%, клас 5.1 – 7%, клас 5.2 – 0,002%, клас 6.1 – 2%, клас 6.2 – 0,001%, клас 7 – 0,005%, клас 8 – 5%, клас 9 – 18%.

Клас 3 небезпечних вантажів складається з легкозаймистих рідин, рідких десенсибілізованих вибухових речовин та рідин, що надаються до перевезення за температури не нижче температури їх спалаху, а також речовини, що надаються до перевезення або перевозяться у рідкому стані за підвищеної температури та які виділяють займисту пару за температури, яка не перевищує максимальну температуру під час перевезення. Відносна кількість видів додаткової небезпеки легкозаймистих вантажів подано на рис.8.

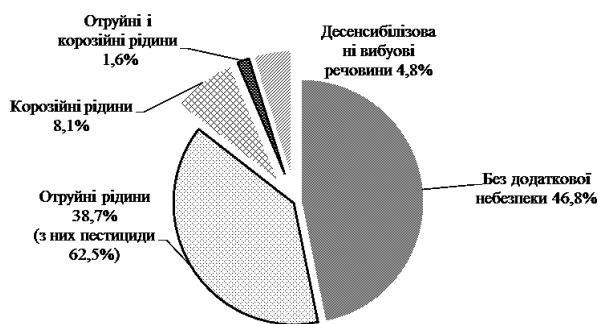


Рис. 8. Відносна кількість видів додаткової небезпеки легкозаймистих вантажів.

До небезпечних вантажів класу 9 належать речовини (включаючи суміші й розчини), матеріали та вироби, які під час транспортування становлять небезпеку, нехарактерну іншим класам. Відносна кількість видів додаткової небезпеки вантажів 9 класу небезпеки надано на рис. 7.

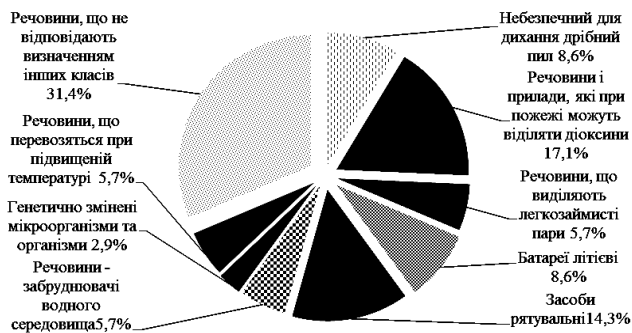


Рис. 9. Відносна кількість видів додаткової небезпеки вантажів класу 9

До небезпечних вантажів класу 2 відносяться гази і вироби, які містять гази. Вантажі цього класу небезпеки поділяються на 3 підкласи: займісті гази, не займісті нетоксичні гази, токсичні гази.

До вантажів цього класу відносяться стиснені (22%) і скраплені гази (43,9%) високого та низького тиску; охолодженні рідкі гази (7,3%); гази, розчиненні під тиском (2,4%), аерозольні упаковки і малі ємкості з газом (4,9%); інші вироби, що містять газ під тиском (12,2%) та зразки газів (7,3%). Дані про відносну кількість вантажів класу 2 за їхніми небезпечними властивостями подані на рис. 10, з даних якого видно, що, наприклад, із стиснених газів найбільшу небезпеку становлять задушливі гази, а із скраплених – задушливі і легкозаймісті гази.

Визначення величин небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій

Досвід ліквідування залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами свідчить про те, що в разі настання аварійної ситуації керівнику оперативного штабу в складних умовах відсутності цілковитої та достатньої інформації про причинно-наслідкові зв'язки між компонентами такої ситуації

необхідно приймати певну кількість індивідуальних, колегіальних, інформаційних, організаційних, оперативних рішень, спрямованих на узгодження, координацію та управління підлеглими пунктами управління та ліквідаційними підрозділами, яка може перевищувати його можливості щодо прийняття таких рішень та/або впливати на їх обґрунтованість.

Прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо ліквідування наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами повинно здійснюватися за допомогою системи підтримки прийняття рішень (СППР), для створення яких слід використовувати математичні моделі прогнозування розвитку аварійних ситуацій та алгоритми дій керівників оперативного штабу.

Велике значення для організації дій ліквідаційних підрозділів має визначення значень параметрів небезпечних чинників транспортних подій за участю стиснених, зріджених, скраплених, розчинених під тиском газів, пов'язаних з розлиттям небезпечних рідин, а також прогнозування параметрів зони забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливі нафтопродуктів, які є найбільш типовими аварійними ситуаціями.

Для прогнозування розвитку небезпечних чинників аварійних ситуацій при транспортуванні вантажів другого і третього класів безпеки, а також сильнодіючих отруйних речовин, на залізничному транспорті використовуються методичні вказівки щодо визначення зон впливу небезпечних факторів аварій із скрапленими вуглеводневими газами, горючими рідинами та аварійно-небезпечними хімічними речовинами [1]. На базі цих вказівок для СППР керівника ліквідації аварій на залізничному транспорті були розроблені комп'ютерні програми аналізу аварійних ситуацій за участю цих вантажів [2, 3].

Структурно-аналітична модель методу визначення величин небезпечних для довкілля чинників аварійних залізничних ситуацій при транспортуванні легкозаймистих речовин надана на рис. 11.

Структурно-аналітична модель методу визначення величин небезпечних для довкілля чинників залізничних аварійних ситуацій з легкозаймистими речовинами дозволяє визначити розміри вибухонебезпечних зон ($R_{НКМР}(t)$) при розгерметизації цистерни і розливанні речовини, площу розлиття $S_p(t)$, масу розлитої речовини $M_p(t)$, масу речовини, що всмокталася у ґрунт $M_v(t)$, масу речовини на поверхні ґрунта $M_n(t)$ на будь-який момент часу.

За допомогою моделі визначаються радіуси зон надлишкового тиску (R_i) та величини надлишкового тиску (ΔP) при вибуху паливо-повітряної суміші, яка утворюється при випаровуванні рідини, а також імпульс тиску що дає змогу визначити умовні імовірності ураження людини і ступені ураження об'єктів довкілля у межах вибухонебезпечних зон.

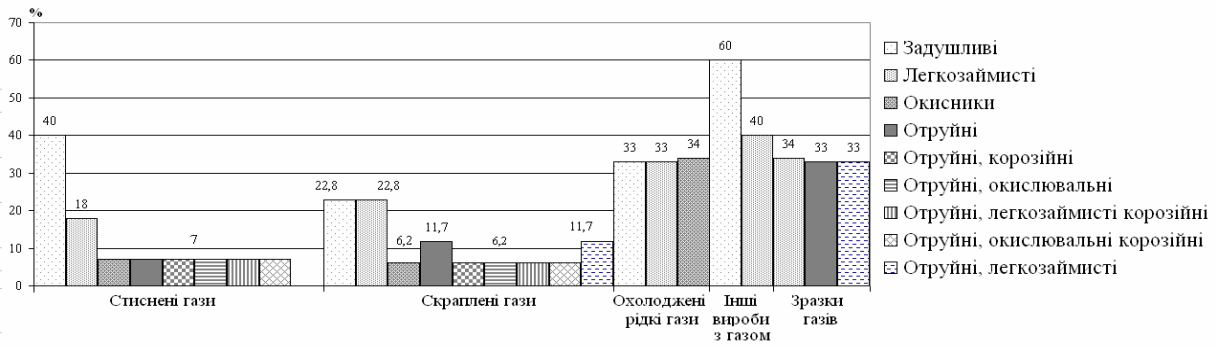


Рис. 10. Відносна кількість вантажів класу 2 за їхніми небезпечними властивостями.

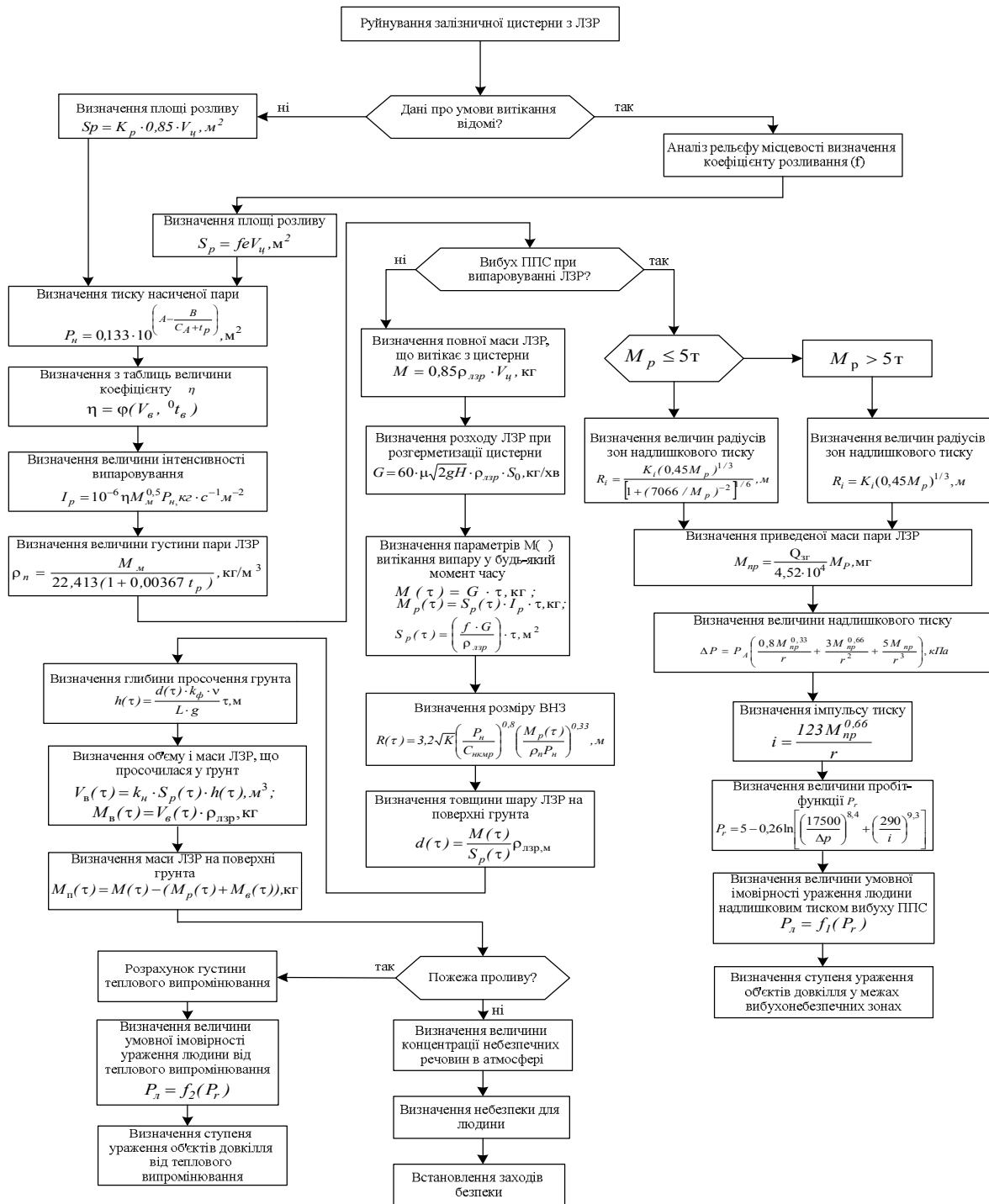


Рис. 11. Структурно-аналітична модель метода визначення величин небезпечних для довкілля та життєдіяльності людини чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортуванні легкозаймістих рідин

При розробці структурно-аналітичної моделі були враховані положення методик і рекомендацій [4-9], які не ввійшли у вказівку.

Проведемо, як приклад, розрахунок небезпечних для довкілля чинників аварійної залізничної ситуації пов'язаною з витіканням легкозаймистої речовини (бензину АІ-95) через пошкоджений зливний пристрій ($S_0 = 78,5$ см) стандартної цистерни об'ємом $V_{ц} = 61,2$ м³ на залізничній станції на залізничній станції з нахилом місцевості менше 1% ($f = 5$), темпера-

тура повітря $t_n = 28^{\circ}\text{C}$, швидкість повітряного потоку $V_n = 0$ м/с; площа зливного пристрою $S_0 = 78,5$ см², внутрішній діаметр цистерни $H = 2,8$ м, ступінь заповнення цистерни $\epsilon = 0,85$.

Як це було показано вище, аналогічні ситуації трапляються на залізницях України частіше за інші аварійні ситуації. Характеристики аварійної ситуації при витіканні усієї маси бензину ($M = 42000$ кг) продовж повного часу витікання ($\tau_{пв} = 50$ хв) подані у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики аварійного витікання бензину з цистерни

Час (τ), хв	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Площа розлиття ($S_p(\tau)$), м ²	26,25	52,5	78,75	105	131,25	157,5	183,75	210	236,25	262,5
Маса розлиття ($M(\tau)$), кг	4200	8400	12600	16800	21000	25200	29400	33600	37800	42000
Маса випаровування ($M_p(\tau)$), кг	2,4	9,6	21,6	38,4	60,0	86,5	117,7	153,7	194,6	240,2
Маса всмоктування ($M_b(\tau)$), кг	0,01	0,04	0,09	0,14	0,23	0,33	0,46	0,61	0,77	0,96
Маса на поверхні ґрунту ($M_n(\tau)$), кг	4197,6	8390,4	12578,3	16761,5	20939,8	25113,2	29281,8	33445,7	37604,6	41758,2
Радіус зони загазування ($R(\tau)$), м	12,8	20,2	26,4	31,9	36,9	41,7	46,1	50,4	54,5	58,4

Дані табл. 1 свідчать про те, що найбільш негативний вплив на довкілля за цей період розвитку аварійної ситуації справляють випари легкозаймистої речовини у повітря, накопичення її на поверхні ґрунту із збільшенням площі розливу і радіусу зони загазування. З цієї таблиці видно, що скорочення часу проведення ліквідаційних заходів, наприклад з 35-ї хвилини, тільки на 5 хвилин призведе до зменшення площі розлиття на 26,25 м², маси випаровування бензину у навколишнє середовище на 40,9 кг, маси легкозаймистої рідини на поверхні ґрунту на 415,9 кг та радіусу зони загазування більше ніж на 4 м. Характеристики подальшого розвитку аварійної ситуації після розливу усієї кількості легкозаймистої речовини подані на графіку (рис. 12).

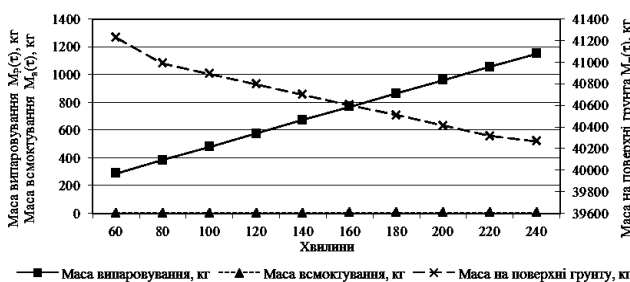


Рис. 12. Залежності маси випаровування $M_p(\tau)$, маси всмоктування $M_b(\tau)$ і маси бензину на поверхні ґрунту $M_n(\tau)$ від часу

Подальший розвиток аварійної ситуації залізничної цистерни з бензином характеризується великою кількістю пари бензину, яка надходить у навколишнє середовище. Маса бензину, що всмоктується у баластну призму залізничного полотна є незначною: на 60-й хв. – 1,2 кг, на 100-й хв. – 1,9 кг, на 140-й хв. – 27 кг; на 240-й хв. – 4,42 кг. Маса легкозаймистої рідини на поверхні ґрунту знижується з

41,2 т на 60-й хв. до 40,3 т на 240-й хв., а радіус зони загазування збільшується відповідно з 62 м до 98 м.

До недоліків структурно-аналітичної моделі, яка використовується для визначення величин небезпечних для довкілля чинників залізничних аварійних ситуацій з отруйними легкозаймистими речовинами є відсутність можливості визначення параметрів забруднення атмосфери в результаті викиду таких речовин, а також обмеження на величину швидкості вітру ($U_b \leq 1$ м/с).

Нині є велика кількість методик і створених на їхніх основах програмних комплексів, які дозволяють моделювати розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері.

Для моделювання розповсюдження пари бензину у безвітряних умовах використовувалася стандартна методика лагранжево-ейлерових моделей атмосферного переміщення небезпечних речовин, які у світовій літературі також називають моделями гаусових «клубів» («puffs»). До моделей такого класу відносяться такі відомі моделі як DIPLOT, RIMPUFF, що є складовими системи Євросоюзу з ядерного аварійного реагування РОДОС, CALPUFF [10-12] та деякі інші. Модель CALPUFF, яка прийнята Агентством з охорони довкілля США, визнана за кращу серед аналогічними моделями для оцінювання переносу забруднювачів та їхнього впливу на довкілля, й є добре верифікованою. У лагранжево-ейлерових моделях розрахунок тривалого викиду здійснюється шляхом розрахунків послідовності миттєвих викидів – так званих лагранжево-ейлерових частинок. Центр мас кожної частинки рухається за полем вітру. Відмінність лагранжево-ейлерових частинок від звичайних лагранжевих частинок нескінченно малого розміру є те, що у даному випадку частинки характеризуються розмірами та розподі-

лом концентрації у частинці. У системі координат, пов'язаній з центром мас, поле концентрації у кожній частинці розподілено у відповідності до поля концентрації внаслідок миттєвого викиду, яке розраховується за гаусовою формулою. Таким чином концентрація C речовини у точці (x,y,z) у момент часу t обчислюється як сума вкладів усіх частинок [12]:

$$C(x,y,z,t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{p=1}^N \frac{q_p \tau \cdot H(t - \tau \cdot p)}{\sigma_{xp} \sigma_{yp} \sigma_{zp}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_p - x}{\sigma_{xp}}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y_p - y}{\sigma_{yp}}\right)^2\right] \times (1) \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_p - z}{\sigma_{zp}}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_p + z}{\sigma_{zp}}\right)^2\right] \right\}.$$

де використана Декартова система координат: вісь z направлена вертикально вгору, рівень $z = 0$ співпадає з рівнем поверхні Землі; τ - тривалість інтервалу часу; $p\tau$ - момент появи p -ї частинки $H(t - p\tau)$ - функція Хевісайда, за рахунок використання якої у розрахунку враховується вплив тільки тих частинок, що встигли з'явитися до моменту часу t ; N - сумарна кількість частинок, що встигла з'явитися до часу t , q_p - середня потужність викиду за час τ , σ_{xp} , σ_{yp} , σ_{zp} - параметри, які характеризують розподіл речовини у частинці по горизонталі та вертикалі. У (1) поверхня Землі вважається площиною і не враховується вплив кінцевої глибини проміжного шару, що припустимо при розрахунку розповсюдження на відстані менші за характерні розміри такої глибини, тобто до 2-х км [12]. Також зроблене стандартне припущення про повне відбиття хмари від поверхні Землі.

Для σ_{xp} , σ_{zp} використовувались співвідношення McElroy & Pooler [13] з моделі CALPUFF, які придатні для використання у тому числі й в умовах міської забудови. Оскільки розрахунки проводились для випадку умов нейтральної стратифікації (категорія стійкості С) наведемо відповідні співвідношення для даної категорії стійкості [12, 15, 16]:

$$\sigma_{xp} = \sigma_{x0} + 0.22l_p(1 + l_p)^{-1/2}; \quad (2)$$

$$\sigma_{zp} = \sigma_{z0} + 0.24l_p,$$

де $l_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}$ - шлях, яка пройшла частинка, а

σ_{x0} , σ_{z0} описують початкову дисперсію хмари, яка щодо горизонтального розміру у розрахунках покладалася рівною характерному середньому розміру розливу ($\sigma_{x0} = 10$ м), а вертикальний початковий розмір покладалася рівним $\sigma_{z0} = 1$ м.

Зрозуміло, що для розрахунку у безвітряних умовах $l_p = 0$, а координати центрів мас частинок не змінюються і співпадають з координатами центра джерела: $x_p = x_s = \text{const}$, і тн. Тоді для врахування того, що навіть у безвітряних умовах хмара підлягає дії турбулентної дифузії (в атмосфері завжди є пориви вітру), формула (2) переводиться у часову за-

лежність шляхом введення характерної швидкості поривів вітру u_0 , яке коливається від 0,5 до 1 м/с при безвітряних умовах [12]. Тоді формули (2) можна переписати у вигляді такої часової залежності:

$$\sigma_{xp} = \sigma_{x0} + 0.22u_0t(1 + u_0t)^{-1/2}; \quad (3)$$

$$\sigma_{zp} = \sigma_{z0} + 0.24u_0t,$$

У розрахунках використовувалось значення $u_0 = 0,5$ м/с.

Описана вище методика моделі CALPUFF широко використовується за кордоном, зокрема на даних натурних вимірювань під час реальних викидів забруднюючих речовин [13-16].

У розрахунках нехтувалося ефектами "важкого газу". Згідно [17] даним ефектом можна нехтувати, якщо значення наступного параметру Π задовольняє умові:

$$\Pi = \frac{1}{u_0} \left(\frac{g}{D_0} \left(\frac{\rho_g - \rho_a}{\rho_a} \right) \left(\frac{Q}{\rho_g} \right) \right)^{1/3} \leq 0.15.$$

Для обраних параметрів ($u_0 = 0,5$ м/с, інтенсивність викиду $Q = 0,08$ кг/с, діаметр розливу $D=10$ м, початкова густина газу $\rho_{g0} = 1,2\rho_a$, густина атмосферного повітря $\rho_a = 1,2$ кг/м³) отримаємо значення $\Pi_0 \approx 0,4$. Отже, на початковій стадії (близько до джерела), ефекти важкого газу за даним сценарієм важливі. Але при розповсюдженні газ розбавляється з оточуючим повітрям, і можна оцінити, на якій відстані ці ефекти перестають впливати. У [18] підтверджена безрозмірна залежність ступеню розбавлення важкого газу від відстані поширення (рис. 4 з цитованої роботи), з якої для даного випадку можна отримати, що вже на відстані $r_1 = 10$ м від джерела розливу початкова концентрація речовини розбавляється повітрям зменшуючись у 10 разів. Це відбувається за рахунок гравітаційного руху важкого газу, який генерує інтенсивне початкове перемішування. Тоді густина газової суміші буде значно меншою:

$$\rho_g = 0.9\rho_a + 0.1\rho_{g0} = 0.9\rho_a + 0.1 \cdot 1.2\rho_a = 0.02\rho_a$$

Відповідне значення параметру Π стає:

$$\Pi = \frac{1}{u_0} \left(\frac{0.02g}{D_0 + 2r_1} \left(\frac{Q}{\rho_{g0}} \right) \right)^{1/3} \approx 0.14,$$

що дозволяє для даного сценарію нехтувати ефектами важкого газу на відстанях понад 10 м від джерела газу.

У результаті проведених розрахунків отримані залежності величини концентрації пари бензину (C , кг/м³) на різних відстанях ($10\text{м} < r < 1000\text{м}$) через кожні 10 м від аварійного отвору при певних значеннях часу (t) від початку витоку кожні 10 хв. до 24 год. Це дасть змогу встановити рівень небезпеки для працівників залізниці у парку станції з аварійною цистерною і пасажирів на перонах вокзального комплексу. Отримані дані дозволять керівнику ліквідації аварії визна-

чити засоби індивідуального захисту для працівників залізниці і аварійних підрозділів Державної служби з надзвичайних ситуацій, які беруть участь у ліквідуванні наслідків аварійної ситуації, час початку і тривалість аварійно-відновних робіт щодо евакуації персоналу і пасажирів, надання їм, при необхідності, першої долікарської та медичної допомоги.

Розглянемо залежність концентрації (C , $\text{мг}/\text{м}^3$) пари бензину у довірлі від часу t на відстанях $R_1=10\text{м}$ (радіус розлиття речовини) і $R_2=100\text{м}$ (межа вибухонебезпечної зони). Дані щодо значень концентрацій на вказаних відстанях при різних значеннях часу надані у табл. 2.

Таблиця 2

Значення концентрацій пари бензину у довірлі на відстанях $R_1=10\text{м}$, $R_2=100\text{м}$

$R, \text{м}$ \ t	10 хв..	20 хв..	30 хв..	40 хв..	50 хв..	70 хв..	240 хв..	250 хв..	260 хв..	280 хв..
10	333	785	1240	1690	2260	1140	1130	6,29	2,7	0,982
100	0,51	2,93	6,24	9,88	14,7	11,1	10,2	6,29	2,7	0,982

Графіки залежності величини концентрації пари бензину у довірлі на відстанях $R_1=10\text{м}$, $R_2=100\text{м}$ від часу у логарифмічному масштабі представлені на рис. 13. Графіки (рис. 13) свідчать про те, що за період з 10-ої та 50-ту хвилину значення концентрації збільшуються з $333\text{мг}/\text{м}^3$ до $2260\text{мг}/\text{м}^3$ для відстані $R_1=10\text{м}$, й від $0,51\text{мг}/\text{м}^3$ до $14,7\text{мг}/\text{м}^3$ для відстані $R_2=100\text{м}$. За період з 50-ої хвилини, на якій здійснилося повне витікання речовини з цистерни, й до 70-ї хвилини значення концентрації знизилася від $2260\text{мг}/\text{м}^3$ до $1140\text{мг}/\text{м}^3$ (відстань $R_1=10\text{м}$), за цей же період часу концентрація пари на відстані $R_2=100\text{м}$ знизилася від $14,7\text{мг}/\text{м}^3$ до $11,2\text{мг}/\text{м}^3$. Більш стрімке падіння концентрації відстані $R_1=10\text{м}$ у порівнянні із зниженням концентрації на відстані $R_2=100\text{м}$ можна пояснити тим, що швидкість падіння концентрації тим більша, чим менша відстань до джерела викиду. На значних відстанях від джерела,

деякий час після припинення його дії, падіння концентрації у повітрі сповільнюється впливом хмари, яка встигла утворитися до припинення дії джерела. При цьому розмір хмари, яка впливає на концентрацію у даній точці після припинення дії джерела, визначається відстанню від даної точки до джерела. Тому для точок, що знаходяться поблизу джерела, лише незначна частина хмари впливає на величини концентрації, що призводить до надзвичайно швидкого падіння рівня забруднення. У точках, які знаходяться на відстані, швидкість падіння забруднення сповільнюється, і може навіть зростати деякий час після припинення дії джерела.

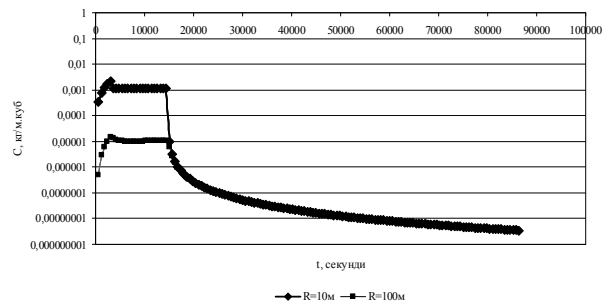


Рис. 13. Графіки залежності величини пари бензину на відстанях $R_1=10\text{м}$, $R_2=100\text{м}$ від часу

з 70-ої хвилини і до повного випаровування рідини з проливу концентрація пари змінюється з $1140\text{мг}/\text{м}^3$ до $1130\text{мг}/\text{м}^3$ й від $11,1\text{мг}/\text{м}^3$ до $10,2\text{мг}/\text{м}^3$ на відстанях $R_1=10\text{м}$, $R_2=100\text{м}$ відповідно. Починаючи з 250-ї хвилини середнє значення пари в атмосфері швидко вирівнюється і стає однаковою на усіх відстанях, що розглядаються.

Розглянемо залежність концентрації пари бензину у довірлі на різних відстанях від джерела викиду при певних значеннях часу. Дані щодо залежності концентрації пари бензину у довірлі від джерела викину при різних значеннях часу подані у табл. 3.

Таблиця 3

Дані щодо залежності концентрації пари бензину у довірлі на різних відстанях від джерела викину при певних значеннях часу (в %)

$R, \text{м}$ \ t	10 хв.	50 хв.	60 хв.	240 хв.
0	0,0466780529	0,3150208387	0,1585422472	0,1578912154
10	0,0333658701	0,2262158959	0,1141345457	0,1134878023
20	0,0136808623	0,0948176872	0,0484198992	0,0477858485
30	0,0046256980	0,0341950863	0,0180831925	0,0174697348
40	0,0017829665	0,0149243363	0,0084133004	0,0078275352
50	0,0008692812	0,0084783761	0,0051477441	0,0045957293
60	0,0004618526	0,0053993564	0,0035589182	0,0030454988
70	0,0002569391	0,0036847873	0,0026471010	0,0021758143
80	0,0001470896	0,0026339730	0,0020635817	0,0016366396
90	0,0000858340	0,0019457544	0,0016594270	0,0012777689
100	0,0000510490	0,0014753325	0,0013637910	0,0010271963
110	0,0000307183	0,0011410006	0,0011371986	0,0008444430
120	0,0000186485	0,0008973342	0,0009580834	0,0007071237

Графіки залежності концентрації пари бензину у довкіллі на різних відстанях від джерела викиду при різних значеннях часу наведені на рис. 14.

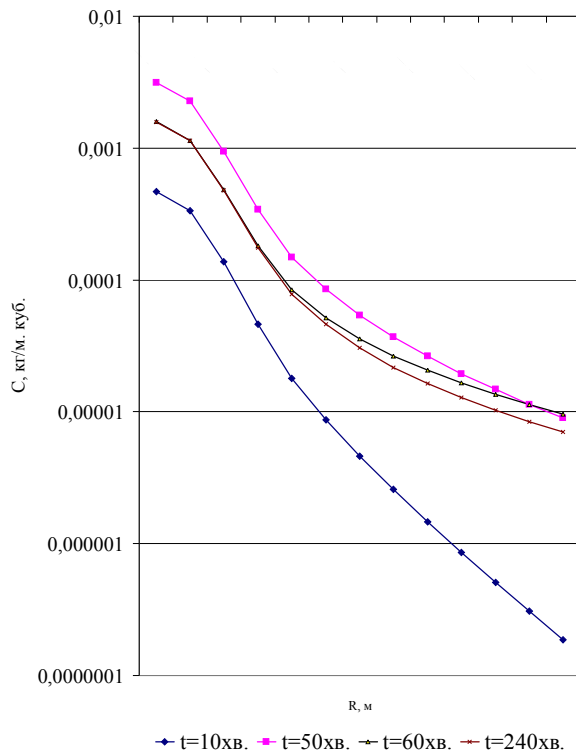


Рис. 14. Графіки залежності концентрації пари бензину на різних відстанях у визначені моменти часу

З рис. 14 можна зробити висновки про те, що на 10-ту хвилину концентрація пари зменшується від 467 мг/м^3 до 137 мг/м^3 на відстані до 20м. У цей період перевищення концентрації у порівнянні з ГДК= 100 мг/м^3 дорівнює від 4,67 разів до 1,37 разів.

На 50-ій хвилині рівень концентрації перевищує ГДУ у 31,5 рази на місці викиду і 1,49 рази на відстані 40м. Концентрація стає нижчою за ГДК на відстані 50м.

На 60-ій хвилині рівень концентрації пари з проливу рідини перевищує ГДК від 15,87 разів до 1,81 рази (30м). На відстані 40м концентрація стає меншою за ГДК ($C=84,1 \text{ мг/м}^3$).

На 240 хвилині значення концентрацій на відстані до 40м практично співпадає із значенням концентрації для 60-ї хвилини, після чого здійснюється її різке падіння.

При значеннях концентрацій пари більших за ГДК, ліквідування наслідків аварійних ситуацій повинно здійснюватися лише у засобах індивідуального захисту, визначених відповідною аварійною картою.

Висновки

Багаторічне використання розглянутої вище структурно-аналітичної моделі дозволяє відзначити, що за її допомогою можливо визначати основні па-

раметри залізничних аварійних ситуацій з легкозаймистими вантажами, що не є отруйними.

У даній роботі вперше проведено розрахунок забруднення зон уражень внаслідок аварійного викиду легкозаймистої речовини (бензину АІ-95) на основі оцінювання джерела викиду згідно запропонованої методики оцінювання часової залежності інтенсивності викиду, яка була інтегрована у сучасну модель атмосферного перенесення небезпечних речовин. Це дозволило врахувати часову мінливість джерела викиду та розрахувати нестационарні часові залежності концентрацій отруйної хімічної речовини в атмосфері на різних відстанях від джерела викиду.

Для оцінювання небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій другого і третього класів небезпеки необхідно створити в Україні методику, яка б дозволяла:

враховувати: особливості залізничного транспорту (одночасно наявність у парках станції великої кількості рухомого складу з небезпечними вантажами, які мають різноманітні фізико-хімічні, пожежовибухові та аварійно хімічно небезпечні властивості); стан стійкості атмосфери, температури повітря і ґрунту, рельєф місцевості та його забудову, наявність і розміри водойм і селітебної зони;

визначати: кількість газу і пари легкозаймистих речовин у довкіллі; просторово-часове поле концентрації отруйних речовин в атмосфері; розміри зон хімічного забруднення; розміри зон дрейфу пожежовухопонебезпечних хмар, в межах яких зберігається здатність до займання, розміри зон розповсюдження пожежі (пожежі – спалаху) або детонації, появи горілих продуктів, а також часу підходу зон до визначених об'єктів; кількість отруйних речовин у хмарах, обмежених концентраційними межами запалення; значення виражальних чинників вибуху; наслідків впливу ударно-хвильових навантажень на людей і об'єкти залізничної інфраструктури.

Створені на базі такої методики програмні комплекси для реалізації відповідних математичних моделей повинні мати зручний інтерфейс для роботи користувачів середньої кваліфікації у стресових умовах аварійних ситуацій.

Список літератури

1. *Руководство по определению зон воздействия опасных факторов аварий с сжиженными газами, горючими жидкостями и аварийно химически опасными веществами на объектах железнодорожного транспорта.* – М.: ГИПРОТРАНСТЭИ, 1997. – 124с.
2. *Комп'ютерна програма аналізу надзвичайної ситуації, яка супроводжується пожежею, що виникла внаслідок аварії цистерни зі скрапленими вуглеводневими газами / Юхимчук С.В., Потетюєв Ю.Ф., Великодний В.В., Кацман М.Д., Поремський Ю.В., Захарченко Л.М. . Свідчення Державного департаменту інтелектуальної влас-*

ності Міністерства освіти і науки України про реєстрацію авторського права на твір № 16304 (дата реєстрації 13.04.2006 р.)

3. Комп'ютерна програма аналізу надзвичайної ситуації, яка супроводжується пожежею, що виникла внаслідок аварії цистерни з легкозаймистою речовиною / Юхимчук С.В., Потетюєв Ю.Ф., Великодний В.В., Кацман М.Д., Поремський Ю.В., Захарченко Л.М. . Свідчення Державного департаменту інтелектуальної власності Міністерства освіти і науки України про реєстрацію авторського права на твір № 16305 (дата реєстрації 13.04.2006 р.)

4. НАПБ Б.03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежею небезпечною. Наказ МНС України від 03.12.2007 №833. Електронне джерело: www.dnaor.com/get/32350

5. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. РД 03-409-01. – М.: Гостехнадзор РФ, 2001. – 16с.

6. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах. – М.: Минтопэнерго РФ, 1995. - 122с.

7. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически-опасных объектах и транспорте. РД 52.02.253-90. – СПб, 2000. – 16с.

8. Кацман М. Д. Ліквідація пожеж на залізничному транспорті : Посіб. / М. Д. Кацман, Г. Б. Кононов, І. В. Діденко, Н. В. Огороднічук; Держ. територ.-галуз. об-ня "Півд.-Зах. з-ця". Служба відом. воєніз. охорони. Центр підгот. ряд. складу відомчої воєніз. охорони. - К. : Основа, 2006. - 210 с.

9. Мироненко В. К. Моделювання впливу часу локалізації та ліквідації аварійного розливу нафтопродукту на характеристики зони забруднення верхньої будови залізничної колії / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, О. А. Горещкий // Стратегія якості в промисловості та образванні: XI міжнародна конференція, 5–12 жовтня 2015 з. тези доп. – Варна, 2015. – С. 113–117.

10. Andronopoulos S. RODOS DIPLOT model description and evaluation [Електронний ресурс] / S. Andronopoulos, E. Davakis, J.G. Bartzis // RODOS report RODOS(RA)-TN(09)-01. – Greece, Athens: National Center for Scientific

Research, 2009. – 27 p. – Режим доступу: <https://resy5.iket.kit.edu/RODOS/>

11. RIMPUFF [Електронний ресурс] / S. Thykier Nielsen, S. Deme, T. Mikkelsen // Report RODOS WG2_TN98_02. – Denmark, Roskilde: RISO National Laboratory, 1998. – 48 p. – Режим доступу: <https://resy5.iket.kit.edu/RODOS/>

12. Scire J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J., 2000. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5). USA, Concord: Earth Tech, Inc., 2000.

13. Akula Venkatram, An examination of the urban dispersion curves derived from the St. Louis dispersion study, In Atmospheric Environment, Volume 39, Issue 21, 2005, Pages 3813-3822

14. Ковалец І.В., Мадерич В.С., Железняк М.И., 2009. Моделирование атмосферного переноса продуктов горения желтого фосфора в результате железнодорожной аварии 16 июля 2007 г. возле с. Ожидов Львовской области // 36. доп. V-ї дист. наук.-практ. конф. з міжнар. участю "Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. СППР'2009", (Київ, 8 червня 2009). – К.: НАН України, Ін-т проблем математичних машин і систем, 2009. – С. 133–137

15. Халченков А.В., Ковалец І.В., 2012. Реалізація і тестування модуля атмосферного переноса в програмі Ecolago // 36. наук. пр. Інстит. проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. – 2012. – №.65 – С.3-10

16. Kovalets I.V., Asker C., Khalchenkov A.V., Persson C., Lavrova T.V. (2017) Atmospheric dispersion of radon around uranium mill tailings of the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine // J. of Environmental Radioactivity, V.172, 173-190, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.03.025>

17. Britter R. E.: 1989, Atmospheric dispersion of dense gases, Ann. Rev. Fluid Mech., 21, 317-344.

18. Kovalets I.V., Maderich V.S., 2006. Numerical simulation of the interaction of the heavy gas cloud with the atmospheric surface layer. Environmental Fluid Mechanics, 6(4), 313-340.

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ОПАСНЫМИ ГРУЗАМИ

А.И. Запорожец, И.В. Ковалец, М.Д. Кацман

В работе рассматривается состояние перевозки опасных грузов железнодорожным транспортом Украины, динамика транспортных происшествий при перевозке опасных грузов. Предложена методика оценки временной зависимости интенсивности выброса легковоспламеняющегося вещества, которая была интегрирована в современную модель атмосферного переноса опасных веществ. Проведен расчет зон поражений вследствие аварийного выброса бензина АИ-95, что позволило учесть временную изменчивость источника выброса и рассчитать временные зависимости концентрации бензина в атмосфере на разных расстояниях от аварийной железнодорожной цистерны.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, опасный груз, транспортное происшествие, аварийная ситуация, концентрация опасного вещества, математическая модель.

ASSESSMENT OF THE CONSEQUENCES OF RAILWAY EMERGENCIES WITH DANGEROUS GOODS

O.I. Zaporozhets, I.V. Kovalets, M.D. Katsman

The article considers the state of transportation and the dynamics of transport events with the dangerous goods during the transportation by the railway transport of Ukraine. The method of estimating the time dependence of the emission intensity of a flammable substance, which was integrated into the modern model of atmospheric transport of hazardous substances, was proposed. The calculation of damage zones due to the accidental release of gasoline AI-95 has been made, which made it possible to take into account the temporal variability of the source of emissions and to calculate the time dependences of the concentration of gasoline in the atmosphere at different distances from the emergency railway tank.

Keywords: railway transport, dangerous goods, transport event, emergency situation, hazardous substance concentration, mathematical model.