

УДК 504.05

М.І. Адаменко

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків

## ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ МОДЕЛІ ТЕЧІЇ РІДИНИ В НОВИХ УСТАНОВКАХ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ХІМІЧНИХ АВАРІЙ

Виконано математичне моделювання процесу витікання рідини з резервуару автоматичної системи превентивної локалізації екологічних наслідків аварії. Отримана повна система рівнянь та знайдені її рішення, що моделюють витікання рідини з резервуару в режимах «Постріл», «Постріл з Підпором», «Постріл з Продовженням». Розроблена математична модель квазістаціонарного турбулентного витікання рідини з резервуару запропонованої установки. Збудована модельна установка й проведені експериментальні дослідження з реалізації означених режимів та їх порівняння з теоретичними розрахунками.

**Ключові слова:** екологічна безпека, ризик, комплексна аварія, хімічна небезпека, вибуховопожежна небезпека, потенційно небезпечний об'єкт.

### Вступ

**Актуальність теми.** Виробничі аварії з викидом хімічно небезпечних речовин на підприємствах України, які мали місце в останні роки, доводять актуальність заходів щодо забезпечення екологічної безпеки на подібних об'єктах.

**Постановка проблеми.** Проблема забезпечення екологічної безпеки діяльності підприємств, на яких виробляються, використовуються або зберігаються хімічно небезпечні речовини, ускладнена тим, що ліквідацію наслідків аварії з викидом необхідно проводити у найкоротші терміни.

**Попередні дослідження та вивчення літератури.** Відображення цієї проблеми знайшло місце у багатьох нормативних документах та законодавчих актах, науковій та науково-практичній літературі [1 – 5].

Отже, постає **наукова задача** забезпечення проведення найскорішої локалізації розповсюдження викиду у разі виникнення аварії.

### Основний розділ

**Розв'язання задачі.** Автором запропонований новий технічний комплекс автоматичного реагування на екологічну небезпеку.

При розробленні теорії функціонування швидкодіючого технічного комплексу автором розроблені математичні основи моделювання процесу витікання рідини з резервуару автоматичної системи превентивної локалізації екологічних наслідків аварії.

Отримана повна система рівнянь, що моделює витікання рідини з резервуару по трубі під впливом газу, котрий розширюється. Ця система рівнянь може бути записана у такому вигляді:

$$\frac{\partial U_Z}{\partial t} = \nu \Delta U_Z + \frac{P_r(t) - P_a}{\rho L} + \frac{g}{L} \left( H_n - \frac{W}{S} - H_L \right) - \frac{P_{\text{внт}}}{\rho L}. \quad (1)$$

Тут  $U_Z$  – швидкість плинину рідини по трубі довжиною  $L$ , вісь якої співпадає з віссю  $Z$ ;  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $H_n$  – початковий рівень рідини у резервуарі;  $S$  – площа перетину резервуару;  $H_L$  – відстань з відповідним знаком по вертикалі від дна резервуару до кінця струменю, який витікає в атмосферу;  $P_{\text{внт}}$  – тиск на кінці труби, який обумовлений умовами витікання рідини в атмосферу;  $P_a$  – атмосферний тиск;  $\rho$  – щільність рідини;

$$W(t) = \int_0^t \int_0^a U_Z(r, t') 2\pi r dr dt' - \quad (2)$$

обсяг рідини, що витече з резервуару до моменту часу  $t$ ;  $a$  – радіус труби;  $r$  – відстань від вісі труби;

$$P_r(t) = \frac{P_n V_{r,n}}{W(t) + V_{r,n}} - \quad (3)$$

тиск, що створюється газом в момент часу  $t$  в резервуарі;  $P_n$  та  $V_{r,n}$  – відповідно початковий тиск газу та початковий об'єм газу в резервуарі в момент часу  $t = 0$ .

Граничні та початкові умови записуються у такому вигляді:

$$U_Z(r = a, t) = 0; U_Z(r, t = 0) = 0; P_r(t = 0) = P_n. \quad (4)$$

Аналітичне рішення цієї інтегродиференційної системи рівнянь в загальному випадку отримати неможливо. Проте існує низка випадків, що мають практичний інтерес, в яких задача істотно спрощується. Один з таких випадків реалізується для резервуарів з невеликим об'ємом, які спустошуються за короткий проміжок часу, так що в'язкісна течія не встигає установитися. У такому випадку реалізується режим ідеальної рідини, який розглядається у попередніх публікаціях [6 – 10].

Експериментальні дослідження проводились на установці, яка мала резервуар ємністю  $V_0 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ .

В нижню частину резервуару була вмонтована труба з внутрішнім радіусом  $a = 8 \cdot 10^{-3}$  м та довжиною  $L = 1$  м. На кінці труби був змонтований вентиль, при відкритті якого труба резервуару сполучалась з атмосферою. У вентилі була закріплена ебонітова трубка, на якій був змонтований конденсатор. Якщо в трубці повітря замінювалось водою, то ємність конденсатора зростала приблизно в 30 разів. Це дозволяло проміжок часу витікання води з резервуару вимірювати з точністю не нижче, ніж  $10^{-2}$  секунд.

У верхню частину резервуару був вмонтований трійник. У верхньому отворі трійника закріплювався манометр, що дозволяв вимірювати тиск в резервуарі. У правому отворі трійника знаходився клапан, який відкривався, коли зовнішній атмосферний тиск був більшим, ніж тиск в резервуарі. На правій частині трійника був змонтований вентиль, що дозволяв ізолювати клапан від атмосфери. На лівій частині трійника також був змонтований вентиль.

Через лівий отвір трійника при відчиненому лівому вентилі резервуар заповнювався водою, яка займала обсяг  $V_{p,n} < V_6$ . Після цього через той же лівий отвір повітря закачувалось до резервуару. Коли у резервуарі створювався запланований тиск  $P_n$ , лівий вентиль трійника перекривався.

У момент часу  $t = 0$  вентиль труби відчинявся і вода під дією перепаду тисків  $P_n - P_a > 0$  починала витікати з резервуару. При витіканні води з резервуару повітря займало об'єм, що звільнився. У підсумку тиск  $P_r(t)$ , створений повітрям у резервуарі, зменшувався згідно з законом Бойля – Маріотта. Коли резервуар цілком спустошувався, кінцевий тиск повітря  $P_k$ , що займало об'єм резервуару  $V_6$ , залежав від відносного об'єму  $\tilde{V}_n = V_{p,n}/V_6$ , який займала рідини в резервуарі в початковий момент часу  $t = 0$ :

$$P_k = P_n (1 - \tilde{V}_n). \quad (5)$$

В експериментальному режимі «Постріл» виконувалась нерівність  $P_k > P_a$ . Згідно з рівністю (5) з метою реалізації режиму «Постріл» відносний об'єм рідини, котра заливається в резервуар, повинен задовольняти нерівності

$$\tilde{V}_n < 1 - \frac{P_a}{P_n}. \quad (6)$$

Експерименти в режимі «Постріл» були проведені для трьох початкових тисків:  $P_n = 10$  ат,  $P_n = 7$  ат,  $P_n = 2$  ат. При одному з цих трьох фіксованих значень  $P_n$  вимірювалась залежність часу спустошення резервуару  $t_{\text{екс}}$  від  $\tilde{V}_n$ . Згідно з нерівністю (6) бралися такі інтервали зміни  $\tilde{V}_n$  для кожного з трьох тисків:

$$0,1 \leq \tilde{V}_n \leq 0,8, \quad \text{коли } P_n = 10 \text{ ат}; \quad (7)$$

$$0,1 \leq \tilde{V}_n \leq 0,7, \quad \text{коли } P_n = 7 \text{ ат}; \quad (8)$$

$$0,1 \leq \tilde{V}_n \leq 0,4, \quad \text{коли } P_n = 2 \text{ ат}. \quad (9)$$

На рис. 1 наведені експериментальні значення і теоретичні залежності часу спустошення резервуару від початкового відносного об'єму рідини в резервуарі в умовах початкового тиску  $P_n = 10$  ат.

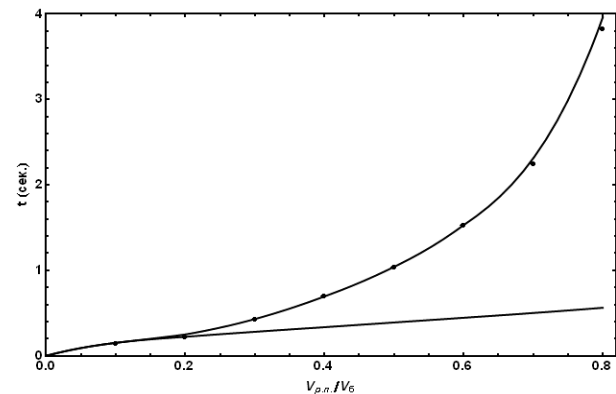


Рис. 1. Експериментальні значення та теоретичні залежності часу витікання рідини з резервуару від початкового відносного об'єму рідини в резервуарі при  $P_n = 10$  ат.

З результатів, які наведені на рис. 1, випливає, що, коли  $\tilde{V}_n \leq 0,2$ , то час  $t_{\text{екс}}$ , котрий був отриманий в експериментах, співпадає з розрахунковим  $t_B^{(1)}$ , що одержаний за формулою (5). Коли  $\tilde{V}_n = 0,3$ , то  $t_{\text{екс}}$  більше  $t_B^{(1)}$  в 1,5 рази. Ця різниця збільшується зі зростанням  $\tilde{V}_n$  та досягає значення 6,8 рази у випадку  $\tilde{V}_n = 0,8$ . Якісно такий же результат було отримано і при початкових тисках  $P_n = 7$  ат та  $P_n = 2$  ат, коли  $\tilde{V}_n$  змінювалось відповідно в інтервалах (8) та (9).

Експерименти у режимі «Постріл з Підпором» та «Постріл з Продовженням» виконувались при початкових значеннях тиску  $P_n = 2$  ат та відносному об'ємі води в резервуарі  $\tilde{V}_n = 0,55$ . Візуальна картина витікання води з резервуару, що спостерігалась у цих двох режимах, якісно співпадала з течією у моделі ідеальної рідини, але кількісно була досить велика розбіжність. Так, часи витікання води з резервуару були в декілька разів більше, ніж розрахункові в моделі течії ідеальної рідини.

Проведений аналіз показав, що причиною розбіжності експериментальних даних і теоретичних розрахунків за формулою (5) є велика швидкість руху рідини по трубці, що згідно з (4) суттєво перевищує емпіричне значення критичної швидкості, при якому рух рідини у трубці стає нестійким.

Виходячи з аналізу, сценарій розвитку подій можна описати наступним чином. Перші декілька десятих секунди вода рухається у режимі ідеальної рідини. При цьому швидкість руху рідини досягає свого максимального значення, що суттєво перевищує критичну швидкість, при якій рух рідини стає

нестійким. Проте, за цей короткий час турбулізація течії ще не встигає встановитися.

Подальше витікання води з резервуару з великою швидкістю призводить до турбулізації течії та переходу її в режим розвиненої турбулентності. Турбулентний характер струменю, який витікає з резервуару, спостерігався в експериментах. З загальних міркувань та багатьох експериментів випливає, що турбулізація течії веде до істотного зменшення швидкості руху рідини та відповідного збільшення часу витікання у порівнянні з часом.

Як відомо, турбулентна течія супроводжується надзвичайно нерегулярними змінами швидкості руху рідини. При цьому в швидкості руху рідини можна виділити середню швидкість руху та пульсуючу складову. Витікання рідини з резервуару визначається середньою швидкістю руху. Пульсуюча складова швидкості веде до виникнення, так званої, турбулентної в'язкості  $\nu_{тур}$ , яка значно більше, ніж кінематична в'язкість рідини  $\nu$ .

Для опису турбулентного витікання рідини з резервуару пропонується модель, в якій рух рідини з середньою швидкістю описується гідродинамічними рівняннями (1) – (3). При цьому в рівнянні (1) кінематичну в'язкість  $\nu$  потрібно замінити на турбулентну в'язкість  $\nu_{тур}$ , оскільки  $\nu_{тур} \gg \nu$ . Для спрощення не будемо враховувати третій та четвертий доданки у правій частині рівняння (1) та обмежимося тільки режимом «Постріл».

Рішення системи рівнянь (1) – (3) суттєво спрощується з урахуванням того, що впродовж часу  $t_{тур}$  турбулентного витікання рідини з резервуару зміна швидкості руху рідини у часі є відносно малою величиною. Тоді у нульовому наближенні ліву частину рівняння (1) можна вважати рівною нулю, а у правій частині рівняння (1) замінити функції  $U_z(r,t)$  та  $P_r(t)$  їхніми середніми значеннями  $\bar{U}(r)$  та  $\bar{P}_r$  на інтервалі часу  $t_{тур}$ . Тоді одержимо рівняння

$$0 = \nu_{тур} \Delta \bar{U} + \frac{\bar{P}_r - P_a}{\rho L} \quad (10)$$

з граничною умовою  $\bar{U}(r=a) = 0$ . Рівняння (10) описує турбулентне витікання рідини в квазістаціонарному наближенні.

Рівняння (10) може виявитися досить грубим наближенням для деяких задач. За бажанням, в нашому випадку, можливо одержати рішення задачі з досить великою точністю. Для цього проміжок часу  $t_{тур}$  слід розподілити на  $n$  малих проміжків часу  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  так, що  $n \Delta t = t_{тур}$ . Усереднення рівняння (1) по  $i$ -му проміжку часу дає ланцюг квазістаціонарних рівнянь. Розв'язуючи ланцюг цих квазістаціонарних рівнянь з урахуванням (2), (3), та «зшиваючи» отримані рішення, можна у квазістаціонарному наближенні одержати залежність від часу усіх функцій, що описують витікання рідини з резервуару.

Якщо  $n = 1$ , то ланцюг квазістаціонарних рівнянь переходить в квазістаціонарне рівняння (10). Рішення рівняння (10) з урахуванням симетрії задачі та граничної умови записується у вигляді

$$\bar{U}(r) = \frac{P_n(1 - \tilde{V}_n)(2 - \tilde{V}_{тур}) - 2P_a(1 - \tilde{V}_{тур})}{8\rho L \nu_{тур}(1 - \tilde{V}_{тур})} (a^2 - r^2), \quad (11)$$

де  $\tilde{V}_{тур} = \frac{V_{р.тур}}{V_0}$  – відносний об'єм рідини, що витікає в турбулентному режимі за час  $t_{тур}$ .

Очевидно, що

$$\tilde{V}_{тур} = \tilde{V}_n - \tilde{V}_{пер}, \quad (12)$$

де  $\tilde{V}_{пер}$  – відносний об'єм рідини, яка витікає з резервуару до моменту часу  $t_{пер}$ , після якого відбувається перехід до режиму розвинутої турбулентності. Значення  $\tilde{V}_{пер}$  та  $t_{пер}$  для кожного початкового тиску  $P_n$  знаходяться шляхом співставлення експериментальних даних з розрахунковими, які отримані в моделі ідеальної рідини.

Якщо  $P_n = 10$  ат, то  $\tilde{V}_{пер} = 0,3$ , а  $t_{пер} = 0,43$  сек.

Якщо  $P_n = 7$  ат, то  $\tilde{V}_{пер} = 0,3$ , а  $t_{пер} = 0,5$  сек.

Якщо  $P_n = 2$  ат, то  $\tilde{V}_{пер} = 0,1$ , а  $t_{пер} = 0,5$  сек.

Очевидно, що час спустошення резервуару

$$t_{сп} = t_{пер} + t_{тур}. \quad (13)$$

Обсяг рідини  $W_{тур}(t)$ , що витече з резервуару в турбулентному режимі до моменту часу  $t$  після  $t_{пер}$ , знаходиться підставленням (11) в (2) з наступним інтегруванням. Час витікання рідини з резервуару в турбулентному режимі знаходиться з рівності  $W_{тур}(t) = V_{р.тур}$ , котра дає

$$t_{тур} = \frac{16 V_0 \rho L \nu_{тур} \tilde{V}_{тур} (1 - \tilde{V}_{тур})}{\pi a^4 \left\{ P_n (1 - \tilde{V}_n) (2 - \tilde{V}_{тур}) - 2 P_a (1 - \tilde{V}_{тур}) \right\}}. \quad (14)$$

Результат розрахунку (14) з урахуванням (12) та (13) дає явну залежність часу спустошення резервуару  $t_{сп}$  від початкового відносного об'єму рідини в резервуарі  $\tilde{V}_n$ .

Формула (14) містить параметр  $\nu_{тур}$ , чисельне значення якого слід знайти з експериментальних даних. З цією метою були зіставлені розрахункове значення  $t_{сп}$ , що одержано по формулах (13) та (14) при  $P_n = 10$  ат та  $\tilde{V}_n = 0,6$ , з експериментальним  $t_{екс}$  при тих же значеннях  $P_n = 10$  ат та  $\tilde{V}_n = 0,6$ . Збіг розрахункового значення  $t_{сп}$  з експериментальним  $t_{екс}$  реалізується, коли  $\nu_{тур} = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{сек}$ . Одержане значення  $\nu_{тур}$  виявляється на два порядки більшим значення кінематичної в'язкості води  $\nu$ . Такий результат узгоджується з результатами інших

експериментів та простими фізичними міркуваннями. Усі подальші розрахунки виконувались з отриманим чисельним значенням  $v_{\text{тип}} = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{сек}$ . Отримані результати свідчать про те, що експериментальні дані добре узгоджуються з теоретичними розрахунками.

## Висновок

Розглянуті моделі течії ідеальної рідини та квазістаціонарної турбулентної течії рідини дозволяють прогнозувати витікання рідини з резервуарів будь-яких об'ємів на всіх етапах цього витікання. Це дозволить конструювати установки технічного комплексу різних розмірів для забезпечення превентивної локалізації екологічних наслідків аварій, тобто сприятиме проведенню найскорішої локалізації розповсюдження викиду у разі виникнення аварії.

Напрямок подальших досліджень пов'язаний із розробкою алгоритму та методики прийняття рішення щодо економічної доцільності впровадження в практику нового комплексу превентивної локалізації екологічних наслідків аварій на потенційно небезпечних об'єктах відповідного класу.

## Список літератури

1. Ліпкан В.А. Національна безпека України: нормативно-правові аспекти забезпечення / В.А. Ліпкан. – К., 2003. – 180 с.
2. Мартынюк В.Ф. Защита окружающей среды в чрезвычайных ситуациях: учеб. пособ. для вузов / В.Ф. Мартынюк, Б.Е. Прусенко. – М.: Нефть и газ, 2003. – 336 с.
3. Мاستрюков Б.С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: учебн. для вузов / Б.С. Мاستрюков. – М.: Изд. Центр «Академия», 2003. – 338 с.

4. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов / под ред. Э.А. Арустамова. – М.: Даиков и Ко, 2004. – 496 с.

5. Биченок М.М. Основи інформатизації управління регіональною безпекою / М.М. Биченок. – К., РНБО, Інститут проблем національної безпеки, 2005. – 194 с.

6. Адаменко Н.И. Три режима вытекания жидкости из резервуара автоматической установки пожаротушения под действием расширяющегося газа / Н.И. Адаменко // Коммунальное хозяйство городов: научн.-техн. сб. Сер: Архитектура и технические науки. – К., 2005. – Вып. 63. – С. 33-35.

7. Адаменко Н.И. Вытекание жидкости из резервуара в режиме «Выстрел с подпором» / Н.И. Адаменко // Наук. вісн. будівництва. – Х.: Харк. держ. ун-т будів. та архіт. – 2005. – Вып. 31. – С. 66-69.

8. Адаменко Н.И. Математическое моделирование вытекания жидкости из резервуара в режиме «Выстрел с продолжением» / Н.И. Адаменко // Системы обработки информации: сб. науч. пр. – Х.: Харк. ун-т Повітр. Сил, 2005. – Вып. 7(47). – С. 55-58.

9. Адаменко М.І. Розрахунок установки автоматического пожарогасіння складів боеприпасів у трьох режимах витікання рідини з резервуара під дією газу і сили тяжіння / М.І. Адаменко // Системи озброєння і військова техніка: наук. журн. – Х.: Харк. ун-т Повітр. Сил. – 2005. – №1(1). – С. 37-40.

10. Адаменко М.І. Зниження масштабів екологічного впливу аварій на потенційно небезпечних об'єктах шляхом їх своєчасного виявлення / М.І. Адаменко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: Центральний наук.-досл. ін-т навігації і управління. – 2010. – Вып. 4 (16). – С. 240-243.

Надійшла до редколегії 10.07.2013

**Рецензент:** д-р військ. наук, проф. І.О. Кириченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ИНФОРМАЦИОННО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НОВЫХ УСТАНОВКАХ ЛОКАЛИЗАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ АВАРИЙ

М.И. Адаменко

Проведено математическое моделирование процесса вытекания жидкости из резервуара автоматической системы локализации экологических последствий аварии. Получена полная система уравнений, моделирующая вытекание жидкости из резервуара по трубе под воздействием расширяющегося газа, в режимах «Выстрел», «Выстрел с Подпором», «Выстрел с Продолжением». Разработана математическая модель квазистационарного, турбулентного вытекания жидкости из резервуара предложенной установки. Построена модельная установка и проведены экспериментальные исследования при реализации режимов «Выстрел», «Выстрел с Подпором», «Выстрел с Продолжением» и их сравнение с теоретическими расчетами.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, риск, комплексная авария, химическая опасность, взрывопожароопасность, потенциально опасный объект.

## AN INFORMATIVELY-THEORETICAL GROUND AND EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF MODEL OF FLOW OF LIQUID IS IN NEW OPTIONS OF LOCALIZATION OF CHEMICAL FAILURES

M.I. Adamenko

The mathematical bases of process design of liquid effluence from the reservoir of the automatic system of preventive localization of accident ecological consequences are created. The complete system of equalizations is got and its decisions that design the liquid effluence from a reservoir in the modes "Shot", "Shot with Support", "Shot with Continuation" are found. The mathematical model of quasistationary turbulent liquid effluence from the reservoir of the offered setting is worked out. The model setting and conducted experimental researches in realization of the marked modes and their comparing to the theoretical calculations are built.

**Keywords:** ecological safety, risk, complex accident, fire-explosive danger, potentially dangerous object.