

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЗОН ДІЇ ПОЖЕЖІ ПРОЛИВУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ MARINFO GIS ДЛЯ РЯДУ АВТОЗАПРАВНИХ СТАНЦІЙ ЖИТЛОВОГО РАЙОНУ ОДЕСИ (УКРАЇНА)

Васютинська К. А., Смик С. Ю., Іванов А. В., Шевчук І. В.

1. Вступ

Негативні наслідки процесів урбанізації для навколишнього природного середовища різноманітні. В цілому, вони призводять до динамічних змін в системі «місто – навколишнє природне середовище». Урбанізація полягає не тільки в зростанні чисельності міського населення, яке сьогодні в Україні досягає 68,9 %. Зміни включають неконтрольоване розповзання території міст, утворення міських агломерацій на місці природних комплексів. Поряд із збільшенням щільності населення посилюється його нерівномірність в міському просторі. Урбанізаційні процеси обумовлюють відповідне концентрування об'єктів міського сервісу, інфраструктури, транспорту тощо в районах щільного проживання населення. Невід'ємним наслідком зосередження транспортних засобів в районах проживання населення є відповідне щільне розміщення таких потенційно небезпечних об'єктів, якими є автозаправні станції (АЗС) [1].

Застарілі нормативні акти, які регулюють правила проектування і будівництва об'єктів з підвищеними вимогами до протипожежної та противибухової безпеки, не враховують сучасні вимоги до безпекового розміщення автозаправних станцій в міському просторі. Як наслідок, цілий ряд АЗС, які, як правило, належать різним власникам, та представляють різні мережі, скупчені в обмеженому просторі, на близьких відстанях одна від однієї. У випадках, коли на АЗС відбувається аварійна ситуація, що відносяться до рівня «В» [2] і розвиток якої виходять за межі території автозаправного комплексу, ініціюють небезпечні події на автозаправках, місце розташування яких входить в зони впливу чинників аварії.

Отже, робота актуальна для оцінювання та прогнозування впливу наслідків аварійної ситуації на одиничній АЗС на ініціювання небезпечних подій в групах автозаправних станцій, які розташовані в зоні дії небезпечних факторів аварії.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є система автозаправних станцій традиційного типу в межах Маліновського району м. Одеса (Україна).

Аналіз потенційних небезпек, пов'язаних із особливостями технології зберігання і роздавання палива на АЗС та відповідних сценаріїв розвитку аварійних ситуацій проведений в роботі [3]. Події, які призводять до виникнення аварії на одиничній АЗС, пов'язані як із порушенням нормального технологічного режиму АЗС (людський фактор чи відмови обладнання), так й з можливими випадками разгерметизування обладнання та порушеннями правил вибухопожеженебезпеки. Перші відносяться до подій I типу, а останні – до подій II типу.

Підвищена пожежна небезпека притаманна як автоцистернам, так й автомобілям, які можуть одночасно запраплятися, що залежить від кількості працюючих запрапних паливом і маслом постів [4]. В ємнісному обладнанні АЗС збіюєрігаються значні об'єми бензину і дизельного пального, які створюють джерела виникнення пожежі у випадку їх витоку. При витоку палива у технологічному колодязі створюється небезпека утворення вибухонебезпечних концентрацій паливно-повітряної суміші (ППС), що при наявності джерела ініціювання може обумовити вибух цієї суміші у технологічних колодязях і створити умови для подальшого розвитку аварії у підземних сховищах. При збільшенні швидкості наливу нафтопродуктів у ємності може відбутися іскровий разряд, який викликає вибух суміші парів та пожежу. Таким чином, початковою подією аварії на АЗС є витік чи пролив пожежовибухонебезпечного продукту.

Одним з найбільш проблемних місць функціонування АЗС, як потенційне небезпечного об'єкту, є їх розташування всередині житлових кварталів, біля автомагістралей з великою інтенсивністю руху, поряд з іншими об'єктами інфраструктури. Значну небезпеку представляє собою розміщення декількох АЗС на обмеженій території, в безпосередній близькості один від одного.

В якості об'єкта моделювання були обрані 37 АЗС, які розташовані в Малиновському районі міста Одеса, та відносяться до мереж Укрнафта, WOG, ОККО, Лукойл, Shell, Мавекс, Amic, Катрал АЗС ТОВ. Основні види робіт на АЗС – прийом, зберігання та роздача (заправка) нафтопродуктів. Розрахунки проводилися для 4 видів палива (бензин А-80, А-92; А-95 дизельне паливо). Ємнісне обладнання АЗС стандартне [5], включає резервуар місткості 40 м³ (максимально можлива для міста із чисельністю мешканців більше 200 тис.) та цистерни місткістю 15 м³ та 40 м³. Кількість нафтопродуктів, яка може вилитись на вільну поверхню внаслідок аварійної ситуації з локальним руйнуванням резервуару і наступним спалахом витоку палива, приймалась згідно [6].

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – візуалізувати зони дії теплового випромінювання від пожежі проливу внаслідок аварії на АЗС, а також ідентифікувати небезпечні наслідки для об'єктів підвищеної небезпеки, що знаходяться в межах впливу.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

1. Провести аналіз імовірних сценаріїв розвитку аварійної ситуації на АЗС для випадків витоку нафтопродуктів та визначити найбільш небезпечні події.
2. Для варіанту пожежі проливу визначити радіуси дії фактору теплового випромінювання.
3. Оцінити можливості застосування геоінформаційної системи MapInfo GIS для візуалізації зон ураження наслідками аварійної ситуації на АЗС в міському просторі.
4. Візуалізувати зони ураження території Малиновського району тепловим випромінюванням в сценаріях пожежі проливу на міських автозаправних станціях із застосуванням MapInfo GIS.
5. Виявити небезпечні з позицій ризику каскадних аварій чи проявлення механізму доміно груп автозаправок, та запропонувати попереджувальні заходи.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Проблеми збільшення аварій на станціях заправки транспортних засобів паливом різного типу (бензин, дизельне паливо, газ, зріджений газ, водень тощо) на фоні неконтрольованого зростання щільності населення і розвитку міст досліджені майже для всіх частин світу.

Так, в роботі [7] оцінені ризики пожеж в щільно заселених районах міста Кендари, Індонезія. Розроблений метод візуалізації імовірностей пожеж в міських забудовах на основі геоінформаційних систем GIS Grid. Розроблена модель демонструє підвищення ризиків пожеж внаслідок впливу аварій на артеріальній автомагістралі та наявності горючих матеріалів в елементах будівель. Система GIS Grid дозволила виявити в міському просторі щільно заселені райони з високими ризиками пожеж. Розроблена модель також враховує рівні небезпек при наявності одночасних пожеж.

Мінімізація ризиків пожеж на автозаправних станціях, розташованих в густозаселених житлових районах особливо важлива для Китаю, в якому на кінець 2006 року налічувалось 93.879 бензинових заправних станцій [8]. Основна стратегія, яка обрана країною – впровадження газу та зрідженого газу замість бензину в якості палива. Так, за 5 років кількість міських газових заправних станцій зросла в 4,5 раз (з 130 до 712), а середньорічні темпи зростання станцій заправки зрідненим газом склала 34,3 %, а газом – 32,2 %. Але в роботі також відмічені ризики роботи технологічного обладнання з підвищеним тиском, що може спричинити вибух чи витік газу.

В Японії останніми роками поширюються транспортні засоби на паливних елементах, водню. Тож, водень-генераційні станції стали важливою інфраструктурою міст. Гібридні гідро-бензинові заправні станції по суті більш безпечні та компактні. В роботі [9] оцінені ризики гібридної станції методом HAZID (метод ідентифікації ризиків – HAZard IDentification), за яким досліджені 314 аварійних сценаріїв із застосуванням бензину та органічних хімічних гідридних систем. Найбільш критичні сценарії включали значний виток горючих речовин, автомобільне зіткнення та пожежу.

Дослідження іспанських авторів [10] присвячені методології аналізу ризику в технологічних процесах перевантаження та розливу нафтопродуктів. Запропонований метод HAZOP (Hazard and Operability analysis) для аналізу експлуатаційних характеристик та відповідних шкідливих факторів. Кількісне оцінювання ризику аварій на терміналах перевантаження та сховищ пального розроблений на основі «дерева відмов» (fault tree analysis – FTA). Аналіз FTA показав, що найбільш ймовірною подією є розлив пального, а людський фактор дуже важливий у всіх сценаріях можливих аварій. Значення людського фактору та кваліфікації персоналу також відмічається в роботі [11] на прикладі управління операційними ризиками бензинових автозаправних станцій в Кенії.

З метою досягнення пожежної безпеки заправних станцій Кореї, які працюють на зрідженому газі, досліджені сценарії факельної пожежі, пожежі розливу, а також вибуху за механізмом BLEVE (Boiling liquid expanding vapour explosion) [12]. Проведені для останнього сценарію розрахунки показали, якщо зініціюється аварійна ситуація з витоком 10 т бутану, то наслідками вибуху та

пожежі буде вогненна куля діаметром 129 м, висотою 97 метрів та тепловий потік інтенсивності теплового випромінювання 421 кВт/м^2 на відстані до 21 м.

Для кожного типу аварійної ситуації визначені рівні необхідного захисту на основі побудованої матриці ризику для визначення категорії ризику. Матриця складається з частоти та наслідків кожного із сценаріїв, для яких визначені незалежні рівні захисту методом LOPA-аналізу. Зазначимо, що аналіз рівнів надійності засобів захисту (LOPA – Layer of protection analysis) – це напівкількісний метод оцінки ризиків небажаних подій чи сценаріїв. Метод отримав поширення останнім часом для аналізу достатності захисних заходів з мінімізації ризиків.

За останні роки виник інтерес до проявів ефектів «доміно», який значно підсилює масштаби аварії, вагу наслідків, особливо на транспорті. В роботах [13, 14] ефекти «доміно» виявлені для 330 випадків крупних аварій на прикладі Іспанії. Показане, що пожежа і вибух мають рівний вклад в ініціювання першої події «доміно». Хоча радіуси дії факторів пожежі менше, ніж вибухів, пожежі виникають з більшою частотою. Але ситуація змінюється для механізму BLEVE. Зафіксовано, що перша подія, яка зустрічається приблизно в 70 % випадків аварій BLEVE є вибухом, це справедливо для всіх ступенів ефекту доміно в різних послідовностях. Пропорція вибуху до пожежі становить 1,7 до 1. Аналіз статистичних даних, проведених авторами [13], виявив переважну більшість аварій у випадках використання зрідженого газу та рідких вуглеводнів. В роботі [15] обґрунтована необхідність застосування спеціальних заходів на реагування пожеж, які розвиваються за механізмом «доміно». Моделювання такої ситуації on-line на основі Petri-net важливе для розроблення ефективної стратегії подолання надзвичайної ситуації.

Таким чином, проблеми виникнення і розвитку аварійної ситуації на об'єктах транспортування, зберігання та роздачі пального різноманітного типу (чи інших легкозаймистих і горючих речовин) вивчаються науковцями різних країн. В Україні такі дослідження обмежуються якісними оцінками наслідків аварій на АЗС та розробленням окремих засобів із забезпечення їх пожежовибухонебезпеки. Так, автор роботи [16] відмічає небезпеку для населення і навколишніх об'єктів наслідків аварійної пожежі на АЗС із врахуванням вірогідності вибуху, а також пропонує ефективні методи припинення факельного горіння. В роботі [17] встановлена залежність між площею пожежі та кількістю викидів токсичних продуктів згорання з використанням їх питомих значень. Для зменшення викидів обґрунтована ефективність способу гасіння під шар піни та запропонована система підшарового пожежогасіння. Проблеми розташування автозаправних станцій, як потенційне небезпечних об'єктів, в міських районах з високою концентрацією населення, не вивчені, тож є дуже важливими для дослідження.

5. Методи дослідження

Задіяні методи візуалізації та геоінформаційного моделювання, метод статистичного оброблення даних, методи аналізу, синтезу і узагальнення, методи ризик-аналізу.

Метод «дерева подій» застосований для визначення ймовірностей розвитку сценаріїв аварії в залежності від різних факторів (наявність і надійність систем блокування аварії, людський фактор – дії персоналу, метеоумови на момент аварії та ін.).

Технологічний аудит одиночної АЗС як об'єкта моделювання аварійної ситуації представлений в роботі [3]. Відомі 2 типових сценаріїв розвитку аварії на АЗС. Вірогідність першого сценарію повного зруйнування ємності з повним вивільненням пожежевибухонебезпечної речовини внаслідок природної, техногенної чи соціальної катастрофи, складає величину порядку 10^{-8} . Тому в роботі розглядався другий сценарій локального зруйнування обладнання із витоком легкозаймистих (ЛЗР) та горючих речовин.

6. Результати дослідження

6.1. Аналіз наслідків аварійної ситуації на АЗС за сценарієм витоку нафтопродуктів

Проаналізований сценарій, коли початковою подією аварії на АЗС є витік пожежевибухонебезпечного продукту. На основі статистичних даних [18], визначено, що розвиток аварії може привести до однієї з наступних подій:

- Подія A_1 – миттєве займання спливаючого продукту з подальшим факельним горінням;
- Подія A_2 – стався розлив палива на поверхню, загоряння не відбулося (спрацювала системи блокування);
- Подія A_3 – системи блокування не спрацювали, сталося загоряння проливу;
- Подія A_4 – паливо, яке випарувалось, утворило парову хмару, відбулося її загоряння без утворення надлишкового тиску;
- Подія A_5 – сталася пожежа хмари з утворенням надлишкового тиску;
- Подія A_6 – утворилася «вогняна куля».

Імовірності кожної проміжної події (табл. 1), визначені за умови, що імовірність ініціюючої події (локальне руйнування обладнання АЗС) дорівнює 1.

Серед означених сценаріїв, які представлені в табл. 1, найбільш вірогідними для реалізації є факел, згорання хмари, і горіння проливу.

Таблиця 1

Статистичні ймовірності різних сценаріїв розвитку аварій з викидом горючої речовини*

Сценарій аварії	Імовірність
«Вогняна куля» (A_6)	0,108
Пожежа – спалах:	0,367
Горіння проливу (A_3)	0,1862
Згорання хмари (A_4)	0,1689
Згорання хмари з розвитком надлишкового тиску (A_5)	0,0119
Факел (A_1)	0,322
Струмінь рідини (A_2)	0,129
Пролив рідини	0,074

Примітка: * – складено на основі даних [6].

На рис. 1, відповідно даним табл. 1, представлено «дерево подій» аварійної ситуації на АЗС із витоком легкозаймистих (ЛЗР) та горючих (ГР) складових палива.



Рис. 1. Схема «Дерева подій» локального руйнування ємності з нафтопродуктами на автозаправній станції

Саме горіння проливу містить додаткові фактори небезпек, та може супроводжуватись вторинними подіями спалаху та горіння. Ініціація небажаних подій може відбуватися як в межах самої АЗС, так й у зонах впливу. Так, у межі пожежу можуть потрапити резервуари, які знаходяться на деякій відстані та навіть належать іншій близько розташованій АЗС. Ці резервуари з вірогідністю 70 % вибухнуть у результаті ефекту «BLEVE» (Boiling liquid expanding vapour explosion). Вибух даного типу відбувається за умови витoku перегрітої рідини (нагрітої вище температури кипіння при атмосферному тиску) за наступною схемою:

1) охоплення полум'ям резервуару, підвищення тиску всередині та нагрів металу з втратою його міцності;

2) розрив оболонки резервуару, викид речовини та скипання викинутої речовини;

3) вибух парів рідини, яка скипіла, із запалюванням та утворенням «вогняної кулі».

Як було відмічене в роботі [12], сценарій «BLEVE» може проходити тільки в автоцистернах, оскільки підземні резервуари не можуть нагріватися достатньо для його ініціювання. Але цілком можлива ситуація, коли пожежа розповсюджується на близько розташовану АЗС, коли там відбувається вивантаження пального з вантажівки-цистерни до підземного резервуару або подача до транспортних засобів. Така ситуація є небажаною (небезпечною) подією, та може бути першою в послідовності «доміно» із залученням іншої АЗС.

Пожежа проливу може також відбуватися поряд із дифузійним горінням парів ЛЗР та горючих речовин у повітрі над поверхнею рідини. Дифузійне горіння – горіння за умов, коли горюча речовина і окисник розділені зоною горіння [19].

Таким чином, сценарій витoku паливних речовин із наслідками пожежі проливу відбувається за розгалуженою схемою та з ініціацією несприятливих ситуацій на близько розташованих потенційно небезпечних об'єктах, якими є АЗС.

6.2 Визначення зон дії теплового випромінювання під час пожежі проливу

Основними вражаючими факторами пожежі проливу є теплове випромінювання та гарячі продукти горіння, відкрите полум'я та палаючі нафтопродукти,

токсичні продукти горіння. Основною величиною, яку розраховують при пожежах проливу є інтенсивність теплового випромінювання q , кВт/м². У табл. 2 наведені типові значення гранично допустимої інтенсивності теплового випромінювання для різних ступенів ураження людини і матеріалів.

Таблиця 2

Типові гранично допустимі значення інтенсивності теплового випромінювання для різних ступенів ураження*

Ступінь ураження	Типові гранично допустимі значення інтенсивності теплового випромінювання, кВт/м ²
Без негативних наслідків впродовж тривалого часу	1,4
Безпечно для людини у брезентовому одязі	4,2
Нестерпний біль через 20–30 с Опік 1-ого ступеню через 15–20 с Опік 2-ого ступеню через 30–40 с Займання бавовни-волокна через 15 хв	7,0
Нестерпний біль через 3–5 с Опік 1-ого ступеню через 6–8 с Опік 2-ого ступеню через 12–16 с	10,5
Займання деревини із шорсткою поверхнею (вологість 12 %) при тривалості опромінення 15 хв	12,9
Займання деревини, пофарбованої масляною фарбою по струганій поверхні, займання фанери	17,0

Примітка: * – складено на основі даних [20].

Результати розрахунків інтенсивності теплового випромінювання пожежі розливу проведений для 4 видів палива (бензину А-80, А-95, А-95, дизельного пального) відповідно для резервуару (40 м³) та цистерни (15 м³) за нормативним методом [6], приведені в табл. 3.

Розрахунками визначені ефективний діаметр проливу і висоту полум'я. Розраховано кутівий коефіцієнт опромінення, коефіцієнт пропускання теплового випромінювання крізь атмосферу. А також радіуси зон, у яких інтенсивність теплового випромінювання складе відповідно 17; 10,5; 7 і 1,4 кВт/м².

У зоні, в якій інтенсивність складає 17 кВт/м², відповідно до [20] можливе загорання деревини і фанери. Незалежно від типу бензину, радіус зони складає 215,6 м для резервуару та 144 м для цистерни. Для дизельного пального, як показали розрахунки, інтенсивність теплового випромінювання 17 кВт/м² не досягається.

Радіуси зони, яка є небезпечною для людини через високу ймовірність отримання опіків 1-го та 2-го ступенів (інтенсивність теплового випромінювання складе 10,5 кВт/м²) досягають:

- понад 300 м для всіх видів палива для резервуару;
- понад 200 м для цистерни.

Таблиця 3

Результати розрахунків зон ураження тепловим випромінюванням від пожежі проливу під час руйнування резервуарів (40 м^3) та цистерн (15 м^3), що містять нафтопродукти

Розрахований параметр	Бензин А-80		Бензин А-92		Бензин А-95		Дизельне паливо	
	Резервуар	Цистерна	Резервуар	Цистерна	Резервуар	Цистерна	Резервуар	Цистерна
Пожежа проливу								
Питома масова швидкість вигорання палива M_v , $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,04	0,04
Ефективний діаметр проливу d , м	87,40	53,52	87,40	53,52	87,40	53,52	87,4	53,52
Висота полум'я H , м	75,55	53,73	75,55	53,73	75,55	42,47	58,9	41,95
Кутовий коефіцієнт опромінення F_q	0,005	0,004	0,004	0,0,04	0,005	0,018	0,005	0,004
Середньо поверхнева густина теплового потоку випромінювання полум'я E_f , кВт/м^2	25	25	25	25	25	25	18	18
Коефіцієнт пропускання теплового випромінювання крізь атмосферу ψ	0,7394	0,6565	0,7384	0,655	0,873	0,651	0,75	0,678
Радіуси зон r , м, при яких інтенсивність теплового випромінювання q складе:								
17 кВт/м^2	215,6	144	215,6	144,5	215,6	143	–	–
10,5 кВт/м^2	272	187	278,3	188	272	184	–	–
7 кВт/м^2	327	221	328,6	222	328	220	294	200
1,4 кВт/м^2	645	458	647	460	655	457	598	420

Радіуси безпечної для людини зон (інтенсивність теплового випромінювання складе менше $1,4 \text{ кВт/м}^2$) дорівнюють:

- 645 м – для бензину А-80;
- 647 м – для бензину А-92;
- 655 м – для бензину А-95;
- 200 м – для дизельного палива.

Найбільш безпечним з усіх видів палива, яке, в основному, використовується на українських заправках, є дизельне паливо, менш безпечними є бензини. Безпечність бензинів підвищується із збільшенням якості пального, зокрема, із зростанням октанового числа.

6.3. Застосування геоінформаційної системи для візуалізації зон дії фактору пожежі проливу

Переваги застосування геоінформаційних систем для візуалізації зони такого небезпечного наслідку аварійної ситуації на АЗС, як ударної хвилі, показані в роботі [3]. Там же показана схема архітектури комплексної геоінформаційної системи з оцінювання наслідків аварії в конкретних умовах розташування АЗС.

В якості ГІС для моделювання зон дії фактору пожежі проливу в чинному дослідженні було використано геоінформаційну систему MapInfo, яка достатньо роз-

повсюджена, відносно дешева, проста в освоєнні. З допомогою MapInfo Professional можна в повному обсязі використовувати всі можливості геоінформаційного картографування, а саме, відображати дані на карті у вигляді крапок, забарвлених діапазонів, діаграм, районів та ін. Так само можна виконати операції з географічними об'єктами типу районування, об'єднання об'єктів та буферизації [21].

MapInfo поєднує переваги методу обробки інформації на основі баз даних (включаючи потужний SQL запитів), та наочність карт, схем та графіків. В MapInfo поєднані ефективні засоби аналізу та представлення даних. Можливості програмного продукту MapInfo наступні:

1. Прямий доступ до файлів, створеним в dBASE або FoxBASE, ASCII, шейпфайл, Lotus 1-2-3, Microsoft Excel і Microsoft Access; імпорт графічних файлів різних форматів; можливість створювати файли баз даних з MapInfo.

2. Перегляд даних в будь-якій кількості вікон трьох видів: вікнах Карт, Списків і Графіків. Технологія синхронного представлення даних дозволяє відкривати одночасно кілька вікон, що містять одні й ті ж дані, причому зміна даних в одному з вікон супроводжується автоматичною зміною уявлення цих даних у всіх інших вікнах.

3. «Живий» доступ до віддалених баз даних, Oracle або SQL Server; а тип багат шарових зшитих карт дозволяє обробляти кілька карт одночасно. Тематичні карти дозволяють аналізувати дані з високою наочністю, включаючи 3D-карти, тематичні карти растрових поверхонь і карти-призми; можливість підкладати під векторні карти растрові зображення.

MapInfo дає можливість для запитів різної складності: від простих вибірок з окремих файлів до складних SQL-запитів по декількох файлах; зберігає вікна і дозволяє запускати файли або URL прямо з них. В ГІС існує універсальний набір засобів малювання і редагування, а також набори готових карт і функції для створення своїх карт.

Саме метод MapInfo застосоване для візуалізації зон випромінювання у випадках пожежі проливу на існуючих 33 АЗС Малиновського району Одеси (Україна).

6.4. Візуалізація зон ураження тепловим випромінюванням в сценаріях пожежі проливу на міських автозаправних станціях в межах території Малиновського району

На карту Малиновського району м. Одеси (Україна) нанесені місця розташування, які були кодовані в MapInfo із порівнянням координат заправок з описом вулиць на карті StreetInfo. На рис. 2 представлені координати 20 АЗС, оскільки 12 АЗС знаходяться на периферії Малиновського району м. Одеси, далеко від районів щільної забудови та об'єктів інфраструктури. StreetInfo – це спеціальний тип даних MapInfo, який використовується для зберігання адресів.

Для кожної з АЗС проведені розрахунки радіусів чотирьох зон, для яких інтенсивність теплового випромінювання q складала, відповідно, 17, 10,5, 7 і 1,4 кВт/м² (табл. 3). Результати розрахунків для кожної з розташованих на території Малиновського району АЗС аналогічні внаслідок стандартного ємного обладнання та нормативних лімітів обсягів зберігання палива на автозаправках для міст з чисельністю більше 200.000 мешканців. Наземні резервуари в цьому випадку заборонені [5].

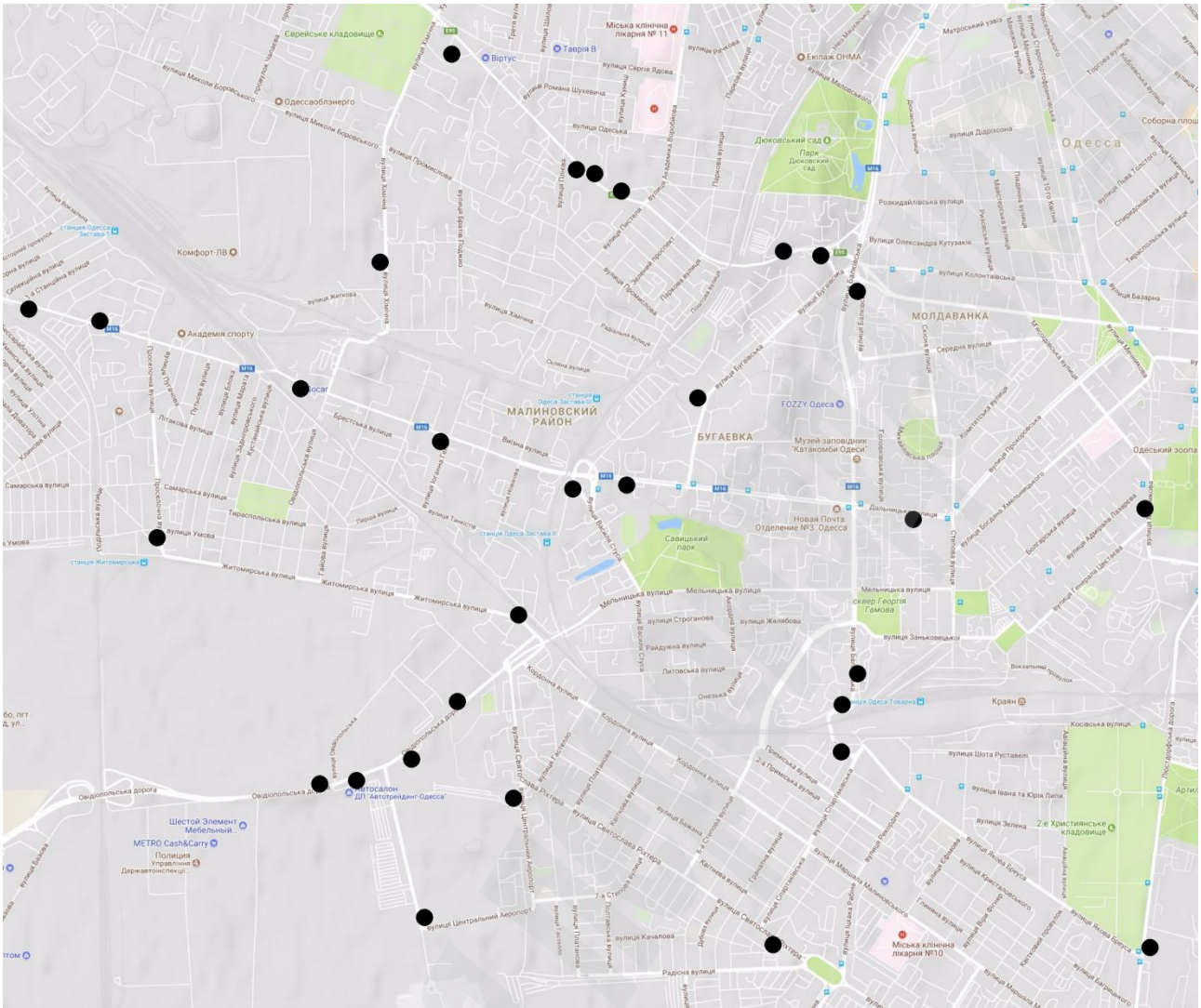


Рис. 2. Розташування автозаправних станцій на мапі Малиновського району м. Одеса, Україна (масштаб 1:36780)

Розраховані радіуси ураження тепловим випромінюванням візуалізовано із використанням MapInfo на мапі Малиновського району виходячи з геопозиції кожної АЗС, представлена на рис. 2.

Результати візуалізації зон дії факторів пожежі проливу для різних інтенсивностей теплового випромінювання представлені на рис. 3. При цьому напрями проливу рідини вважались рівноймовірними. Карта демонструє, що автозаправки покривають територію району досить щільною мережею та створюють ризики ураження наслідками аварійної пожежі на більшій її частині.

Межі зон дії фактору пожежі проливу, встановлені для всіх АЗС, наочно демонструють, які об'єкти потрапляють у зону високого, середнього та мінімального ураження тепловим випромінюванням. На рис. 3 видно, що у випадку аварії з пожежею проливу під інтенсивності теплового випромінювання від 17 до $10,5 \text{ кВт/м}^2$ (небезпека спалаху матеріалів і значних опіків людини [20]) потрапляють різноманітні для кожної конкретної автозаправки «об'єкти турботи». В зони різних АЗС входять багатоповерхневі будинки, гаражні кооперативи, школи, лікарня, поштові відділення, місця відпочинку, місця скупчення людей (універсами, торговельний центр «Метро». «Шостий елемент») та багато інших соціально важливих об'єктів та об'єктів житлово-комунального господарства міста.



Рис. 3. Зони ураження тепловим випромінюванням від пожежі проливу на АЗС, розташованих в межах території Малиновського району: жовтий колір – радіус зон дії для проливу бензину А-95; чорний колір – радіус зон дії для проливу бензину А-92; синій колір – радіус зон дії для проливу дизельного палива (масштаб 1:36780)

Детальне визначення реципієнтів, які відносяться до «об’єктів турботи», та їх класифікація представлені в роботі [3], а відстані від них до меж території АЗС приведені в табл. 4.

Таблиця 4

Противопожежні відстані від об’єктів міста до споруд АЗС*

Найменування об’єкта, до якого визначають відстань від споруд АЗС	Мінімальна відстань від споруд АЗС, м				
	Типів А і Б з підземними резервуарами			Типу В з наземними резервуарами	
	малі	середні	великі	малі	середні
1	2	3	4	5	6
1. Житлові та громадські будинки	25	40	50	50	80
2. Місця масового скупчення людей (до зупинки громадського транспорту, межі території ринку)	30	50	50	50	80
3. Окремі торгові палатки, кіоски	20	20	25	25	25
4. Гаражі та автостоянки	18	18	18	20	30
5. Очисні каналізаційні, що не відносяться до АЗС	15	15	15	25	30
6. Виробничі (за винятком указаних у пункті 8), адміністративні і побутові будинки, складські будівлі і споруди промислових підприємств I, II та III-го ступенів вогнестійкості	12	12	15	15	20
7. Те саме IIIа, IIIб, IV, IVа, 4-го ступенів вогнестійкості	18	18	20	20	25
8. Виробничі будинки з наявністю радіоактивних або шкідливих речовин	100	100	100	100	100
9. Склади лісових матеріалів, торфу, волокнистих горючих речовин	20	20	20	25	25

Продовження таблиці 4

1	2	3	4	5	6
10. Масиви лісу, парків, міських скверів:					
– хвойних і змішаних порід	25	25	25	30	40
– листяних порід	10	10	10	15	15

Примітка: * – складено на основі даних [20].

В місті з населенням більш 200.000 мешканців за нормативом [5] дозволені АЗС типу А і Б з середніми підземними резервуарами.

Отже, використання MapInfo GIS дозволило встановити, що розміри зон дії факторів аварії з пожежею проливу майже для всіх АЗС Малиновського району перевищують протипожежні відстані від об'єктів міста до споруд АЗС. Це створює перший рівень небезпеки для населення та важливих об'єктів міської інфраструктури. Другий рівень асоціюється з розвитком каскаду аварій на близько розташованих заправках та синергетичним ускладненням їх наслідків.

6.5. Ідентифікація небезпек каскадного механізму розвитку аварійної ситуації

Одним з найбільш важливих аспектів оцінки потенційної небезпеки реалізації аварійних сценаріїв на АЗС за розгалуженим сценарієм, є ідентифікація умов каскадного розвитку аварії внаслідок впливу теплового випромінювання пожежі проливу.

Доміно ефекти, що призводять до каскадних подій, є відомими причинами важких сценаріїв аварій. За таким несприятливим розвитком аварії пожежа на окремій АЗС викликає наслідки, які ініціюють небезпечну подію на іншій близько розташованій заправці. Взагалі, «Ефект доміно» характеризується зміщенням спектра можливих сценаріїв аварій в сторону найбільш несприятливих факторів і явищ. Так, теплове випромінювання може призвести до перегріву наземного обладнання АЗС чи цистерни під час вивантаження палива, викликати іскру, спалах транспорту, який заправляється, та інші небезпечні події.

Такі фактори небезпеки виявлені внаслідок візуалізації зон ураження для ряду близько розташованих АЗС. Як видно на рис. 3, існує декілька груп АЗС, для яких на мапі геопозиції зон ураження об'єднані. На практиці це означає, що фактор дії теплового випромінювання на небезпечному рівні інтенсивності від 17 до 10,5 кВт/м² охоплює територію розташування пожежевибухонебезпечного обладнання іншої АЗС, та ініціює небезпечну подію, яка стає першою в подальшій серії пожеж, вибухів, витоків токсичних речовин тощо.

На рис. 4 представлений укрупнений елемент зони ураження тепловим випромінюванням для групи чотирьох АЗС уздовж Овідіопольської дороги. Траса відноситься до об'єктів критичної інфраструктури міста, характеризується високою інтенсивністю руху автотранспорту, серед якого значна частка вантажівок. На рис. 4 видно, що для кожної з 4 АЗС, в зоні найбільшого рівня випромінювання, до 17 кВт/м², залучена поверхня іншої, близько розташованої автозаправки. Це створює ризики розвитку каскаду аварійних ситуацій та катастрофічних наслідків для населення і міської інфраструктури.



Рис. 4. Зони дії теплового випромінювання для групи чотирьох близько розташованих автозаправних станцій в районі Овідіопольської дороги (масштаб 1:36780)

Особливо небезпечним для ескалації аварії є подія перегрівання цистерни із паливом під час його вивантаження в підземний резервуар внаслідок зовнішнього теплового випромінювання. У цьому випадку цілком ймовірна ініціація механізму BLEVE. Під час вивантаження з вантажівки-цистерни до підземного резервуару або подачі до транспортних засобів, рідке паливо та облако парів можуть виділятися з пошкодженого або нещільно під'єданого трубопроводу, та утворювати басейн витоку. В присутності зовнішнього джерела займання може розвинути пожежа проливу, пожежа струменю, вибух чи інші події, представлені в табл. 1 за схемою рис. 1. Тож, відбувається ескалація аварії, яка, в свою чергу, може ініціювати інші небезпечні події на наступній АЗС.

Також відмітимо, що серед перелічених АЗС офіційно не зафіксоване наявність гібридних станцій із використанням газу чи зрідженого газу для заправки автотранспорту. Як вже було показано в роботах [9, 12, 14] механізм BLEVE переважно розвивається для цих видів пального, та з 70 % імовірністю зніціює вибух. З розвитком в Україні ринку автомобілів на газі, забезпеченням такими транспортними засобами української поліції, розширюється коло газових автозаправних станцій в місті. Такі заправки, часто знаходяться на території СТО, автомийок, профільних магазинів. Відсутність офіційної інформації щодо наявності гібридних газове-бензинових заправок та геопозицій газових заправок на мапі міста, тільки збільшує ризики задіяння механізму BLEVE в ланцюгах аварійних подій.

Безпосереднє розташування автозаправок уздовж траси може призвести до включення транспортних засобів в аварійний сценарій. Так, каскадна аварія може включати події із зіткненням автомобілів, їх вибухом і пожежею, а також вибух та пожежу крупногабаритних транспортних засобів, особливо у випадках перевезень легкозаймистих та горючих речовин.

Таким чином, взаємне розташування ряду АЗС створює на території житлового району осередки підвищеної небезпеки для населення, майна, об'єктів інфраструктури. Для управління ризиками каскадних аварій необхідно на основі «дерева подій» визначати послідовності з найбільш важкими наслідками аварійних ситуацій для безпеки населення та навколишнього міського середовища. Доцільне створення узгодженого порядку часового розподілу заводу нафтопродуктів вантажівками-цистернами, та їх вивантаження в підземні резервуарі АЗС «групи ризику».

В якості додаткових технічних засобів захисту від теплового випромінювання можна запропонувати спеціальні огорожі і захисні полоси з високою теплопоглинальною здатністю, які б розділяли близько розташовані АЗС. Такі елементи доповнюють систему протипожежних та противибухових захисних заходів тим, що створюють умови інертності та гасіння теплоти випромінювання.

З точки зору управління надзвичайними ситуаціями аварійна ситуація на одній з «групових» автозаправок повинна розглядатися як дуже небезпечна; персонал та населення мають бути негайно евакуйовані за межі визначених небезпечних зон.

В цілому, необхідне розроблення комплексної стратегії управління ризиками каскадних аварій в системі організації екологічної безпеки міста.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Проведена візуалізація зон дії фактору пожежі проливу для ряду АЗС в конкретних умовах міського простору матиме наступні корисні властивості. Отримана карта житлового району міста з зонами ризику ураження населення та об'єктів навколишнього міського середовища наслідками аварійної ситуації на таких потенційно небезпечних об'єктах, якими є автозаправні станції. Результати візуалізації зон дії фактору пожежі проливу для кожної конкретної АЗС наочно демонструють геопозицію об'єктів, які потрапляють у зону високого, середнього та мінімального ураження тепловим випромінюванням. Позитивним фактором застосування геоінформаційної системи StreetInfo є додаткові можливості візуалізації взаємного розташування АЗС як джерел негативних впливів і потенційних аварій, та відповідних реципієнтів в конкретних умовах міської забудови. Це дозволяє для кожної аварійної ситуації деталізувати заходи з мінімізації ризиків для «об'єктів турботи». Результати візуалізації представлені одночасно для 20 зафіксованих АЗС житлового району, що дозволяє виділити групи автозаправок, для яких можливий каскадний механізм розвитку аварійної ситуації. Візуалізовані та представлені на мапі міста зони дії фактору пожежі проливу для близько розташованих АЗС дозволяє ідентифікувати умови виникнення ініціюючих подій як для самих заправок «групи ризику», так й для критичних об'єктів інфраструктури.

Weaknesses. Для виявлених груп АЗС, де існують умови каскадного механізму аварій, виникає необхідність розширення досліджень в напрямках:

- проведення альтернативних розрахунків зон дії факторів ураження при екскалації аварії;
- розроблення «дерева подій» розгалуженого типу;
- моделювання ситуації із врахуванням фактору часу, за який тепловий потік небезпечної інтенсивності досягне пожежевибухонебезпечного обладнання іншої АЗС.

Складність полягає в тому, що для виявлення найбільш небажаного ланцюжка в каскаді подій необхідні як об'єктивні оцінки стану технологічного

обладнання, систем захисту, протипожежних засобів, так й суб'єктивні оцінки людського фактору (професіоналізм персоналу, стресостійкість, та інші). Вплив багатьох різнорідних факторів на характер сценарію розвитку аварійної ситуації ускладнює аналіз причинно-наслідкових зв'язків та моделювання.

Opportunities. Означені слабкі сторони є мотивом для розгорнутих досліджень механізму каскадних реакцій та виявлення послідовностей з найбільш важкими наслідками.

Перспективним є розповсюдження даних дослідження на всі райони досліджуваного міста. Зонування міського простору за зонами ризику ураження наслідками аварійних ситуацій на таких численних небезпечних об'єктах, якими є мережі АЗС, є важливою складовою комплексного управління екологічною безпекою населення. Представлені на платформі ГІС небезпечні зони мають бути покладені в основу прийняття рішень щодо планування землекористування та розширення міської агломерації.

Threats. Використання методів ризик-аналізу та побудова «дерева подій» у випадках каскадних реакцій розгорнення аварійних ситуацій вимагає аналізу значної кількості статистичних даних. Але автозаправні станції проводять комерційну діяльність, є об'єктами приватної власності, та належать компаніям різних країн та форм власності. Тож, відкритий доступ навіть до технічної інформації ускладнений.

8. Висновки

1. Проаналізовано сценарій, коли початковою подією аварії на АЗС є витік пожежовибухонебезпечного продукту. Методом «дерева подій» встановлене, що найбільш вірогідними для реалізації є факел, згорання хмари, і горіння проливу. Горіння проливу містить додаткові фактори небезпек, та може супроводжуватись вторинними подіями спалаху, горіння та вибуху. Ініціація небажаних подій може відбуватися як в межах самої АЗС, так й у зонах впливу, із розгортанням сценарію «BLEVE» чи дифузійним горінням.

2. Для основних негативних факторів пожежі проливу (теплове випромінювання та гарячих продукти горіння, відкрите полум'я та палаючі нафтопродукти, токсичні продукти горіння) визначені радіуси зон дії. Розрахунки інтенсивності теплового випромінювання пожежі розливу для 4 видів палива (бензину А-80, А-95, А-95, дизельного пального) відповідно для резервуару (40 м³) та цистерни (15 м³) показали наступне. У зоні, в якій інтенсивність складає 17 кВт/м², незалежно від типу бензину, радіус зони складає 215,6 м для резервуару та 144 м для цистерни. Радіуси зони, з інтенсивністю теплового випромінювання 10,5 кВт/м² досягають понад 300 м для всіх видів палива для резервуару, та понад 200 м для цистерни. Небезпечні для людини є відстані на рівні 650 м.

Найбільш безпечним з усіх видів палива є дизельне паливо, а безпечність бензинів підвищується із зростанням октанового числа.

3. В якості ГІС для моделювання зон дії фактору пожежі проливу запропонована геоінформаційна система MapInfo, яка дає змогу в повному обсязі використовувати всі можливості геоінформаційного картографування. Із використанням MapInfo GIS візуалізовані зони дії факторів пожежі проливу для різних інтенсивностей теплового випромінювання.

4. Показано, що автозаправки створюють ризики ураження наслідками аварійної пожежі на більшій частині території району. Визначені об'єкти, які потрапляють у зону високого, середнього та мінімального ураження тепловим випромінюванням. До них відносяться багатоповерхневі будинки, гаражні кооперативи, школи, лікарня, поштові відділення, місця відпочинку, місця скупчення людей (універ-

сами, торгівельні центри «Метро», «Шостий елемент») та багато інших соціально важливих об'єктів та об'єктів житлово-комунального господарства міста.

Використання MapInfo GIS дозволило встановити, що розміри зон дії факторів аварії з пожежею проливу майже для всіх АЗС Малиновського району перевищують протипожежні відстані від них до об'єктів міста.

5. Ідентифіковані небезпеки каскадного розвитку аварії внаслідок впливу теплового випромінювання пожежі проливу. Якісно оцінені фактори, що сприяють «ефекту доміно», серед яких найбільш імовірний перегрів наземного обладнання АЗС чи цистерни під час вивантаження палива, та вибух транспорту, який заправляється.

Ідентифіковані події, які ініціюють механізм BLEVE. В присутності зовнішнього джерела займання може розвинути пожежа проливу, пожежа струменю, вибух чи інші події, які призводять до ескалації аварії, яка, в свою чергу, може ініціювати інші небезпечні події на наступній АЗС.

Виявлені фактори небезпеки внаслідок візуалізації зон ураження для ряду близько розташованих АЗС із використанням MapInfo GIS. Безпосереднє розташування автозаправок уздовж траси може призвести до включення транспортних засобів в аварійний сценарій.

Таким чином, взаємне розташування ряду АЗС створює на території житлового району осередки підвищеної небезпеки для населення, майна, об'єктів інфраструктури. Запропоновані заходи з мінімізації ризиків каскадних аварій, серед яких часовий розподіл завозу нафтопродуктів вантажівками-цистернами, спеціальні огорожі і захисні полоси з високою теплопоглинальною здатністю, евакуація персоналу та мешканців за межі визначених небезпечних зон.

Література

1. Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia ryzykiv ta yikh pryiniatnykh rivniv dlia deklaruvannia bezpeky ob'ektiv pidvyshchenoi nebezpeky: Order of the Ministry of Labor and Social Policy of Ukraine No. 637 from December 4, 2002 // Informatsionnyi portal Ukrainy. URL: <http://ua-info.biz/legal/basene/ua-cmelgt/index.htm> (Last accessed: 11.01.2018).

2. Mykhailiuk O. P., Kravtsiv S. Ya. Problemy zabezpechennia pozhezhovybukhobezpeky avtozapravnykh stantsii // Problemy pozharnoi bezopasnosti. 2012. Vol. 32. P. 149–154.

3. Vasiutynska K., Arsirii O., Ivanov O. Development of the method for assessing the action zones of hazards in an emergency at a city filling station using geoinformation technology // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 6, No. 3 (38). P. 29–38. doi:[10.15587/2312-8372.2017.119505](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.119505)

4. Jelnovach A. N., Prokopenko N. V. Analiz ekologicheskikh vozdeistvii i riskov pri ekspluatatsii avtozapravochnykh stantsii // Vestnik HNADU. 2014. Vol. 67. P. 78–88.

5. Instruksiiia shchodo vymoh pozhezhnoi bezpeky pid chas proektuvannia avtozapravnykh stantsii: Order of the Ministry of Ukraine for Emergencies and for Protection of Population from the Consequences of the Chernobyl Catastrophe No. 376 from December 6, 2005. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/z0291-06> (Last accessed: 10.01.2018).

6. Grazhdanskaya zashhita oblasti. Vol. 2: handbook / Mazorenko D. Yu. et al. Kharkiv: ID «Drukarnya No. 13», 2007. 540 p.

7. Expert System Development for Urban Fire Hazard Assessment. Study Case: Kendari City, Indonesia / Taridala S. et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 79. P. 12–35. doi:[10.1088/1755-1315/79/1/012035](https://doi.org/10.1088/1755-1315/79/1/012035)

8. Zhang H. The Research about Fire Prevention of Vehicle Refuelling Stations // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 71. P. 385–389. doi:[10.1016/j.proeng.2014.04.055](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.055)
9. Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on a hybrid gasoline-hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system using organic chemical hydride / Nakayama J. et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, No. 18. P. 7518–7525. doi:[10.1016/j.ijhydene.2016.03.143](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.143)
10. Risk Analysis of a Fuel Storage Terminal Using HAZOP and FTA / Fuentes-Bargues J. et al. // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017. Vol. 14, No. 7. P. 705. doi:[10.3390/ijerph14070705](https://doi.org/10.3390/ijerph14070705)
11. Magambo J. O. Operational Risk Management in Petroleum Filling Station in Kenya: A Survey of Nairobi Based Petroleum Filling Stations. Fall. 2016. URL: <http://erepo.usiu.ac.ke/handle/11732/3098>
12. Park K. Simplified risk assessment on fire hazard of LPG filling station // *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2017. Vol. 34, No. 3. P. 642–650. doi:[10.1007/s11814-016-0325-x](https://doi.org/10.1007/s11814-016-0325-x)
13. The significance of domino effect in chemical accidents / Hemmatian B. et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. Vol. 29. P. 30–38. doi:[10.1016/j.jlp.2014.01.003](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.01.003)
14. Hemmatian B., Planas E., Casal J. Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE // *Reliability Engineering & System Safety*. 2015. Vol. 139. P. 141–148. doi:[10.1016/j.res.2015.03.021](https://doi.org/10.1016/j.res.2015.03.021)
15. Zhou J., Reniers G. Petri-net based simulation analysis for emergency response to multiple simultaneous large-scale fires // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. Vol. 40. P. 554–562. doi:[10.1016/j.jlp.2016.01.026](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.01.026)
16. Derevianko I. H. Osoblyvosti pozhezhnoi nebezpeky ta hasinnia pozhezh na avtozapravnykh stantsii: proceedings // *Problemy tsyvilnoho zakhystu: upravlinnia, poperedzhennia, avariino-riatuvalni ta spetsialni roboty*. Kharkiv: Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy, 2014. P. 101–103.
17. Voytovich D. P., Hulida E. M. Emission of toxic combustion products caused by fire at storages of crude oil and petroleum products // *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2015. Vol. 5. P. 91–97.
18. Radchenko Yu. S. Otsenka posledstviy avariy na avtozapravochnykh stantsiyakh // *Trudy BGTU. Seriya 4: Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshhestv i biotekhnologiya*. 2008. Vol. 4. P. 125–129.
19. DSTU 2272:2006 Pozhezhna bezpeka. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat. Introduced: July 1, 2007. Kyiv: Ukrainy, 2007. 31 p.
20. NAPB B.03.002-2007. Normy vyznachennia katehorii prymishchen, budynkiv ta zovnishnikh ustanovok za vybukhopozhezhnoiu ta pozhezhnoiu nebezpekoiu. Vpershe (zi skasuvanniam NAPB B.07.005-86): Order of the Ministry of Ukraine on Emergencies and Affairs of Population Protection from the Consequences of the Chernobyl Disaster No. 833 from December 3, 2007. Kyiv, 2007. URL: https://dnaop.com/html/32980/doc-НАПБ_Б.03.002-2007 (Last accessed: 16.01.2018).
21. MapInfo Professional. 12.0 USER GUIDE. New York: Pitney Bowes Software Inc., One Global View, Troy, 598 p. URL: http://reference1.mapinfo.com/software/mapinfo_pro/english/12.0/MapInfoProfessionalUserGuide.pdf (Last accessed: 18.12.2017).