Л.В. АМЕЛІНА, М.М. БІЛЯЄВ, П.Б. МАШИХІНА

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

Л.В. Амеліна, М.М. Біляєв, П.Б. Машихіна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

Дніпро
Журфонд
2021

УДК 502.3:504.054

А61

Рецензенти:

д-р фіз.-мат наук проф.. С.О. Пічугов

д-р т.н. М.М.Налисько

Рекомендовано до друку Вченою радою

Дніпровського національного університету залізничного

транспорту імені академіка В.Лазаряна

Л.В. Амеліна , М.М. Біляєв, П.Б. Машихіна

А61 Математичне моделювання наслідків аварій на потенційно небезпечних об’єктах. Журфонд: Дніпро, 2021 р. - 135 с

ISBN 978-966-934-290-4

В монографії розглянути науково-прикладні методи оцінювання рівня забруднення навколишнього середовища, ризику ураження персоналу у випадку надзвичайних ситуацій на потенційно небезпечних об’єктах. Розглянута технологія побудови багатовимірних математичних моделей та організації обчислювальних експериментів з визначенню динаміки забруднення навколишнього середовища при нестаціонарній емісії хімічно-небезпечних речовин.

Для студентів, аспірантів, наукових працівників, які спеціалізуються в галузі екологічної безпеки, охорони навколишнього середовища, охорони праці, гідродинаміки, прикладної математики.

© Л.В. Амеліна, М.М. Біляєв, П.Б. Машихіна., 2021 р.

ISBN 977-966-934-290-4

ЗМІСТ

ВСТУП 5

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ 5

1.1. Аміак та його властивості 6

1.2. Опис об'єкту дослідження 6

1.3. Аналіз аварій з аміаком 8

1.4. Методи прогнозу забруднення навколишнього середовища при аварійних викидах токсичних речовин 10

1.5. Захист атмосфери від забруднення при викидах аміаку 16

1.6. Обґрунтування напряму наукового дослідження 18

РОЗДІЛ 2. 19

МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНОГО ВИТОКУ АМІАКУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНИЧНОГО ЗАБРУДЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ АВАРІЇ НА АМІАКОПРОВОДІ «ТОЛЬЯТТІ – ОДЕСА» 19

2.1. Експериментальне визначення коефіцієнта витрати отвору в пошкодженому трубопроводі 19

2.2. Розрахунок процесу нестаціонарного витоку аміаку з трубопроводу 23

2.3. Прогнозування механічного забруднення навколишнього середовища у випадку вибуху газоповітряної суміші «аміак + повітря» 31

РОЗДІЛ 3. 41

МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ 41

3.1. Прогнозування забруднення атмосферного повітря на території насосної станції у випадку аварійного викиду аміаку 42

3.2. Прогнозування рівняння забруднення атмосфери в масштабі «county» при аварійному викиді аміаку 58

3.3. Прогнозування забруднення навколишнього середовища у випадку аварійного викиду аміаку на мості..... 62

3.4. Мінімізація рівня забруднення атмосферного повітря у випадку аварійного викиду аміаку на території насосної станції 72

3.5 Моделювання нестаціонарного процесу забруднення атмосфери при аварії на залізниці 87

РОЗДІЛ 4. 95

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНОГО ТА ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩ ПРИ АВАРІЇ НА ВІДКРИТІЙ ДІЛЯНЦІ АМІАКОПРОВОДА «ТОЛЬЯТТІ – ОДЕСА» 95

4.1. Постановка задачі..... 95

4.2. Прогнозування рівня забруднення акваторії річки при аварійній емісії аміаку..... 96

4.3. Прогнозування забруднення акваторії річки та атмосферного повітря при аварійному витоку аміаку..... 105

ВИСНОВКИ..... 118

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК 119

ВСТУП

Аміакопровід «Толятті – Одеса» є крупним хімічно небезпечним об'єктом в Україні. Стан трубопроводів, запірної арматури та таке інше на даному аміакопроводі є дуже зношеним. Тому, у разі аварії, теракту на даному хімічному об'єкті станеться потужний викид аміаку в навколишнє середовище. В цьому випадку, виникне загроза масштабного забруднення навколишнього середовища і поразки людей. Для визначення можливих наслідків погіршення стану навколишнього середовища потрібно, заздалегідь, виконати оцінку масштабів можливого аварійного забруднення. Вирішення цієї задачі необхідно знайти згідно Закону України «Про зону надзвичайної екологічної ситуації». Згідно з цим Законом необхідно короткострокове й довгострокове прогнозування негативних змін навколишнього природного середовища в зоні надзвичайної екологічної ситуації, а також на прилеглих до неї територіях. Але, зараз, для оцінки рівня аварійного забруднення навколишнього середовища хімічними агентами використовуються емпіричні моделі, що були створені 60 років назад. Ці моделі не відповідають вимогам часу, не враховують суттєві фізичні фактори, що впливають на формування зон хімічного забруднення навколишнього середовища. Тому, актуальним завданням є розробка методів оцінки аварійного викиду аміаку на забруднення повітряного і водного середовищ й розробка методів мінімізації негативних наслідків аварій на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ

В роботі розглядаються задачі, що пов’язані з проблемою забруднення поверхневих вод й атмосфери при аваріях на аміакопроводі Тольятті – Одеса. В даному розділі розглядаються підходи, які застосовуються для вирішення задач цього класу.

1.1. Аміак та його властивості

Останнім часом особливу увагу привертають завдання, що пов'язані з аналізом та прогнозуванням забруднення навколишнього середовища внаслідок аварійної емісії хімічно небезпечних речовин на підприємствах, транспорті та інших хімічно небезпечних об'єктах [1, 2–7, 112, 120–149]. В даній роботі будуть розглядатися питання прогнозування забруднення природного навколишнього середовища при аварійних викидах аміаку [8–18, 21, 22, 26, 30]. Аміак (хімічна формула NH_3) – неорганічна сполука, газ із різким задушливим запахом, легший за повітря, добре розчинний у воді. Одержують каталітичним синтезом з азоту і водню під тиском. Використовують переважно для виробництва азотних добрив, вибухових речовин і азотної кислоти. Рідкий аміак використовується в холодильних установках. Водний розчин аміаку (нашатирний спирт) застосовується в медицині.

Аміак відносять до IV класу небезпеки. Гранично-припустима концентрація шкідливих речовин в повітрі робочої зони (ГПК р.з.) аміаку дорівнює 20 мг/м^3; гранично-припустима концентрація шкідливих речовин, середньодобова, в атмосферному повітрі населених пунктів та житлових приміщеннях (ГПК с.д.) – 0,04 мг/м^3. Максимальна разова концентрація в атмосфері – 0,2 мг/м^3.

Пари аміаку викликають рясну сльозотечу, біль в очах, хімічний опік кон'юнктиви й рогівки, втрату зору, напади кашлю, почервоніння й свербіж шкіри. При зіткненні зрідженого аміаку з шкірою наступає печіння, можливий хімічний опік з бульбашками, виявленнями. Зріджений аміак при випаровуванні поглинає тепло, тому при зіткненні зі шкірою виникає обмороження. Роздратування зіву та очей відбувається при концентрації в повітрі аміаку 280 мг/м^3 і 490 мг/м^3 відповідно.

1.2. Опис об'єкту дослідження

В роботі розглядаються питання забруднення природного навколишнього середовища при аварійних викидах аміаку на аміакопроводі Тольятті – Одеса. Цей

аміакопровод був повністю збудований у 1981р. Загальна довжина цього аміакопроводу становить 2417 км. Аміакопровід Тольятті – Одеса був побудований для транспортування основної продукції Тольяттинського азотного заводу на експорт. Труби мають товщину 8 мм і діаметр 14 дюймів. Аміакопровід Тольятті – Одеса прокладений на глибині 1,4 м. По всій трубі з кроком в 5 км розташовані крани, які автоматично перекривають подачу аміаку в аварійних ситуаціях.

Аміак, що транспортується, знаходиться в трубі діаметром 355 мм у вигляді рідини з нормальною температурою +4°С, під тиском – до 35 атмосфер. Як засіб від корозії у чистий аміак додається 0,4 % води.

Нижче на рис. 1.1 показано фрагмент топографічної карти Дніпропетровської області, де пролягає аміакопровід Тольятті – Одеса.

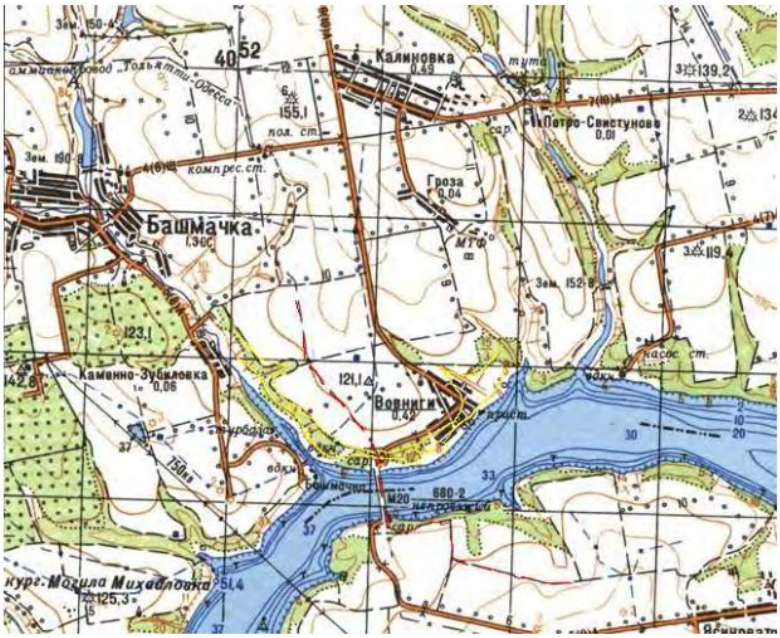


Рисунок 1.1 – Аміакопровід Тольятті –Одеса
(https://reibert.info/attachments/mixajlovka-3-png.12940469/)

Вище по трасі аміакопроводу розташовано 14 насосних станцій, які забезпечують необхідний тиск в системі. Одна з таких насосних станцій розташована поблизу с. Вовніги. Біля цього селища аміакопровід відкрито

перетинає річку Дніпро. Слід підкреслити думку експертів, що даний аміакопровід представляє вкрай небезпечний об’єкт з точки зору терористичних атак.

1.3. Аналіз аварій з аміаком

Аналіз наукової літератури показує [37, 44-46, 47, 48, 50, 57, 93, 94], що аварійні викиди, в зокрема, аміаку відбуваються на різних промислових об'єктах, насосних станціях, а також при перевезенні, при заправці або зливі з цистерн (наприклад, на рис. 1.2 показана зона хімічного забруднення при перевезенні аміаку автотранспортом).

Рисунок 1.2 – Аварія при перевезенні аміаку (https://www.safteng.net/index.php/free-section/safety-info-posts/chemical-process-safety-psmrmp/1571-nh3-unloading-incident-30-tons-release)

На рис. 1.3 показана зона хімічного забруднення аміаком при аварії на підприємстві.

Рисунок 1.3 – Аварійний викид аміаку
(https://www.shutterstock.com/es/search/ammonia+industry?image_type=photo)

Так як аміак широко використовується в різних сферах, тому аварії, що супроводжуються викидом аміаку – нерідкість. Наведемо декілька прикладів аварійного витоку аміаку. Так, у 2013 р. у порту Южне Одеської області під час перевантаження аміаку на судно, що стояло біля причалу, сталася аварія. Відбувся прорив аміакопроводу, який подавав речовину на судно Gas Columbia.

Техногенна аварія, сталася 6 серпня 2013 р. на заводі ПАТ «Концерн Стирол», який розташований в місті Горлівка Донецької області: під час капітального ремонту заводу № 1 в міжцеховому аміачному колекторі сталася розгерметизація трубопроводу рідкого аміаку діаметром 150 мм й робочим тиском 12 атмосфер і стався викид аміаку, а над заводом з'явилося біла хмара, яка швидко поширювалася. В результаті аварії у повітря потрапило 600 кг аміаку. При огляді трубопроводу була виявлена тріщина довжиною 10 см, через яку і стався викид аміаку. На момент аварії в цеху перебували всього приблизно 100 чоловік. В результаті аварії 6 осіб загинуло.

Так, 13 серпня 2018 р. у Китаї м. Шах-Алам сталася аварія внаслідок несправності резервуара холодокомбінату. В результаті витоку аміаку загинули двоє робітників й 18 госпіталізовано. Обидва працівника вдихали газоподібний аміак, який просочився з резервуара. Витік було локалізовано, хоча жителям в

радіусі трьох кілометрів було наказано покинути цей район, щоб уникнути подальших травм.

27 жовтня 2004 року трубопровід діаметром 8 дюймів, що належить Magellan Midstream Partners, LP, (Magellan), був розірваний біля графства Кінгман, штат Канзас, США й стався викид приблизно 772,224 м^3 безводного аміаку. В результаті потрапляння безводного аміаку в струмок було вбито більше 25000 риби. Збиток від аварії склав близько 680 тис. доларів США.

16 січня 2015 року в США (Theodore, Alabama) в результаті витоку аміаку на птахофермі (Millard Refrigerated Services Inc), постраждало 153 робітників і 32 людини було відправлено до лікарні.

Аналіз літературних джерел, що присвячені аваріям на трубопроводах, (рис. 1.4), дозволяє виділити наступні їх причини [88, 101]:

– відмова обладнання;

– недотримання профілю і плану траншеї для прокладання трубопроводу;

– пошкодження при проведені земляних робіт;

– помилкові дії персоналу;

– дефекти труб, фланцевих з'єднань

– помилки при монтажі трубопроводу;

– корозія;

– просадка ґрунтів.

Слід підкреслити, що аміакопровод Тольятті – Одеса експлуатується протягом тривалого часу, тому ризик виникнення аварійних ситуацій на ньому дуже великий. Це пов'язано з тим, що, з часом, має місце [96, 113, 119] пошкодження ізоляції, розвиток корозії, поява тріщин у зварних швах. Крім цього, слід вказати, що прикрою рисою теперішнього часу є ризик терористичних актів на аміакопроводах.

1.4. Методи прогнозу забруднення навколишнього середовища при аварійних викидах токсичних речовин

Питання моделювання забруднення навколишнього середовища при аварії на аміакопроводі Тольятті – Одеса активно досліджувалися в 70-х і 80-х роках XX

століття. Слід підкреслити, що зараз, в Україні, для рішення задач прогнозування рівня забруднення навколишнього середовища при можливому аварійному викиді аміаку, є три «інструменти»: модель ОНД-86 (емпірична модель, розроблена 60 років тому), методика прогнозу наслідків аварійних емісій хімічно небезпечних речовин на промислових об'єктах та транспорті (емпірична модель, розроблена 60 років тому), модель Гауса (полуемпірична модель, розроблена 50 років тому). Модель Гауса використовує декілька емпіричних параметрів, значення яких визначалися поза території України (в США, Великобританії) і тому використання цих параметрів в Україні потребує обґрунтування.

Велика частина досліджень по аналізу можливих наслідків викиду аміаку на даному аміакопроводі виконана співробітниками ДіАПу (Державний інститут азотної промисловості). Так, в роботі [57] отримана розрахункова формула для визначення зони ураження при стаціонарному витоку аміаку. Для розрахунку цієї величини використовувалася модель, розроблена в геофізичної обсерваторії імені Воєйкова. У даній роботі на основі формул гідравліки отримана залежність з оцінки витрати аміаку при його виході з пошкодженого аміакопроводу. Значна кількість досліджень присвячена питанню оцінки швидкості випаровування аміаку [47, 57]. Для розрахунку цієї величини запропоновані як емпіричні залежності, так і графіки. Було також проведено ряд досліджень, щодо забруднення підземних вод при аварійних розливах аміаку, де на основі моделі масопереносу, була розроблена методика розрахунку переносу аміаку в підземні води [87].

Аналіз наукових джерел, що були присвячені прогнозу забруднення атмосферного повітря при аварійних викидах хімічно небезпечних речовин показав, що для розрахунку концентраційних полів аміаку в атмосфері використовувалися аналітичні моделі [21, 22, 36, 37, 42, 106, 109]. Наприклад, такі аналітичні моделі:

1. Модель Сеттона. Розрахункова формула для визначення концентрації аміаку має вигляд [38]:

$$C = \frac{Q_л}{\pi^{\frac{1}{2}} \cdot C_z \cdot ux^{\frac{n}{2}}} \left[\Phi\left(\frac{y_0 - y}{C_z \cdot x^{\frac{n}{2}}}\right) + \Phi\left(\frac{y_0 + y}{C_z \cdot x^{\frac{n}{2}}}\right) \right] exp\left[-\frac{z^2}{C_z^2 \cdot x^{2-n}}\right] exp\left[-\frac{4\nu \cdot x^{\frac{1}{2}}}{\pi^{\frac{1}{2}} \cdot C_z \cdot un}\right]$$

де $Q_л$ – продуктивність постійно діючого лінійного джерела, г/м·с;

u – швидкість вітру, м/с;

Ф – функція Крампа;

ν – коефіцієнт в'язкості повітря, м^2/с;

n – параметр, що залежить від стану атмосфери;

x, y – координати точки, в якій визначається концентрація домішки, уздовж відповідних осей (осі X та Y розташовані в горизонтальній площині).

2. Модель Берлянда. Розрахунок концентрації аміаку за цією моделлю розраховується так [36, 38]:

$$C = \frac{Q_т \cdot (ZH)^{\frac{1-m}{2}} \cdot Z_1^m}{2(2+n-m)k_1 \cdot \sqrt{\pi k_0 x^3}} exp\left[-\frac{y^2}{4k_0 x} - \frac{U_1 Z_1^{m-n}(Z^{2+n-m} + H^{2+n-m})}{k_1(2+n-m)}\right] \frac{I_{1-m}}{2+n-m}\left[\frac{2u_1 Z_1^{m-n} \cdot H_z^{\frac{2+n-m}{2}}}{(2+n-m)^2 k_1 x}\right]$$

де $Q_т$ – продуктивність постійно діючого лінійного джерела, г/с;

H – висота розташування джерела домішки над поверхнею Землі;

k_0, k_1, m – параметри теорії розсіювання домішки.

3. Модель Бизової. Розрахунок концентрації аміаку за цією моделлю розраховується так [36]:

$$C = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_л(1+n)}{\Gamma(1+\rho)} \left(\frac{u_1}{(1+\delta+n)^2 \cdot k_1 Z_1^{n+b-1}} \right)^{\rho} \cdot \frac{Z_1^n}{u_1} \left[\Phi\left(\frac{y + \frac{y_0}{2}}{2\sqrt{k_0 x}} \right) - \Phi\left(\frac{y - \frac{y_0}{2}}{2\sqrt{k_0 x}} \right) \right]$$

де n, k_1, ρ, δ – параметри теорії розсіювання домішки.

За кордоном для розрахунку забруднення навколишнього середовища широко використовується модель Гауса. Розрахунок концентрації аміаку за цією моделлю розраховується так [38]:

$$C = \frac{Q}{2\pi V \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \left[exp\left(\frac{y^2}{2\sigma^2 y} \right) \right] \cdot \left\{ exp\left[-\frac{z-H}{2\sigma_z^2} \right] + exp\left[-\frac{z+H}{2\sigma_z^2} \right] \right\}$$

де Q – потужність викиду; V – швидкість вітру, м/с; σ – коефіцієнт дисперсії[38]:

$$\sigma_y^2 = \frac{2\mu_{yx}}{V};\ \sigma_z^2 = \frac{2\mu_{zx}}{V}$$

де z – висота рецептору; H – висота викиду.

Модель Гауса [38, 116, 133, 136, 137] реалізована у вигляді декількох спеціалізованих програм: «Аміак», «Токсі», «ALOHA», CAMEO/ALOHA та інші. Приклад розрахунку (модель ISC3, модель ALOHA) зон забруднення при аварійному витоку аміаку, хлору показано на рис. 1.4 - 1.6 [134]. Крім цього, за кордоном для прогнозу аварійного забруднення атмосфери використовується модель SLAB (аналітичне рішення рівняння масопереносу).

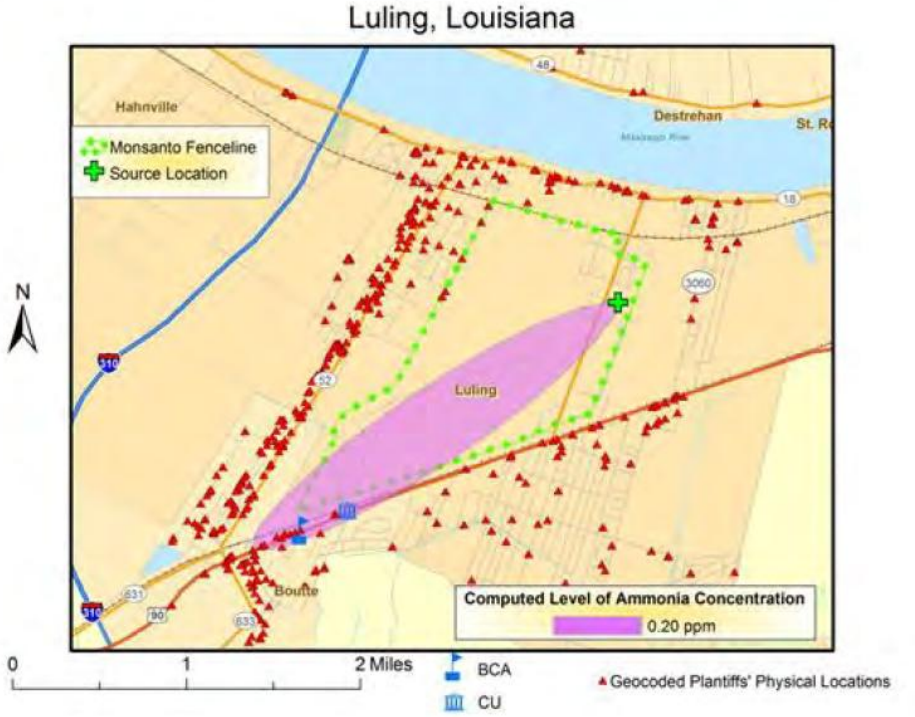


Рисунок 1.4 – Розрахунок зони забруднення аміаком при аварії на підприємстві (США) [132]

Рисунок 1.5 – Розрахункова область в задачі прогнозування забруднення атмосферного повітря при аварійному викиді хлору [138]

Рисунок 1.6 – Зона забруднення атмосферного повітря хлором при аварії на підприємстві, модель ALOHA [138]

Перераховані моделі широко використовуються на практиці, але вони не враховують змінну з часом інтенсивність викиду аміаку, присутність будівель та інші фактори.

Іншим підходом до прогнозування рівня забруднення атмосфери при аварійному викиді хімічно небезпечних речовин є використання чисельних кінематичних моделей [20, 26, 28]. Особливістю цих моделей є можливість врахування профілю швидкості вітрового потоку, нерівномірного поля коефіцієнту атмосферної дифузії. Розрахунок на базі цих моделей вимагає невеликих витрат комп'ютерного часу.

Крім перерахованих моделей за кордоном використовують CFD моделі. Їх основу складають чисельні рішення рівняння аеродинаміки (1 етап моделювання) а потім чисельно вирішують рівняння масопереносу для визначення поля забруднення атмосфери. CFD моделі представляють собою найпотужніший інструмент теоретичного вирішення завдань забруднення атмосфери. Для рішення задачі аеродинаміки використовують, як правило, рівняння Нав'є – Стоксу. Однак, практична реалізація моделей даного класу вимагає потужних комп'ютерів і великих витрат комп'ютерного часу – розрахунок одного завдання може тривати

декілька діб [140]. Це не дозволяє використовувати ці моделі, зараз, для проведення серійних розрахунків.

В цілому, необхідно підкреслити, що проблемі забруднення навколишнього середовища при викидах аміаку за кордоном приділяється значна увага, але в Україні кількість наукових досліджень в даному напряму дуже обмежена. Слід також відзначити, що в науковій літературі відсутні результати досліджень з забруднення акваторії р. Дніпро (там аміакопровод Тольятті – Одеса відкрито перетинає річку) при аварійних викидах аміаку, тобто відсутні дані, щодо можливого рівня забруднення акваторії річки у випадку надзвичайної ситуації. Крім цього, в літературі відсутні дані, щодо механічного забруднення навколишнього середовища (розліт уламків обладнання) при аварії на аміакопроводі.

1.5. Захист атмосфери від забруднення при викидах аміаку

У випадку аварійного викиду аміаку на трубопроводах, найбільше техногенне навантаження приходить на атмосферу. Тому захист атмосфери від забруднення при можливих аваріях є задачею особливої важливості. Аналіз наукових публікацій з проблеми захисту атмосфери від забруднення при аварійних викидах аміаку показав, що в даний час застосовуються такі види захисту атмосфери [1, 28, 71, 93, 94]:

– відсмоктування забруднювача від зони розливу;

– подача нейтралізатора від наземних струменевих установок;

– подача нейтралізатору від гелікоптера;

– створення повітряної або водяної завіси.

Над зоною аварійного розливу формується хмара з високою концентрацією забруднюючої речовини. В роботах [28, 93, 94] рекомендують використовувати відсмоктування забруднювача вентиляторами як метод боротьби з наслідками аварії. В роботі [28] було проведено два обчислювальних експерименти, результати цих експериментів показали, що даний метод малоефективний і може використовуватися при невеликих за площею ділянках забруднення.

На практиці застосовують також метод з подачею нейтралізатора в хмару з високою концентрацією забруднюючої речовини. Застосовують подачу з наземних установок або з рухомих (пожежні машини). В роботі [28] було проведено два обчислювальних експерименти, отримані результати показали, що даний метод є ефективним.

У деяких випадках застосування наземних установок реалізувати неможливо, наприклад, при складному рельєфі місцевості. У цих випадках в роботі [28] рекомендовано застосування літальних апаратів для подачі нейтралізатора в хмару забруднюючої речовини. Результати обчислювальних експериментів наочно показали, що даний метод є ефективним.

До числа методів захисту атмосфери відносять створення вертикальних повітряних струменів, за допомогою, наприклад, вентиляційних установок. Ефект даного методу залежить від швидкості подачі повітря і від ширини «щілини», скрізь яку він подається.

В роботі [28] було розглянуто метод захисту атмосфери від забруднення за допомогою створення повітряної завіси від наземних установок. Результати обчислювального експерименту показали, що даний метод тим ефективніше, чим ширше зона повітряної завіси, але і в цьому випадку, у міру «накочування» забрудненого хмари, «чиста» зона зменшується. Також розглянуто варіант з використанням одного повітряного струменя зі схожими параметрами розрахунку, крім швидкості струменя (вона збільшена). Результати показали, що концентрація забруднюючої речовини в хмарі значно зменшилася по висоті, але тільки поблизу струменя.

Розглянута також задача, в якій вентиляторна установка розташована на шляху міграції шлейфу забруднюючої речовини, що випарувався від місця розливу. Результати показали, що збільшення швидкості повітряного струменя зменшує концентрацію забруднюючої речовини в атмосфері, але тільки поблизу її. При зменшенні швидкості струменя концентрація забруднюючої речовини залишається підвищеною навіть поблизу установки.

Слід відзначити, що для використання будь-якого методу захисту навколишнього середовища від забруднення при аварійних викидах аміаку потрібно наукове обґрунтування використання цього методу, для того, щоб, ще до «запуску» конкретної захисної установки, визначити її ефективність для конкретних умов експлуатації. Це можна зробити на базі спеціалізованих математичних моделей. Аналіз літературних джерел показав обмежену кількість наукових досліджень, що присвячені рішенню цієї проблеми [28, 100].

1.6. Обґрунтування напряму наукового дослідження

На основі системного аналізу наукових публікацій з проблеми, що пов’язана з прогнозуванням забруднення навколишнього середовища при аварійних ситуаціях на аміакопроводі Тольятті – Одеса, було сформульовано завдання наукових досліджень:

– розробка багатофакторних чисельних методів оцінки рівня забруднення атмосферного повітря при аварійної емісії аміаку на аміакопроводі Тольятті – Одеса;

– розробка методу оцінки рівня забруднення р. Дніпро при аварійної емісії аміаку на аміакопроводі Тольятті – Одеса;

– створення чисельної моделі для оцінки ефективності захисту атмосфери від забруднення на території насосної станції, що перекачує аміак шляхом подачі нейтралізуючого розчину в повітря;

– розробка методу для оцінки механічного забруднення навколишнього середовища (розліт уламків обладнання) при аварії на аміакопроводі.

РОЗДІЛ 2.

МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНОГО ВИТОКУ АМІАКУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНИЧНОГО ЗАБРУДЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ АВАРІЇ НА АМІАКОПРОВОДІ «ТОЛЬЯТТІ – ОДЕСА»

В даному розділі розглядається побудова моделей для розрахунку нестаціонарного процесу витоку аміаку з пошкодженого аміакопроводу. Також розглядаються питання механічного забруднення навколишнього середовища у випадку розльоту уламків аміакопроводу.

2.1. Експериментальне визначення коефіцієнта витрати отвору в пошкодженому трубопроводі

При прогнозуванні рівня забруднення природного навколишнього середовища у випадку аварії на аміакопроводі важливо знати інтенсивність емісії забруднювача з пошкодженого трубопроводу. На величину цієї емісії значний вплив має коефіцієнт витрати отвору, що з'явився в трубі аміакопроводу внаслідок різних причин. Цілком очевидно, що форма такого отвору буде відмінною від канонічної (тобто, отвір у вигляді кола та таке інше) (рис.2.1, 2.2).

Рисунок 2.1 – Розрив трубопроводу [96, 119]

Рисунок 2.2 – Отвір у трубопроводі [98]

Тому, при проведені розрахунків з метою визначення зон хімічного забруднення при аварійному витоку аміаку, неможливо скористатися відомими довідковими даними для вибору даного коефіцієнта [61]. У зв'язку з цим було поставлено фізичний експеримент для визначення коефіцієнта витрати отвору неправильної форми.

Методологія проведення експерименту була наступна. В ємкості, що мала циліндричну форму було зроблено отвір у вигляді щілини, що мав неправильну форму. Перший варіант – «довга» щілина (вона моделює отвір, що показаний на рис. 2.3).

Рисунок 2.3 – Форма щілини в циліндрі (варіант №1)

Для експерименту використовувався сталевий циліндр довжиною 95 мм, діаметром 58 мм. Розміри щілини в циліндрі: довжина щілини – 50 мм, максимальна ширина щілини – 2,5 мм.

Рисунок 2.4 – Форма щілини в циліндрі (варіант №2)

При підготовці експерименту, виникла задача по визначенню площі щілини, що мала дуже складну геометричну форму. Щоб визначити площу отвору використовувалась така технологія. У щілину вставлялася вставка з пластиліну змінного перерізу. Вставка всувалася в щілину до того моменту, поки на ній по контуру не з'явилася відмітка від периметра щілини на даній вставці. Потім пластилінова вставка розсікалася по виділеному контуру і отриманий поперечний переріз прикладалася до міліметрівці і обводився контур даного перетину. Потім здійснювалося визначення площі отриманої фігури.

В другому варіанті експерименту досліджувався процес витоку рідини з «короткої» щілини (вона моделює отвір, що показаний на рис. 2.2). Ця форма отвору була близька до прямокутної (рис. 2.4), але отвір мав «рвані» краї. Максимальна довжина отвору – 11 мм і максимальна ширина 4 мм.

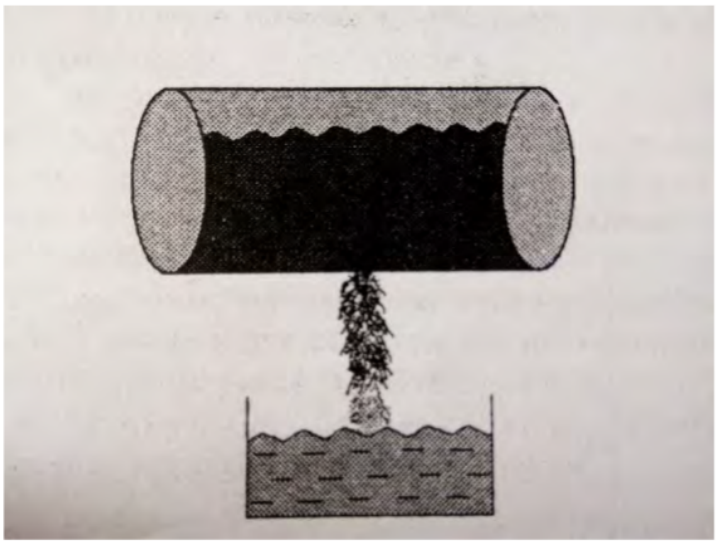


Рисунок 2.5 – Схема витікання рідини з циліндричної посудини при змінному напорі

Далі, ємкість повністю заповнювалось водою (температура води була 20˚С та 7˚С) та починався виток рідини з ємкості (рис.2.5). При проведені експерименту визначався час витікання рідини з циліндричної посудини. Слід зауважити, що це був виток при змінному напорі.

З гідравліки відомо [61], що при витоку рідини з отвору в циліндричній ємкості, при змінному напорі, час витікання визначається так

$$t = \frac{4l \cdot d\sqrt{d}}{3\mu \cdot \omega\sqrt{2g}}$$

де l – довжина циліндру, мм;

d – діаметр циліндру, мм;

ω – площа отвору;

μ – коефіцієнт витрати.

Використовуючи дану залежність можна розрахувати коефіцієнт витрати

$$\mu = \frac{4 \cdot l \cdot d\sqrt{d}}{3 \cdot t \cdot \omega\sqrt{2g}} \qquad (2.1)$$

Дана залежність була використана для визначення коефіцієнту витрати для кожного варіанту експерименту. Для кожного варіанту було проведено 10 експериментальних виливів та визначався час виливу. Далі виконувався розрахунок коефіцієнту витрати за залежністю (2.1). Середнє значення коефіцієнта витрати μ для щілин, що відповідало першому варіанту склало величину порядку 0,17 – 0,19, а для другого варіанту 0,24 – 0,26. При проведені експерименту вплив температури води на значення коефіцієнту витрати не було встановлено.

Отримане значення коефіцієнта витрати було далі використано при проведенні обчислювального експерименту.

2.2. Розрахунок процесу нестаціонарного витоку аміаку з трубопроводу

Аналіз літературних джерел, що присвячені прогнозуванню забруднення навколишнього середовища при аварійних емісіях аміаку показав, що прогнозування виконується при використанні постійного значення інтенсивності викиду аміаку Q, тобто процес викиду – стаціонарний з точки зору емісії небезпечної речовини. Такий підхід є дуже «спрощеним», так як він не відображає фізику процесу викиду аміаку з трубопроводу, що знаходиться під надлишковим тиском. При появі отвору в трубопроводі, з часом, має місце зниження надлишкового тиску ΔP_s в ньому. Внаслідок цього, з часом, змінюється значення Q – інтенсивність викиду, так як $Q = f(\Delta P_s, t)$ Тобто, процес емісії аміаку з трубопроводу є суттєво нестаціонарний (рис. 2.6).

Рисунок 2.6 – Аварійний витік аміаку
[https://www.mda.state.mn.us/ammonia-incident-summaries]

Це значить, що протягом часу має місце різне «навантаження» від викиду аміаку на забруднення навколишнього середовища. Тому, для адекватної оцінки рівня забруднення навколишнього середовища при аварійному викиді аміаку з трубопроводу потрібно враховувати зміну тиску з часом у ньому.

В даній роботі запропонована модель за допомогою якої це можливо зробити. Побудову цієї моделі будемо розглядати 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.

Розглянемо побудову моделі. Відзначимо, що аміак в трубі представляє собою перегріту рідину. Середній надлишковий тиск у аміакопроводі біля ΔP_s^n= 35 атм. В разі появи отвору в стінці трубопроводу, під тиском, почнеться інтенсивний витік аміаку. Процес викиду аміаку з труби будемо поділяти на 2 етапи:

– перший етап: напірний викид аміаку з трубопроводу внаслідок надлишкового тиску ΔP_s в трубопроводі;

– другий етап: викид аміаку за рахунок його випаровування (після скиду надлишкового тиску).

Тобто, масу аміаку, що випаровується з пошкодженого трубопроводу представляємо так:

$$M = M_1 + M_2$$

де M_1 – маса аміаку, що потрапить в атмосферу при напірному викиді з пошкодженого трубопроводу; M_2 – маса аміаку, що випаровується після напірного викиду аміаку.

Алгоритм розрахунку інтенсивності викиду аміаку (маси аміаку M_1 та інших параметрів) на першому етапі будемо виконувати в наступній послідовності [61]:

1. Визначається об'єм аміаку W в секції (довжина секції L = 5 км), якщо не було б надлишкового тиску ΔP_s:

$$W = S \cdot L$$

де $S = 0{,}785 \cdot d^2$ – площа поперечного перерізу трубопроводу, d = 0,355 м – діаметр трубопроводу.

2. Розраховується маса аміаку M в трубі якщо не було б надлишкового тиску та зріджений аміак заповнював би трубопровід як нестисла рідина:

$$M = W \cdot \rho$$

де ρ – щільність (0,68 кг/м^3).

3. Визначається «надлишковий» об'єм аміаку ΔW в секції при наявності надлишковому тиску ΔP_s:

$$\Delta W = \beta \cdot W \cdot \Delta P_s$$

де β – коефіцієнт об'ємного тиску (β = 152·10^{-9} Па).

4. Визначається «надлишкова» масу аміаку ΔM в секції при надлишковому тиску ΔP_s:

$$\Delta M = \rho \cdot \Delta W$$

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

$$Q = \mu \cdot \omega \sqrt{2g \frac{\Delta P_s^n}{\gamma}} \Delta t \qquad (2.2)$$

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

Відзначимо, що значення «*n*» відповідає значенню фізичного параметра на попередньому часовому шарі.

6. Визначається маса аміаку, що виходить з отвору в трубопроводі за час Δt:

$$\Delta m = \rho \cdot Q$$

7. Визначається «надлишковий» об’єм та маса аміаку, що залишилося в трубі після часу Δt:

$$\Delta W^{n+1} = \Delta W - Q$$

$$\Delta W^{n+1} = \rho \cdot \Delta M - \Delta m$$

де позначка «*n+1*» відповідає значенню параметра на новому часовому шарі.

8. Визначається зміна надлишкового тиску в трубі, внаслідок витоку аміаку за час Δt:

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

де $\Delta P = \frac{\Delta W^{n+1}}{W \cdot \beta}$.

9. Далі процедура розрахунку повторюється, починаючи з п. 5, та визначаються нові значення $\Delta W, Q, \Delta M, \Delta P$ на новому часовому кроці.

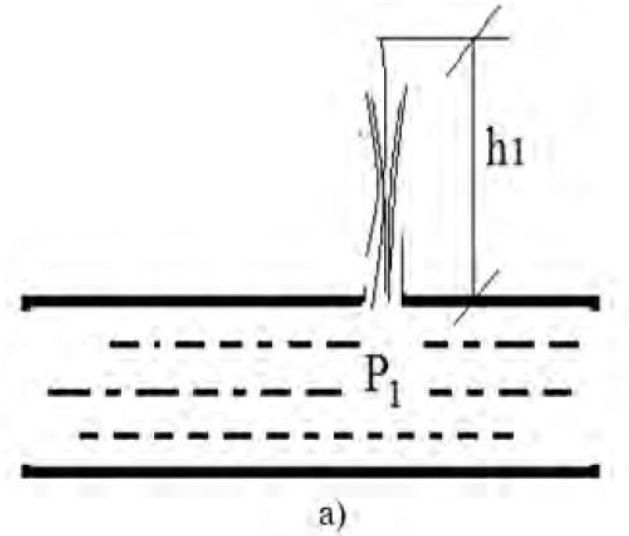
Розрахунок за даними залежностями закінчуються, коли надлишковий тиск в пошкодженому трубопроводі буде дорівнювати нулю. На цей момент часу, маса аміаку, що була викинута з пошкодженого трубопроводу, буде дорівнювати M_1. В трубопроводі, на цей момент часу, залишилася маса аміаку M_2.

Слід підкреслити, що при розрахунку витрати аміаку на базі залежностей (2.2) використовувалися експериментальні значення коефіцієнта витрати отвору, що були отримані раніше (п. 2.1).

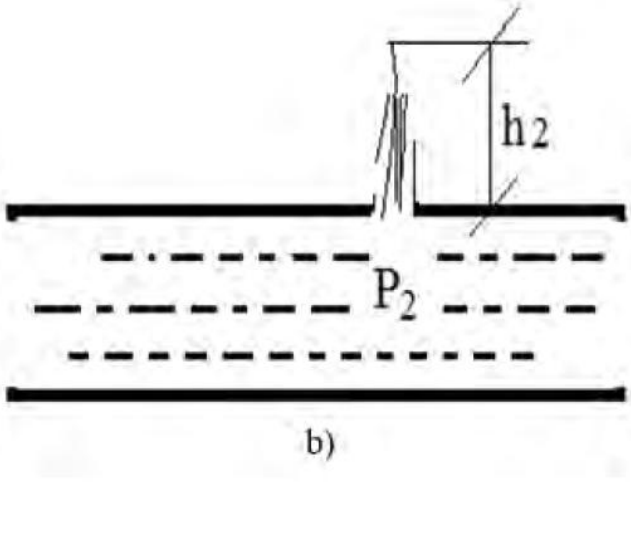
Розглядаючи запропоновану методологію, потрібно підкреслити ще одну її перевагу, а саме – вона дає можливість розрахувати змінну з часом висоту h струменя аміаку, що викидається з трубопроводу. Для цього використовується залежність [58]:

$$h(t) = \frac{\Delta P(t)}{\gamma}$$

Величина $h(t)$ змінюється з часом – вона зменшується (рис. 2.7), так як з часом зменшується величина надлишкового тиску $\Delta P_s(t)$ в аміакопроводі.



a)



b)

Рисунок 2.7 – Схема зміни висоти викиду струменя аміаку при зміні тиску в трубопроводі: а) великий тиск; б) малий тиск

Розрахунок параметру $h(t)$ є дуже важливим, так як знання цього параметру дає можливість в моделі відтворювати реальну фізику процесу викиду аміаку. В даній роботі, для оцінки впливу викидів аміаку на забруднення навколишнього середовища, буде використовуватися тривимірне рівняння масопереносу. В цьому рівнянні є можливість враховувати змінне значення параметру $h(t)$ на процес забруднення. Для цього в розробленій чисельній моделі величина $h(t)$ задається набором точкових джерел емісії у вигляді дельта – функцій Дірака. Сума цих точкових джерел дорівнює масі аміаку, що викинута з трубопроводу на розрахунковий час *t*.

Також слід відзначити, що згідно рівнянню Бернуллі, при зміні геометричної висоти аміакопроводу *z* має місце зміна тиску *P* в трубопроводі (рис. 2.8). Тобто, в двох сусідніх перерізах трубопроводу, що мають різні значення z_1, z_2, значення тиску *P* (висоти h_1, h_2) буде різним.

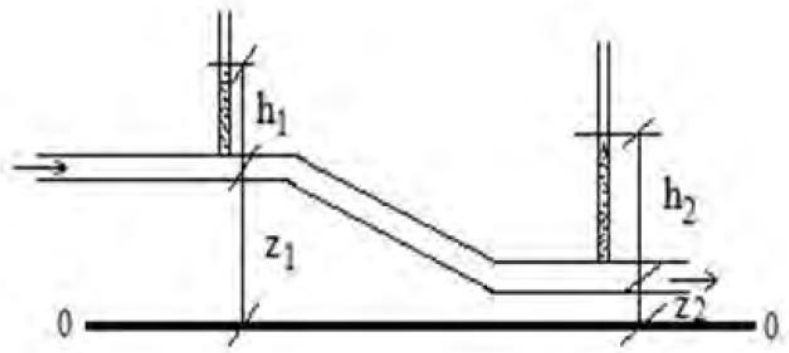


Рисунок 2.8 – Схема зміни тиску в трубопроводі при зміні геометричної висоти *z*

Для врахування цього потрібно в розроблену модель надати дані, щодо зміни геометричної висоти аміакопроводу на певній ділянці аміакопроводу.

На другому етапі розрахунку, інтенсивність потрапляння аміаку, за одиницю часу, за рахунок випарювання, будемо визначати на базі емпіричної моделі [83]:

$$Q = (5{,}83 + 4{,}1V)P\sqrt{G}$$

де V – швидкість повітря, G – молекулярна маса, P – тиск насичених парів.

Маса аміаку, що випарилася з трубопроводу за час dt, розраховується так:

$$M = Q \cdot S \cdot dt$$

де S – площа отвору.

Процес розрахунку закінчується, коли $M = M_2$, тобто, до моменту часу повного випарювання аміаку (той частини рідини, що залишилась після напірного викиду аміаку з пошкодженого трубопроводу).

Для проведення розрахунків на базі запропонованої моделі гідравлічного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу, в якості початкових даних, слід задати:

– площу отвору в аміакопроводі;

– довжину секції труби;

– надлишковий тиск в аміакопроводі на момент аварії;

– розрахунковий крок за часом;

– коефіцієнт витрати.

Програмна реалізація розглянутої моделі виконана на алгоритмічної мові FORTRAN. Розроблена програма *PruD.exe*, що імплементована в код «VOV3D.exe». Ця програма виконує прогнозні розрахунки на ПК з оцінки рівня забруднення атмосферного повітря та поверхні землі у випадку викиду аміаку. Результатом роботи програми *PruD.exe* 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 коді «VOV3D.exe» на етапі проведення розрахунку формування зон забруднення.

На приведених нижче таблицях показані розрахункові дані, щодо зміни надлишкового тиску в аміакопроводі та маси аміаку, що викидається з нього у випадку появи отвору. Розрахунок виконано на базі побудованої моделі (код

«VOV3D.exe») для площини отвору S = 0,096 м^2 (ця площа дорівнює площі «живого» перерізу трубопроводу, тобто, такий розмір отвору можна трактувати, як «гільйотинний» розрив аміакопроводу).

Таблиця 2.1 Сумарна кількість аміаку, що викинута з трубопроводу з часом

Час, с	Маса, кг
10	11711
50	54461
70	73470
257	171146
275	172911

Таблиця 2.2 Зміна надлишкового тиску в аміакопроводі

Час, с	Надлишковий тиск, атм
10	32,59
50	23,97
70	20,14
257	0,45
275	0,1

Як ми бачимо з наведених таблиць, з часом, значення надлишкового тиску в аміакопроводі швидко змінюється, що впливає на кількість імітованого в повітря аміаку. Розрахунки показали, що перший етап викиду аміаку з пошкодженого

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : навч. посіб. у 6 кн. / за ред. В. А Котляревського, О. В Забігаєва. Москва : АСВ, 2001–2005.
2. Амеліна Л.В. Моделювання процесу нестаціонарного забруднення річки та повітряного середовища при надзвичайної ситуації. *«Довкілля-XXI»*. 2012. С. 92.
3. Амеліна Л.В., Біляєв М.М., Козачина В.А., Полторацька В.М. Prediction of atmospheric air pollution during accidental ammonia emission. *East European Scientific Journal*. 2019. №4 (44). P. 4–11.
4. Амеліна Л.В., Берлов А.В., Малюгін М.Г. Розрахунок вибухонебезпечних зон при аварійній емісії аміаку. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. №3(75). С.27–33.
5. Амеліна Л.В. Чисельний прогноз наслідків витоку аміаку на аміакопроводі «Тольятті-Одеса». *Надзвичайні ситуації: безпека та захист.* : матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Черкаси, 20-21 жовтня. 2017. С. 111.
6. Амеліна Л.В., Біляєв М.М., Берлов О.В. Моделювання забруднення навколишнього середовища та робочих зон при емісії хімічно-небезпечних речовин. *«Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України»* : матеріали V Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції, м. Київ, 30 квітня, 2019. С.10–11.
7. Амеліна Л.В., Пащенко А.В., Тютюнник Ю.І. Компютерні моделі для оцінки рівня забруднення довкілля при аварійних викидах. *«Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта»* : матеріали 75 Міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпропетровськ,14-15 травня, 2015. С. 309–310.
8. Амеліна Л.В., Якубовська З.М. Моделювання забруднення навколишнього середовища та робочих зон при емісії хімічно-небезпечних речовин. *«Неделя еколога-2017» :* матеріали міжнар. наук. симп., м. Каменское,10-13 квітня, 2017. С.7.
9. Амеліна Л.В., Берлов А.В., Башмак А.В., Бондарь А.Е. Комплекс программ для прогнозирования аварійного загрязнения атмосферного воздуха и воды

«Тиждень еколога-2019» : матеріали наук. симп., м. Кам'янське, 7–10 жовтня, 2019. С.24–25.

10. Амеліна Л.В. Використання програмного коду «VOV3D.exe» для розрахунку витоку аміаку з аміакопроводу. *Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпро, 15 грудня 2020 р. Дніпро, 2020. С.121
11. Амелина Л.В, Козачина В.А., Машихина П.Б. Моделирование загрязнения окружающей природной среды при аварийных выбросах на аммиакопроводе. *«Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах»* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Харків, 4-5 листопада, 2019. С.205–207.
12. Амелина Л.В., Берлов А.В., Долина Л.Ф. Компьютерное моделирование загрязнения атмосферного воздуха и воды при авариях на химически опасных объектах. *«Компьютерное моделирование и оптимизация сложных систем»* : матеріали V Міжнародної наук.-техн. конф., м. Дніпро, 6-8 листопада, 2019 р. С. 16–17.
13. Амелина Л.В., Беляев Н.Н., Савина О.П. Моделювання процесу нестаціонарного забруднення річки та повітря середовища при надзвичайній ситуації. *«Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании»*. 2013. С. 54.
14. Амелина Л.В., Беляев Н.Н. Численное исследование загрязнения окружающей среды при возможной аварии на аммиакопроводе «Тольятти-Одесса». *«Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная»*. 2014 р. С. 73–75.
15. Амелина Л.В., Беляев Н.Н., Пащенко А.В. Аварийная утечка из аммиакопровода «Тольятти-Одесса»: расчет зоны загрязнения реки Днепр на базе численной модели. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2011. № 62. С.19–24.
16. Амелина Л.В., Беляев Н.Н., Берлов А.В. Численный анализ загрязнения воздушной среды при авариях на химически опасных объектах. *«Проблемы и*

перспективы развития железнодорожного транспорта» : матеріали 74 Міжнародної наук.-практ. конф., м. Дніпропетровськ, 15.05-16.05.2014, 2014. С. 310.

17. Амеліна Л.В., Біляєв М.М., Харітонов М.М., Гурєєва К.О. Чисельне моделювання забруднення навколишнього середовища у випадку аварії на аміакопроводі «Тольяті-Одеса». *«Неделя эколога-2010»*. 2010. С. 12.
18. Амелина Л.В., Берлов А.В., Калашников И.В. Прогнозирование аварийного загрязнения атмосферного воздуха. *«Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд»* : матеріали IX Міжнародної наук. конф., м. Харків, 15-16 жовтня, 2019. С.19–20.
19. Андронов В.А. Пономаренко Р.В Можливості виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних із антропогенним впливом на поверхневі водойми. *Проблеми надзвичайних ситуацій.* Харків, № 7, 2008. С. 26–35.
20. Аргучинцев В. К. Аргучинцев А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2007. 255 с.
21. Басманов А. Е, Говаленков С. С. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника *Проблеми надзвичайних ситуацій* : зб. наук. пр. – Харків : Нац. ун-т цивільного захисту України, 2010. № 12. С. 21–27.
22. Басманов А. Е., Говаленков С. С., Васильев М. В Зонирование местности в районе непрерывно действующего источника опасного химического вещества. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : зб. наук. пр. – Харків : Нац. ун-т цивільного захисту України, 2011. № 13. С. 20–33.
23. Беженар Р., Мадерич В., Моделювання різномасштабних процесів у водоймах складної форми. *Прикладна гідромеханіка*, 2007, Том 9. С.10–16.

24. Беликов В.В., Зайцев А.А., Милитеев А.Н. Математическое моделирование сложных участков русел крупных рек. *Водные ресурсы. Гидрофизические процессы*, 2002. т.29. №5. С.698–705.
25. Белозеров Д.А. Совершенствование методики розработки нормативов допустимых сбросов веществ в водные объекты для водопользования *Весник ВГУ*. 2011. №5. С.186 – 193.
26. Беляев Н. Н. , Берлов А. В. , Машихина П. Б. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монографія. Дніпропетровськ : Акцент ПП», 2014. 127 с.
27. Беляев Н.Н., Голышев А.М., Кириченко П.С. Экологические аспекты сброса сточных вод в акваторию моря : монографія. Дніпропетровськ : Акцент, 2014. 126 с.
28. Беляев Н. Н., Лисняк В. М. Защита атмосферы от загрязнения при миграции токсичных веществ : монографія. Дніпропетровськ: Інновація, 2006. 152 с.
29. Беляев Н. Н., А. В. Берлов, П. С. Кириченко Защита атмосферы от загрязнения при эмиссии опасного вещества из движущегося железнодорожного вагона. *Строительство, материаловедение, машиностроение* : зб. наук. пр. ПГАСА. Дніпропетровськ. 2016. № 87. С. 13–18.
30. Беляев Н.Н., Покутнева Л.В. Численное моделирование загрязнения акватории реки. *«Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В.Лазаряна»* : Зб. наук. пр. 2009 р. № 28. С. 69–72.
31. Біляєв М.М., Амеліна Л.В., Антіпова К.І. Забруднення навколишнього середовища у випадку надзвичайної ситуації на аміакопроводі. *«Екологічний інтелект-2011»*. 2011. С. 56–57.
32. Біляєв М.М., Амеліна Л.В., Степанова Ю.О. Чисельне моделювання забруднення повітря робочих місць після емісії токсичних речовин. *Строительство, материаловедение, машиностроение*, №. 98. 2017. С.51–55.
33. Біляєв М.М., Амеліна Л.В. Методи нейтралізації аміаку при надзвичайній ситуації на аміакопроводі. «Актуальні проблеми сучасної науки та освіти» :

матеріали II Міжнародної наук.-практ. конф., м. Львів 9-10 листопада, 2020 р., ч. III. С. 16–17.

34. Біляєв Н.Н., Амеліна Л.В. Методи мінімізації забруднення навколишнього середовища на аміакопроводі Тольятті – Одеса при надзвичайних ситуаціях. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення* : зб. тез доп. рег. наук.-практ. конф., м. Львів, 3–4 грудня 2020 р. Львів, 2020. С.127–130
35. Біляєв Н.Н., Амеліна Л.В. Математичне моделювання розповсюдження небезпечної речовини при надзвичайній ситуації. *Наука. Інновації. Якість* : зб. тез доп. І міжнар. наук.-практ. конф., м. Бердянськ, 17–18 грудня 2020 р. Бердянськ, 2020. С.235–238
36. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. 273 с.
37. Бесчастнов М. В., Соколов В. М. Предупреждение аварий в химических производствах. Москва : Химия, 1979. 392 с.
38. Бруяцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
39. Букі О. О. Ю. В. Квітковський Захист населення і територій від екологічної небезпеки в залежності від розташування джерел хімічних надзвичайних ситуацій. *Науковий вісн. будівництва* : зб. наук. пр. Харків : Харк. нац. ун-т буд-ва та архітектури, 2014. № 3(77). С. 211–214.
40. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Теория мелкой воды. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1977.
41. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979. 536 с.
42. Генихович Е. Л. К вопросу о применимости гауссовой модели для расчета загрязнения воздуха : Тр. ГГО. Ленинград, 1982. № 450. С. 35–40.
43. Глива В. А., Шевченко Л. О. Сучасні підходи до моделювання і прогнозування динаміки шкідливих факторів виробничого середовища. *«ABIA-2013»* : Матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., 21.05–23.05.2013, Національний авіаційний університет. Київ : НАУ, 2013. Т. 5. С. 32.37 – 32.40.

44. Грабар О.В., Лихачова В.В., Рисенко Г.О. Екологічна безпека та надійність експлуатації магістрального аміакопроводу. *Вісті автомобільно-дорожнього інституту*. 2010. № 2 (11). С. 170–174.
45. Гущак Ж. Ризик екологічного забруднення внаслідок руйнування трубопроводів. *Молодь і ринок*. №7 (90), 2012. С. 95–97
46. Дадонов Ю.А., Дегтярев Д.В., Кручинина И.А.,. Лисанов М.В, Сумской С.И., Бурдачев В.Е. Оценка риска аварий на магистральном аммиакопроводе «Тольятти-Одесса», 2003. С.
47. Заказнов В.Ф., Куршева Л.А., Федина З.И. Скорость испарения жидкого аммиака в смеси с поглотителями, Магистральные аммиакопроводы, праці ДіАП, выпуск 51, Москва, 1978. С. 74–79.
48. Заказнов В.Ф., Куршева Л.А. Методы ликвидации проливов жидкого аммиака. *Магистральные аммиакопроводы*, праці ДіАП, выпуск 51, Москва, 1978. С. 68–77.
49. Запорожець О. І. Проект концепції управління ризиками надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. *Безпека життєдіяльності*. 2007. № 4. С. 2–4.
50. Захматов В. Д. Техногенна аварія у Львівській області. *Безпека життєдіяльності.* 2007. № 8. С. 13–14.
51. Защита производственного персонала и населения от сильнодействующих ядовитых веществ на химически опасных объектах. Москва : ВАХЗ, 1991. 223 с.
52. Зберовский А. В. Математическое моделирование загрязнения атмосферы при аварийном выбросе химически опасного вещества. Зб. наук. пр. Нац. гірничого ун-ту. Дніпропетровськ : Вид-во НГУ, 2012. № 37. С. 305–310.
53. Зберовский А. В. Численное моделирование загрязнения атмосферы при аварийных разливах. Зб. наук. пр. Нац. гірничого ун-ту. Дніпропетровськ : Вид-во НГУ, 2012. № 37. С. 315–321.
54. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К, Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде : монографія. Київ : Наук. думка, 1997. 368 с.

55. Зубко К.Ю. Теоритичні основи класифікації еколого-економічних збитків. *Науковий вісник міжнародного гуманітарного університету*. С. 170–174.
56. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. Москва : Гидрометеоиздат, 1984. 560 с.
57. Испарение и рассеивание аммиака при его разливах и утечках / Сост. А.Л.Цыкало та ін. М. : Москва. Наук.-досл.ін-т тех.-екон.досл., 1982. 48 с. (Сер.: Азотная промышленность).
58. Ковалец И. В., Ющенко С. А., Железняк М. И. Ассимиляция данных в трехмерной модели распространения радионуклидов в водоемах Тритокс системы Родос. *Математичні машини і системи*. 2005. С. 147–154.
59. Ковалец И. В. Численная гидродинамическая модель атмосферной дисперсии загрязнений вокруг зданий. *Зб. Ін-та проблем мат. машин та систем НАН України*. 2010. № 1 С. 3–10.
60. Козий Л. И., Мадерич В. С. Лагранжева модель растекания нефтяных пятен. *Прикладна гідромеханіка*, 2000. Том 2. С. 108–109.
61. Комов А.А., Комов В.А. Гидравлика. Л.: Сельхозгиз, 1955. 416 с.
62. Компаниец Л.А. О численных алгоритмах для нелинейно-дисперсионных моделей мелкой воды в двумерном случае *Сборник Вычислительные технологии*, т.1, №3, 1996. С.44–56.
63. Константинов Ю.Н. Гидравлика. К.: Вища школа, 1981. 360с.
64. Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. М., Высшая школа, 1987, ч. 1,2.
65. Кострюков В.А. Основы гидравлики и аеродинамики. М.: Высшая школа, 1975. 220с.
66. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, ч. 1,2. М., Физматгиз, 1963.
67. Кравчук А.М. Масопередача в спорудах систем водопостачання і водовідведення. К., 2000. 168 с.

68. Кресін И. С., Брук В. В., Баранник В. О. Моделювання поширення нафтопродукти у перші дні після аварії т/х «Волганефть – 139» у Керченській протоці, 2007. С. 13.
69. Крейт Ф. Основы теплопередачи. Москва : Мир, 1983. 512 с.
70. Кузнецов С. Г. Методы моделирования распределения загрязнения в городской застройке. *Проблеми архітектури і містобудування. Вісн. Донбаської нац. акад. буд-ва і архітектури.* Макіївка, 2010. № 2 (82). С. 158–161.
71. Купаев В. И. Методы локализации очага аварии и ликвидации ее последствий на химически опасных объектах железнодорожного транспорта. *Транспорт: наука, техника, управление*. 2003. № 4. С. 28–34.
72. Кушнир В. М., Федоров С. В. Моделирование взаимодействия поверхностных волн с подводным трубопроводом. *Прикладна гідромеханіка*, 2003, Том 5(77), №3, С. 55 – 64.
73. Кушнир В. М., Федоров С. В. Нестационарное вязкое течение вокруг трубопровода, расположенного вблизи поверхности дна. *Прикладна гідромеханіка*. 2004, Том 6(78), №3. С.54–63.
74. Кушнир В. М., Федоров С. В. Диффузия вещества с нейтральной плавучестью из подводного трубопровода при воздействии квазистационарных и волновых течений. *Прикладна гідромеханіка*. 2005. Том 7(79), №1. С. 43–49.
75. Кюнж Ж.А., Холи Ф.М., Вервей А. Численные методы в задачах речной гидравлики: практическое применение: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
76. Ліквідація пожеж на залізничному транспорті : монографія / М. Д. Кацман та ін. Київ : Основа, 2006. 216 с.
77. Логачев И. Н., Логачев К. И. Аэродинамические основы аспирации. Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. 659 с.
78. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Москва : Наука, 1978. 735 с.
79. Мадерич В., Моргунов М., Кошебутский В. Моделирование проникновения клина соленых вод в рукав Быстрый дельты Дуная. *Прикладна гідромеханіка* : Зб. наук. пр. 2006, т.8, №1. С.31–38.

80. Мандрик О.М. Екологічні та економічні наслідки аварій на магістральних газопроводах. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування* Науково-технічний журнал. 2013. №1(7). С.160–165.
81. Мандрик О.М. Прогнозування екологічного ризику при аварії на дільниці магістрального газопроводу (на прикладі Богородчанського району). *Екологічна безпека.* №1 (15), 2013. С.59–63.
82. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.
83. Мацак В. Г., Хоцянов Л.К. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве. Москва : Медгиз, 1959. 231 с.
84. Методи розрахунку концентрації повітряних забруднень на міській території : навч. посібник / Є. Р. Абрамовський та ін. Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2010. 223 с.
85. Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. Київ, 2001. 33 с.
86. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Госкомгидромет. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. 93 с.
87. Нерпин С.В., Кузнецов М.Я., Стрижевский И.И., Хлопотенков Е.Д. Проникновение аммиака в грунт и его распределение в грунтовых водах. *Магистральные аммиакопроводы*, наукові праці ДІАП, № 51, Москва, 1978, С.43–46.
88. Несвижский Ф. А., Потанин А. П., Эвенчик Н. С. Расчет длины зоны поражения. Пр. ГИАП. Москва. 1978. № 51. Магистральные аммиакопроводы. С. 34–43.
89. Ночвай В. И., Панчук В. И. Оптимизация эмиссионных параметров численной модели распространения атмосферных загрязнений. *Моделювання та інформаційні технології.* ІПМЕ. 2010. Спеціальний вип.,т. 2. С. 308–314.
90. Основы прогнозирования качества поверхностных вод. М.: Наука,1982.181с.

91. Опанасюк Ю.А. Науково-методичні підходи до оцінки еколого-економічного збитку від надзвичайних ситуацій техногенного характеру комбінованим методом. *Економічна наука. Економіка та держава*. №3, 2014. С. 91–96.
92. Петренко О.С. Оптимізація по глибині процессу розбавлення стічних вод при скиданні у водні об'єкти, науково-технічний збірник. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки.* 2009. №12. Київ. С.72–77.
93. Плахотник В Н, Бойченко А.Н., Ярышкина Л.А. Экологические аспекты перевозок сжиженного аммиака и его водных растворов железнодорожным транспортом. *Залізничний транспорт України*. №3. 2000. С.26–28.
94. Плахотник В Н, Ярышкина Л.А., Сизиков В И та ін. Природоохранная деятельность на железнодорожном транспорте Украины, проблемы и решения : монографія. Київ.: Транспорт Украины, 2001. 244с.
95. Пляцук Л. Д., Бойко В. В. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. *Вісн. КНУ ім. Михайла Остроградського.* Кременчук, 2010. № 6. С. 1–4.
96. Побережний Л.Я., Яворський А.В., Цих В.С., Станецький А.И., Грицанчук А.В. Підвищення рівня екологічної безпеки трубопроводних мереж нафтогазового комплексу України, *«Техногенно-екологічна безпека», матеріали* наук.-техн. журналу. 2017. №1. С. 24–31.
97. Попов В.М., Ромин А.В., Фесенко Г.В. Особенности прогностических расчетов распространения высокозагрязненных вод с учетом состояния льда и числа дней после ледостава. *«Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Зб. наук. праць. 2011. №. 14. С.123–128.
98. Посібник до СніП 2.04.02.–84 «Проектирование сооружений для водозабора поверхностных вод». М.: Стройиздат, 1990. 262с.
99. Пшинько А.Н., Амелина Л.В., Беляев Н.Н. Численное моделирование загрязнения акватории р. Днепр при аварийной утечке аммиака из аммиакопровода «Тольятти-Одесса». *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В.Лазаряна* . Зб. наук. пр. 2010. № 35. С. 181–186.

100. Пшинько А.Н., Беляев Н.Н., Машихина П.Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях : монографія. Дніпро : Нова ідеологія, 2011. 168 с.

101. Пшинько А.Н., Беляев Н.Н., Покутнева Л.В. Моделирование загазованности общественного помещения токсичным газом. *«Наука та прогрес транспорту»*. Зб. наук. пр. 2009. № 26. С. 90–94.

102. Пшинько А.Н., Беляев Н.Н., Покутнева Л.В. Расчет зоны аварийного загрязнения реки. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В.Лазаряна* . Зб. наук. пр., 2010. № 31. С. 140–143.

103. Рогаль П., Кондратюк В. До теорії прогнозування наслідків аварії: зони планування та зони реагування. *Безпека життєдіяльності*. 2008. № 1–2. С. 28–30.

104. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир. 1980. 61с.

105. Рудаков Д.В., Шейко А.Ф. Моделирование диффузии примеси в поверхностном слое океана. *Вісник.* 2004. №6, Серія Механіка. № 8. Т.1. С. 98–106.

106. Рудаков Д. В. Модель рассеивания примеси в приземном слое атмосферы над поверхностью со сложным рельефом. *Вісн.Дніпропетр. нац. ун-ту. Серія : Механіка.* Дніпропетровськ : ДНУ, 2004. Вип. 8, № 6, т. 1. С. 89–97.

107. Самарский А.А., Михайлов А. П. Математическое моделирование Москва : Физматлит. 2001. 320с.

108. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.

109. Светличная С. Д. Оценка полученной токсодозы при распространении первичного облака токсического вещества. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : зб. наук. пр. Харків : НУЦЗУ, 2011. № 13. С. 127–132.

110. Селезов И. Т., Ткаченко В. А., Савченко С. А. О гашении волн на воде локальными донными неоднородностями. *Прикладна гідромеханіка*. 2006. Том 8. №1. с.73–78.

111. Селезов И.Т. Распространение нелинейных неустановившихся поверхностных гравитационных волн над неровным дном. *Прикладна гідромеханіка.* Зб. наук. пр.. 1999. т.1(73). №1. С.102–109.

112. Соботович Е. В. , Лисиченко Г. В. , Забулонов Ю. Л. та ін. Аварія з фосфором у Львівській області: факти, проблеми, екологічні наслідки. *Вісн. Ін-ту геохімії навколишнього середовища.* Київ, 2007. № 14. С. 8–18.

113. Сопільник Л., Скриньковський Р, Лозован В., Юзевич В, Павловські Г. Визначення економічних втрат газотранспортних підприємств від виникнення аварійних ситуацій на магістральних газопроводах Traektoriâ Nauki = Path of ScienceVol. 5. No 1. 2019, с.1008–1017

114. Степаненко С. Н., Волошин В. Г., Типцов С. В. Решение уравнения турбулентной диффузии для стационарного точечного источника. *Зб. праць Укр. гідрометеорологічного журн*. 2008. № 3. С. 13–24.

115. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Распределение аммиака при разгерметизации. *Магистральные аммиакопроводы*. праці ДІАП, №51, Москва, 1978, С.

116. Теліженко О.М., Опанасюк Ю.А. Експрес-оцінка еколого-економічних збитків від катастроф техногенного характеру. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2014. №4, т.1. С. 164–170.

117. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. М.: Мир, 1980. 539 с.

118. Шапар А. Г., Ємець М. А. , Тяпкін О. К. та ін. Концептуальні положення комплексного екологічного моніторингу районів радіаційно небезпечних об’єктів. *Екологія і природокористування*. Дніпропетровськ, 2011. № 14. С. 224–233.

119. Шиян В.Д., Лисиченко Г.В. Магістральні трубопроводи в проблематиці забезпечення екологічного імперативу. *Проблеми техногенно-екологічної безпеки*. С.4–9.

120. Aggarwal A., Dr. Haritash A. K., Kansal G. Air pollution modeling – a review. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*. June 2014.

Volume No.02, Issue No. 06. P. 355–364. URL: https://www.researchgate.net/publication/299562617_Air_Pollution_Modelling-A_Review (дата звернення: 02.03.2021).

121. Amelina L.V., Biliaiev N.N. Numerical simulation of air pollution in case of unplanned ammonia release. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. Лазаряна. «Наука та прогрес транспорту»*. 2017. № 3 (69). С. 7–14.
122. Amelina L.V., Biliaiev N.N., Mashichina P.B. Reducing ammonia concentrations in atmosphere after it's unplanned release. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. Лазаряна. «Наука та прогрес транспорту»*. 2017. № 4 (70). С. 16–22.
123. Bernardino A. Di, Monti P., Leuzzi G., Sammartino F., Ferrari S. Experimental investigation of turbulence and dispersion around an isolated cubic building. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* : conference materials, Bologna, 9–12 October 2017.
124. Bieringer P. E., Pina A., Sohn M. D., Jonker H. J. J. et al Large eddy simulations (LES) based system for producing coupled urbanand indoor airborne contaminant transport and dispersion solutions. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* : conference materials, Bologna, 9–12 October 2017.
125. Biliaiev M.M., Amelina L.V., Kharytonov M.M. Numerical simulation of the atmosphere pollution after accident at the "Tolliaty-Odessa" ammonia pipe. *Air pollution modeling and its application XXII. NATO Science for peace and security* : conference materials. 2014. P. 391–395.
126. Biliaiev M.M., Amelina L.V., Stepanova Yu.O. Numerical simulation of air pollution in workplaces after toxic chemical emission. Збірник наукових праць «*Строительство, материаловедение, машиностроение.* 2017. № 98. С. 51–55.
127. Biliaiev M. M. Berlov A. V., Shevchenko A. V. Numerical simulation of the atmosphere pollution after the accident at the chemical plant. *«Applied problems of the fluid mechanics and heat and mass transfer» :* conference materials International

scientific conf. of Dnipropetrovk national university, Dnipropetrovsk, Nov. 6–8. 2014. P. 173–174.

128. Bright V. B., Bioss W., Cai X. Street canyon atmospheric composition: Coupling dynamics and Chemistry. *SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application* : Conf. Abstracts of 31st NATO, 27 September–01 October, Torino 2010. P.1.1.

129. Carpentieri M., Hayden P., Robins A. G Experimental study of flow and dispersion in regular arrays of rectangular buildings. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes :* conference materials, Bologna, 9–12 October 2017.

130. Chatzimichailidis A. E., Argyropoulos C. D., Assael M. J., Kakosimos K. E. A formulation for the street canyon recirculation zone based on parametric analysis of large eddy simulations. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes :* conference materials, Bologna, 9–12 October 2017.

131. Cosemans Guido J.J. A new approach to building downwash modelling. *SPS SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application : Conf. Abstracts of 31st NATO,* 27 September–01 October, Torino 2010. № P.1.6.

132. Daly A., Zannetty P., Jannings M. Accident reconstruction and plume modeling of an unplanned ammonia release. *Air pollution XXI, WIT Transactions on Ecology and The Environment* : conference materials. 2013. P. 3–13.

133. Dinis M. de L., Fluza A. Simulation of liberation and dispersion of radon from a waste disposal. *Advances in Air Pollution Modeling for Environment Security. NATO Science Series / Springer* : conference materials. 2004. Vol. 54. P. 133–142.

134. Graber W. K., Gassmann F. Real time modelling as an emergency decision support system for accidental release of air pollutants. *Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM)*. 2000. Vol. 52. iss. 5. P. 413–426.

135. Gross A. Jorgensen S. Theoretical determination of reaction parameters for atmosphere chemical reactions. *Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment* : Proc of the NATO Advanced Research Workshop.

Department of Chemistry, University of Copenhagen. Alushta, Ukraine, 1–4 October, 2007. P. 31–45.

136. Hanna S., Chang J., Mazzola T. Analysis of variations of concentrations with downwind distance and characteristics of dense gas plume rise for jack rabbit II–2015 and 2016 chlorine field experiments. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes : conference materials,* Bologna, 9–12 October 2017.

137. Hanna S., Dharmavaramb S., Zhangc J. et al Comparison of Six Widely–Used Dense Gas Dispersion Models for Three Actual Railcar Accidents. *NATO Security through Science Series C: Environmental Security*, January, 2008.

138. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software, Quality of Life, 9, 2018. – P. 38–45.

139. Intini F., Morabito A., Tinarelli G., Tanzarella A. et al Pmss micro-scale simulations of pollutants emitted by fireplaces located in the urban residential area of torchiarolo (apulia region, Italy) / 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. – 9-12 October 2017, Bologna, Italy.

140. Madalozzo D.M.S., Braun A. L., Awruch A. M. A numerical model for pollutant dispersion simulation in canyons. *Mecanica Computacional* Vol XXXI, P. 211–235 (articulo complete).

141. Mangia C., Cervino M., Gianicolo E. A. L., Giuseppe delle Noci, Portaluri M. Modelling exposure to the industrial accidental release of arsenic occurred at manfredonia (italy) in 1976: lessons learned. 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. 9–12 October 2017, Bologna, Italy.

142. Mo Z., Liu C.–H. Characterizing pollutant plume dispersion in urban atmospheric surface layer *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 9–12 October 2017, Bologna, Italy.

143. Nakayama H., Takemi T. Les studies for predicting plume concentrations around nuclear facilities using an overlapping technique / 18th International Conference on

Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. – 9–12 October 2017, Bologna, Italy.

144. Ngoc Bao Tran LE, Périllat R., Korsakissok I., Mallet V. Uncertainty studies on an atmospheric dispersion model with monte carlo method. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 9–12 October 2017, Bologna, Italy.

145. Qu Y., Millez M., Musson–Genon L., Carrissimo B. Development of building resolving atmospheric CFD code taking into account atmospheric radiation in complex geometric. *SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application.* Conf. Abstracts of 31st NATO, 27 September–01 October, 2010, Torino, Italy. Torino, 2010. № P.1.5.

146. Sanchez B., Santiago J. L., Martilli A., Pujadas M at al Cfd modelling of effects on nox concentration of photocatalytic materials applied to a sidewalk pavement and a brick wall in a real street canyon. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 9–12 October 2017, Bologna, Italy.

147. Swaluw van der E. et al Measuring and modeling wet deposition fluxes in the Netherlands and Europe. Conf. Abstracts of 31st NATO / SPS Intern. Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, 27 September – 01 October, 2010, Torino, Italy. Torino, 2010. № 2.8.

148. Tracking and predicting the atmospheric dispersion of hazardous material releases. Implications for Homeland Security. National research council. *Committee on the Atmospheric Dispersion of Hazardous Material Releases Board on Atmospheric Sciences and Climate Division on Earth and Life Studies.* Washington, 2003. 101 p.

149. Webb A. R., Westoby P. B. Analytical modelling of dispersion for bayesian source term estimation. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 9–12 October 2017, Bologna, Italy.

Наукове видання

АМЕЛІНА Лариса Володимирівна
БІЛЯЄВ Микола Миколайович
МАШИХІНА Поліна Борисівна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

Монографія
Українською мовою

Матеріал друкується в авторській редакції

Підписано до друку 26.02.2021
Формат 60х80/16. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 7,85 Обл-вид. арк. 6,58
Тираж 100 пр. Зам № 2704

Видавництво
"Журфонд"
49000, Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК №684 від 21.11.2001 р.
Відруковано в ПП Вахмістров О.Є
Адреса видавництва та друкарні:
49000, м. Дніпро, вул.
Писаржевського, 18.

Л.В. Амеліна , М.М. Біляєв, П.Б. Машихіна
А61 Математичне моделювання наслідків аварій на потенційно небезпечних об'єктах. Журфонд: Дніпро, 2021 р. - 135 с

ISBN 978-966-934-290-4

УДК 502.3:504.054