УДК 624.5
UDC 624.5

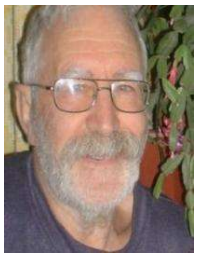
DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-312-329

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ВИТОКУ МАСИ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

METHOD OF ASSESSMENT OF LIQUID MASS LEAKAGE IN THE PIPELINE DURING OPERATION

Онищенко Артур Миколайович, *доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд,професор Національний транспортний університет, Київ, Україна, e- mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, тел. +380687771899,*

https://orcid.org/0000-0002-1040-4530



Островерх Борис Миколайович*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: borys.ostro@gmail.com.*

https://orcid.org/0000-0002-3373-5535

Чиженко Наталія Петрівна, *кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: chyzhenko_np@ukr.net, тел. +380507355080,*

https://orcid.org/0000-0002-9152-2474

Аксьонов Сергій Юрійович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, Aksenov121@gmail.com, тел. +380971534406,*

https://orcid.org/0000-0002-6749-3909

Мошківський Роман Володимирович, *аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна e-mail: moshkjoma@gmail.com, тел. +380672357174,*

https://orcid.org/0009-0004-9471-4238

Анотація. При розробці документів, що передбачені Законом України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» виникла необхідність розрахунку кількості аміаку, яка може прийняти участь у надзвичайній ситуації під час аварії на лінійній частині аміакопроводу. Нормативними документами передбачений розгляд випадку надзвичайної ситуації з гільйотинним розривом трубопроводу.

Загальна маса небезпечної речовини, що бере участь у аварії вираховується як сумарна маса, що міститься в лінійній частині трубопроводу між двома запірними пристроями, і сумарна маса, що може виділитися протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв. Необхідно розрахувати масу аміаку, що може виділитися по прямому і зворотному напрямку протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв. Визначена загальна маса небезпечної речовини після аварії ділянки аміакопроводу як сумарна маса в лінійній частині трубопроводу між двома запірними пристроями, і сумарна маса, що може виділитися протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв за схемою гільйотинного розриву.

Ключові слова: аварії аміакопроводів, гільйотинний розрив, термогідродинамічна теорія течії, гідравлічне наближення.

Вступ. ДП «Укрхімтрансаміак» експлуатує магістральний аміакопровід, який є об'єктом підвищеної небезпеки (далі ОПН) першого класу. При розробці документів, що передбачені Законом України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» виникла необхідність розрахунку кількості аміаку, яка може прийняти участь у надзвичайній ситуації під час аварії на лінійній частині аміакопроводу. Нормативними документами передбачений розгляд випадку надзвичайної ситуації з гільйотинним розривом трубопроводу.

Загальна маса небезпечної речовини, що бере участь у аварії вираховується як сумарна маса, що міститься в лінійній частині трубопроводу між двома запірними пристроями, і сумарна маса, що може виділитися протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв.

Сумарна маса рідкого аміаку у кожній секції лінійної частини між двома запірними пристроями вираховується досить просто. Такі розрахунки уже зроблені.

Наразі необхідно розрахувати масу аміаку, що може виділитися по прямому і зворотному напрямку протягом часу, установленого для виявлення витоку речовини та здійснення перекриття запірних пристроїв. Висока точність такого розрахунку не потрібна. Тому, для спрощення розрахунку необхідно визначити і прийняти певні допущення. Запропоновано прийняти середні параметри, а саме:

– тиск в секції – 50 кг/см^2;

– довжина секції - 6000 м;

– розгерметизація - гільйотинний розрив посередині секції;

– густина рідкого аміаку в секції – 0,627 т/м^3;

– встановлений час для виявлення витоку речовини та здійснення (виконання) наказу перекриття запірних пристроїв складає 90 секунд;

– з них час перекриття запірних пристроїв після надання команди складає 60 секунд, під час перекриття швидкість витоку аміаку зменшується лінійно від початку до повного перекриття запірних пристроїв;

– наявність зворотних клапанів на лінійній частині секції не враховується.

– виключення насосів прямої (нагнітання) та зворотньої (всмоктування) частин секції та запирання затворів – відбувається одночасно за сценарієм (пропонується продовження роботи на зворотній ділянці секції)

– зважаючи, що більша частина трубопроводу укладена під землею на глибині до 1.4 м треба врахувати можливість утворення вирви глибиною до 3 м, що може затримати остаточний витік аміаку з трубопроводу.

Розрахунок потрібно виконати для двох діаметрів трубопроводу, а саме:

1.Зовнішній діаметр труби D_1- 355,6 мм, товщина стінки h – 7,92 мм;

2.Зовнішній діаметр труби D_2 - 273 мм, товщина стінки h – 7,92 мм

Мета роботи є розробка моделі з оцінювання витоку маси рідини аміаку в трубопроводі при експлуатації .

Виклад основного матеріалу. Аналіз літературних джерел, що присвячені прогнозуванню рівня забруднення природного середовища при витоку аміаку показав, що розрахунки ведуться з використанням постійного значення інтенсивності викиду. Тобто, процес викиду вважається стаціонарним. Такий підхід є «спрощеним», і через те він не відображає фізику процесу викиду аміаку з аміакопроводу, що знаходиться під надлишковим тиском та створення ОПН. В реальності, процес викиду аміаку є нестаціонарним. Це означає, що навколишнє природне середовище буде отримувати навантаження різне за інтенсивністю. Тому, для адекватного оцінювання рівня забрудненості навколишнього природного середовища (НПС) необхідно враховувати зміну тиску з часом у ньому. У такій постановці загальна задача про нестаціонарний рух однорідного середовища, поставлена в рамках одновимірної задачі, є окремим випадком системи [5–8] і зводиться до розв'язування системи двох рівнянь у частинних похідних збереження маси та імпульсу[5]:

$$\partial P/\partial t = a^2\, \partial(\rho V)/\partial x \qquad (1)$$

$$\partial P/\partial x = \partial(\rho V)/\partial t + \rho\lambda V\,|V|/2D, \qquad (2)$$

де: V – середня швидкість несучого середовища по площі поперечного перерізу;
P – тиск в системі;
ρ – щільність несучого середовища;
a – швидкість поширення звуку;
λ – коефіцієнт гідравлічного опору;
D – діаметр трубопроводу.

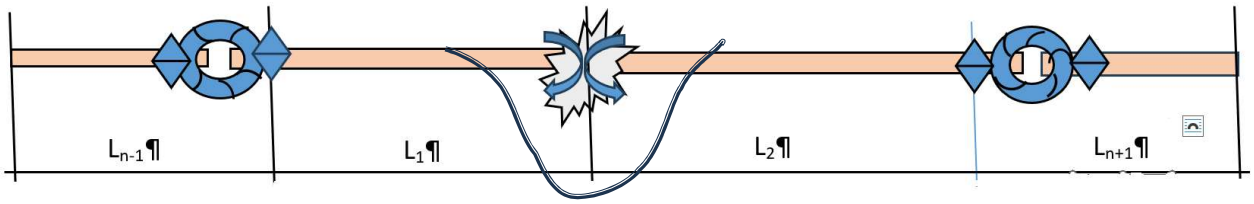
Як більш загальна система рівнянь руху [6], так і спрощена система рівнянь (1-2) належать до гіперболічного типу і для їх розв'язування можна використовувати одні й ті ж аналітичні та чисельні методи. Іншими словами, задаючи початкові та граничні умови (також знаючи закон зміни ρ, λ та a), систему рівнянь (1) можна принципово розв'язати для різних режимів роботи високошвидкісних трубопровідних систем.

Водночас слід зазначити, що правильне завдання граничних умов і вибір зручного методу розв'язування системи (1) найчастіше пов'язане з певними труднощами. У науковій літературі широко використовуються як аналітичні, так і чисельні методи розв'язування систем гіперболічних рівнянь. У зв'язку з нелінійністю системи (1) при використанні аналітичних методів розв'язування передбачається проводити попередню лінеаризацію вихідних рівнянь. Більшість авторів, вирішуючи такі задачі, проводили лінеаризацію системи (1), замінюючи доданок $\lambda V|V|$ на його постійне значення, що дорівнює середньому значенню за координатою та часом. Крім того, при вирішенні конкретних задач зазвичай приймається ρ = const, що виключає можливість фазових переходів. Наведені вище припущення призводять до того, що не завжди вдається досягти задовільної відповідності між розрахунковими та експериментальними даними. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки універсального методу розв'язування системи (1). Цілком очевидно, що в такій ситуації можна використовувати лише чисельні методи розрахунку. Найпопулярнішим методом розв'язання системи (1) досі вважається метод характеристик.

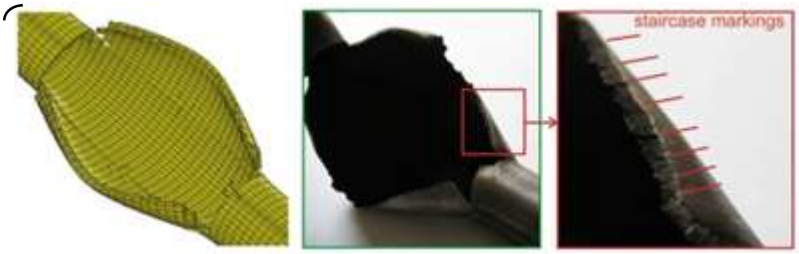
Після аналізу різних чисельних алгоритмів прийнято явні різницеві схеми Лакса та Лакса–Вендрофа, які добре зарекомендували себе в галузі газової динаміки. У цій постановці змогли використати вихідну систему рівнянь (1) для розв'язання деяких задач у сфері не лише руху однорідної рідини, а й гідротранспорту різних твердих дисперсних матеріалів у трубах у режимі розвиненої турбулентності [6–8].

В роботі [1] розглянуто процес розрахунку нестаціонарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу. В даній роботі розглядається чисельна модель, побудову якої створено в гідравлічному наближенні. Особливістю запропонованої моделі є те що вона враховує нестаціонарний процес витоку аміаку з трубопроводу, тобто змінну з часом витрату аміаку, що потрапляє в природне навколишнє середовище. Інший алгоритм витікання запропоновано у праці Van den Bosch C.J.H. [19] , де витікання рідини розглядається за сценарієм, що описано нижче.

Моделювання витікання рідини через отвори та трубопроводи спрямоване на прогнозування масової витрати як функції перепаду тиску. Для рідин, що протікають через отвір, можна застосувати рівняння Бернуллі. Нехтуючи початковою швидкістю рідини в посудині, можна оцінити масову швидкість потоку. Проведення розрахунків за методикою є неможливою через відсутність більшості параметрів для зрідженого аміаку, які є результатом спеціальних експериментальних досліджень [1].



а)



б)

Рисунок 1 – Схема зруйнованої ділянки (секції) пошкодженого трубопроводу (а) та варіант реального розриву (б)

Figure 1 – Scheme of the destroyed section (section) of the damaged pipeline (a) and the real gap option (b)

Для проведення розрахунків на базі запропонованої моделі гідравлічного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу, в якості початкових даних, використані такі фізико-технічні параметри:
– площу отвору в аміакопроводі;
– довжину секції труби;
– надлишковий тиск в аміакопроводі на момент аварії;
– розрахунковий крок за часом ;
– коефіцієнт витрати через розрив μ =0.18–1.0;
– коефіцієнт гідравлічного тертя (шорсткості) f у трубопроводі (наявність внутрішнього облицювання);
– коефіцієнт об‘ємного стиснення, β;
– кінематична в‘язкість рідини (аміаку), ν .

Було проведено декілька обчислювальних експериментів щодо зміни надлишкового тиску в аміакопроводі та маси аміаку, що викидається з нього у випадку появи отвору шляхом покрокового наближення рівнянь (1-2). Розрахунок виконано на базі побудованої моделі для площини отвору S м^2 (ця площа дорівнює площі «живого» перерізу трубопроводу, тобто, такий розмір отвору можна трактувати, як «гільйотинний» розрив аміакопроводу). Результати експериментів наглядно вказують

(рис. 2), що значення надлишкового тиску в аміакопроводі змінюється з часом у вигляді поширення хвилі, що впливає на кількість емітованого в повітря аміаку.

Програмна реалізація гідравлічного підходу [1] до розглянутої моделі виконана на алгоритмічній мові, що імплементована в кодах «Exel». Ця програма виконує прогнозні розрахунки на ПК з оцінки рівня забруднення атмосферного повітря та поверхні землі у випадку викиду аміаку за сценарієм гільйотинного розриву трубопроводу. Розрахунки показали, що перший етап викиду аміаку з пошкодженого трубопроводу (викид за рахунок надлишкового тиску) закінчується приблизно за 180 с, тобто пізніше повного закриття затворів (90 сек.), і таким чином зруйнована секція може вважатися закритою з одного боку та вільно відкритою – з іншого. Розрахунок завершується після досягнення поверхні фазового переходу до затвору та починається другий етап – випаровування аміаку та повний витік газу, що легше повітря, з пошкодженого трубопроводу.

У заданій постановці обидві частини зруйнованої секції мають однакову довжину і є абсолютно ідентичні одна одній та витікають в одне місце (рис. 1). Тому всі параметри стосовно обсягів витікання зрідженого газу для отримання остаточних результатів збільшуються у 2 рази.

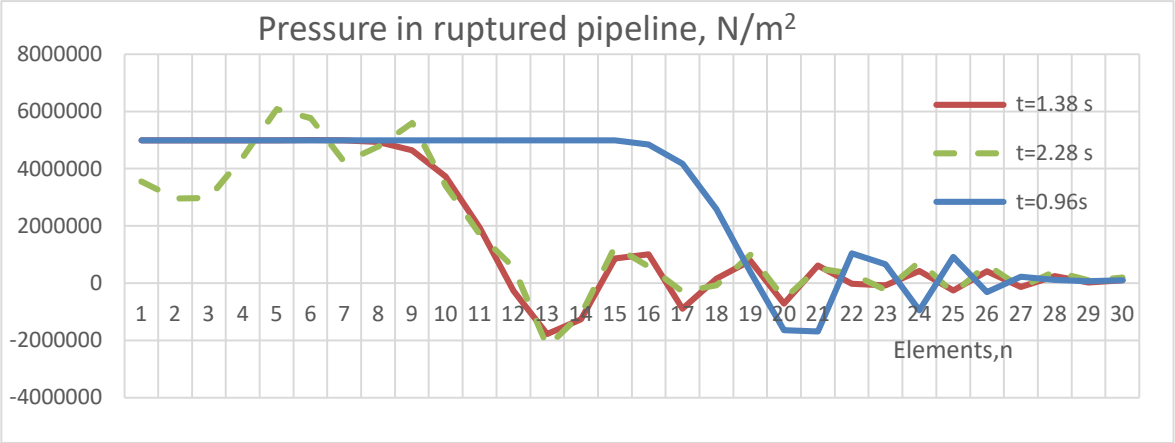


Рисунок 2 – Результати розрахунків поширення хвилі падіння тиску в зруйнованій секції аміакопроводу

Figure 2 – Results of pressure drop wave propagation calculations in the destroyed section of the ammonia pipeline

Перш за все визначаємо об'єм аміаку в секції (довжина секції *L,* м) за відсутності надлишкового тиску ΔP_s:

$$W = S\,L, \tag{4}$$

де $S = \pi d^2/4$ ($м^2$) – площа поперечного перерізу трубопроводу,
d =0.3556 м – діаметр та довжина L трубопроводу.

Згідно того, що до пошкодження аміакопроводу слід виділити наступні етапи:

1) Витікання рідини (зрідженого газу) з отвору, що утворився в результаті аварії на середині секції, під вибуховою чи розривною дією, при наявності відкритих секційних затворів не відбувається під тиском із сусідніх заповнених секцій, якщо термін повного фазового переходу зрідженого аміаку в зруйнованій секції більше терміну повного перекриття, то можна вважати стаціонарною від моменту руйнування до отримання команди і до повного перекриття затворів

з відокремленої секції відбувається витіснення залишків газу аміаку повітрям. Таким чином, об‘єм витоку зрідженого газу не може бути більше обсягу витоку визначеного за першим етапом плюс обсяг газу, що залишається в розрахунковій секції.

2) Якщо термін повного фазового переходу зрідженого аміаку в зруйнованій секції більше терміну повного перекриття, то після перекриття затворів відбувається витікання надлишкового об‘єму газу аж до повного випорожнення аміаку і заміною його повітрям.

Головною задачею встановлюємо визначення швидкості руху поверхні розділу (інтерфейсу) рідкої та газообразної фаз існування аміаку в трубопроводі.

Процес розрахунку викиду аміаку з труби згідно [1] запропоновано поділяти на два етапи:

1. Перший етап – напірний викид аміаку як рідини з трубопроводу внаслідок надлишкового тиску ΔP_s^n в ньому до повної зупинки насосів та закриття затворів. Масу аміаку, який витікає з пошкодженого трубопроводу, подано так:

$$M= M_1+M_2, \quad (5)$$

де M_1– маса аміаку, що потрапить в атмосферу в разі напірного викиду з пошкодженого трубопроводу;
M_2– маса аміаку, що витікає після напірного викиду аміаку.

$$\text{Емісія зрідженої маси} \quad M=V\rho \quad (6)$$

2. Другий етап – викид аміаку за рахунок його вільного втікання (скидання надлишкового тиску) після закриття затворів. Як варіант в [11] пропонується ітераційний метод з припущенням про стисливість зрідженого аміаку.

1. Розраховуємо масу аміаку у трубі за умови, коли не було б надлишкового тиску та зріджений аміак заповнював би трубопровід як нестислива рідина:

$$M = \rho W \quad (7)$$

де ρ – щільність аміаку (ρ =0,627 кг/м^3).

2. Визначаємо «надлишковий» об’єм аміаку в секції за наявності надлишкового тиску ΔP_s:

$$\Delta W= \beta W \Delta P_s^n \quad (8)$$

де β – коефіцієнт об’ємного тиску.

3. Визначаємо «надлишкову» масу аміаку ΔM в секції за надлишкового тиску: ΔP_s

$$\Delta M= \rho \Delta W \quad (9)$$

5. Визначаємо об’єм аміаку, що виходить з отвору в трубопроводі за час Δt:

$$Q = \mu \cdot \omega \sqrt{2g \frac{\Delta P_s^n}{\gamma}} \Delta t \,,$$

$$Q= \Delta t\ \mu\ \omega\ \mathrm{sqrt}(2gP^n_s/\gamma) \quad (10)$$

де ω – площа отвору, з якого витікає аміак;
μ – коефіцієнт витрати;
γ – питома вага.

4. Визначаємо масу аміаку, що виходить з отвору в трубопроводі за час t:

$$\Delta m = \rho Q \tag{11}$$

5. Визначаємо «надлишковий» об'єм та масу аміаку, що залишилася в трубі після часу Δt :

$$\Delta W^{n+1} = \Delta W Q , \tag{12}$$

$$\Delta M^{n+1} = \rho \Delta M - \Delta m, \tag{13}$$

де позначка $n+1$ – відповідає значенню параметра на новому часовому кроці.

Відзначимо, що значення n відповідає значенню фізичного параметра на попередньому часовому кроці.

6. Визначаємо зміну надлишкового тиску в трубі внаслідок витоку аміаку за час Δt:

$$\Delta P_s^{n+1} = \Delta P_s^n - \Delta P, \tag{14}$$

де:

$$\Delta P = \Delta W^{n+1}/(W\beta) \tag{15}$$

9. Далі розрахунок повторюємо, починаючи з п. 4, та визначаємо нові значення ΔM, Q, ΔW, ΔP на новому часовому кроці.

Алгоритм попереднього розрахунку об'єму викиду аміаку (маси аміаку M_1 та інших параметрів) на першому етапі без перекриття запірних пристроїв:

$$V_{T30} = Q_1 * 30 \tag{16}$$

Після надання команди початку закриття затвору термін згідно завдання складає 60 секунд, коли швидкість витоку аміаку зменшується лінійно від початку до повного перекриття запірних пристроїв будемо виконувати в такій послідовності:

$$V_{T90} = V_{T30} + Q_1 * (n-(n+1)/2), \tag{17}$$

Результатом роботи програми є динаміка зниження надлишкового тиску в трубопроводі, зміна висоти струменя аміаку з часом, динаміка зміни з часом маси аміаку, що виходить з трубопроводу. Ці дані використовуються в «Exel» на етапі проведення розрахунку формування зон забруднення.

Розрахунок за цими залежностями закінчується, коли надлишковий тиск у пошкодженому трубопроводі буде дорівнювати нулю. На цей момент часу маса аміаку, викинута з пошкодженого трубопроводу, буде дорівнювати M_1 (рис. 3). У трубопроводі залишиться маса аміаку M_2. Слід підкреслити, що для розрахунку витрати аміаку на базі залежності (1) використано експериментальні значення коефіцієнта витрати отвору, отримані раніше [12].

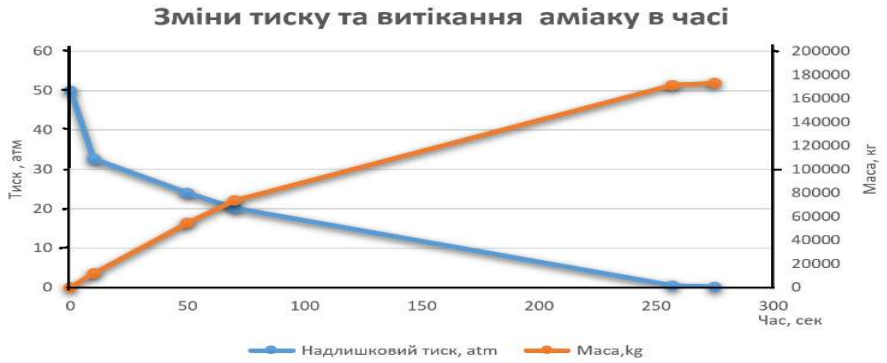


Рисунок 3 – Результат ітераційного процесу витікання аміаку з трубопроводу [11]
Figure 3 – The result of the iterative process of ammonia leakage from the pipeline [11]

Визначення коефіцієнту всебічного стиснення виконується на основі міркувань про зменшення об‘єму тіла та відповідного збільшення щільності, що можна записати наступним чином [1]

$$dV = -\frac{1}{K} V dP \,, \tag{18}$$

де V – об‘єм під деяким тиском P,
dV – зміна (прирощення) обсягу при збільшенні тиску на dP.

Коефіцієнт (K) – модуль об‘ємного стиснення чи інакше – об‘ємної пружності . На практиці частіше користуються зворотною величиною, яка називається стисливістю (коефіцієнтом стиснення, Volume compress. coeficient):

$$\beta = \frac{1}{K} = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dp} \quad . \tag{19}$$

Для газів іноді зручніше рівняння (19) записати відносно зміни маси M. Помножимо обидва члени відношення (19) на значення густини газу ρ і враховуючи співвідношення $M = \rho$ V отримаємо

$$\beta = -\frac{1}{M}\frac{dM}{dp} \tag{20}$$

звідки можна визначити стисливість.

Поняття модуля об‘ємного стиснення (стисливості) застосовується не тільки до твердих тіл, але й до рідин та газів. Стисливість газів залежить від того зворотного процесу, яким виконується стиснення. Легко визначити, що для ізотермічного стиснення ідеального газу стисливість дорівнює $\beta = p$, а для адіабатичного стиснення – $\beta = \gamma p$, де γ – показник адіабати.

З матеріалів роботи [1] не зрозуміло, якими даними про стисливість зрідженого газу користується автор, проте результати розрахунків якісно та кількісно збігаються із запропонованими.

Гідравлічний розрахунок є важливою складовою процесу вибору методу розрахунку ситуації розриву трубопроводу. На наш погляд, це пов'язано зі спробою описати всі варіанти розрахунку коефіцієнта тертя в залежності від режиму потоку, типу рідини і її температури, а також від шорсткості труби, а головне із зміною сценарію процесу у зв‘язку з необхідністю враховувати фазовий перехід від однофазної до двофазної рідини, а потім до крапельно-газової суміші (пару) та, нарешті, газу. З метою

більш детального аналізу запропонованих в документах методів розрахунку представляється корисним повернутися до вихідних рівнянь класичної гідродинаміки [1].

Запропонований алгоритм розрахунку витікання рідини розглядається за такою методикою:
– Моделювання витікання рідини через отвори та трубопроводи спрямоване на прогнозування масової витрати як функції перепаду тиску. Для рідин, що протікають через отвір, можна застосувати рівняння Бернуллі. Нехтуючи початковою швидкістю рідини в отворі, можна оцінити масову швидкість потоку:

$$q_s = C_d * A_h * \sqrt{(2(P - P_a) * q_l)} \tag{22}$$

де $P = P_h + P_{aL}$ (23)

$$P_h = {}^{p}{}_{L} * g * h_L \tag{24}$$

де: A_h – площа отвору
Cd – коефіцієнт витрат
P –загальний тиск у трубопроводі
P_a –атмосферний тиск
q_S – інтенсивність потоку маси
ρ_L – щільність рідини

Падіння тиску для стаціонарного потоку рідини в трубопроводі можна оцінити за допомогою відомого рівняння Дарсі-Вейсбаха [1]:

$$\Delta P = f_D * \rho_f / 2 * u_f{}^2 * l_p / d_p \tag{25}$$

Використовуючи це рівняння, можна отримати вираз для (середньої) швидкості потоку рідини в трубі

$$u_L = \mathrm{sqrt}(2 \cdot \Delta P / \rho l_p \cdot dp / (f_D \cdot \rho_L)) \tag{26}$$

Масову витрату в трубі можна розрахувати за допомогою:

$$q_S = \rho u_L A_{pipe} \tag{27}$$

У формулах (25-27) dp –діаметр трубопроводу
f_D –фактор тертя Darcy
l_p –довжина трубопроводу
u_L –швидкість течії рідини
ΔP – зміна тиску
ρ_L – щільність рідини

Відповідно до наведених вище рівнянь, масова швидкість потоку через трубу залежить від тертя в трубі. Загалом коефіцієнт тертя є функцією числа Рейнольдса [1]. Число Рейнольдса в залежності від швидкості потоку в трубі можна виразити як функцію масової витрати

$$Re = f(q_S) \tag{28}$$

Для круглої труби:

$$Re = (4/\pi) \cdot q_s/(d_p\eta) \quad (29)$$

Це означає, що масова витрата з труби повинна бути розрахована шляхом ітерації через те, що втрата напор ⁄h_{Lp} і падіння тиску пов'язані :

$$P = \rho_f \, g⁄h_{Lp} \qquad (N/m2) \quad (30)$$

Як видно з рівняння (25) [1], коефіцієнт Дарсі є функцією числа Рейнольдса та відносної шорсткості стінки (відношення між шорсткістю стінки та діаметром труби). Для шорсткості стін можна використовувати значення в таблиці нижче.

Падіння тиску для стаціонарного потоку рідини в трубопроводі також часто оцінюється рівнянням Дарсі-Вейсбаха, в якому використовується коефіцієнт тертя Фаннінга f_F:

$$\Delta P = 4 \times f_F \times \rho_f/2 \times u_f^2 \times l_p/d_p \quad (31)$$

З рівнянь (2.198) і (2.204) легко зробити висновок, що коефіцієнт тертя Фаннінга в чотири рази менший за коефіцієнт тертя Дарсі:

$$4f_F = f_D \quad (32)$$

Для ламінарного потоку коли $Re < 2000$

$$f_D = 64/Re \quad (33)$$

Для турбулентної течії та гладкої труби виконується рівняння Блазіуса:

$$f_D = 0.3164Re^{-0.25} \quad \text{якщо} \quad 4000 < Re < 10^5 \quad (34)$$

Тертя є одним із факторів, що визначають швидкість течії в трубі. Оскільки коефіцієнт тертя залежить від числа Рейнольдса, яке є функцією швидкості, звичайно слід застосовувати ітераційну процедуру для оцінки масової витрати у трубі. Однак згідно з дослідженнями коефіцієнту тертя в трубах [1] виявляється, що коефіцієнт тертя за досить високих чисел Рейнольдса є практично постійним.

Проведення розрахунків за наведеною методикою є неможливим через відсутність більшості параметрів для зрідженого аміаку, які є результатом спеціальних експериментальних досліджень [1].

Розвиток методики розрахунку течії з руйнованого трубопроводу [1] створено на базі робіт [6-8] , де враховується процес фазового переходу у вигляді руху перетину інтерфейсу ділянок розділу двох фаз стисненого газу у стані зрідженої рідини та паро-газової суміші з врахуванням тертя. Рух поверхні інтерфейсу відбувається у зворотному напрямку витікання з трубопроводу.

При розгерметизації трубопроводу в області, що прилягає до місця розриву, встановлюється тиск, близький до тиску насиченого пару при відповідній середній температурі продукту, що транспортується. При цьому відбувається закипання частини рідини та збільшення її об'єму в трубі, а швидкість потоку лімітується пропускною здатністю кінцевої ділянки, тобто трубопровід працює як би в режимі часткового «замикання».

В роботі використовується модель однорідної рівноваги двофазного потоку [8], яка припускає, що після прориву в трубопроводі утворюються, два послідовних режими потоку.

Режим 1 - швидка розгерметизація (рис. 4)

Відразу після прориву тиск у трубі дуже швидко знижується від робочого тиску. Швидкість падіння регулюватиметься швидкістю звуку у рідині (або надкритичній рідині) у трубі, і ми припускаємо, що цей процес закінчується рідиною насиченою рідиною при деякій температурі T_0 і тиску $P_0=P_{sat}(T_0)$. Розширення, а отже, і викид рідини з розриву, буде регулюватися в першу чергу стисливістю рідини, яка невелика, особливо в масштабі пізнішого розширення через випаровування. Тому оцінки цього режиму призводять до висновку, що цей процес відбувається дуже швидко порівняно з тим, що йде далі, і що втрата рідини невелика, також порівняно з тим, що йде далі.

Режим 2 - поширення фронту зони закипання

Після режиму 1, ми маємо трубу, що містить насичену рідину в спокої, або перекачується з певною заданою швидкістю потоку. Вона почне випаровуватись і далі знижувати тиск.

Верхня зона (зона 1) – це насичена рідина, яка перебуває в стані спокою при постійній температурі T_0 і тиску $P_0=P_{sat}(T_0)$.

Рідина тече від межі розділу (b) до розриву (e), і коли вона рухається вниз за течією, газова фракція зростає, а тиск зменшується до деякого значення P_e в (e). Швидкість потоку через зону 2 поєднується з падінням тиску та швидкість розширення внаслідок випаровування між (b) і (e). Оскільки маса рідини в трубі зменшується, межа зони (b) рухається вгору проти течії та утворює фронт закипання, який розмиває рідину зони 1.

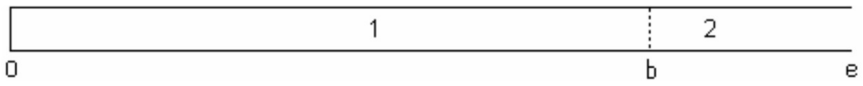


Рисунок 4 – Течія в режимі 2 в трубі. Зона 1 - насичена рідина в спокої. Зона 2 - це двофазна рідина, що тече зліва направо і з розриву (e). Частка газу в зоні 2 збільшується від нуля на межі розділу зон (b) по мірі руху вниз за течією до розриву (e).

F***igure 4 –*** Flow in mode 2 in the pipe. Zone 1 - saturated liquid at rest. Zone 2 is a two-phase fluid flowing from left to right and out of the discontinuity (e). The fraction of gas in zone 2 increases from zero at the interface of the zones (b) as it moves downstream to the gap (e).

Модель потоку в режимі 2

Суттєвими ознаками цього режиму є переміщення фронту зони насиченої рідини. Ми очікуємо, що фронт двофазної зони буде рухатися повільніше порівняно зі швидкістю рідини на виході, тому течію в двофазній зоні в цьому режимі доцільно вважати квазістаціонарною. Враховуючи нульову теплопередачу ззовні рідини, рівняння маси, імпульсу та енергії є стаціонарними. Моделі однорідної рівноваги передбачає рівні швидкості потоку обох фаз, $U_L = U_V$, а також термодинамічну рівновагу (температура і тиск) між рідкою і паровою фазами.

Граничні умови на верхній границі зони 2 на малюнку 4, дають значення T_0, $P=P_{sat}(T_0)$ - тиск насичення , $V_L(T_0)$ – питомий об'єм рідкої фази, $h_L(T_0)$ – ентальпія рідкої фази. На нижній границі зони 2 задається вихідний тиск P_e, значення якого між атмосферним тиском P_a та тиском насичення P_{sat}.

Тиск в трубопроводі задається рівнянням [8, 21]

$$\frac{dP}{dz} = \frac{2fV_L q^2(z)}{D_p A_p^2} \tag{35}$$

де $q(z)$ – масова витрата,

f –коефіцієнт тертя.

Якщо припустити, що масова витрата змінюється лінійно від початку двофазної зони до зони розриву

$$q(z) = q_e - \frac{q_e - q_i}{z_i} z \tag{36}$$

то підставивши масову витрату (36) в (35) і інтегруючи по z від P_e *до* P_{sat} , отримаємо формулу довжини двофазної зони

$$z_i = \frac{3d_p \times A_p^2 \times (P_{sat} - P_e)}{2f \times V_L \times q_e^2} \tag{37}$$

де d_p – внутрішній діаметр трубопровода,
A_p - площа поперечного перерізу.

Нехтуючи щільністю пари в порівнянні зі щільністю рідини масу витоку із розірваної труби дорівнює

$$Q_i = \frac{A_p \times z_i}{V_L} \tag{38}$$

де V_L – питомий об'єм рідкої фази.

Квазістаціонарна модель еволюції потоку в режимі 2 виглядає наступним чином:
1. Довжина двофазної зони, зона 2 на малюнку 4, спочатку дорівнює нулю. Починаємо з насиченої рідини при T_0, P_0 і початкової масової витрати потоку, яка визначається за формулою [19]

$$q_{s1} = A_p \times (p_0 - p_e) / u_s \tag{39}$$

де p_e – тиск на виході,
u_s- швидкість звуку рідкої фази аміаку,
A_p - площа поперечного перерізу трубопроводу.

2. Задаємо масову швидкість потоку, як частку попередньої масової витрати, яка зазвичай становить 5%

$$q_{s2} = (1 - \varepsilon) \times q_{s1} \tag{40}$$

3. Визначаємо середню масову швидкість потоку, як частку попередньої масової витрати

$$q_{s,avg} = 0.5 \times (q_{s1} + q_{s2}) \tag{41}$$

4. Обчислюємо довжину двофазної зони за формулою (37), де

$$q_e = q_{s,avg} \tag{42}$$

5. Обчислюємо масу витоку за формулою (38), де v_L – питомий об'єм рідкої фази .
6. Проміжок часу, за який здійснюється виток маси обчислюється за формулою

$$\Delta t_i = (Q_{i+1} - Q_i) / q_{s,avg} \quad (43)$$

Повторюємо числову процедуру для кожного нового часового кроку, починаючи з кроку 2, поки відстань до межі розділу Δl_i не перевищить довжину труби L_p або якщо час t менший за вказаний час.

Швидкість поширення двофазної зони визначається коефіцієнтом тертя. Коефіцієнт тертя для потоку у круглій трубі залежить від числа Рейнольдса та відносної шорсткості ε / d_p. При цьому різні алгоритми розрахунку дають суттєво різні результати. В нашому випадку коефіцієнт тертя був налаштований шляхом застосування наведеного вище алгоритму для пропану і порівняння результатів розрахунку з відомим рішенням задачі руйнування трубопроводу зрідженого пропану [19].

Проведено розрахунок розриву трубопроводу для секції L=3000 *м,* діаметру d =0.257 м регіонального трубопроводу та d =0.34 м магістрального трубопроводу для початкових умов і відповідних параметрів (таблиця 1).

Таблиця 1 – Параметри розрахунку
Table 1 – Calculation parameters

T_0,C	P_0 (10^5 н/м^2)	P_{sat} (10^5 н/м^2)	u_s (м/сек)	V_L (м^3/кг)	P_a (10^5 н/м^2)
15	50	7.28	1409.8	0.00162	1.013

Результати розрахунків для секції регіонального трубопроводу d =0.257 м Q_0 =96120 кг наведені на рисунку 5 та в таблиці 2. Сумарна кількість витоку за 1412 с з однієї частини трубопроводу становить Q = 96120 кг, а виток за 90 с становить Q = 13857 кг.

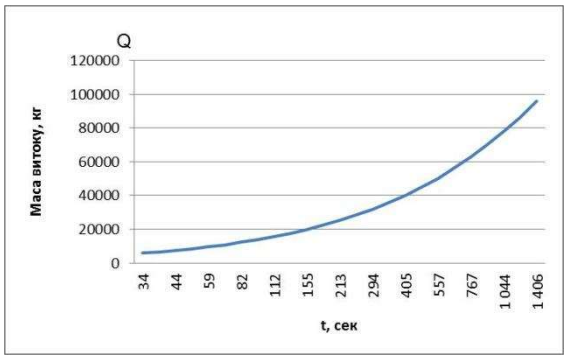


Рисунок 5 – Результати розрахунків для секції регіонального трубопроводу
Figure 5 – Calculation results for the regional pipeline section

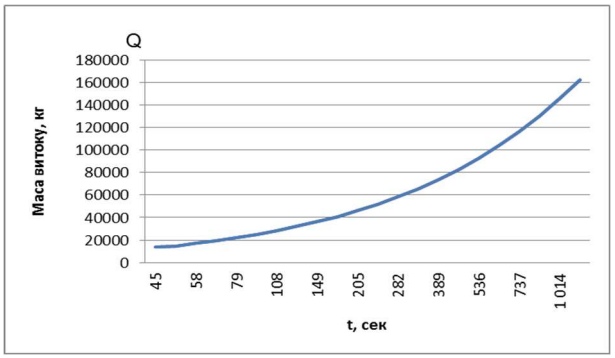


Рисунок 6 – Результати розрахунків витоку маси аміаку для секції магістрального трубопроводу
Figure 6 – Results of ammonia mass leakage calculations for the main pipeline section

Результати розрахунків витоку маси аміаку для секції магістрального трубопроводу d =0.34 м, Q_0 =168232 кг наведені на рисунку 6 та в таблиці 3. Кількість витоку за 1245 с з однієї частини трубопроводу становить Q = 168232 кг, виток за 90 с становить Q = 24993 кг. Ці результати вимагають уточнення через неточність визначення коефіцієнту тертя (тут прийнято f = 0.003).

Проведені розрахунки за наведеною вище методикою для зрідженого аміаку є попередніми та вимагають подальшої розробки програм та використання параметрів, особливо, стисливості газової суміші та коефіцієнту тертя, які є результатом спеціальних досліджень та, можливо, проведення експериментів [7, 8, 19].

Розрахунки за спрощеною методикою просторово - часового витікання зрідженого газу з трубопроводу

Загальний миттєвий обсяг рідини у непошкодженому трубопроводі рахуємо за вище наведеними формулами з допомогою функціональних таблиць (Excel).

Перший етап – напірний викид аміаку як рідини з трубопроводу внаслідок надлишкового тиску ΔP_s^n в ньому до повної зупинки насосів та закриття затворів.

Витікання аміаку з трубопроводу до повного закриття затворів згідно запропонованого сценарію зупинки витікання з сусідніх секцій виконуємо за :

$$q_s = C_d \times A_h \times \sqrt{(2P \times \rho_L)} \quad (44)$$

Розрахунок проводиться шляхом ітерацій та зупиняється при досягненні хвилі падіння тиску та фазового переходу зрідженого аміаку до затвору.

У заданій постановці обидві частини зруйнованої секції мають однакову довжину і є абсолютно ідентичні одна одній та витікають в одне місце. Тому всі параметри стосовно обсягів витікання зрідженого газу для отримання остаточних результатів збільшуються у 2 рази.

Таблиця 5 **–** Параметри розрахунку
Table 5 **–** Calculation parameters

t, c	dt, c	P, атм	dM,кг	β	dV, м^3	Mrest, кг	V rest, м^3	dPexces, атм	M esit, кг
0	0	35.00	0.00	0.7	0.00	170492.47	271.92	0.00	0
10	10	30.32	10808.66	0.2	17.24	159683.81	254.68	4.68	10808.66
30	20	22.13	20119.20	0.1	32.09	139564.62	222.59	8.19	30927.85
70	40	15.96	34379.40	0.1	54.83	105185.21	167.76	6.17	65307.26
130	60	12.36	43795.15	0.1	69.85	61390.06	97.91	3.60	109102.41
150	20	9.51	12846.67	0.1	20.49	48543.39	77.42	2.85	121949.08
180	30	7.66	16905.57	0.1	26.96	31637.83	50.46	1.86	138854.64
242	62	7.02	31346.06	0.1	33.00	291.77	17.46	0.64	170200.70

Обсяг зрідженого аміаку у половині зруйнованої секції $V_{rest,t=0}$ = 271.92 m^3 (магістральний АТП) згідно розрахунку ітераційним методом, що наведено у вигляді функціональної таблиці 2 та рис. 7 та 8, які свідчать, що випорожнення аварійної секції обсягом V=272 м^3 відбувається на протязі менше T=250 с. У заданій постановці обидві частини зруйнованої секції мають однакову довжину і є абсолютно ідентичні одна одній та витікають в одне місце (рис. 7). Тому всі параметри стосовно обсягів витікання зрідженого газу для отримання остаточних результатів збільшуються у 2 рази. Швидкість витікання з аварійної ділянки під напором P = 50 атм. Розрахунок проводиться покроково (dt = 10 с – 60 с) та припиняється при досягненні поверхні розділу рідини та двофазної суміші ділянки до затвору трубопроводу. Результати розрахунку показують, що витік газу, який знаходиться у зрідженому стані під дією надлишкового тиску в об‘ємі V= 272.9 м^3, відбувається на протязі менше 250 с. (табл. 5) Згідно термогідродинамічної теорії перетворення

зрідженого газу після аварійного розриву трубопроводу по типу гільйотинного розтину під великим надлишковим тиском рекомендується виконувати на ***Другому етапі*** утворення двох-фазової області (рис. 8 [8]), що також може бути розрахований за допомогою окремого програмного забезпечення та, можливо, з проведенням експериментальних досліджень.

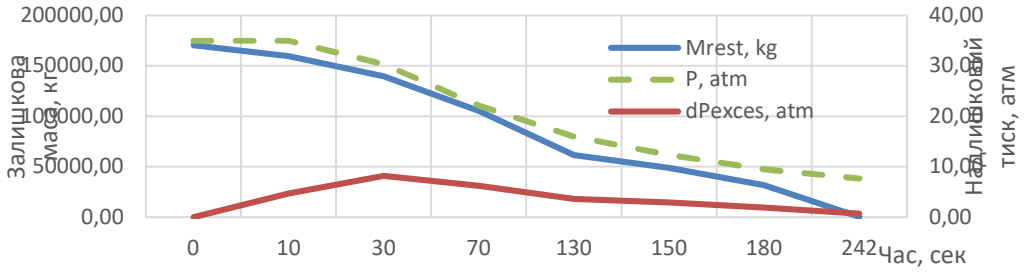


Рисунок 7 – Хід падіння надлишкового тиску та витоку залишкової маси зрідженого аміаку
Figure 7 – The course of excess pressure drop and leakage of residual mass of liquefied ammonia

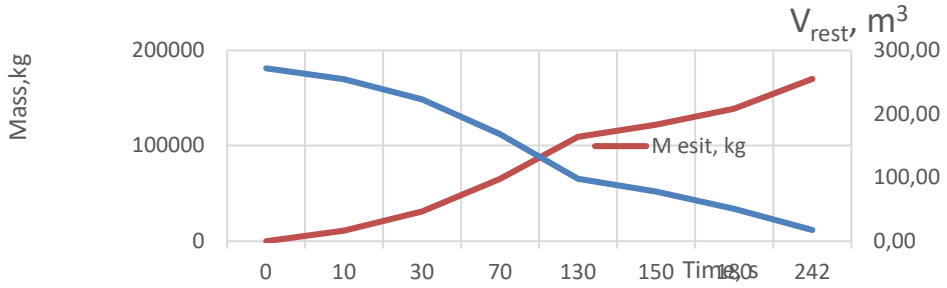


Рисунок 8 – Хід випорожнення половини зруйнованої секції
Figure 8 – The course of emptying half of the destroyed section

V= 272.9 м^3, відбувається на протязі менше 250 с. (табл. 5) Згідно термогідродинамічної теорії перетворення зрідженого газу після аварійного розриву трубопроводу по типу гільйотинного розтину під великим надлишковим тиском рекомендується виконувати на ***Другому етапі*** утворення двох-фазової області (рис. 8 [8]), що також може бути розрахований за допомогою окремого програмного забезпечення та, можливо, з проведенням експериментальних досліджень.

Третій етап – витікання газу аміаку, який утворився в результаті фазового переходу, з трубопроводу відбувається шляхом витіснення повітрям чи продувом до випорожнення аварійної секції обсягом 272 м^3 . Через те, що обидві частини зруйнованої секції мають однакову довжину і є абсолютно ідентичні одна одній та витікають в одне місце, тому всі параметри стосовно обсягів витікання зрідженого газу для отримання остаточних результатів збільшуються у 2 рази.

Отримані також результати розрахунку секції регіонального трубопроводу витоку газу, який знаходиться у зрідженому стані під дією надлишкового тиску в об‘ємі V= 155.792 м^3. На протязі T= 200 с відбувається фазовий перехід та витиснення рідкого аміаку у вигляді газово-парової суміші. Залишковий газ у секції витісняється повітрям чи шляхом продуву.

Оцінку швидкості витоку зрідженого газу з секцій трубопроводу меншої довжини можна отримати за результатами таблиць 2 та 4 відповідно для магістрального та регіонального аміакопроводу шляхом визначення обсягу маси M_0 (кг) рідини у трубі відповідної довжини зруйнованої секції (не обов‘язково посередині секції) та визначення по таблиці час T (с), який відповідає витоку $M_{exit}=M_0$. Наприклад, якщо маса аміаку у зруйнованій секції становить M_0=70000 кг, то термін витоку газу відповідно дорівнює T=130 с . Якщо маса аміаку у секції не збігається приблизно

з табличними значеннями $M_0 \neq M_{exit}$, то час визначається шляхом лінійної інтерполяції чи на побудованій графічній залежності.

Висновки. За результатами роботи, можна зробити наступні рекомендації та пропозиції:

– запропоновано методику із оцінювання ходу випорожнення зрідженого аміаку із зруйнованої секції магістрального аміакопроводу за методом гільйотинного розриву та ітераційної процедури на основі розробленої програми, яка надається в форматі Excel.

– результати розрахунку секції магістрального трубопроводу показують, що витік газу, який знаходиться у зрідженому стані під дією надлишкового тиску в об‘ємі V= 272.9 м^3, відбувається на протязі 250 с.

– оцінку швидкості витоку зрідженого газу з секцій трубопроводу меншої довжини можна отримати за результатами таблиць відповідно для магістрального чи регіонального аміакопроводу шляхом визначення обсягу маси M_0 (кг) рідини у трубі відповідної довжини зруйнованої секції (не обов‘язково посередині секції) та визначення по таблиці час Т (с), який відповідає витоку $M_{exit}=M_0$. У випадку більшої довжини трубопроводу таблиці 2 чи 4 необхідно перерахувати для відповідних параметрів обсягу довгого трубопроводу.

– остаточний об‘єм зрідженого газу, що знаходився в обох частинах секції, яка була зруйнована, становить V_0 = 545.8 м^3 та витікає на протязі 242 с у вигляді відповідного об‘єму газу $V_г$. До цього об‘єму згодом додається газ в такому саме обсязі, що витікає на другій стадії.

– аналогічні результати розрахунку секції регіонального трубопроводу показують, що витік газу, який знаходиться у зрідженому стані під дією надлишкового тиску в об‘ємі V= 155.792 м^3, відбувається на протязі 200 с.

– наведені результати є наближеними, тому вимагають перевірки за розрахунками по моделі фазового переходу та поширення зворотної хвилі розгерметизації, що вирішуються за моделями, які вимагають в подальшому розробки додаткового складного програмного забезпечення, більш об‘ємних розрахунків та, можливо, з проведенням експериментальних досліджень, особливо для визначення коефіцієнту тертя та стисливості газо-парової суміші під час фазового переходу та витоку з розривного отвору.

Перелік посилань

1. Звіт про науково-дослідну роботу «Надання рекомендацій з оцінки витоку маси рідини аміаку в трубопроводі з часом». Київ 2024. С.35.

2. Cleaver R.etAlt.2003 Modelling outflow from a ruptured pipeline transporting compressed volatile liquids – Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16 (2003) 533–543 www.elsevier.com/locate/jlp.

3. Амеліна Л. В. др. 2021 Моделювання забруднення довкілля в разі емісії аміаку з пошкодженого трубопроводу ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online) Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2021, № 1 (91) Екологія та промислова безпека doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/229167.

4. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. Науката прогрес транспорту. 2016. № 1 (61). P. 48–54. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2016/60953.

5.Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollutionfor Regions Having Complex Topography. NATO Science for Peace and Security. Series C : EnvironmentalSecurity. Dordrecht, 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15

6.Cao C., Li C., Yang Q., Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Alloca-tionfor Sustainable Disaster Supply Chain. Sustainability. 2017. Vol. 9. Iss. 11. P. 1–22.DOI: https://doi.org/10.3390/su9112103

7.Naserzadeh Z., Atabi F., Moattar F., Nejad N. M. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution bymathematical modeling. Bioscience Biotechnology Research Communication. 2017. Vol. 10. Iss. 1.P. 192–204.

8.Tumanov A., Gumenyuk V., Tumanov V. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. IOP Conf. Series : Earthand Environmental Science. 2017. Vol. 90. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027

9. Cumber P.S. Outflow from fractured pipelines transporting supercritical ethylene. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 20 (2007) 26–37.

METHOD OF ASSESSMENT OF LIQUID MASS LEAKAGE IN THE PIPELINE DURING OPERATION

Onyshchenko Artur M., Doctor of Technical Science, Professor, Head of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, National Transportation University Kyiv, Ukraine, e-mail: *onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, +380687771899, https://orcid.org/0000-0002-1040-4530* .

Ostroverkh Borys M., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-57; e-mail: borys.ostro@gmail.com.

Chyzhenko Nataliia P., PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures Department National Transportation University Kyiv, Ukraine, e-mail: *chyzhenko_np@ukr.net, +380507355080,* https://orcid.org/ 0000-0002-9152 2474.

Aksonov Sergii Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, Aksenov121@gmail.com, tel. +380971534406, https://orcid.org/0000-0002-6749-3909.

Moshkivskyi Roman V., postgraduate student of the Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine e-mail: moshkjoma@gmail.com, tel. +380672357174, https://orcid.org/0009-0004-9471-4238

Summary. During the development of the documents stipulated by the Law of Ukraine "On Objects of Increased Danger" there was a need to calculate the amount of ammonia that can take part in an emergency situation during an accident on the linear part of the ammonia pipeline. Regulatory documents provide for the consideration of the case of an emergency situation with a guillotine rupture of the pipeline. The total mass of the hazardous substance involved in the accident is calculated as the total mass contained in the linear part of the pipeline between two shut-off devices and the total mass that can be released during the time established to detect the leakage of the substance and implement the closure of the shut-off devices.

It is necessary to calculate the mass of ammonia that can be released in the forward and reverse direction during the time established to detect the leakage of the substance and implement the closing of the shut-off devices. The total mass of the hazardous substance after the accident of the section of the ammonia pipeline was determined as the total mass in the linear part of the pipeline between two shut-off devices, and the total mass that can be released during the time established to detect the leakage of the substance and implement the closure of the shut-off devices according to the guillotine gap scheme.

Keywords: ammonia pipeline accidents, guillotine rupture, thermohydrodynamic flow theory, hydraulic approximation.

References

1. Report on the research work “Providing recommendations for assessing the mass leakage of ammonia liquid in a pipeline over time”. Kyiv 2024. P.35.

2. Cleaver R.etAlt.2003 Modelling outflow from a ruptured pipeline transporting compressed volatile liquids – Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16 (2003) 533–543 www.elsevier.com/locate/jlp.

3. Amelina L. V. et al. 2021 Modeling of environmental pollution in the event of ammonia emission from a damaged pipeline ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online) Science and progress of

transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2021, No. 1 (91) Ecology and industrial safety doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/229167.

5.Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollutionfor Regions Having Complex Topography. NATO Science for Peace and Security. Series C : EnvironmentalSecurity. Dordrecht, 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15

6.Cao C., Li C., Yang Q., Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Alloca-tionfor Sustainable Disaster Supply Chain. Sustainability. 2017. Vol. 9. Iss. 11. P. 1–22.DOI: https://doi.org/10.3390/su9112103

7.Naserzadeh Z., Atabi F., Moattar F., Nejad N. M. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution bymathematical modeling. Bioscience Biotechnology Research Communication. 2017. Vol. 10. Iss. 1.P. 192–204.

8.Tumanov A., Gumenyuk V., Tumanov V. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. IOP Conf. Series : Earthand Environmental Science. 2017. Vol. 90. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027

9. Cumber P.S. Outflow from fractured pipelines transporting supercritical ethylene. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 20 (2007) 26–37.

Дата надходження до редакції 13.06.2025.