УДК 504.05.

М.І. Адаменко

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ПО АПРОБАЦІЇ МОДЕЛІ КВАЗІСТАЦІОНАРНОЇ ТУРБУЛЕНТНОЇ ТЕЧІЇ РІДИНИ В УСТАНОВКАХ ЛОКАЛІЗАЦІЇ АВАРІЙ

У статті розглядається проблема забезпечення екологічної безпеки діяльності підприємств на яких виробляються, використовуються або зберігаються хімічно небезпечні речовини та наукова задача забезпечення проведення найскорішої локалізації розповсюдження викиду у разі виникнення аварії з хімічно небезпечними речовинами. Наводяться основи розрахунку дії нової установки з локалізації екологічного впливу на довкілля найбільш важливих чинників ураження аварій на хімічних підприємствах. Висвітлюються результати експериментальних досліджень роботи моделі установки, яка запропонована, у трьох режимах функціонування – «постріл», «постріл з підпором» та «постріл з продовженням». Надаються висновки щодо порівняння експериментальних результатів з теоретичними розрахунками.

Ключові слова: *екологічний вплив, локалізація аварії, хімічна небезпека, експериментальні дослідження.*

Вступ

Актуальність теми. Надзвичайні ситуації 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

Виклад основного матеріалу

Розв’язання задачі. У попередніх роботах автора були наведені розрахунки та конструктивне рішення, щодо створення установки превентивної локалізації розповсюдження впливу хімічної аварії на довкілля. Також були розраховані три режими роботи установки – «постріл», «постріл з підпором» та «постріл з продовженням [6 – 10]. Дана робота присвячена експериментальним дослідженням роботи даної установки.

Турбулентний рух супроводжується надзвичайно нерегулярними, хаотичними змінами швидкості руху рідини. При цьому в швидкості руху рідини можливо виділити складову, яка змінюється в часі повільно, та пульсуючу складову, що змінюється швидко за час пульсації $\tau_{пульс}$. Окрім того, виконується сильна нерівність:

$$\tau_{пульс} << \tau_з, \tag{1}$$

де $\tau_з$ – характерний час задачі.

У нашому випадку таким часом може слугувати час, за який вода проходить відстань порядку довжини труби.

Визначимо середню швидкість руху рідини $\vec{U}(\vec{r},t)$ рівністю:

$$\vec{U}(\vec{r},t) = \frac{1}{\tau}\int_{t-\frac{\tau}{2}}^{t+\frac{\tau}{2}} \vec{U}_{тур}(\vec{r},t'), \tag{2}$$

де $\vec{U}_{тур}(\vec{r},t')$ – істинна швидкість руху рідини у турбулентному потоці, а час усереднення τ визначається нерівностями:

$$\tau_{пульс} << \tau << \tau_з. \tag{3}$$

Запишемо істинну швидкість $\vec{U}_{тур}$ у вигляді

$$\vec{U}_{тур}(\vec{r},t) = \vec{U}(\vec{r},t) + \vec{U}_{пульс}(\vec{r},t), \tag{4}$$

де $\vec{U}_{пульс}$ – пульсуюча складова швидкості руху рідини у турбулентному потоці.

Згідно з визначенням (2) та (4) середнє значення $\vec{U}_{пульс}$ дорівнює нулю.

Очевидно, що витікання рідини з резервуару визначається середньою швидкістю руху $\vec{U}(\vec{r},t)$. Пульсуюча складова швидкості $\vec{U}_{пульс}(\vec{r},t)$ веде до переносу імпульсу рідини між шарами рідини, яка рухається з середньою швидкістю. Такий хаотичний перенос імпульсу, обумовлений $\vec{U}_{пульс}$, веде до виникнення, так званої, турбулентної в'язкості $\upsilon_{тур}$.

Фізична природа турбулентної в'язкості $\upsilon_{тур}$ аналогічна фізичній природі звичайної кінематичної в'язкості υ. Різниця лише у тому, що звичайна кінематична в'язкість υ обумовлена переносом імпульсу між шарами рідини за рахунок хаотичного теплового руху, а турбулентна в'язкість $\upsilon_{тур}$ – за рахунок хаотичного руху, який обумовлений $\vec{U}_{пульс}$. При цьому макроскопічний перенос імпульсу, який обумовлений хаотичним пульсаційним рухом рідини, очевидно, буде значно ефективніше, ніж перенос імпульсу, що обумовлений мікроскопічним хаотичним тепловим рухом. З простих фізичних міркувань та експериментальних даних випливає, що

$$\upsilon_{тур} >> \upsilon. \tag{5}$$

У зв'язку з тим, що наведено вище, для розв'язання нашої задачі турбулентного витікання рідини з резервуару пропонується модель, в якій усереднений рух рідини $\vec{U}(\vec{r},t)$ описується звичайними гідродинамічними рівняннями. В цих рівняннях, враховуючи нерівність (5), кінематичну в'язкість υ потрібно замінити на турбулентну в'язкість $\upsilon_{тур}$.

Врешті – решт, маємо:

$$\operatorname{div}\vec{U} = 0\,; \tag{6}$$

$$\frac{\partial\vec{U}}{\partial t} + \left(\vec{U}\nabla\right)\vec{U} = \upsilon_{тур}\Delta\vec{U} + \frac{1}{\rho}\nabla P\,. \tag{7}$$

З симетрії задачі, яка розв'язується, випливає, що відмінна від нуля тільки складова швидкості U_Z, яка спрямована вдовж вісі труби, що співпадає з віссю Z. З симетрії задачі випливає, що $U_Z(r,t)$, де r – відстань від вісі труби. Врешті – решт, для нашого випадку Z – складова рівняння (7) записується у вигляді:

$$\frac{\partial U_Z}{\partial\ t} = \upsilon_{тур}\Delta U_Z + \frac{P_г(t) - P_a}{\rho L} \tag{8}$$

з граничною умовою

$$U_Z(r = a, t) = 0\,. \tag{9}$$

В подальшому ми обмежимось тільки режимом «Постріл», коли тиск газу в резервуарі $P_г(t)$ більше за атмосферний тиск P_a. При цьому реалізуються три різні етапи витікання рідини з резервуару.

На першому етапі вода витікає з резервуару в режимі ідеальної рідини, який розглядався у цьому розділі раніше. Проміжок часу, впродовж якого триває цей етап, дається нерівностями

$$0 < t \le t_{ід}, \tag{10}$$

де $t_{ід}$ – момент часу, коли закінчується перший етап.

Час $t_{ід}$ можна вважати рівним максимальному значенню часу, коли теоретичне значення часу $t_{мін}$ співпадає з експериментальним $t_{екс}$ в межах похибки вимірювання. Часи $t_{ід}$ відповідно дорівнюють: 0,22 сек. при $P_п$ = 10ат; 0,27 сек. при $P_п$ = 7ат; 0,45 сек. при $P_п$ =2ат.

Коли рідина прискорюється від нульового значення швидкості при t=0 до максимального значення швидкості, яке рідина набуває в момент часу $t_{ід}$. Максимальне значення швидкості знаходиться, виходячи з теоретичних формул [6].

Другий етап витікання рідини з резервуару є перехідним від режиму течії ідеальної рідини до режиму розвинутої турбулентності. Цей етап триває впродовж часу, який визначається нерівностями

$$t_{ід} < t \le t_{пер}, \tag{11}$$

де $t_{пер}$ – момент часу, коли завершується перехідний етап.

Час $t_{пер}$ можна оцінити, виходячи з експериментальних даних. Така оцінка зроблена нижче.

На третьому етапі рідина витікає з резервуару в режимі розвиненої турбулентності. Третій етап триває впродовж часу, який визначається нерівностями

$$t_{пер} < t \le t_{сп}, \tag{12}$$

де $t_{сп}$ – час спустошення резервуару.

На третьому етапі швидкість руху рідини можна отримати, якщо розв'язати рівняння (8) з граничною умовою (9). Рішення цієї досить складної задачі можна спростити, якщо врахувати, що на третьому етапі швидкість руху рідини є досить велика, а її зміна за час (12) у наших випадках є відносно малою величиною.

Математично це означає, що перший та другий доданки, які компенсують один одне, у правій частині рівняння (8), значно більше лівої частини рівняння (8). Тоді у нульовому наближенні ліву частину рівняння (8) можна вважати рівною нулю, а у правій частині рівняння (8) функції $U_Z(r,t)$ та $P_г(t)$, які залежать від часу, треба замінити їхніми середніми значеннями U(r) та $\overline{P}_г$ на інтервалі часу (12).

Врешті – решт, для середніх значень швидкості U(r) при заданому середньому значенні тиску газу в резервуарі $\overline{P}_г$ згідно з (8) отримаємо рівняння

$$0 = \upsilon_{тур}\Delta U + \frac{\overline{P}_г - P_a}{\rho\ \ L} \tag{13}$$

з граничною умовою

$$U(r = a) = 0\,. \tag{14}$$

Рівняння (13) є досить грубим наближенням. За бажанням в нашому випадку можливо одержати рішення задачі з будь-якою точністю. Для цього проміжок часу (12) слід розподілити на *n* малих проміжків часу $\Delta\ \ t = t_{i+1} - t_i$ так, що $n\Delta\ \ t = t_{сп} - t_{пер}$. Усереднення рівняння (8) по і-му проміжку часу дає таке:

$$\frac{U_Z(t_{i+1}) - U_Z(t_i)}{\Delta\ \ t} = \upsilon_{тур}\Delta\overline{U}_Z^i + \frac{\overline{P}_г^i - P_a}{\rho L}\,, \tag{15}$$

де $\overline{U}_Z^i$ та $\overline{P}_г^i$ – середні значення швидкості та тиску на і-му проміжку часу.

В ситуації, яка досліджується, швидкість $\bar{U}_Z^i$ значно більша, ніж зміна швидкості $\left|U_Z(t_{i+1}) - U_Z(t_i)\right|$ за проміжок часу Δt. З точки зору математики це означає, що перший доданок правої частини рівняння (14) значно більше лівої частини рівняння (14). Таке ствердження передбачає виконання наступної нерівності

$$\frac{\left|U_Z(t_{i+1}) - U_Z(t_i)\right|}{\bar{U}_Z^i} \prec\prec \upsilon_{тур} \frac{\Delta t}{a^2}. \qquad (16)$$

У нашому випадку $\upsilon_{тур}$ та $\bar{U}_Z^i$ є досить великі величини, так що нерівність (16) виконується.

У нульовому наближенні по малому параметру, який випливає з (16), можна вважати, що ліва частина рівняння (15) дорівнює нулю. Врешті – решт, отримаємо ланцюг *n* квазістаціонарних рівнянь

$$0 = \upsilon_{тур} \Delta \bar{U}_Z^i + \frac{\bar{P}_г^i - P_а}{\rho L} \quad (i = 1, 2 ... n) \qquad (17)$$

з граничними умовами

$$\bar{U}_Z^i (r = a) = 0. \qquad (18)$$

Розв'язуючи ланцюг квазістаціонарних рівнянь (17) з граничними умовами (18), та зшиваючи отримані рішення на границях часових інтервалів можна одержати рішення задачі з будь-якою точністю. Коли n=1, ланцюг квазістаціонарних рівнянь (17) з граничними умовами (18) переходить в квазістаціонарне рівняння (13) з граничною умовою (13).

Наближення n=1 є з одного боку найбільш грубим, але з іншого боку – це найбільш простий шлях для вирішення нашої задачі. Тому і будемо виходити з наближення n=1, якому відповідає рівняння (13) з граничною умовою (14). Тут доречно відмітити, що після отримання рішення з n=1, яке буде наведене нижче, була розв'язана також задача з n=2. При цьому у всіх розглянутих випадках результати з n=1 та n=2 виявилися близькими.

Слід врахувати, що, виходячи з симетрії задачі, яка вирішується, швидкість U залежить тільки від відстані r від вісі труби. Тоді у циліндричній системі координат рівняння (13) можна записати у вигляді:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr} r \frac{dU}{dr} = \frac{P_а - \bar{P}_г}{\rho L \upsilon_{тур}}. \qquad (19)$$

Інтегруючи двічі рівняння (19), отримаємо

$$U(r) = \frac{P_а - \bar{P}_г}{4\rho L \upsilon_{тур}} r^2 + c_1 \ln r + c_2, \qquad (20)$$

де c_1 та c_2 – константи інтегрування.

Виходячи з умов скінченності рішення, коли $r \to 0$, константа c_1=0.

Константа c_2 визначається граничними умовами (5.33). Врешті – решт, одержимо:

$$U(r) = \frac{\bar{P}_г - P_а}{4\rho L \upsilon_{тур}} \left(a^2 - r^2\right). \qquad (21)$$

Значення часу, за яке у квазістаціонарному турбулентному режимі рідина витече з резервуару, згідно з (12), можна записати у вигляді

$$t_{кв} = t_{сп} - t_{пер}. \qquad (22)$$

Нам потрібно вирахувати час $t_{сп}$, за який спустошиться резервуар, та порівняти розрахункові значення з експериментальними даними $t_{екс}$. Згідно з (22),

$$t_{сп} = t_{кв} + t_{пер}. \qquad (23)$$

Час закінчення перехідного режиму, який міститься у формулі (23), можна оцінити, виходячи з експериментальних даних, як час, при якому відношення $t_{екс}/t_{мін}$ починає помітно відрізнятися від одиниці. Така оцінка тисків дає значення $t_{пер}$=0,43 сек., коли $P_п$= 0 ат та $t_{пер}$=0,5 сек., коли $P_п$=7 ат і $P_п$=2 ат.

Час $t_{кв}$ можна одержати, виходячи з рівності

$$V_{р.кв} = t_{кв} \int_0^a U(r) 2\pi r dr, \qquad (24)$$

де $V_{р.кв}$ – об'єм рідини, що витікає з резервуару за час $t_{кв}$, який дається формулою (22).

Рівність (24) стає очевидна, якщо врахувати, що інтеграл, який міститься у її правій частині, дає об'єм рідини, яка витече в одиницю часу з труби з радіусом a. Підставляючи у підінтегральний вираз (24) співвідношення (21) та виконуючи інтегрування, одержимо

$$t_{кв} = \frac{V_{р.кв} 8\rho L \upsilon_{тур}}{\pi a^4 \left(\bar{P}_г - P_а\right)}. \qquad (25)$$

Введемо безрозмірний відносний об'єм рідини, що витікає за час $t_{кв}$ рівністю

$$\tilde{V}_{кв} = V_{р.кв} / V_б. \qquad (26)$$

Очевидно, що

$$\tilde{V}_{кв} = \tilde{V}_п - \tilde{V}_{пер}, \qquad (27)$$

де $\tilde{V}_{пер}$ – відносний об'єм рідини, що витік з резервуару до моменту часу $t_{пер}$.

При $t_{пер}$=0,43 сек., коли $P_п$=10 ат, та $t_{пер}$=0,5 сек., коли $P_п$= 7 ат, одержимо $\tilde{V}_{пер}$=0,3, а при $P_п$=2 ат, коли $t_{пер}$=0,5 сек., одержимо $\tilde{V}_{пер}$=0,1.

Середнє значення тиску $\bar{P}_г$ в резервуарі на інтервалі (12), яке міститься в (25), можна вважати рівним

$$\bar{P}_г = \left(P_{пер} + P_к\right)/2, \qquad (28)$$

де $P_{пер}$ – тиск газу в резервуарі в момент часу $t_{пер}$ Цей тиск згідно з теорією дорівнює:

$$P_{пер} = P_п \frac{1 - \tilde{V}_п}{1 - \tilde{V}_{кв}}. \qquad (29)$$

Кінцеве значення тиску газу $P_к$ в момент часу $t_{сп}$ випливає з відповідного теоретичного співвідношення [8]. Значення $P_к$ можна також одержати з (29), в якій слід $\tilde{V}_{кв}$ покласти рівним нулю. Підстановка в (28) виразів для $P_{пер}$ та $P_к$ дає

$$\overline{P}_г = P_п \frac{\left(1-\tilde{V}_п\right)\left(2-\tilde{V}_{кв}\right)}{2\left(1-\tilde{V}_{кв}\right)}. \qquad (30)$$

Підставляючи (30) в (25) з урахуванням (26), остаточно одержимо

$$t_{кв} = \frac{16V_б\rho L\upsilon_{тур}\tilde{V}_{кв}\left(1-\tilde{V}_{кв}\right)}{\pi a^4\left\{P_п\left(1-\tilde{V}_п\right)\left(2-\tilde{V}_{кв}\right)-2P_а\left(1-\tilde{V}_{кв}\right)\right\}}. \qquad (31)$$

Результат (31) з урахуванням (23) та (27) дає явну залежність часу спустошення резервуару $t_{сп}$ від початкового відносного об'єму рідини в резервуарі $\tilde{V}_п$.

Формула (31) містить параметр $\upsilon_{тур}$, чисельне значення якого слід знайти з експериментальних даних. З цією метою ми зіставимо розрахункове значення $t_{сп}$, що одержимо по формулах (22) та (31) при $P_п$=10 ат та $\tilde{V}_п$=0,6, з експериментальним $t_{екс}$ при тих же значеннях $P_п$=10 ат та $\tilde{V}_п$=0,6.

Збіг розрахункового значення $t_{сп}$ з експериментальним $t_{екс}$ реалізується, коли $\upsilon_{тур}=1{,}14 \cdot 10^{-4}$ м^2/сек. Одержане значення $\upsilon_{тур}$ виявляється на два порядки більше значення кінематичної в'язкості води υ. Такий результат узгоджується з результатами інших експериментів та простими фізичними міркуваннями.

Висновки

Порівняння теоретичних розрахунків з даними,які отримані експериментальним шляхом надає можливість констатувати, що теорія, яка наведена у попередніх роботах [6 – 10] знаходить достатнє експериментальне підтвердження.

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: уч. пособ. для вузов / В.Ф. Мартынюк, Б.Е. Прусенко. – М.: Нефть и газ, 2003. – 336 с.

3. Мастрюков Б.С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: учебн. для вузов / Б.С. Мастрюков. – М.: Изд. Центр «Академия», 2003. – 338 с.

4. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов / под ред. Э.А. Арустамова. – М.: Дашков и К°, 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. – 2005. – Вип. 31. – С. 66-69.

8. Адаменко Н.И. Математическое моделирование вытекания жидкости из резервуара в режиме «Выстрел с продолжением» / Н.И. Адаменко // Системи обробки інформації. – Х.: Харк. ун-т Повітр. Сил. – 2005. – Вип. 7(47). – С. 55-58.

9. Адаменко М.І. Розрахунок установки автоматичного пожежегасіння складів боєприпасів 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: зб. наук. пр. – К.: Цент. наук.-досл. ін-т навігації і управління. – 2010. – Вип. 4 (16). – С. 240-243.

Надійшла до редколегії 2.04.2013

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО АПРОБАЦИИ МОДЕЛИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В УСТАНОВКАХ ЛОКАЛИЗАЦИИ АВАРИЙ

Н.И. Адаменко

В статье рассматривается проблема обеспечения экологической безопасности работы предприятий, на которых производятся, используются или хранятся химически опасные вещества. В части решения проблемы рассматривается научная задача по обеспечению проведения срочной локализации распространения выброса в случае возникновения аварии с химически опасными веществами. Приводятся основы расчета действия новой установки по локализации влияния на окружающую среду наиболее опасных факторов аварий на химических предприятиях. Описываются результаты экспериментальных исследований работы модельной установки в трех режимах – «выстрел», «выстрел с подпором» и «выстрел с продолжением». Приводятся выводы, сделанные при сравнении экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

Ключевые слова: *экологическое влияние, локализация аварии, химическая опасность, экспериментальные исследования.*

RESULTS OF EXPERIMENTS ON APPROBATION OF MODEL OF QUASI-STATIONARY TURBULENT FLOW OF LIQUID IN OPTIONS OF LOCALIZATION OF FAILURES

M.I. Adamenko

The problem of providing of ecological safety of work of enterprises, on which made, utillized or kept chemically hazardous substances, is examined in the article. In part of decision of problem a scientific task is examined on providing of conducting of urgent localization of distribution of the troop landing in the case of origin of failure with chemically hazardous substances. Bases over of calculation of action of the new setting are brought on localization of influence on the environment of the most dangerous factors of failures on chemical enterprises. The results of experimental researches of work of the model setting are described in three modes is a «shot», «shot with подпором» and «shot with continuation». Conclusions over, done at comparing of experimental information to the theoretical calculations, are brought.

Keywords: *ecological influencing, localization of failure, chemical danger, experimental researches.*