



СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

«Спеціальні методи оцінки екологічних ризиків: гострий вплив, дермальне
надходження, комп'ютерне моделювання»
для здобувачів вищої освіти спеціальності Е2 Екологія

Укладач:
к.т.н., доц. Кравченко І.В.

Київ, 2026

Методичні вказівки до самостійної роботи «Спеціальні методи оцінки екологічних ризиків: гострий вплив, дермальне надходження, комп'ютерне моделювання» з дисципліни «Методи визначення екологічних ризиків» для здобувачів другого рівня вищої освіти спеціальності Е2 Екологія / Укладач: І.В. Кравченко. – Київ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2026. – 77 с.

Методичні вказівки для самостійної роботи містять три розділи, що доповнюють основний комплект аудиторних практичних робіт з дисципліни «Методи визначення екологічних ризиків». Перший розділ присвячений оцінці ризику гострого хімічного впливу при аварійних ситуаціях із використанням системи рівнів AEGL, ERPG та IDLH. Другий розділ охоплює оцінку ризику при дермальному шляху надходження хімічних речовин через контакт із забрудненим ґрунтом та водою. Третій розділ покликаний допомогти здобувачам опанувати програму ALOHA для моделювання зон гострого хімічного впливу та зон ураження від вибуху паро-газової хмари під час аварійних хімічних викидів. Кожний розділ містить теоретичну частину, детальний приклад розрахунку та варіанти індивідуальних завдань.

Укладач:

І.В. Кравченко, к.т.н., доц.

Відповідальний за випуск

Є.І. Зубцов, к.т.н., доц.

Рецензент

В.І. Мохонько, к.геол.н., доц.

© СНУ ім. В. Даля, 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ОСНОВНІ АНГЛОМОВНІ ТЕРМІНИ ПРОГРАМИ ALOHA	6
ВСТУП.....	7
1. ОЦІНКА РИЗИКУ ГОСТРОГО ХІМІЧНОГО ВПЛИВУ ПРИ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	9
1.1. Відмінність гострого впливу від хронічного	9
1.2. Система AEGL (Acute Exposure Guideline Levels)	9
1.3. Інші системи нормативів гострого впливу	10
1.4. Параметри AEGL та ERPG для основних СДОР	11
1.5. Методика оцінки гострого ризику	15
1.6. Закон Габера та перерахунок між часовими інтервалами.....	16
1.7. Зв'язок із плануванням аварійного реагування	16
1.8. Приклад розрахунку	17
1.9. Варіанти завдань	19
2. ОЦІНКА РИЗИКУ ПРИ ДЕРМАЛЬНОМУ ВПЛИВІ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН	22
2.1. Значення дермального шляху в оцінці ризику	22
2.2. Основні сценарії дермального впливу	22
2.3. Розрахунок дермальної дози при контакті з ґрунтом	23
2.4. Розрахунок дермальної дози при контакті з водою.....	24
2.5. Фактори дермальної абсорбції та проникності для основних забруднювачів.....	25
2.6. Розрахунок дермального HQ та інтеграція з іншими шляхами.....	26
2.7. Приклад розрахунку	27
2.8. Варіанти завдань	29
3. МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ ХІМІЧНИХ ВИКИДІВ У ПРОГРАМІ ALOHA.....	32
3.1. Загальні відомості про програму ALOHA	32
3.2. Структура головного меню ALOHA	32
3.3. Покрокова інструкція: моделювання витоку хлору	33
3.4. Інтерпретація результатів.....	44

3.5. Обмеження ALOHA	47
3.6. Приклад виконання завдання	48
3.7. Моделювання вибуху паро-газової хмари (VCE) у ALOHA	49
3.7.1. Фізика вибуху паро-газової хмари	49
3.7.2. Моделювання VCE у ALOHA: особливості	51
3.7.3. Покрокова інструкція: моделювання вибуху хмари пропану	52
3.7.4. Інтерпретація результатів VCE	66
3.7.5. Вплив загроможженості простору на результати VCE	67
3.8. Варіанти завдань для самостійного виконання	68
4. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	74
5. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення	Розшифрування
AEGL	Acute Exposure Guideline Levels — рівні керівництва з гострого впливу
AEGL-1	Рівень гострого впливу, що викликає дискомфорт і зворотні ефекти
AEGL-2	Рівень гострого впливу, що може спричинити серйозні або незворотні наслідки
AEGL-3	Рівень гострого впливу, що становить загрозу життю
ERPG	Emergency Response Planning Guidelines — рівні планування аварійного реагування
ERPG-1	Перший рівень аварійного реагування
ERPG-2	Другий рівень аварійного реагування
ERPG-3	Третій рівень аварійного реагування
IDLH	Immediately Dangerous to Life or Health — концентрація, безпосередньо небезпечна для життя та здоров'я
ALOHA	Areal Locations of Hazardous Atmospheres — програма моделювання аварійних хімічних викидів
US EPA (EPA)	United States Environmental Protection Agency — Агентство з охорони довкілля США
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration — Національне управління океанічних та атмосферних досліджень США
NAC/AEGL	National Advisory Committee for AEGL — Національний дорадчий комітет з розробки AEGL
AIHA	American Industrial Hygiene Association — Американська асоціація промислової гігієни
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health — Національний інститут охорони праці США
HQ	Hazard Quotient — коефіцієнт небезпеки
HI	Hazard Index — індекс небезпеки
RfD	Reference Dose — референтна доза
RfC	Reference Concentration — референтна концентрація
SF	Slope Factor — фактор канцерогенного нахилу
ADD	Average Daily Dose — середньодобова доза
ABS	Absorption Factor — фактор дермальної абсорбції
AF	Adherence Factor — фактор адгезії ґрунту до шкіри
Kp	Dermal Permeability Coefficient — коефіцієнт дермальної проникності

Скорочення	Розшифрування
SA	Skin Area — площа поверхні шкіри
BW	Body Weight — маса тіла
EF	Exposure Frequency — частота експозиції
ED	Exposure Duration — тривалість експозиції
AT	Averaging Time — час усереднення
CF	Conversion Factor — коефіцієнт переведення одиниць
Cs	Концентрація забруднювача у ґрунті
Cw	Концентрація забруднювача у воді

ОСНОВНІ АНГЛОМОВНІ ТЕРМІНИ ПРОГРАМИ ALOHA

Скорочення	Розшифрування
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion — вибух розширюваної пари киплячої рідини
BST	Baker–Strehlow–Tang Method — метод Бейкера–Стрехлоу–Тенга для оцінки вибухів парогазових хмар
GMT	Greenwich Mean Time — середній час за Гринвічем
lb/min	pounds per minute — фунтів за хвилину
LEL	Lower Explosive Limit — нижня концентраційна межа вибуховості
LOC	Level of Concern — рівень небезпеки (рівень занепокоєння)
mph	miles per hour — милі за годину
psi	pounds per square inch — фунт на квадратний дюйм (одиниця надлишкового тиску)
TNT	Trinitrotoluene (тринітротолуол, тротил) — використовується у методі TNT-еквівалентності
UEL	Upper Explosive Limit — верхня концентраційна межа вибуховості
VCE	Vapor Cloud Explosion — вибух парогазової хмари

ВСТУП

У практичних роботах основного курсу студенти опановують методики оцінки канцерогенного та неканцерогенного ризику при хронічному впливі забруднювачів інгаляційним та пероральним шляхами. Ці два шляхи надходження та хронічний сценарій експозиції є найбільш типовими для населення, що тривалий час проживає на забрудненій території. Однак повна оцінка ризику для здоров'я людини потребує врахування ще двох важливих аспектів, яким присвячений цей посібник.

Перший аспект — оцінка ризику гострого хімічного впливу. При аваріях на хімічно небезпечних об'єктах (витік хлору, аміаку, сірководню, розлив токсичних рідин) населення та працівники піддаються впливу високих концентрацій небезпечних речовин протягом короткого часу — від хвилин до кількох годин. Методологія хронічної оцінки (RfD, RfC, slope factor) є непридатною для таких сценаріїв, оскільки вона розроблена для багаторічного впливу малих доз. Для оцінки гострого ризику використовуються спеціальні нормативи — рівні керівництва з гострого впливу (AEGL), рівні планування аварійного реагування (ERPG) та концентрації, безпосередньо небезпечні для життя та здоров'я (IDLH). Ці нормативи дозволяють визначити, які наслідки для здоров'я можна очікувати при заданій концентрації та тривалості впливу, і є основою для планування евакуації, визначення зон ураження та прийняття оперативних рішень при хімічних аваріях.

Другий аспект — дермальний шлях надходження хімічних речовин. На відміну від інгаляційного та перорального шляхів, дермальний вплив (проникнення через шкіру) часто недооцінюється при оцінці ризику. Однак для цілої низки сценаріїв він може бути основним або суттєвим: працівники, що мають безпосередній контакт із хімічними речовинами (розчинники, пестициди, мастила); діти, що грають на забруднених ґрунтах; населення, що купається у забруднених водоймах або використовує забруднену воду для побутових потреб (душ, ванна); мешканці територій з забрудненими ґрунтами. Методологія US EPA для дермального шляху використовує специфічні параметри — площу контакту шкіри, тривалість контакту, коефіцієнт дермальної абсорбції — і потребує окремого вивчення.

Третій аспект — практичне комп'ютерне моделювання аварійних хімічних викидів. Теоретичне знання системи AEGL та методики ручного розрахунку зон ураження (перший розділ) є необхідним фундаментом, однак у реальній практиці аварійного реагування використовуються спеціалізовані програмні засоби, що дозволяють швидко та точно прогнозувати поширення токсичних хмар з урахуванням фізико-хімічних властивостей речовини, параметрів джерела витоку, Метеоумовилогічних умов та характеру місцевості. Найбільш поширеним у світовій практиці інструментом такого моделювання є програма ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), розроблена

спільно Агентством з охорони довкілля США (US EPA) та Національним управлінням океанічних та атмосферних досліджень (NOAA). ALOHA є безкоштовною, використовує гаусову модель дисперсії з модифікаціями для важких газів і дозволяє моделювати токсичні хмари, пожежі, вибухи парогазових хмар тощо. Оволодіння цим програмним інструментом є важливою практичною компетенцією еколога, оскільки результати моделювання безпосередньо використовуються для визначення зон евакуації, планування аварійного реагування та розробки декларацій промислової безпеки.

Цей посібник призначений для самостійної роботи студентів та має на меті розширити компетенції, набуті на аудиторних практичних заняттях, до повного комплексу методів оцінки ризику для здоров'я людини.

1. ОЦІНКА РИЗИКУ ГОСТРОГО ХІМІЧНОГО ВПЛИВУ ПРИ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ

1.1. Відмінність гострого впливу від хронічного

Хронічний вплив, що розглядався у попередніх практичних роботах, характеризується тривалістю від кількох років до всього життя, відносно низькими концентраціями забруднювачів (зазвичай поблизу або нижче ГДК) та поступовим накопиченням ефектів. Гострий вплив при аварійних ситуаціях принципово відрізняється: концентрації можуть перевищувати ГДК у сотні та тисячі разів, тривалість — від хвилин до кількох годин, ефекти розвиваються швидко і можуть бути від легкого дискомфорту до смерті.

Ця різниця зумовлює непридатність хронічних нормативів (RfD, RfC) для оцінки гострих ситуацій. RfC встановлюється для безперервного впливу протягом десятиліть і включає великі коефіцієнти запасу. Якщо порівняти аварійну концентрацію з RfC, перевищення може бути тисячократним, але це не означає, що наслідки обов'язково будуть катастрофічними — усе залежить від тривалості впливу. Вдихання хлору в концентрації 10 мг/м³ протягом 10 хвилин та протягом 8 годин — це зовсім різні ситуації з точки зору наслідків для здоров'я.

Саме тому для гострих впливів розроблено спеціальні нормативи, що одночасно враховують і концентрацію, і тривалість впливу.

1.2. Система AEGL (Acute Exposure Guideline Levels)

AEGL — рівні керівництва з гострого впливу — розроблені Національною дорадчою радою США (NAC/AEGL Committee) під егідою US EPA. Це найбільш сучасна та комплексна система нормативів для оцінки гострого інгаляційного впливу хімічних речовин на населення (включаючи чутливі групи: дітей, людей похилого віку, хворих, вагітних).

Система AEGL визначає три рівні ефектів та п'ять часових інтервалів, утворюючи матрицю 3 × 5:

Три рівні:

AEGL-1 — концентрація у повітрі, вище якої населення загалом (включаючи чутливі групи) може відчувати помітний дискомфорт, подразнення або певні безсимптомні несенсорні ефекти. Однак ці ефекти є тимчасовими та повністю зворотними після припинення впливу. Нижче AEGL-1 більшість людей не відчуватиме жодного впливу. Прикладами ефектів на рівні AEGL-1 є: помітний запах, легке подразнення очей або горла, незначний головний біль. Перевищення AEGL-1 саме по собі не є підставою для евакуації, але потребує інформування населення та моніторингу ситуації.

AEGL-2 — концентрація, вище якої населення загалом може зазнати незворотних або інших серйозних довготривалих ефектів для здоров'я, а також втратити здатність до самостійної евакуації. Це ключовий рівень для прийняття рішень: перевищення AEGL-2 є підставою для негайної евакуації або укриття населення. Прикладами ефектів є: значне ураження дихальних шляхів, стійке порушення зору, серйозна нудота та блювання, виражена задишка.

AEGL-3 — концентрація, вище якої населення загалом може загинути. Це граничний рівень, перевищення якого означає безпосередню загрозу життю. Зона з концентраціями вище AEGL-3 є зоною смертельного ураження, в якій рятувальні роботи проводяться лише в ізолюючих засобах захисту.

П'ять часових інтервалів: 10 хвилин, 30 хвилин, 1 година, 4 години та 8 годин. Для кожної речовини та кожного рівня встановлюється окреме значення концентрації для кожного часового інтервалу. Як правило, чим довший час впливу, тим нижча допустима концентрація: те, що безпечно протягом 10 хвилин, може бути небезпечним при 4-годинному впливі.

Приклад значень AEGL для хлору (мг/м³):

Рівень	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
AEGL-2	8,4	5,9	4,2	2,1	1,5
AEGL-3	150	53	28	11	7,1

Зверніть увагу: AEGL-1 для хлору однаковий для всіх часових інтервалів (1,5 мг/м³), оскільки подразнювальний ефект виникає майже миттєво та не залежить від тривалості. AEGL-2 та AEGL-3 суттєво знижуються зі збільшенням часу: при 10-хвилинному впливі смертельною є концентрація 150 мг/м³, а при 8-годинному — лише 7,1 мг/м³, тобто у 21 раз менше.

1.3. Інші системи нормативів гострого впливу

ERPG (Emergency Response Planning Guidelines) — рівні планування аварійного реагування, розроблені Американською асоціацією промислової гігієни (AIHA). Мають три рівні, подібних до AEGL, але встановлені лише для одного часового інтервалу — 1 година:

ERPG-1 — максимальна концентрація у повітрі, нижче якої майже всі люди можуть перебувати протягом 1 години без відчуття нічого, крім легкого тимчасового впливу на здоров'я або без сприйняття чітко визначеного неприємного запаху.

ERPG-2 — максимальна концентрація, нижче якої майже всі люди можуть перебувати протягом 1 години без розвитку незворотних або інших серйозних ефектів, що перешкоджають евакуації.

ERPG-3 — максимальна концентрація, нижче якої майже всі люди можуть перебувати протягом 1 години без загрози для життя.

ERPG розроблені для більшої кількості речовин, ніж AEGL, і широко використовуються у плануванні аварійного реагування. Їхній недолік — наявність лише одного часового інтервалу (1 година), що обмежує застосування для дуже коротких або дуже тривалих аварій.

IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) — концентрація, безпосередньо небезпечна для життя та здоров'я, розроблена Національним інститутом охорони праці США (NIOSH). IDLH визначається як максимальна концентрація, з якої працівник може евакуюватися протягом 30 хвилин без ризику незворотних наслідків для здоров'я або загрози для життя. IDLH є одним значенням для кожної речовини (без диференціації за часом та рівнями) і використовується переважно для визначення вимог до засобів захисту органів дихання.

Ієрархія використання нормативів: US EPA рекомендує таку послідовність вибору: спочатку AEGL (як найбільш сучасні та науково обґрунтовані); якщо AEGL відсутні — ERPG; якщо відсутні і ERPG — IDLH (поділений на 10 як наближення до ERPG-2).

1.4. Параметри AEGL та ERPG для основних СДОР

Для виконання завдань використовуються наступні дані. Формули перерахунку:

$$C \text{ (мг/м}^3\text{)} = C \text{ (ppm)} \times M / 24,45$$

$$C \text{ (ppm)} = C \text{ (мг/м}^3\text{)} \times 24,45 / M$$

де M — молярна маса речовини (г/моль), 24,45 — молярний об'єм ідеального газу при 25°C та 1 атм (л/моль).

1. Хлор (Cl_2), $M = 70,91$ г/моль, $1 \text{ ppm} = 2,90 \text{ мг/м}^3$

Значення AEGL, ppm:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
AEGL-2	2,8	2,8	2,0	1,0	0,71
AEGL-3	50	28	20	10	7,1

Значення AEGL, мг/м³:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
AEGL-2	8,1	8,1	5,8	2,9	2,1
AEGL-3	145	81	58	29	21

2. Аміак (NH₃), M = 17,03 г/моль, 1 ppm = 0,697 мг/м³

Значення AEGL, ppm:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	30	30	30	30	30
AEGL-2	220	220	160	110	110
AEGL-3	2700	1600	1100	550	390

Значення AEGL, мг/м³:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	21	21	21	21	21
AEGL-2	153	153	111	77	77
AEGL-3	1882	1115	767	383	272

3. Сірководень (H₂S), M = 34,08 г/моль, 1 ppm = 1,394 мг/м³

Значення AEGL, ppm:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
AEGL-2	41	32	27	20	17
AEGL-3	76	59	50	37	31

Значення AEGL, мг/м³:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
AEGL-2	57	45	38	28	24
AEGL-3	106	82	70	52	43

4. Формальдегід (CH₂O), M = 30,03 г/моль, 1 ppm = 1,228 мг/м³

Значення AEGL, ppm:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

AEGL-2	14	14	14	3,5	2,5
AEGL-3	100	56	35	9,0	4,4

Значення AEGL, мг/м³:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
AEGL-2	17	17	17	4,3	3,1
AEGL-3	123	69	43	11	5,4

5. Фосген (COCl₂), M = 98,92 г/моль, 1 ppm = 4,046 мг/м³

Значення AEGL, ppm:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ
AEGL-2	0,15	0,074	0,037	0,020	0,010
AEGL-3	0,89	0,37	0,19	0,049	0,025

Значення AEGL, мг/м³:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ
AEGL-2	0,61	0,30	0,15	0,081	0,040
AEGL-3	3,6	1,5	0,77	0,20	0,10

НВ — не встановлено (AEGL-1 не визначено через неможливість встановити безпечний поріг дискомфортних ефектів для даної речовини)

6. Діоксид сірки (SO₂), M = 64,07 г/моль, 1 ppm = 2,620 мг/м³

Значення AEGL, ppm:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
AEGL-2	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
AEGL-3	40	16	10	3,3	2,0

Значення AEGL, мг/м³:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
AEGL-2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
AEGL-3	105	42	26	8,6	5,2

7. Синильна кислота (HCN), M = 27,03 г/моль, 1 ppm = 1,106 мг/м³

Значення AEGL, ppm:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	2,5	2,5	2,5	1,3	1,3
AEGL-2	17	10	7,1	3,5	2,5
AEGL-3	27	21	15	8,6	6,6

Значення AEGL, мг/м³:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	2,8	2,8	2,8	1,4	1,4
AEGL-2	19	11	7,9	3,9	2,8
AEGL-3	30	23	17	9,5	7,3

8. Оксид етилену (C₂H₄O), M = 44,05 г/моль, 1 ppm = 1,802 мг/м³

Значення AEGL, ppm:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ
AEGL-2	150	80	45	14	7,2
AEGL-3	450	230	130	41	22

Значення AEGL, мг/м³:

	10 хв	30 хв	1 год	4 год	8 год
AEGL-1	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ
AEGL-2	270	144	81	25	13
AEGL-3	811	414	234	74	40

НВ — не встановлено (AEGL-1 не визначено через неможливість встановити безпечний поріг дискомфортих ефектів для даної речовини)

Додатково — значення ERPG (1 година, мг/м³) та IDLH (мг/м³):

Значення ERPG (1 година) та IDLH, ppm / мг/м³:

Речовина	M	ERPG-1 ppm	ERPG-2 ppm	ERPG-3 ppm	IDLH ppm	ERPG-1 мг/м³	ERPG-2 мг/м³	ERPG-3 мг/м³	IDLH мг/м³
Хлор	70,91	1,0	3,0	20	10	2,9	8,7	58	29
Аміак	17,03	25	200	1000	300	17	139	697	209
Сірководень	34,08	1,0	30	100	50	1,4	42	139	70
Діоксид сірки	64,07	1,0	5,0	15	100	2,6	13	39	262
Фосген	98,92	0,1	0,1	1,0	0,5	0,40	0,40	4,0	2,0
Синильна кислота	27,03	—	13	25	50	—	14	28	55
Фтор	38,00	2,0	10	20	10	3,1	16	31	16

Хлороводень	36,46	3,0	20	100	50	4,5	30	149	75
-------------	-------	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----

1.5. Методика оцінки гострого ризику

Оцінка гострого ризику полягає у порівнянні фактичної або прогнозованої концентрації небезпечної речовини у повітрі з відповідними рівнями AEGL (або ERPG) для заданого часу впливу. На відміну від хронічної оцінки (де розраховується числовий показник ризику — HQ або ймовірність раку), при гострій оцінці результатом є визначення зони впливу — від «без ефекту» до «смертельне ураження».

Алгоритм оцінки:

Крок 1. Визначити речовину, що вивільнилася, та її концентрацію у повітрі (фактичну за даними вимірювань або прогнозовану за результатами моделювання).

Крок 2. Визначити тривалість впливу (час від початку витоку до евакуації, укриття або розсіювання хмари).

Крок 3. Обрати відповідні значення AEGL для даної речовини та часового інтервалу.

Крок 4. Порівняти фактичну концентрацію з рівнями AEGL:

$C < AEGL-1$ — без помітних ефектів для здоров'я;

$AEGL-1 \leq C < AEGL-2$ — дискомфорт, зворотні ефекти, евакуація не обов'язкова;

$AEGL-2 \leq C < AEGL-3$ — серйозні ефекти, втрата здатності до евакуації, необхідна негайна евакуація або укриття;

$C \geq AEGL-3$ — загроза для життя, зона смертельного ураження.

Крок 5. Для прогнозування зон ураження при аваріях: визначити відстані від джерела витоку, на яких концентрація знижується до рівнів AEGL-3, AEGL-2 та AEGL-1 (за результатами моделювання розсіювання). Ці відстані визначають три зони: зону смертельного ураження ($C \geq AEGL-3$), зону серйозного ураження ($AEGL-2 \leq C < AEGL-3$) та зону дискомфорту ($AEGL-1 \leq C < AEGL-2$).

Крок 6. Для ситуації з кількома речовинами одночасно (наприклад, при пожежі утворюються CO, HCN, HCl) — використовується правило адитивності за аналогією з HI:

$\Sigma (C_i / AEGL_i) \geq 1$ означає, що відповідний рівень ефекту досягнуто.

Тобто, якщо $C(\text{CO})/\text{AEGL-2}(\text{CO}) + C(\text{HCN})/\text{AEGL-2}(\text{HCN}) \geq 1$, наслідки відповідають рівню AEGL-2, навіть якщо жодна окрема речовина не досягає свого AEGL-2.

1.6. Закон Габера та перерахунок між часовими інтервалами

Для більшості подразнювальних та токсичних газів залежність між концентрацією та часом, що спричиняють однаковий ефект, описується законом Габера (Haber's rule):

$$C \times t = \text{const (для однакового ефекту)}$$

або у більш загальній формі (закон Тен Берге):

$$C^n \times t = \text{const}$$

де C — концентрація, t — час, n — показник степеня (для різних речовин n варіює від 1 до 3,5; для більшості газів $n \approx 1-2$). При $n = 1$ маємо класичний закон Габера: подвоєння концентрації при скороченні часу вдвічі дає той самий ефект.

Цей закон дозволяє наближено перерахувати AEGL з одного часового інтервалу на інший, якщо потрібний інтервал не наведений у таблиці. Наприклад, якщо для хлору AEGL-3 при 1 годині = 28 мг/м³, а при $n = 2$:

$$C_1^n \times t_1 = C_2^n \times t_2$$

$$28^2 \times 60 = C_2^2 \times 15$$

$$C_2 = 28 \times \sqrt{(60/15)} = 28 \times 2 = 56 \text{ мг/м}^3 \text{ (AEGL-3 для хлору при 15 хвиликах)}$$

Для порівняння, офіційне значення AEGL-3 хлору при 10 хвиликах = 150 мг/м³, при 30 хвиликах = 53 мг/м³. Закон Габера дає наближення, але не замінює офіційних значень AEGL, якщо вони доступні.

1.7. Зв'язок із плануванням аварійного реагування

Результати оцінки гострого ризику безпосередньо використовуються для:

Визначення зон планування евакуації — на основі моделювання «найгіршого сценарію» (максимальний витік за найнесприятливіших Метеоумовиумов) визначаються відстані, на яких концентрація досягає AEGL-2 (зона обов'язкової евакуації) та AEGL-3 (зона смертельного ураження). Ці зони зазначаються у планах аварійного реагування та плані цивільного захисту.

Прийняття оперативних рішень під час аварії — на основі даних вимірювань або прогнозу (швидкість та напрямок вітру, обсяг витоку) визначається, в яку зону потрапляє кожен район населеного пункту, і приймається рішення: інформування ($C < AEGL-1$), рекомендація залишатися вдома із закритими вікнами ($AEGL-1 \leq C < AEGL-2$), негайна евакуація ($C \geq AEGL-2$).

Визначення вимог до засобів захисту рятувальників — у зоні з $C \geq AEGL-3$ роботи проводяться лише в ізолюючих засобах захисту (ізолюючі протигази, повністю герметичні костюми); у зоні $AEGL-2 \leq C < AEGL-3$ — у фільтруючих засобах захисту відповідного типу.

1.8. Приклад розрахунку

Умова задачі. На водоочисній станції стався аварійний витік хлору. За даними газоаналізаторів, концентрація хлору у повітрі на різних відстанях від джерела становила: 100 м від джерела — 80 мг/м³; 300 м — 25 мг/м³; 500 м — 6 мг/м³; 1000 м — 2,0 мг/м³; 2000 м — 0,8 мг/м³. Час від початку витоку до повного перекриття — 40 хвилин. Визначити зони ураження та рекомендації для населення.

Розв'язання

Крок 1. Речовина — хлор (Cl₂), $M = 70,91$ г/моль. Концентрації у п'яти точках відомі.

Крок 2. Тривалість впливу — 40 хвилин. Стандартні часові інтервали AEGL — 30 хвилин та 1 година. Оскільки 40 хвилин перевищує 30 хвилин, використання значень для 30-хвилинного інтервалу є неконсервативним (може занизити ризик — при довшому впливі допустимі концентрації нижчі). Тому для консервативної оцінки використаємо значення AEGL для **1 години** (це «помилка у безпечний бік» — ми припускаємо дещо довший вплив, ніж фактичний).

Крок 3. Значення AEGL для хлору при 1 годині:

Рівень	ppm	мг/м ³	Очікувані ефекти
AEGL-1	0,50	1,5	Дискомфорт, подразнення, зворотні ефекти
AEGL-2	2,0	5,8	Серйозні ефекти, втрата здатності до евакуації
AEGL-3	20	58	Загроза для життя

Крок 4. Порівняння вимірних концентрацій з рівнями AEGL:

Відстань	C, мг/м ³	Порівняння з AEGL	Зона	Очікувані ефекти
100 м	80	$C \geq \text{AEGL-3 (58)}$	Смертельне ураження	Загроза для життя
300 м	25	$\text{AEGL-2 (5,8)} \leq C < \text{AEGL-3 (58)}$	Серйозне ураження	Незворотні ефекти, неможливість евакуації
500 м	6	$\text{AEGL-2 (5,8)} \leq C < \text{AEGL-3 (58)}$	Серйозне ураження	На межі AEGL-2, ледве перевищує
1000 м	2,0	$\text{AEGL-1 (1,5)} \leq C < \text{AEGL-2 (5,8)}$	Дискомфорт	Подразнення очей, горла, кашель
2000 м	0,8	$C < \text{AEGL-1 (1,5)}$	Без ефекту	Помітних ефектів немає

Крок 5. Визначення меж зон (інтерполяцією між точками вимірювань):

Межа зони смертельного ураження ($\text{AEGL-3} = 58 \text{ мг/м}^3$): між 100 м (80 мг/м^3) та 300 м (25 мг/м^3). Лінійна інтерполяція: $r = 100 + (300 - 100) \times (80 - 58) / (80 - 25) = 100 + 200 \times 22 / 55 = 100 + 80 = \mathbf{180 \text{ м}}$.

Межа зони серйозного ураження ($\text{AEGL-2} = 5,8 \text{ мг/м}^3$): між 500 м (6 мг/м^3) та 1000 м ($2,0 \text{ мг/м}^3$). $r = 500 + (1000 - 500) \times (6 - 5,8) / (6 - 2,0) = 500 + 500 \times 0,2 / 4,0 = 500 + 25 = \mathbf{525 \text{ м}}$.

Межа зони дискомфорту ($\text{AEGL-1} = 1,5 \text{ мг/м}^3$): між 1000 м ($2,0 \text{ мг/м}^3$) та 2000 м ($0,8 \text{ мг/м}^3$). $r = 1000 + (2000 - 1000) \times (2,0 - 1,5) / (2,0 - 0,8) = 1000 + 1000 \times 0,5 / 1,2 = 1000 + 417 = \mathbf{1417 \text{ м} \approx 1400 \text{ м}}$.

Крок 6. Зведена таблиця зон ураження:

Зона	Рівень AEGL	Межі	Очікувані ефекти
Смертельне ураження	$C \geq \text{AEGL-3 (58 мг/м}^3)$	до 180 м	Загроза для життя
Серйозне ураження	$\text{AEGL-2 (5,8)} \leq C < \text{AEGL-3 (58)}$	180–525 м	Незворотні ефекти, неможливість евакуації
Дискомфорт	$\text{AEGL-1 (1,5)} \leq C < \text{AEGL-2 (5,8)}$	525–1400 м	Подразнення, зворотні ефекти
Без ефекту	$C < \text{AEGL-1 (1,5 мг/м}^3)$	далі 1400 м	Помітних ефектів немає

Крок 7. Висновок та рекомендації.

Зона смертельного ураження (до 180 м від джерела): перебування без ізолюючих засобів захисту загрожує життю. Рятувальні роботи — лише в ізолюючих протигазах та герметичних костюмах. Негайна евакуація будь-яких осіб, що опинилися у цій зоні.

Зона серйозного ураження (180–525 м): можливі незворотні ефекти для здоров'я, втрата здатності до самостійної евакуації. Необхідна негайна евакуація населення. Рятувальники — у фільтруючих протигазах з коробкою типу «В» (для хлору). Особлива увага — дитячим закладам, лікарням та будинкам для літніх людей у цій зоні, оскільки ці групи є найбільш вразливими та мають обмежену здатність до самостійної евакуації.

Зона дискомфорту (525–1400 м): подразнення очей та дихальних шляхів, тимчасові зворотні ефекти. Рекомендація населенню — залишатися вдома з щільно закритими вікнами та вимкненою вентиляцією, увімкнути радіо для отримання інформації. Закрити щілини навколо дверей та вікон вологою тканиною. За можливості — перейти у внутрішні приміщення без вікон. При погіршенні самопочуття — евакуація у напрямку, перпендикулярному до напрямку вітру.

Безпечна зона (далі 1400 м): помітних ефектів немає. Інформування населення про ситуацію та рекомендація уникати наближення до зони аварії.

Примітка щодо порівняння ручного розрахунку з моделюванням ALOHA. Ручний розрахунок на основі даних газоаналізаторів у п'яти точках дає значно менші зони ураження (смертельна — до 180 м, серйозна — до 525 м), ніж моделювання у ALOHA для аналогічного сценарію (розділ 3.4: смертельна — до 1553 м, серйозна — до 3862 м). Ця різниця пояснюється тим, що у ручному розрахунку ми використовуємо виміряні концентрації у конкретних точках у конкретний момент часу, тоді як ALOHA прогнозує максимально можливі концентрації протягом усього часу витoku та враховує поведінку хлору як важкого газу, двофазний характер витoku та інтенсивність вивільнення (379 кг/хв за даними ALOHA). Крім того, дані вимірювань могли бути отримані не в момент максимальної концентрації або не на осьовій лінії хмари. Обидва підходи мають своє місце: ручний розрахунок за фактичними вимірюваннями — для оцінки поточної ситуації «тут і зараз»; моделювання в ALOHA — для прогнозування «найгіршого сценарію» та планування аварійного реагування.

1.9. Варіанти завдань

Загальне завдання. За наведеними даними: 1) визначити AEGL для відповідної речовини та часового інтервалу; 2) порівняти концентрації з рівнями AEGL; 3) визначити зону впливу для кожної точки вимірювання; 4) інтерполяцією визначити орієнтовні межі зон; 5) сформулювати рекомендації. Значення AEGL та ERPG взяти з таблиць п. 1.4.

Варіант 1. Витік аміаку на холодильній установці. Час впливу: 30 хвилин.
100 м — 1200 мг/м³; 300 м — 350 мг/м³; 500 м — 150 мг/м³; 1000 м — 40 мг/м³;
2000 м — 8 мг/м³.

Варіант 2. Витік сірководню на нафтопереробному заводі. Час впливу: 1 година.
50 м — 120 мг/м³; 200 м — 45 мг/м³; 500 м — 15 мг/м³; 1000 м — 3 мг/м³;
2000 м — 0,5 мг/м³.

Варіант 3. Витік хлору на водоочисній станції (нічний час, інверсія). Час впливу: 1 година.
100 м — 120 мг/м³; 300 м — 40 мг/м³; 500 м — 15 мг/м³; 800 м — 5 мг/м³;
1500 м — 1,0 мг/м³.

Варіант 4. Витік фосгену на хімічному виробництві. Час впливу: 30 хвилин.
50 м — 5,0 мг/м³; 150 м — 1,2 мг/м³; 300 м — 0,4 мг/м³; 500 м — 0,15 мг/м³;
1000 м — 0,03 мг/м³.

Варіант 5. Витік діоксиду сірки при аварії на ТЕС. Час впливу: 4 години.
200 м — 60 мг/м³; 500 м — 18 мг/м³; 1000 м — 5 мг/м³; 2000 м — 1,5 мг/м³;
3000 м — 0,3 мг/м³.

Варіант 6. Витік синильної кислоти (HCN) на гальванічному виробництві. Час впливу: 10 хвилин (швидке перекриття).
50 м — 35 мг/м³; 100 м — 18 мг/м³; 200 м — 8 мг/м³; 400 м — 2,0 мг/м³; 800 м — 0,5 мг/м³.

Варіант 7. Витік формальдегіду на меблевому виробництві. Час впливу: 4 години (повільний витік).
50 м — 20 мг/м³; 150 м — 6 мг/м³; 300 м — 2,5 мг/м³; 500 м — 0,8 мг/м³;
1000 м — 0,2 мг/м³.

Варіант 8. Витік бромиду при транспортній аварії. Час впливу: 1 година.
50 м — 25 мг/м³; 100 м — 10 мг/м³; 200 м — 3,0 мг/м³; 400 м — 0,8 мг/м³; 800 м — 0,15 мг/м³.

Варіант 9. Одночасний витік хлору та аміаку при аварії на водоочисній станції. Час впливу: 30 хвилин. Точка вимірювання на відстані 500 м: хлор — $3,0 \text{ мг/м}^3$; аміак — 80 мг/м^3 . Застосувати правило адитивності для визначення сумарного рівня ефекту.

Варіант 10. Витік оксиду етилену при аварії на стерилізаційному підприємстві. Час впливу: 1 година. 50 м — 200 мг/м^3 ; 150 м — 60 мг/м^3 ; 300 м — 20 мг/м^3 ; 500 м — 5 мг/м^3 ; 1000 м — $1,0 \text{ мг/м}^3$.

2. ОЦІНКА РИЗИКУ ПРИ ДЕРМАЛЬНОМУ ВПЛИВІ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН

2.1. Значення дермального шляху в оцінці ризику

Дермальний шлях — проникнення хімічних речовин через шкіру — є третім основним шляхом надходження токсикантів в організм людини поряд з інгаляційним та пероральним. На відміну від двох інших шляхів, дермальний вплив часто недооцінюється при рутинній оцінці ризику, оскільки він менш очевидний: людина може не усвідомлювати, що її шкіра контактує із забрудненим середовищем. Однак для цілого ряду реальних ситуацій дермальний шлях може бути не лише суттєвим, а й домінуючим.

Шкіра — найбільший орган людського тіла із загальною площею поверхні близько 1,7–2,0 м² для дорослого. Вона складається з трьох основних шарів: епідерміс (зовнішній бар'єрний шар), дерма (сполучна тканина з кровоносними судинами) та гіподерма (підшкірна жирова тканина). Основним бар'єром для проникнення хімічних речовин є роговий шар (stratum corneum) епідермісу — тонкий (10–15 мкм) шар мертвих кератиноцитів, просочених ліпідами. Речовина, що подолати роговий шар, потрапляє у дерму, де розгалужена мережа кровоносних капілярів забирає її у системний кровообіг та розносить по всьому організму.

Здатність речовини проникати через шкіру залежить від її фізико-хімічних властивостей. Ліпофільні (жиророзчинні) речовини проникають значно краще, ніж гідрофільні, оскільки роговий шар є ліпідним бар'єром. Низькомолекулярні сполуки (молекулярна маса менше 500 Да) проникають легше за великомолекулярні. Рідкі речовини та розчини проникають краще, ніж тверді. Органічні розчинники (бензол, толуол, трихлоретилен, тетрахлоретилен) проникають через шкіру особливо ефективно, оскільки вони одночасно ліпофільні та здатні руйнувати ліпідну структуру рогового шару, збільшуючи його проникність.

2.2. Основні сценарії дермального впливу

У практиці оцінки ризику виділяють кілька типових сценаріїв дермального впливу, кожен з яких має свої особливості розрахунку.

Сценарій 1: контакт із забрудненим ґрунтом. Цей сценарій є найбільш типовим при оцінці ризику на забруднених територіях (промислові майданчики, території поблизу звалищ, зони впливу підприємств). Забруднювачі, що містяться у поверхневому шарі ґрунту, потрапляють на шкіру при прямому контакті — ходьба босоніж, садово-городні роботи, ігри дітей. Особливо важливим цей сценарій є для дітей дошкільного віку, які часто

контактують із ґрунтом та мають звичку тягнути руки до рота (комбінований дермально-пероральний вплив).

Сценарій 2: контакт із забрудненою водою при побутовому використанні.

При прийнятті душу або ванни шкіра контактує із забрудненою водою протягом 15–30 хвилин. Леткі хлоровані сполуки (трихлоретилен, тетрахлоретилен, хлороформ) додатково випаровуються у замкненому просторі ванної кімнати та надходять інгаляційно. Для деяких речовин дермальне поглинання при прийнятті душу може перевищувати пероральне надходження із тією самою водою.

Сценарій 3: контакт із забрудненою водою при рекреаційному використанні. Плавання у забрудненій водоймі: контакт значної площі шкіри протягом тривалого часу, можливе заковтування води.

Сценарій 4: професійний контакт. Працівники, що безпосередньо контактують із хімічними речовинами: маляри (розчинники), працівники хімчисток (тетрахлоретилен), сільськогосподарські працівники (пестициди), працівники нафтопереробної промисловості (нафтопродукти, бензол).

2.3. Розрахунок дермальної дози при контакті з ґрунтом

Середньодобова дермальна доза при контакті із забрудненим ґрунтом розраховується за формулою:

$$ADD(\text{дерм, ґрунт}) = (Cs \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED) / (BW \times AT)$$

де **Cs** — концентрація забруднювача у ґрунті, мг/кг. Визначається за результатами хімічного аналізу проб поверхневого шару ґрунту (0–5 см).

SA — площа шкіри, що контактує з ґрунтом, см²/подію. Це площа відкритих ділянок тіла, що безпосередньо контактують із ґрунтом. Стандартні значення US EPA: для дорослого (садові роботи) — 5700 см² (руки 890 см², передпліччя 1140 см², ноги нижче колін 3670 см²); для дитини 6–12 років (гра на вулиці) — 2800 см² (руки, ноги, обличчя); для дитини 1–6 років — 2800 см² (руки, ноги, обличчя, з урахуванням того, що діти частіше контактують із ґрунтом усім тілом).

AF — фактор адгезії ґрунту до шкіри, мг/(см²×подію). Показує, яка маса ґрунту прилипає до одиниці площі шкіри при одному контакті. Стандартні значення: для дорослого — 0,07 мг/см²; для дитини — 0,2 мг/см² (діти мають вологішу шкіру та активніше контактують із ґрунтом).

ABS — фактор дермальної абсорбції (Absorption Factor), безрозмірна величина від 0 до 1. Показує, яка частка речовини, що потрапила на шкіру, фактично проникає через шкірний бар'єр у системний кровообіг. Решта залишається на

поверхні шкіри або у роговому шарі та видаляється при митті. Значення ABS залежить від речовини та від матриці (грунт, вода, чиста речовина).

EF — частота контакту, днів/рік. Для мешканців забрудненої території: 350 днів/рік (з урахуванням відпустки); для працівників — 250 днів/рік; для рекреації — 50–100 днів/рік.

ED — тривалість контакту, років. Для оцінки довічного ризику: дорослий — 24 роки (типовий термін проживання на одному місці за даними US EPA); дитина — 6 років.

BW — маса тіла, кг. Дорослий — 70 кг; дитина 6–12 років — 30 кг; дитина 1–6 років — 15 кг.

AT — час усереднення, днів. Для канцерогенного ризику — $70 \times 365 = 25\,550$ днів; для неканцерогенного — $ED \times 365$.

Одиниця виміру ADD(дерм) — мг/(кг×доба), що дозволяє безпосередньо порівнювати з RfD або множити на slope factor.

2.4. Розрахунок дермальної дози при контакті з водою

Середньодобова дермальна доза при контакті із забрудненою водою (душ, ванна, плавання) розраховується за формулою:

$$\text{ADD(дерм, вода)} = (\text{Cw} \times \text{SA} \times \text{Kp} \times \text{t} \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{ED}) / (\text{BW} \times \text{AT})$$

де **Cw** — концентрація забруднювача у воді, мг/л (або мг/см³, оскільки 1 л = 1000 см³, а 1 мг/л = 0,001 мг/см³).

SA — площа шкіри, що контактує з водою, см². При прийнятті душу або ванни: для дорослого — 18 000 см² (приблизно вся поверхня тіла); при плаванні — аналогічно.

Kp — коефіцієнт дермальної проникності (Dermal Permeability Coefficient), см/годину. Це швидкість проникнення речовини через шкіру з водного розчину. Kp залежить від хімічної структури речовини та визначається експериментально або розраховується за формулою US EPA.

t — тривалість контакту, годин/подію. Стандартні значення: душ — 0,2 години (12 хвилин); ванна — 0,5 години (30 хвилин); плавання — 1–2 години.

CF — коефіцієнт переведення одиниць: 0,001 л/см³ (для переведення мг/л у мг/см³).

EF та **ED** — частота та тривалість, як у попередній формулі.

BW та **AT** — маса тіла та час усереднення.

Спрощений варіант формули для стандартних умов (душ дорослого, щоденно):

$$ADD(\text{дерм, вода}) = C_w \times SA \times K_p \times t \times CF / BW =$$

$$= C_w \times 18\,000 \times K_p \times 0,2 \times 0,001 / 70 = C_w \times K_p \times 0,0514$$

2.5. Фактори дермальної абсорбції та проникності для основних забруднювачів

Для виконання завдань використовуються наступні параметри:

Фактори дермальної абсорбції з ґрунту (ABS):

Речовина	ABS (з ґрунту)	Примітка
Миш'як (неорганічний)	0,03	3% від речовини, що контактує зі шкірою, абсорбується
Кадмій	0,001	Дуже мала абсорбція через шкіру
Бенз(а)пірен	0,13	Ліпофільна речовина, порівняно добре проникає
ДДТ	0,04	Помірна абсорбція
Ліндан (γ-ГХЦГ)	0,04	Помірна абсорбція
Хлордан	0,04	Помірна абсорбція
Діоксини (ТХДД)	0,03	Низька, але достатня з урахуванням надзвичайної токсичності
ПХБ	0,14	Ліпофільні, добре проникають
Свинець	0,01	Мала абсорбція
Хром (VI)	0,01	Мала абсорбція
Пентахлорфенол	0,25	Висока абсорбція
Бензол	0,05	Помірна (з ґрунту менше, ніж з води)
Фенол	0,10	Висока

Коефіцієнти дермальної проникності з води (Kp, см/год):

Речовина	Kp, см/год	Примітка
Бензол	0,015	Добре проникає
Толуол	0,012	Добре проникає
Трихлоретилен	0,012	Добре проникає
Тетрахлоретилен	0,0053	Помірно проникає
Хлороформ	0,0073	Помірно проникає
Фенол	0,0084	Помірно проникає
Миш'як (неорганічний)	0,001	Погано проникає з води
Кадмій	0,001	Погано проникає

Хром (VI)	0,002	Погано проникає
Пентахлорфенол	0,051	Дуже добре проникає
Етилбензол	0,0071	Помірно
Ксилол	0,008	Помірно

Стандартні параметри експозиції:

Параметр	Дорослий	Дитина 6–12 років	Дитина 1–6 років
Маса тіла (BW), кг	70	30	15
Площа шкіри, контакт з ґрунтом (SA), см ²	5 700	2 800	2 800
Площа шкіри, контакт з водою (SA), см ²	18 000	10 000	6 700
Фактор адгезії ґрунту (AF), мг/(см ² ×подію)	0,07	0,2	0,2
Тривалість душу (t), год	0,2	0,17	0,17
Тривалість плавання (t), год	1,0	1,0	0,5
Частота контакту з ґрунтом (EF), днів/рік	350	350	350
Тривалість проживання (ED), років	24	6	6

2.6. Розрахунок дермального HQ та інтеграція з іншими шляхами

Після розрахунку ADD(дерм) коефіцієнт небезпеки визначається аналогічно іншим шляхам:

$$HQ(\text{дерм}) = ADD(\text{дерм}) / RfD$$

Для канцерогенного ризику:

$$Risk(\text{дерм}) = ADD(\text{дерм}) \times SF$$

При цьому слід використовувати RfD та SF для перорального шляху, оскільки дермальна доза, після проникнення через шкіру, надходить у системний кровообіг аналогічно до пероральної (з поправкою на абсорбцію у шлунково-кишковому тракті, яка вже врахована у RfD та SF).

Загальний ризик від усіх шляхів надходження:

$$HQ_{\text{сумарний}} = HQ(\text{інгаляц}) + HQ(\text{перорал}) + HQ(\text{дерм})$$

або для канцерогенного ризику:

$$Risk_{\text{сумарний}} = Risk(\text{інгаляц}) + Risk(\text{перорал}) + Risk(\text{дерм})$$

Це дозволяє оцінити відносний внесок кожного шляху у загальний ризик. Для деяких речовин та сценаріїв дермальний внесок може становити від кількох відсотків до 50% і більше від загального ризику.

2.7. Приклад розрахунку

Умова задачі. На території колишнього промислового майданчика, де планується житлова забудова, проведено аналіз ґрунту та ґрунтових вод (джерело водопостачання). Результати: бенз(а)пірен у ґрунті — 5 мг/кг; миш'як у ґрунті — 40 мг/кг; трихлоретилен у ґрунтовій воді — 0,03 мг/л. Оцінити дермальний ризик для дорослого мешканця (неканцерогенний та канцерогенний) та порівняти з ризиком від інших шляхів.

Додаткові дані для порівняння: мешканець також вдихає повітря із забрудненнями (бенз(а)пірен — 0,0001 мг/м³) та п'є воду із забрудненого джерела (трихлоретилен — 0,03 мг/л, миш'як — 0,015 мг/л).

Розв'язання

Частина А. Дермальний ризик від контакту з ґрунтом.

Параметри: дорослий, SA = 5700 см², AF = 0,07 мг/(см²×подію), EF = 350 днів/рік, ED = 24 роки, BW = 70 кг, AT(канцер) = 25 550 днів, AT(неканцер) = 24 × 365 = 8760 днів.

Бенз(а)пірен (ґрунт): ADD(дерм) = (Cs × SA × AF × ABS × EF × ED) / (BW × AT) ADD(дерм, канцер) = (5 × 5700 × 0,07 × 0,13 × 350 × 24) / (70 × 25 550 × 10⁶)

Обчислимо чисельник покроково: 5 × 5700 = 28 500 28 500 × 0,07 = 1 995 1 995 × 0,13 = 259,35 259,35 × 350 = 90 772,5 90 772,5 × 24 = 2 178 540

Знаменник: 70 × 25 550 = 1 788 500

Коефіцієнт переведення: оскільки Cs у мг/кг, AF у мг/см², результат потрібно ділити на 10⁶ (для переведення мг ґрунту в кг ґрунту).

ADD(дерм, канцер) = 2 178 540 / (1 788 500 × 10⁶) = **1,22 × 10⁻⁶ мг/(кг×доба)**

Канцерогенний ризик: Risk = ADD × SF(перорал) = 1,22 × 10⁻⁶ × 7,3 = **8,9 × 10⁻⁶**

Для неканцерогенного ризику AT = 8760 днів: ADD(дерм, неканцер) = 2 178 540 / (70 × 8760 × 10⁶) = **3,55 × 10⁻⁶ мг/(кг×доба)**

HQ = ADD / RfD. Для бенз(а)пірену пероральна RfD = 0,0003 мг/(кг×доба) (за даними деяких джерел; US EPA не встановило офіційного RfD для

бенз(а)пірену, тому використаємо значення Нідерландського RIVM).
 $HQ(\text{дерм, бенз(а)пірен}) = 3,55 \times 10^{-6} / 0,0003 = \mathbf{0,012}$

Миш'як (грунт): $ADD(\text{дерм, канцер}) = (40 \times 5700 \times 0,07 \times 0,03 \times 350 \times 24) / (70 \times 25\,550 \times 10^6)$

Чисельник: $40 \times 5700 = 228\,000$
 $228\,000 \times 0,07 = 15\,960$
 $15\,960 \times 0,03 = 478,8$
 $478,8 \times 350 = 167\,580$
 $167\,580 \times 24 = 4\,021\,920$

$ADD(\text{дерм, канцер}) = 4\,021\,920 / (1\,788\,500 \times 10^6) = \mathbf{2,25 \times 10^{-6} \text{ мг/(кг}\times\text{доба)}}$

Канцерогенний ризик: $Risk = 2,25 \times 10^{-6} \times 1,5 = \mathbf{3,37 \times 10^{-6}}$

$ADD(\text{дерм, неканцер}) = 4\,021\,920 / (70 \times 8760 \times 10^6) = \mathbf{6,56 \times 10^{-6} \text{ мг/(кг}\times\text{доба)}}$

$HQ(\text{дерм, миш'як}) = 6,56 \times 10^{-6} / 0,0003 = \mathbf{0,022}$

Частина Б. Дermalний ризик від контакту з водою (душ).

Параметри: $SA = 18\,000 \text{ см}^2$, $t = 0,2 \text{ год}$, $CF = 0,001 \text{ л/см}^3$, $EF = 350 \text{ днів/рік}$, $ED = 24 \text{ роки}$, $BW = 70 \text{ кг}$.

Трихлоретилен (вода, душ): $ADD(\text{дерм, вода}) = (C_w \times SA \times K_p \times t \times CF \times EF \times ED) / (BW \times AT)$

Для канцерогенного ризику: $ADD = (0,03 \times 18\,000 \times 0,012 \times 0,2 \times 0,001 \times 350 \times 24) / (70 \times 25\,550)$

Чисельник: $0,03 \times 18\,000 = 540$
 $540 \times 0,012 = 6,48$
 $6,48 \times 0,2 = 1,296$
 $1,296 \times 0,001 = 0,001296$
 $0,001296 \times 350 = 0,4536$
 $0,4536 \times 24 = 10,887$

Знаменник: $70 \times 25\,550 = 1\,788\,500$

$ADD(\text{дерм, канцер}) = 10,887 / 1\,788\,500 = \mathbf{6,09 \times 10^{-6} \text{ мг/(кг}\times\text{доба)}}$

Канцерогенний ризик: $Risk = 6,09 \times 10^{-6} \times 0,046 = \mathbf{2,80 \times 10^{-7}}$

$ADD(\text{дерм, неканцер}) = 10,887 / (70 \times 8760) = \mathbf{1,78 \times 10^{-5} \text{ мг/(кг}\times\text{доба)}}$

$HQ(\text{дерм, ТХЕ}) = 1,78 \times 10^{-5} / 0,0005 = \mathbf{0,036}$

Частина В. Порівняння з іншими шляхами.

Розрахуємо ризик від інгаляційного та перорального шляхів для порівняння.

Бенз(а)пірен (інгаляційно): $\text{Risk} = C \times \text{UR} = 0,0001 \times 1000 \times 6,0 \times 10^{-4} = \mathbf{6,0 \times 10^{-5}}$ (тут $0,0001 \text{ мг/м}^3 = 0,1 \text{ мкг/м}^3$; $\text{UR} = 6,0 \times 10^{-4} (\text{мкг/м}^3)^{-1}$, тому $\text{Risk} = 0,1 \times 6,0 \times 10^{-4} = 6,0 \times 10^{-5}$)

Трихлоретилен (перорально, з питною водою): $\text{ADD}(\text{перорал}) = 0,03 \times 2 / 70 = 8,57 \times 10^{-4} \text{ мг/(кг} \times \text{доба)}$ $\text{Risk}(\text{перорал}) = 8,57 \times 10^{-4} \times 0,046 = \mathbf{3,94 \times 10^{-5}}$

Миш'як (перорально, з питною водою): $\text{ADD}(\text{перорал}) = 0,015 \times 2 / 70 = 4,29 \times 10^{-4} \text{ мг/(кг} \times \text{доба)}$ $\text{Risk}(\text{перорал}) = 4,29 \times 10^{-4} \times 1,5 = \mathbf{6,43 \times 10^{-4}}$

Зведена таблиця канцерогенного ризику за шляхами:

Речовина	Інгаляційний	Пероральний	Дермальний	Разом
Бенз(а)пірен	$6,0 \times 10^{-5}$	—	$8,9 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-5}$
Миш'як	—	$6,43 \times 10^{-4}$	$3,37 \times 10^{-6}$	$6,46 \times 10^{-4}$
Трихлоретилен	—	$3,94 \times 10^{-5}$	$2,80 \times 10^{-7}$	$3,97 \times 10^{-5}$
РАЗОМ	$6,0 \times 10^{-5}$	$6,83 \times 10^{-4}$	$1,25 \times 10^{-5}$	$7,55 \times 10^{-4}$

Внесок дермального шляху у сумарний канцерогенний ризик: $1,25 \times 10^{-5} / 7,55 \times 10^{-4} = \mathbf{1,7\%}$. У даному випадку дермальний шлях не є домінуючим — основний ризик створюється пероральним надходженням миш'яку з питною водою (85,2%). Однак навіть дермальний ризик окремо ($1,25 \times 10^{-5}$) перевищує рівень 10^{-6} у 12,5 разів, тобто є значущим.

Висновок. Сумарний канцерогенний ризик від усіх шляхів ($7,55 \times 10^{-4}$) перевищує верхню межу прийнятності (10^{-4}) у 7,6 разів. Територія потребує ремедіації (очищення та відновлення) перед житловою забудовою. Пріоритетним заходом є очищення ґрунтових вод від миш'яку або забезпечення альтернативного джерела водопостачання. Дермальний шлях, хоча й вносить відносно невеликий внесок (1,7%), не є нехтовним і повинен враховуватися у комплексній оцінці.

2.8. Варіанти завдань

Загальне завдання. За наведеними даними: 1) розрахувати дермальну ADD для кожної речовини; 2) розрахувати дермальний HQ та/або канцерогенний ризик; 3) порівняти дермальний ризик з ризиком від інгаляційного та перорального шляхів; 4) визначити внесок дермального шляху у сумарний ризик; 5) сформулювати висновки. Параметри абсорбції та проникності з таблиць п. 2.5, SF та RfD з таблиць методичних вказівок до практичних робіт.

Варіант 1. Забруднений промисловий майданчик (контакт з ґрунтом, дорослий) Ґрунт: бенз(а)пірен — 8 мг/кг; свинець — 500 мг/кг; ПХБ — 3 мг/кг. Для порівняння, повітря: бенз(а)пірен — 0,0002 мг/м³. Вода: не забруднена.

Варіант 2. Житловий район на забрудненій території (контакт з ґрунтом, дитина 1–6 років) Ґрунт: миш'як — 25 мг/кг; свинець — 200 мг/кг; ДДТ — 2 мг/кг. Вода: миш'як — 0,01 мг/л. *Параметри для дитини 1–6 років.*

Варіант 3. Контакт із забрудненою водою (душ, дорослий) Вода: трихлоретилен — 0,05 мг/л; тетрахлоретилен — 0,02 мг/л; хлороформ — 0,06 мг/л. Для порівняння, пероральне споживання тієї самої води — 2 л/добу.

Варіант 4. Плавання у забрудненій річці (дорослий, рекреація) Вода: бензол — 0,01 мг/л; фенол — 0,5 мг/л; ксилол — 0,1 мг/л. Тривалість плавання: 1 година; частота: 60 днів/рік; тривалість: 10 років.

Варіант 5. Територія поблизу старого звалища (контакт з ґрунтом, дорослий) Ґрунт: хром(VI) — 80 мг/кг; кадмій — 10 мг/кг; пентахлорфенол — 5 мг/кг. Вода: хром(VI) — 0,02 мг/л; кадмій — 0,003 мг/л.

Варіант 6. Працівник хімчистки (дермальний контакт із розчинниками) Контакт із тетрахлоретиленом: концентрація у рідині, що контактує зі шкірою — 100 мг/л (залишки на одязі); площа контакту — 1500 см² (руки та передпліччя); тривалість — 4 години/зміну; 250 днів/рік; 20 років стажу. Для порівняння: інгаляційний вплив — 0,1 мг/м³ у повітрі робочої зони.

Варіант 7. Дитяче подвір'я у промисловому районі (контакт з ґрунтом, дитина 6–12 років) Ґрунт: миш'як — 15 мг/кг; бенз(а)пірен — 1 мг/кг; свинець — 300 мг/кг. Повітря: бенз(а)пірен — 0,00005 мг/м³. Вода: миш'як — 0,008 мг/л.

Варіант 8. Територія колишнього пестицидного складу (контакт з ґрунтом, дорослий) Ґрунт: ДДТ — 15 мг/кг; ліндан — 3 мг/кг; хлордан — 5 мг/кг; миш'як — 20 мг/кг. Вода: не забруднена.

Варіант 9. Побутовий контакт із забрудненою водою (душ та питна вода, дорослий) Вода: бензол — 0,008 мг/л; толуол — 0,5 мг/л; етилбензол — 0,02 мг/л. Розрахувати окремо дермальний ризик (душ) та пероральний ризик (питна вода) та визначити співвідношення.

Варіант 10. Комплексна оцінка: всі три шляхи (дорослий мешканець забрудненої території) Ґрунт: бенз(а)пірен — 3 мг/кг; миш'як — 30 мг/кг. Повітря: бенз(а)пірен — 0,0001 мг/м³; формальдегід — 0,02 мг/м³. Вода (питна та побутова): миш'як — 0,02 мг/л; трихлоретилен — 0,04 мг/л. *Розрахувати канцерогенний та неканцерогенний ризик окремо для кожного шляху (інгаляційний, пероральний, дермальний — з ґрунтом та з водою), визначити сумарний ризик та вклад кожного шляху.*

3. МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ ХІМІЧНИХ ВИКИДІВ У ПРОГРАМІ ALOHA

3.1. Загальні відомості про програму ALOHA

ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres — Просторове визначення зон небезпечних атмосфер) — це безкоштовна програма для моделювання аварійних хімічних викидів, розроблена спільно Агентством з охорони довкілля США (US EPA) та Національним управлінням океанічних та атмосферних досліджень (NOAA). Поточна версія — 5.4.7 (вересень 2016 року). Програма входить до пакету CAMEO (Computer-Aided Management of Emergency Operations) і є стандартним інструментом для планування аварійного реагування та оперативного прийняття рішень при хімічних аваріях у США, Канаді та багатьох інших країнах.

ALOHA дозволяє моделювати: токсичні газові хмари (toxic gas clouds) — поширення хмари отруйного газу з визначенням зон, де концентрація перевищує задані рівні безпеки (AEGL, ERPG, IDLH); пожежі калюжі (pool fires) — теплове випромінювання від горіння розлитої рідини; факельне горіння (jet fires) — теплове випромінювання від горіння струменя газу або рідини, що витікає під тиском; вибухи паро-газових хмар (vapor cloud explosions) — надлишковий тиск ударної хвилі; вибухи ємностей із перегрітою рідиною (BLEVE — Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) — теплове випромінювання від вогняної кулі.

Для моделювання токсичних хмар (що є основним застосуванням у контексті нашого курсу) ALOHA використовує гаусову модель атмосферної дисперсії з модифікаціями для важких газів (модель DEGADIS). Результатом є «відбиток загрози» (threat zone footprint) — зона на поверхні землі, де концентрація забруднювача перевищує заданий рівень безпеки (Level of Concern, LOC) протягом хоча б якогось моменту за годину після початку викиду.

Завантаження та встановлення: програма завантажується безкоштовно з офіційного сайту US EPA: <https://www.epa.gov/comeo/aloha-software>. Доступні версії для Windows та Mac. Розмір файлу — 7,33 МБ. Встановлення стандартне, не потребує спеціальних налаштувань.

3.2. Структура головного меню ALOHA

Після запуску ALOHA відкривається головне вікно програми з текстовою областю (Text Summary), де відображається вся введена інформація та результати розрахунків. Головне меню містить шість пунктів:

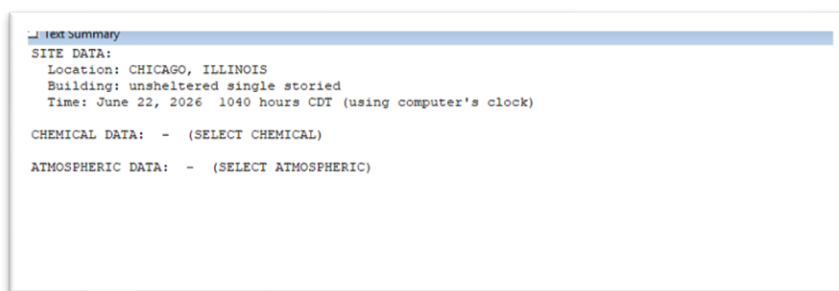
SiteData — введення інформації про місце події: вибір географічного розташування (Location) зі списку міст або введення координат; встановлення дати та часу аварії (Date & Time).

SetUp — основне меню для побудови сценарію аварії. Містить чотири підменю: Chemical — вибір хімічної речовини зі вбудованої бази даних (понад 1000 речовин з усіма необхідними фізико-хімічними параметрами); Atmospheric — введення Метеоумовирологічних умов (швидкість та напрямок вітру, клас стійкості атмосфери, хмарність, температура, вологість); Source — визначення джерела витоку (тип: пряме джерело, резервуар, калюжа, газопровід; параметри: обсяг, розмір отвору, температура, тиск).

Display — відображення результатів: Threat Zone — зони загрози на координатній сітці (три кольори: червоний — найвищий рівень небезпеки, помаранчевий — середній, жовтий — найнижчий); Threat at Point — концентрація у заданій точці; Source Strength — графік швидкості витоку у часі.

Sharing — експорт результатів: KML Export — для відображення зон загрози в Google Earth; Copy — копіювання тексту або графіка.

Help — довідкова система.



Скріншот 1: Головне вікно ALOHA після запуску — порожня текстова область із головним меню та обмеження використання програми

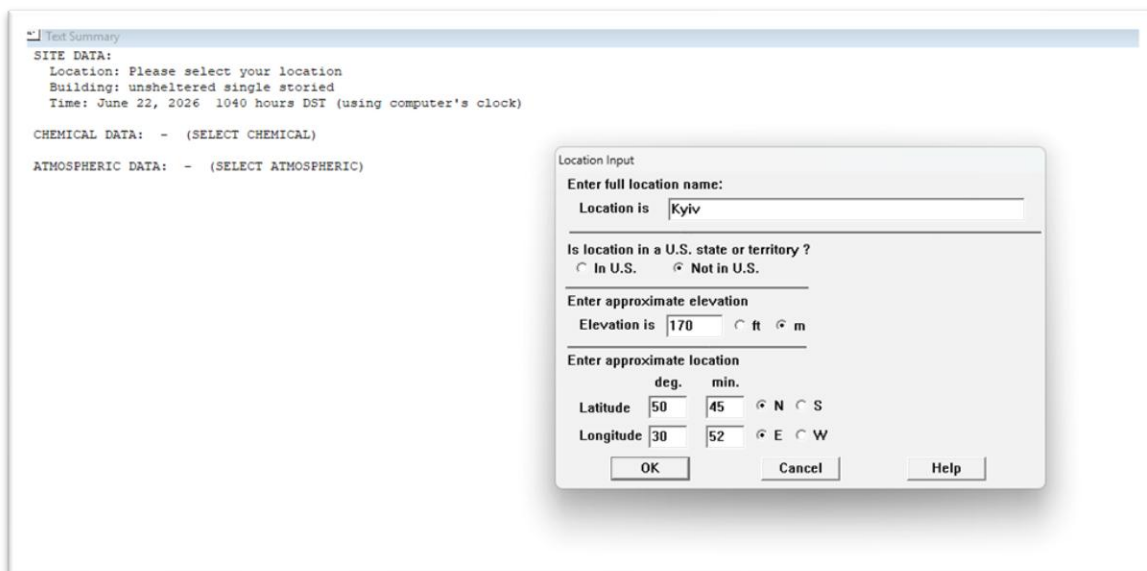
3.3. Покрокова інструкція: моделювання витоку хлору

Розглянемо покроковий приклад моделювання аварійного витоку хлору на водоочисній станції.

Сценарій. На водоочисній станції, розташованій у місті Київ (висота 170 м над рівнем моря), стався витік хлору з ємності об'ємом 1 тонна. У результаті механічного пошкодження утворився отвір діаметром 5 см (2 дюйми) у верхній частині ємності. Метеоумови: вітер зі сходу, швидкість 3 м/с, хмарність 50%, температура повітря 20°C, вологість 60%. Місцевість — міська забудова. Час аварії — 14:00.

Крок 1. Вибір місця розташування (SiteData → Location).

Відкрити меню SiteData, обрати Location. У діалоговому вікні ввести координати Києва (або обрати найближче місто зі списку). Якщо Києва немає у списку, обрати «Use Lat/Long» та ввести: Latitude 50.45 N, Longitude 30.52 E.



Скріншот 2: Діалогове вікно Location з введеними координатами

Після введення координат з'являється вікно **Введення параметрів країни** для локацій за межами США, куди потрібно ввести:

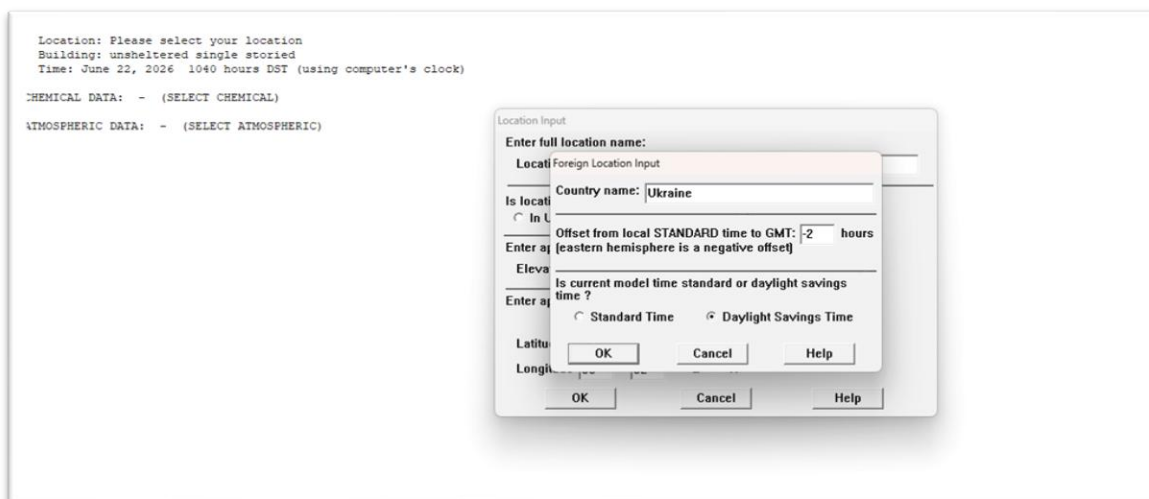
Country name: Ukraine

Offset from local STANDARD time to GMT: -2 hours

Пояснення: Україна знаходиться у часовому поясі UTC+2 (Східноєвропейський час, EET). ALOHA використовує конвенцію, де для східної півкулі зсув є від'ємним, тому вводимо **-2**.

Standard Time / Daylight Savings Time: оскільки наш сценарій відбувається влітку (червень), а Україна традиційно переходить на літній час (UTC+3), обираємо **Daylight Savings Time**.

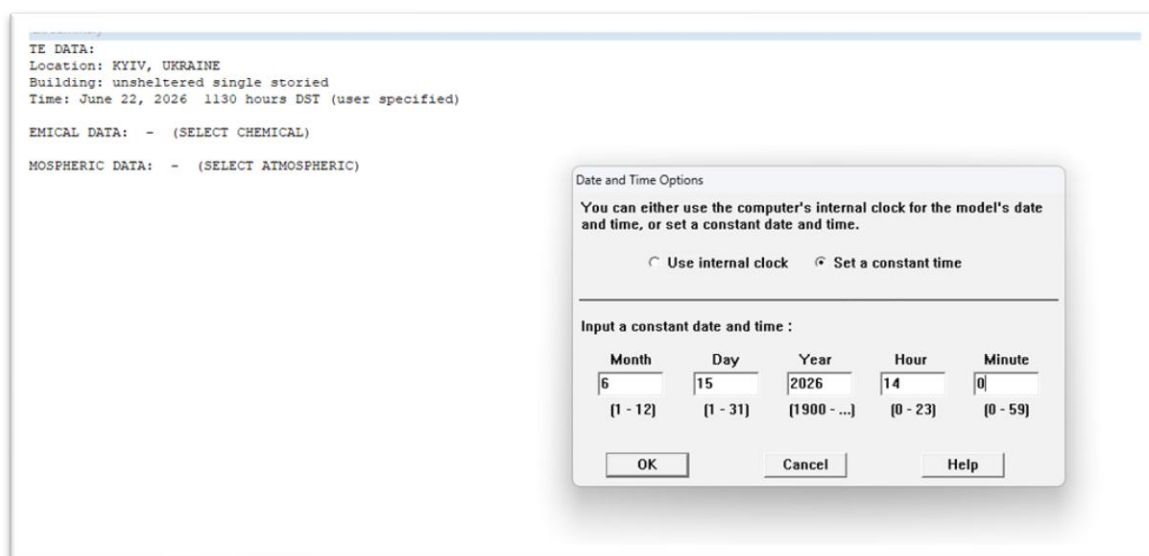
Цей параметр важливий не стільки для самого розрахунку дисперсії, скільки для того, щоб ALOHA правильно визначила положення сонця у заданий час. Від цього залежить розрахунок класу стійкості атмосфери: вдень сонце нагріває поверхню, створюючи конвективні потоки (нестабільна атмосфера, класи A–C), а вночі поверхня охолоджується (стабільна атмосфера, класи E–F). Неправильне введення часового поясу може призвести до того, що ALOHA «вважатиме» денну аварію нічною або навпаки, що суттєво вплине на розміри зон загрози.



Скріншот 3: Діалогове вікно Location Input

Крок 2. Встановлення дати та часу (SiteData → Date & Time).

Обрати Set constant time. Ввести: Month — 6 (червень), Day — 15, Year — 2026, Hour — 14, Minute — 00.



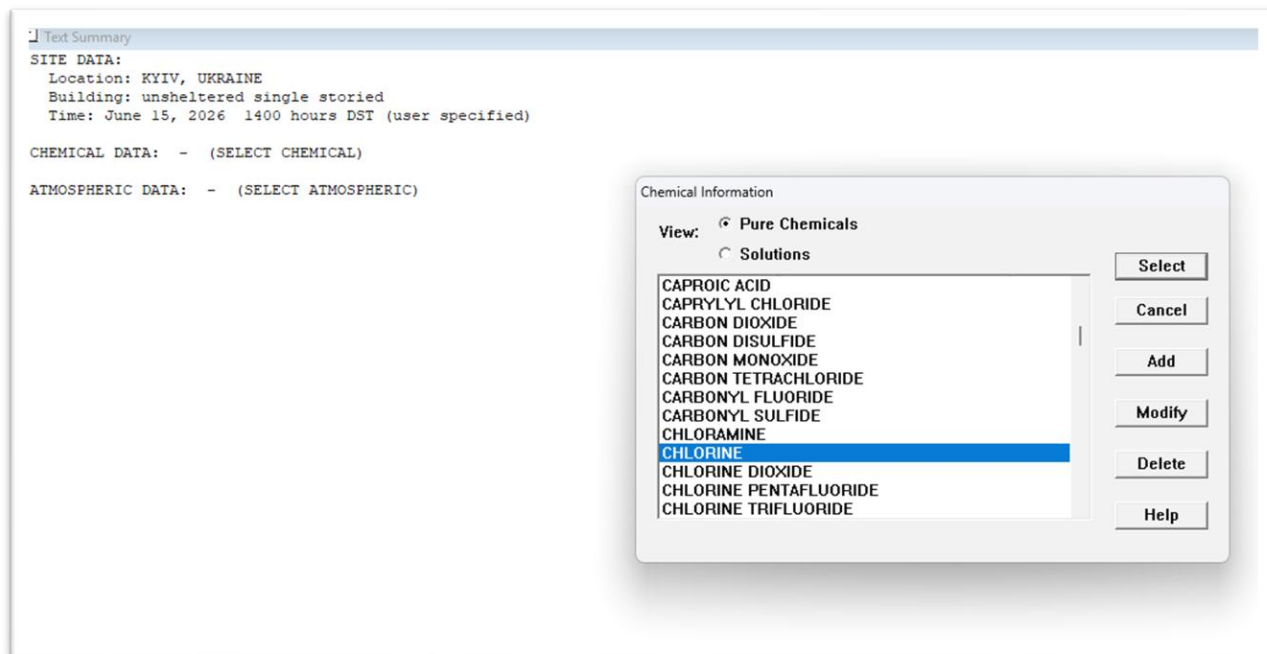
Скріншот 4: Діалогове вікно Date & Time

Крок 3. Вибір хімічної речовини (SetUp → Chemical).

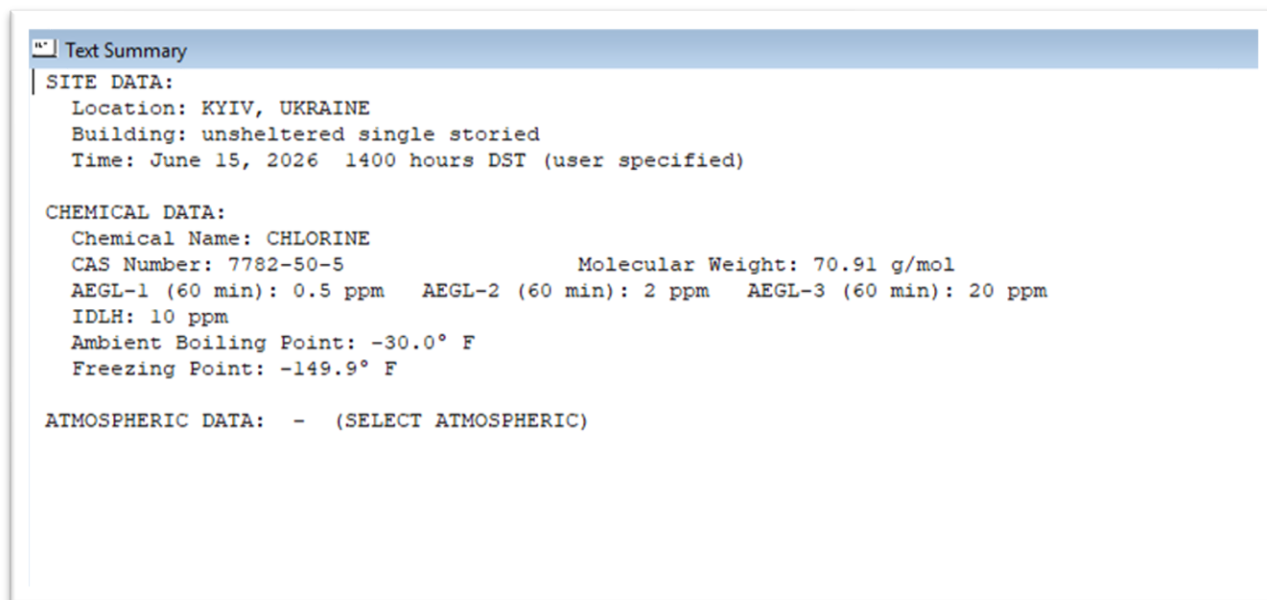
Обрати SetUp → Chemical. У вікні хімічної бібліотеки обрати «Pure Chemicals». Знайти CHLORINE у списку (швидкий пошук — набрати «ch»). Клікнути на назві, натиснути Select.

У текстовій області з'явиться інформація про хлор: молекулярна маса (70,91 г/моль), температура кипіння (-34,0°C), AEGL та інші параметри.

АЛОНА може видати попередження: оскільки температура кипіння хлору (-34°C) значно нижча за температуру повітря (20°C), речовина при нормальних умовах є газом, і при витоку з ємності зрідженого хлору може відбутися миттєве випаровування (flash boiling).



Скріншот 5: Вікно вибору хімічної речовини з виділенням CHLORINE

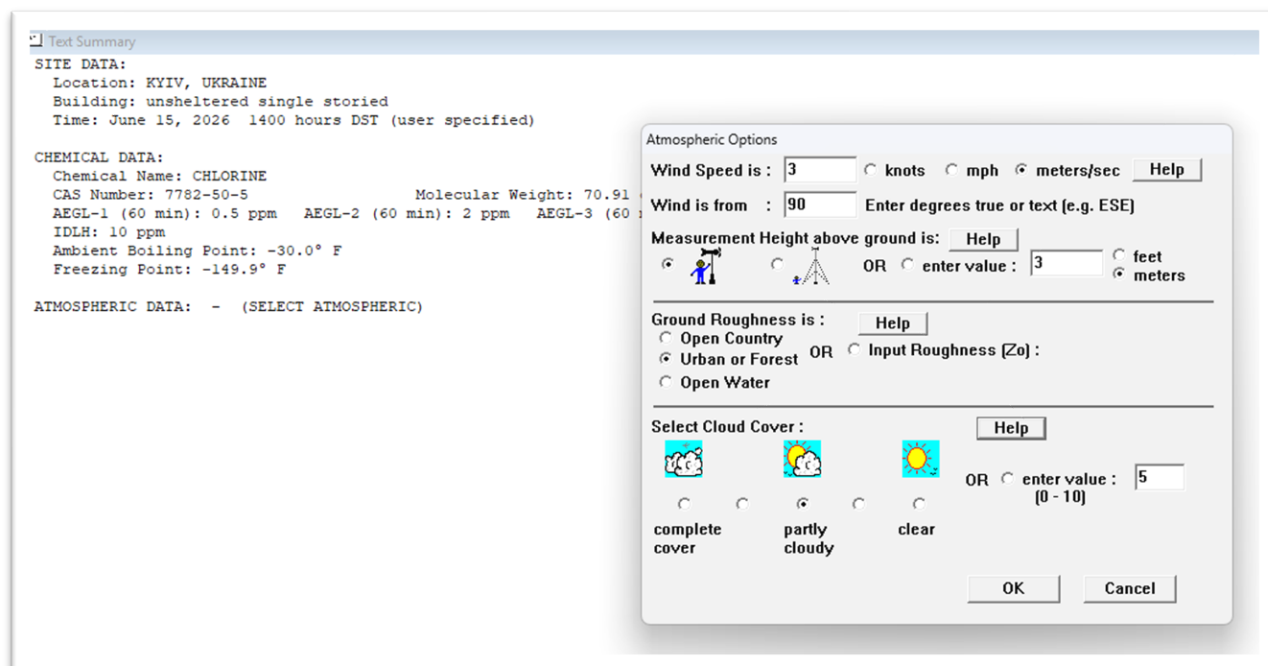


Скріншот 6: Текстова область із характеристиками хлору

Крок 4. Введення Метеоумовирологічних умов (SetUp → Atmospheric → User Input).

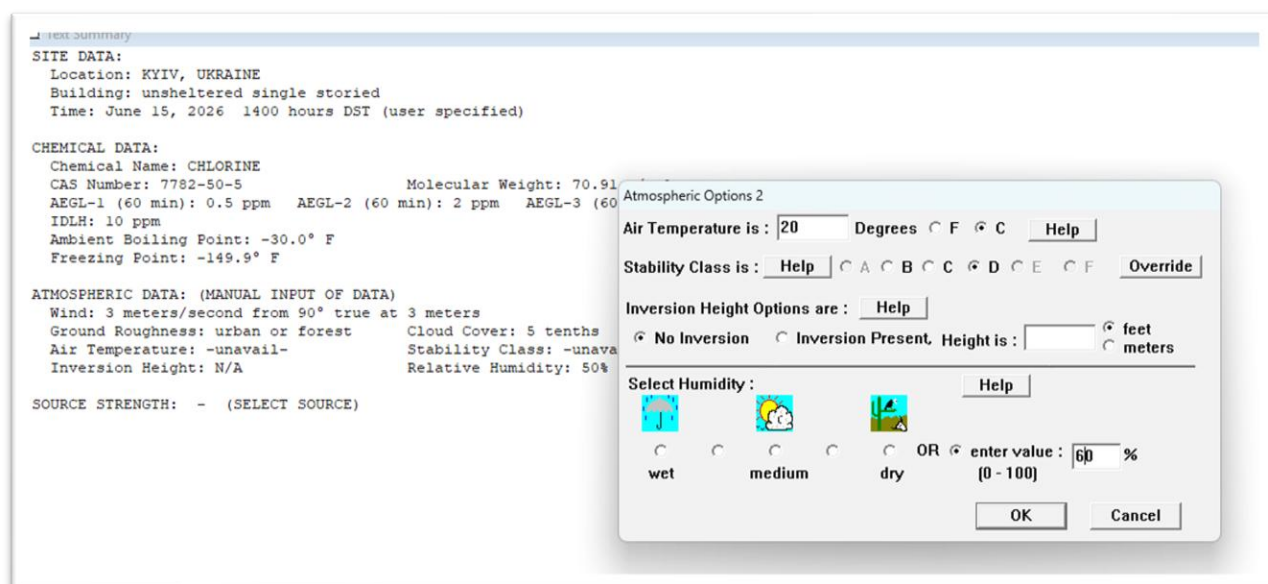
Обрати SetUp → Atmospheric → User Input. З'являться два послідовних діалогових вікна.

Перше вікно (Atmospheric Options): Wind Speed — ввести 3 та обрати m/s (або перерахувати у mph: 3 м/с $\approx$ 6,7 mph). Wind Direction — ввести 90 (вітер зі сходу, тобто дме у напрямку заходу). Measurement Height — обрати значок «person» (висота вимірювання 3 м) або «tower» (10 м). Ground Roughness — обрати «Urban or Forest» (міська забудова). Cloud Cover — обрати 5 (50% хмарності, за шкалою від 1 до 10).



Скріншот 7: Перше вікно Atmospheric Options

Друге вікно: Air Temperature — ввести 20°C (або 68°F). Humidity — ввести 60%. Stability Class — ALOHA розрахує автоматично на основі швидкості вітру, хмарності та часу доби (для даних умов програма визначить клас стійкості D - нейтральна атмосфера. Не слід змінювати автоматично визначений клас вручну, якщо ви не маєте обґрунтованих підстав (наприклад, даних Метеоумовирологічної станції). No Inversion — обрати «No Inversion» (відсутність температурної інверсії).

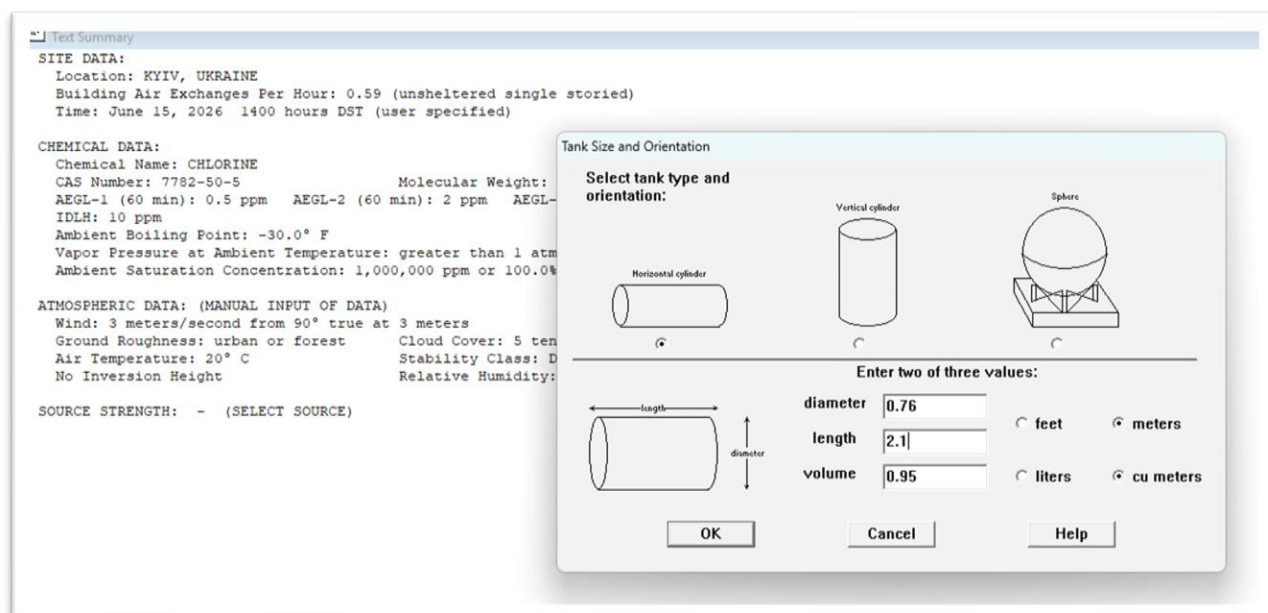


Скріншот 8: Друге вікно Atmospheric Options

Крок 5. Визначення джерела витоку (SetUp → Source → Tank).

Обрати SetUp → Source → Tank (оскільки витік з ємності).

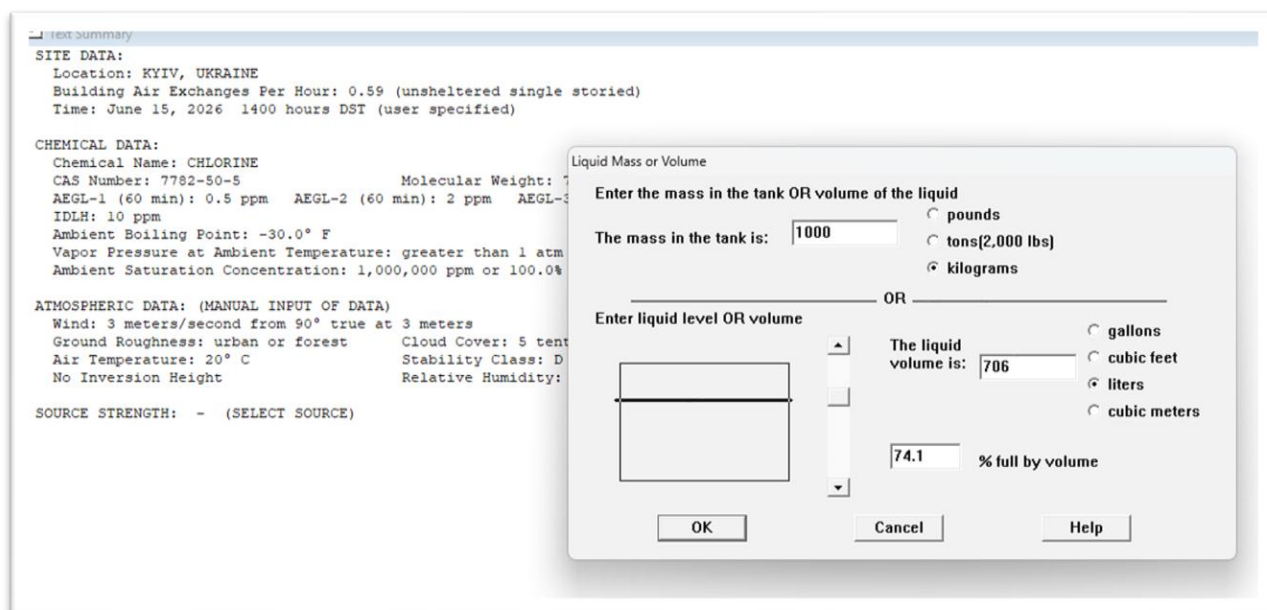
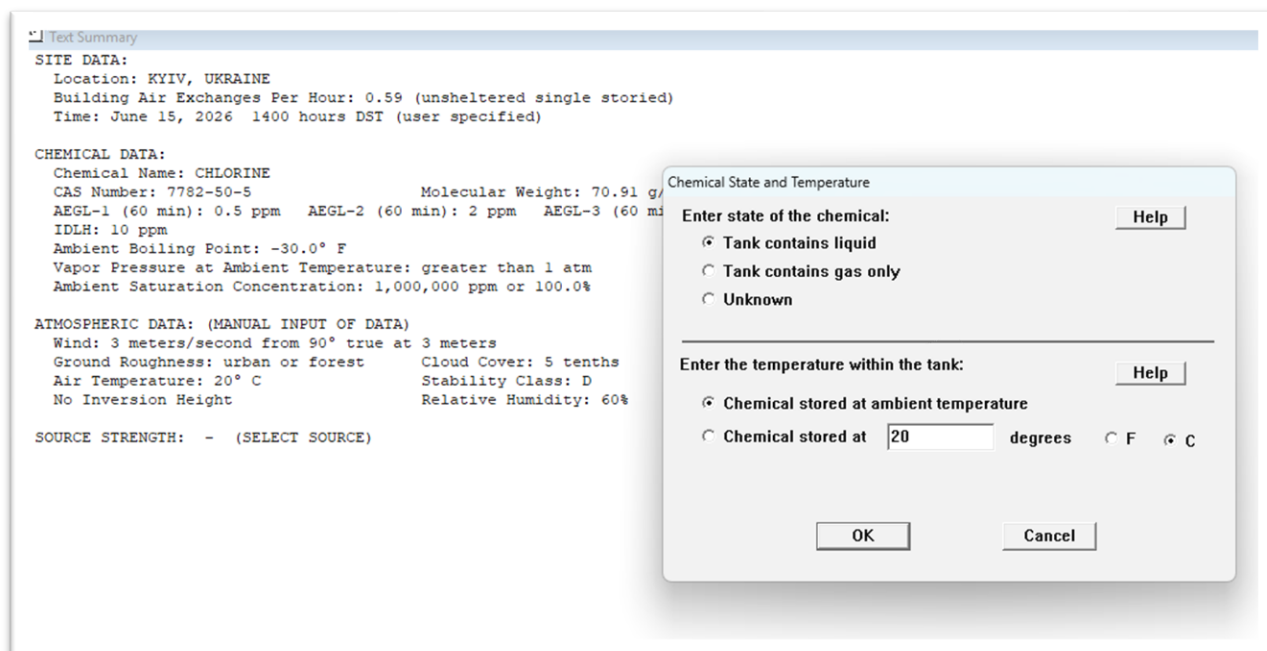
Перше вікно (Tank Type): обрати Cylindrical tank, Horizontal orientation. Ввести Tank Diameter — 0,76 м (стандартна ємність 1 тонна хлору), Tank Length — 2,1 м. Tank Volume — АЛОНА розрахує автоматично.



Скріншот 9: Вікно вибору типу ємності

Друге вікно (Tank Contents): обрати «Tank contains liquid» та «Chemical stored at ambient temperature» (якщо хлор зберігається під тиском при температурі

довкілля). Ввести Tank Mass або Volume — 1000 кг (1 тонна). Або ввести відсоток заповнення ємності.



Скріншот 10: Вікна вмісту ємності

Третє вікно (Leak Parameters): обрати тип отвору — Circular opening. Ввести Diameter — 5 cm (або 2 inches). Обрати розташування отвору — у верхній частині ємності (Hole is at the top of the tank) або ввести висоту отвору від дна. Обрати тип витoku — Leak through hole in tank.

Text Summary

SITE DATA:
 Location: KYIV, UKRAINE
 Building Air Exchanges Per Hour: 0.59 (unsheltered single storied)
 Time: June 15, 2026 1400 hours DST (user specified)

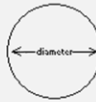
CHEMICAL DATA:
 Chemical Name: CHLORINE
 CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol
 AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 10 ppm
 IDLH: 10 ppm
 Ambient Boiling Point: -30.0° F
 Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
 Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
 Wind: 3 meters/second from 90° true at 3 meters
 Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 5 tenths
 Air Temperature: 20° C Stability Class: D
 No Inversion Height Relative Humidity: 60%

SOURCE STRENGTH: - (SELECT SOURCE)

Area and Type of Leak

Select the shape that best represents the shape of the opening through which the pollutant is exiting



☒ Circular opening



☐ Rectangular opening

Opening diameter:

☐ inches
☐ feet
☒ centimeters
☐ meters

Is leak through a hole or short pipe/valve?

☒ Hole
 ☐ Short pipe/valve

OK
Cancel
Help

Text Summary

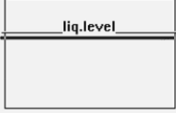
SITE DATA:
 Location: KYIV, UKRAINE
 Building Air Exchanges Per Hour: 0.59 (unsheltered single storied)
 Time: June 15, 2026 1400 hours DST (user specified)

CHEMICAL DATA:
 Chemical Name: CHLORINE
 CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol
 AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm
 IDLH: 10 ppm
 Ambient Boiling Point: -30.0° F
 Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
 Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
 Wind: 3 meters/second from 90° true at 3 meters
 Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 5 tenths
 Air Temperature: 20° C Stability Class: D
 No Inversion Height Relative Humidity: 60%

SOURCE STRENGTH: - (SELECT SOURCE)

Height of the Tank Opening



The bottom of the leak is:

☐ in ☐ ft ☒ cm ☐ m

☐ above the bottom of the tank

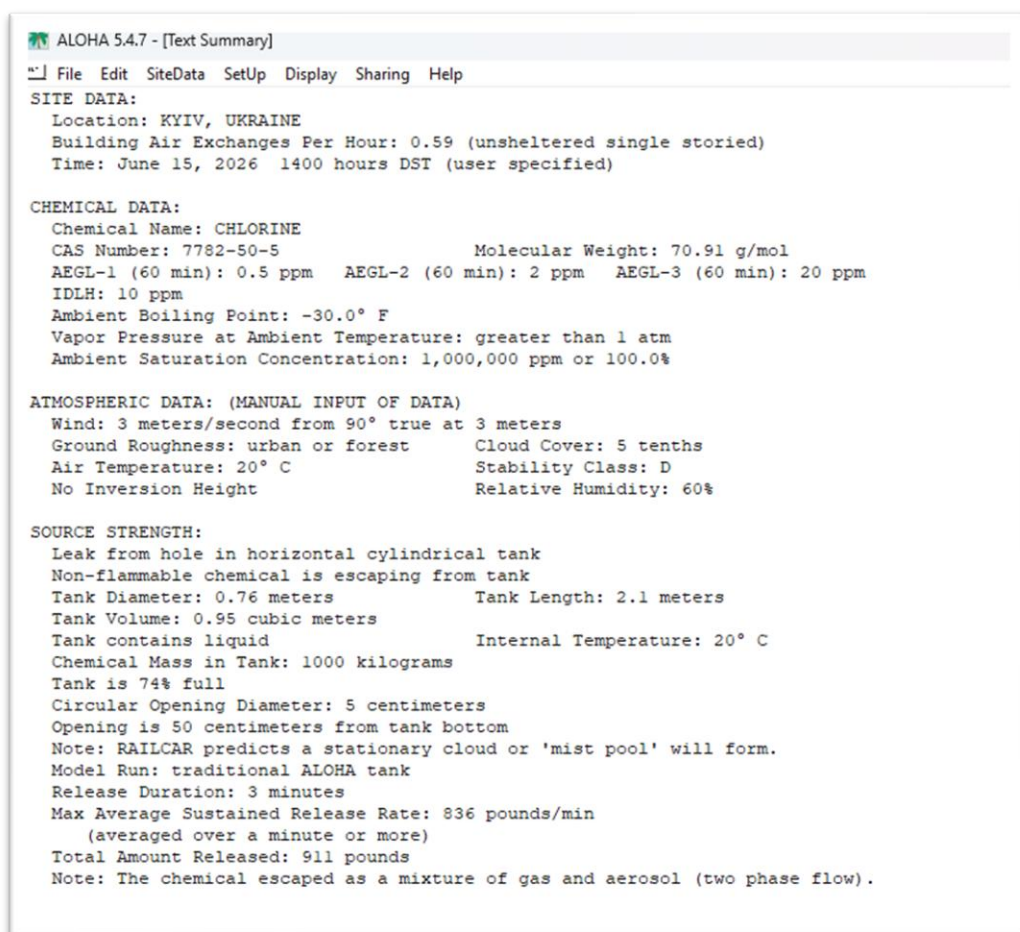
OR

% of the way to the top of the tank

OK
Cancel
Help

Скріншот 11: Вікна параметрів отвору

Після натискання ОК ALOHA проведе розрахунок швидкості витоку (Source Strength) і відобразить результати у текстовій області: максимальну швидкість витоку (Maximum Average Sustained Release Rate, lb/min або kg/min), тривалість витоку, загальну масу вивільненої речовини.



Скріншот 12: Текстова область з результатами Source Strength

Крок 6. Відображення зон загрози (Display → Threat Zone).

Обрати Display → Threat Zone. АЛОHA відобразить діалогове вікно для вибору рівнів небезпеки (Levels of Concern, LOC).

За замовчуванням для токсичних речовин пропонуються три рівні: червона зона — AEGL-3 (загроза для життя); помаранчева зона — AEGL-2 (серйозні ефекти); жовта зона — AEGL-1 (дискомфорт). Час впливу встановлюється автоматично (60 хвилин).

Можна змінити LOC на ERPG або IDLH через кнопку «Select LOC».

Toxic Level of Concern

Select Toxic Level of Concern:

Red Threat Zone
 LOC: AEGL-3 (60 min): 20 ppm

Orange Threat Zone
 LOC: AEGL-2 (60 min): 2 ppm

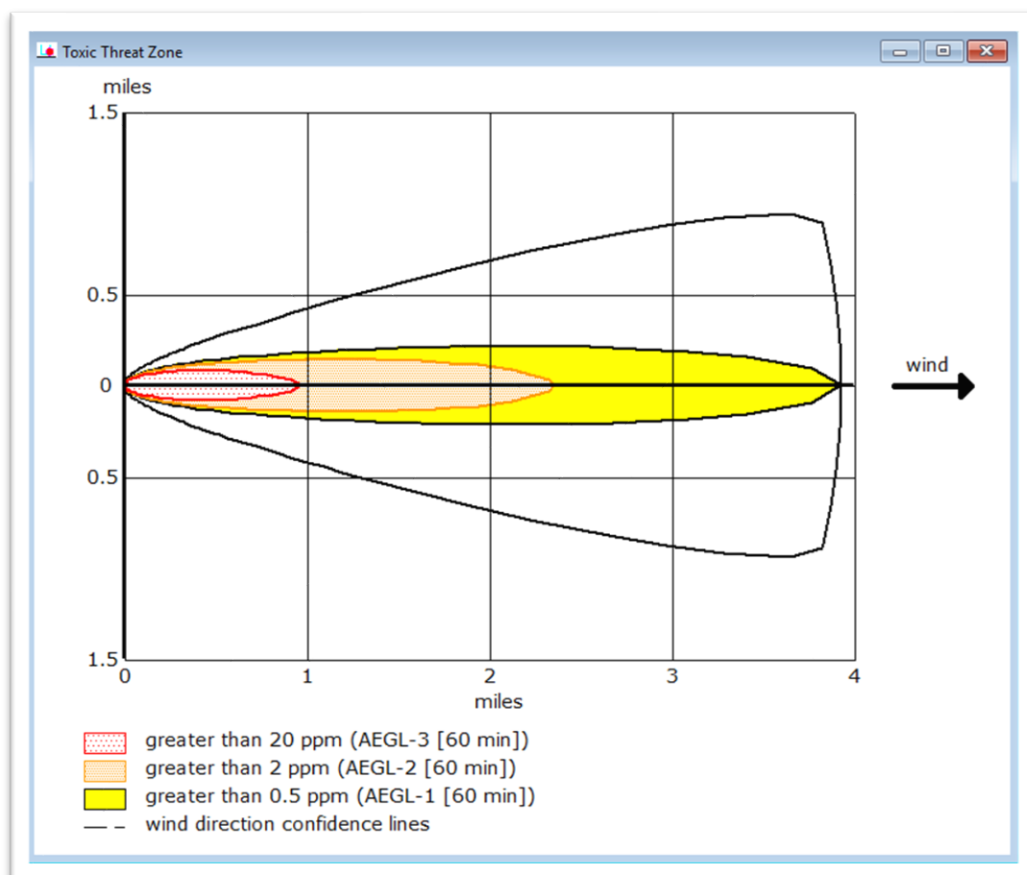
Yellow Threat Zone
 LOC: AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm

Show wind direction confidence lines:
☒ only for longest threat zone
☐ for each threat zone

OK Cancel Help

Скріншот 13: Діалогове вікно вибору LOC

Після натискання ОК ALOHA побудує графік зон загрози (Threat Zone Plot) — «відбиток» у формі витягнутого еліпса або сектора, орієнтованого за напрямком вітру. Червона зона — найближча до джерела, жовта — найдальша.



Скріншот 14: Threat Zone Plot — зони загрози з трьома кольорами

На графіку зон загрози відображаються: відстань від джерела (вісь X), ширина зони (вісь Y), межі трьох зон різними кольорами, напрямок вітру (стрілка), масштабна лінійка.

Крок 7. Аналіз концентрації у конкретній точці (Display → Threat at Point).

Для визначення концентрації у конкретній точці (наприклад, на відстані 500 м за вітром) обрати Display → Threat at Point. Ввести координати точки (відстань та напрямок від джерела). ALOHA побудує графік зміни концентрації у часі для цієї точки, що дозволяє визначити максимальну концентрацію та тривалість перевищення рівнів LOC.

Concentration Location

Specify the location at which you want to evaluate the concentration over time.

☒ Relative Coordinates (Downwind, Crosswind)

☐ Fixed Coordinates (East-West, North-South)

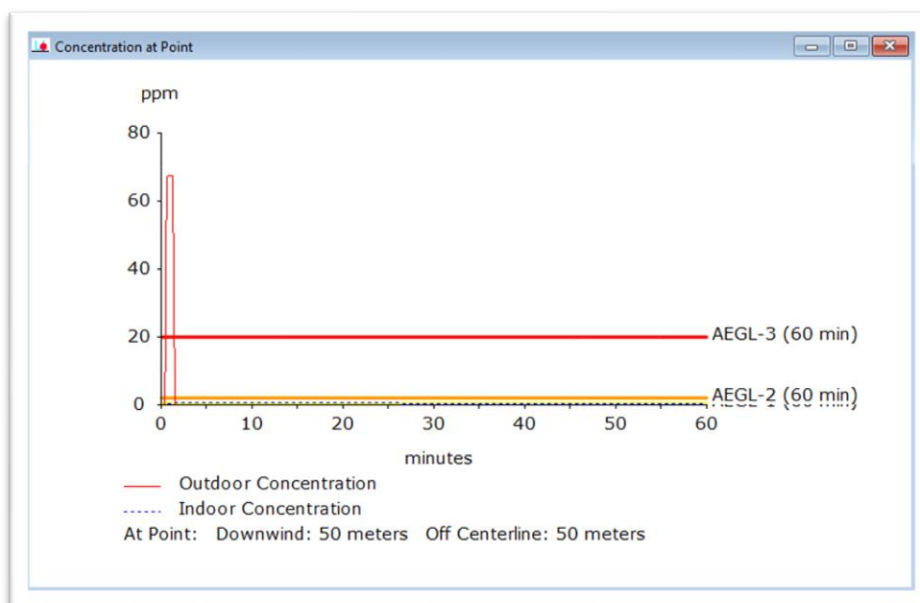
Input X, the downwind distance from the source and Y, the perpendicular distance from the downwind axis.

Input X, the downwind distance: 50

Input Y, the crosswind distance: 50

☐ feet
☐ yards
☐ miles
☒ meters
☐ kilometers

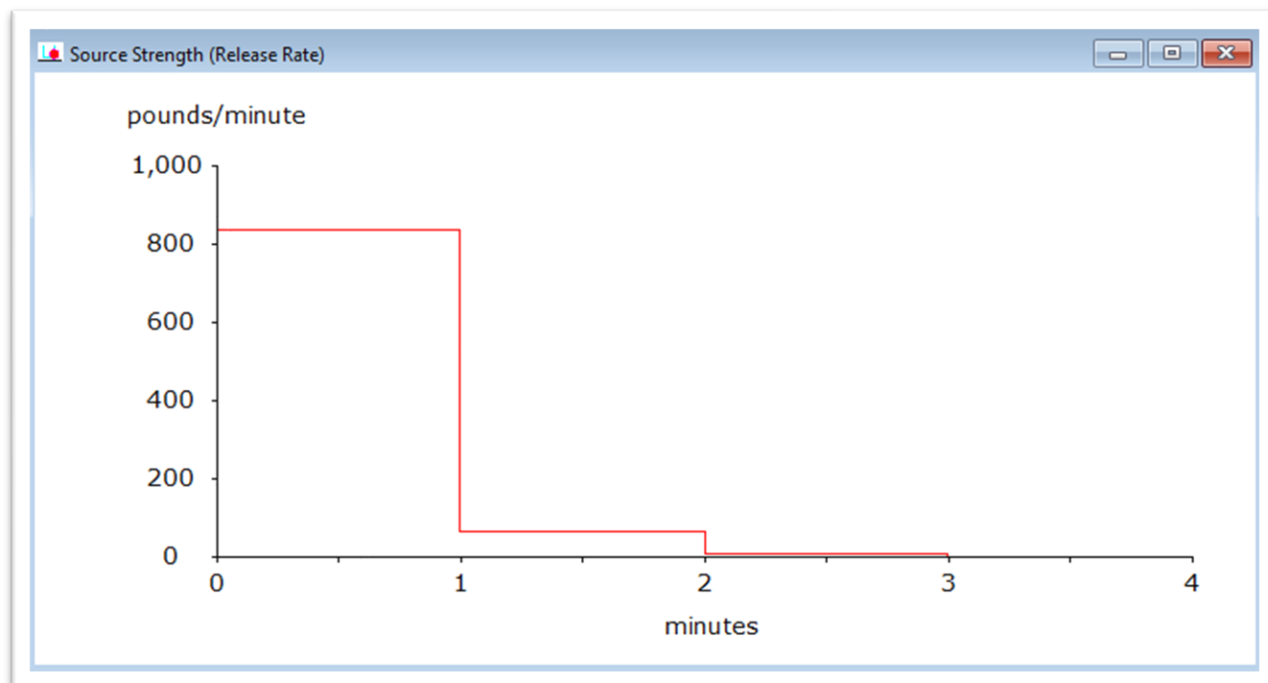
OK Cancel Help



Скріншот 15: Графік концентрації у часі для заданої точки

Крок 8. Перегляд графіка швидкості витоку (Display → Source Strength).

Display → Source Strength відображає графік зміни швидкості витоку хлору у часі. Цей графік показує, як швидко речовина вивільняється з ємності і коли витік припиняється (ємність спорожнюється або тиск вирівнюється).



Скріншот 16: Графік Source Strength

Крок 9. Експорт результатів.

Результати можна: скопіювати текстовий звіт (Edit → Copy Text Summary) для вставки у документ; експортувати зони загрози у формат KML (Sharing → KML Export) для візуалізації на карті у Google Earth; зберегти скріншот графіка зон загрози.

3.4. Інтерпретація результатів

Результати моделювання у ALOHA для сценарію витоку хлору на водоочисній станції у м. Київ подано у Text Summary програми. Розглянемо кожний блок результатів.

```
ALOHA 5.4.7 - [Text Summary]
File Edit SiteData SetUp Display Sharing Help
SITE DATA:
Location: KYIV, UKRAINE
Building Air Exchanges Per Hour: 0.59 (unsheltered single storied)
Time: June 15, 2026 1400 hours DST (user specified)

CHEMICAL DATA:
Chemical Name: CHLORINE
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm
IDLH: 10 ppm
Ambient Boiling Point: -30.0° F
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
Wind: 3 meters/second from 90° true at 3 meters
Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 20° C Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 60%

SOURCE STRENGTH:
Leak from hole in horizontal cylindrical tank
Non-flammable chemical is escaping from tank
Tank Diameter: 0.76 meters Tank Length: 2.1 meters
Tank Volume: 0.95 cubic meters
Tank contains liquid Internal Temperature: 20° C
Chemical Mass in Tank: 1000 kilograms
Tank is 74% full
Circular Opening Diameter: 5 centimeters
Opening is 50 centimeters from tank bottom
Note: RAILCAR predicts a stationary cloud or 'mist pool' will form.
Model Run: traditional ALOHA tank
Release Duration: 3 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 836 pounds/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 911 pounds
Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:
Model Run: Heavy Gas
Red : 1698 yards --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
Orange: 2.4 miles --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
Yellow: 3.9 miles --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])

THREAT AT POINT:
Concentration Estimates at the point:
Downwind: 50 meters Off Centerline: 50 meters
Max Concentration:
Outdoor: 67.2 ppm
Indoor: 0.618 ppm
```

Скріншот 17: Результати моделювання у ALOHA для сценарію витоку хлору на водоочисній станції у м. Київ, поданого у Text Summary

Хімічні дані (Chemical Data). ALOHA автоматично завантажує з вбудованої бази параметри хлору: молекулярна маса 70,91 г/моль, температура кипіння - 30,0°F (-34,4°C), тиск насиченої пари при температурі доквілля (20°C) перевищує 1 атмосферу, насичуюча концентрація — 1 000 000 ppm (100%). Остання цифра означає, що хлор при 20°C перебуває повністю у газовій фазі — він зберігається у рідкому стані лише під тиском. Рівні небезпеки для 60-хвилинного впливу: AEGL-1 = 0,5 ppm, AEGL-2 = 2 ppm, AEGL-3 = 20 ppm. Також наведено IDLH = 10 ppm.

Параметри джерела (Source Strength). Це найбільш інформативний блок. ALOHA розрахувала:

— тривалість витоку: **3 хвилини** — надзвичайно короткий час, що пояснюється миттєвим випаровуванням (flash boiling) зрідженого хлору при розгерметизації. Оскільки температура кипіння хлору (-34°C) значно нижча за температуру довкілля (20°C), при утворенні отвору рідкий хлор, що перебуває під тиском, вибухово переходить у газову фазу;

— максимальна швидкість витоку: **836 фунтів/хвилину (379 кг/хв)** — колосальна інтенсивність вивільнення речовини. За три хвилини ємність практично повністю спорожнюється;

— загальна маса вивільненого хлору: **911 фунтів (413 кг)** — це менше, ніж початкові 1000 кг, оскільки частина хлору залишилася в ємності (тиск вирівнявся до того, як уся рідина встигла випаруватися);

— форма витоку: **двофазний потік (two phase flow)** — суміш газу та крапель аерозолі, що є типовим для витоку зріджених газів. ALOHA також зазначає, що модель RAILCAR прогнозує утворення стаціонарної хмари або «туманної калюжі» (mist pool) поблизу джерела;

— модель розсіювання: **Heavy Gas** — ALOHA автоматично обрала модель важкого газу (DEGADIS), оскільки хлор у 2,5 рази важчий за повітря і стелиться по поверхні землі, а не розсіюється вгору.

Зони загрози (Threat Zone). ALOHA визначила три зони:

— **червона зона (AEGL-3 = 20 ppm): 1698 ярдів ($1553\text{ м} \approx 1,6\text{ км}$)** — у цій зоні концентрація хлору може перевищити 20 ppm, що створює безпосередню загрозу для життя. Перебування без ізолюючих засобів захисту може призвести до смертельного ураження;

— **помаранчева зона (AEGL-2 = 2 ppm): 2,4 милі ($3862\text{ м} \approx 3,9\text{ км}$)** — у цій зоні можливі серйозні незворотні ефекти для здоров'я та втрата здатності до самостійної евакуації. Необхідна негайна евакуація або укриття у герметизованих приміщеннях;

— **жовта зона (AEGL-1 = 0,5 ppm): 3,9 милі ($6276\text{ м} \approx 6,3\text{ км}$)** — у цій зоні населення може відчувати дискомфорт: подразнення очей, горла, кашель. Ефекти зворотні після припинення впливу. Рекомендація — залишатися в приміщеннях із закритими вікнами.

Оцінка концентрації у конкретній точці (Threat at Point). Для точки на відстані 50 м за вітром та 50 м від осьової лінії хмари ALOHA прогнозує максимальну концентрацію на відкритому повітрі 67,2 ppm, а всередині

будівлі — лише 0,618 ppm. Це ілюструє захисний ефект укриття у приміщенні: концентрація всередині одноповерхової будівлі більш ніж у 100 разів нижча, ніж зовні. Однак 67,2 ppm на відкритому повітрі у 3,4 рази перевищує AEGL-3 (20 ppm), тобто на цій відстані від джерела перебування на відкритому повітрі є смертельно небезпечним.

Інтерпретація для прийняття рішень:

У радіусі 1,6 км від водоочисної станції — зона смертельної загрози. Негайна евакуація всього населення. Рятувальники — виключно в ізолюючих засобах захисту (ізолюючі протигази, герметичні костюми). Будь-які роботи з ліквідації джерела витоку — лише в ізолюючих засобах.

У радіусі 1,6–3,9 км — зона серйозного ураження. Негайна евакуація або, якщо евакуація неможлива, — укриття у приміщеннях із максимальною герметизацією (закрити вікна, двері, вимкнути вентиляцію, закрити щілини вологою тканиною). Як показує результат Threat at Point, навіть проста будівля знижує концентрацію у понад 100 разів.

У радіусі 3,9–6,3 км — зона дискомфорту. Рекомендація населенню — залишатися вдома, закрити вікна та двері, слідувати за повідомленнями.

За межами 6,3 км — безпечна зона.

Порівняння з ручним розрахунком (Розділ 1). Зверніть увагу, що зони загрози, отримані у ALOHA, значно більші за ті, що можна було б оцінити вручну за спрощеними методиками. Це пояснюється тим, що ALOHA враховує: двофазний характер витоку (flash boiling), поведінку хлору як важкого газу (стелиться по землі, повільно розсіюється вертикально), надзвичайно високу швидкість витоку (379 кг/хв — увесь вміст ємності вивільняється за 3 хвилини). Саме тому комп'ютерне моделювання є незамінним інструментом для реалістичної оцінки наслідків хімічних аварій.

3.5. Обмеження ALOHA

При використанні результатів ALOHA необхідно враховувати обмеження програми:

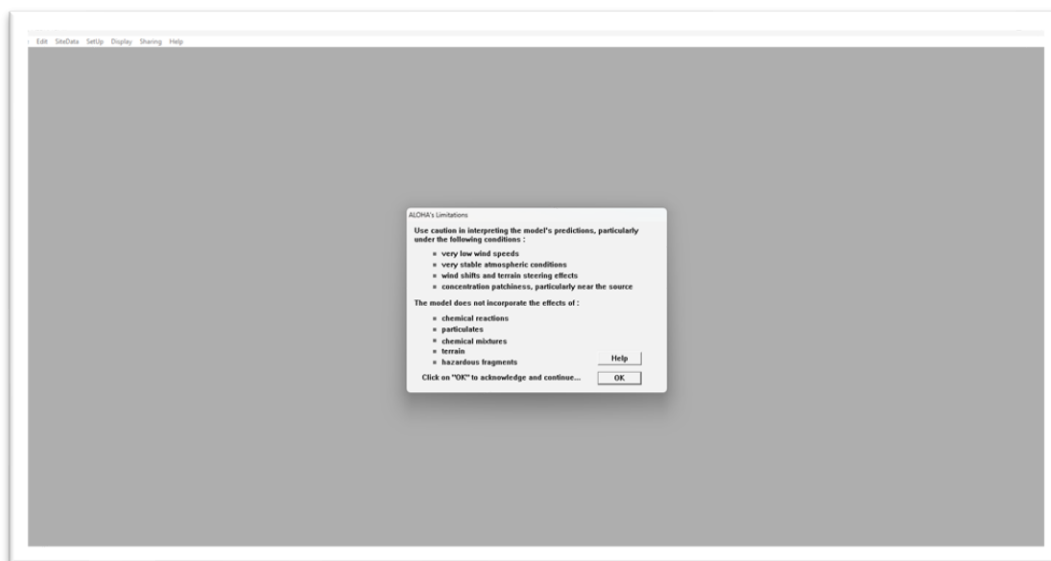
ALOHA не враховує зміну напрямку та швидкості вітру з часом — моделювання ведеться для постійних Метеоумовиумов. У реальності вітер може змінюватися, і зона ураження переміщуватиметься.

ALOHA не моделює поширення на відстань більше 10 км — для великих витоків та стійких Метеоумовиумов реальна зона може бути більшою.

ALOHA не враховує складний рельєф — моделювання ведеться для рівної місцевості. Яри, пагорби, будівлі можуть суттєво впливати на поширення хмари.

ALOHA не моделює витoki тривалістю більше 1 години — для тривалих витоків результати є наближеними.

ALOHA не враховує хімічних реакцій у хмарі — наприклад, реакцію хлору з вологою повітря з утворенням HCl та HOCl.



Скріншот 18: Вікно ALOHA після запуску — із обмеженнями використання програми

Незважаючи на ці обмеження, ALOHA залишається найбільш поширеним інструментом для оперативної оцінки при хімічних аваріях завдяки простоті використання, швидкості розрахунку та безкоштовності.

3.6. Приклад виконання завдання

Умова. На промисловому об'єкті поблизу м. Дніпро (координати: 48.46°N, 35.05°E) о 10:00 ранку 15 березня стався витік аміаку зі сферичної ємності об'ємом 50 м³ (заповнення 80%). Утворився отвір діаметром 10 см у нижній частині ємності. Метеоумови: вітер з південного заходу (225°), швидкість 5 м/с, хмарність 70%, температура 5°C, вологість 75%. Місцевість — промислова зона. Визначити зони загрози за рівнями AEGL (1 година).

Розв'язання у ALOHA (покрокове):

1. SiteData → Location: ввести координати 48.46°N, 35.05°E.
2. SiteData → Date & Time: ввести 3/15/2025, 10:00.
3. SetUp → Chemical: обрати AMMONIA (або AMMONIA, ANHYDROUS).

4. SetUp → Atmospheric → User Input: Wind Speed = 5 м/с (11,2 mph); Wind Direction = 225°; Ground Roughness = Open Country (промислова зона без щільної забудови); Cloud Cover = 7 (70%); Temperature = 5°C (41°F); Humidity = 75%; Stability Class = D (розрахується автоматично).
5. SetUp → Source → Tank: Spherical tank; Diameter = відповідний до об'єму 50 м³ (≈ 4,57 м); Tank contains liquid, stored at ambient temperature; Mass = відповідна до 80% заповнення (для рідкого аміаку при 5°C: щільність ≈ 640 кг/м³, обсяг рідини = 40 м³, маса ≈ 25 600 кг); Circular opening, Diameter = 10 cm; Hole is at the bottom.
6. Display → Threat Zone: LOC = AEGL (60 min).

Очікувані результати (орієнтовно): — червона зона (AEGL-3, аміак 1 год = 1100 мг/м³): ~300–500 м; — помаранчева зона (AEGL-2, 160 мг/м³): ~1500–2500 м; — жовта зона (AEGL-1, 30 мг/м³): ~4000–6000 м.

Оформлення результатів: до звіту додаються скріншоти кожного кроку, скріншот Threat Zone Plot, текстовий звіт Source Strength та висновок з рекомендаціями щодо евакуації.

3.7. Моделювання вибуху паро-газової хмари (VCE) у ALOHA

3.7.1. Фізика вибуху паро-газової хмари

Вибух паро-газової хмари (Vapor Cloud Explosion, VCE) — один із найбільш руйнівних сценаріїв аварій на хімічних та нафтохімічних виробництвах. Він виникає, коли значна маса горючого газу або пари (пропан, бутан, етилен, водень, бензин тощо) витікає з обладнання, змішується з повітрям, утворюючи вибухонебезпечну хмару, і потім ця хмара запалюється від джерела іскри, нагрітої поверхні або відкритого полум'я.

На відміну від детонації конденсованих вибухових речовин (TNT, гексоген), де вибух відбувається миттєво у всій масі речовини зі надзвуковою швидкістю, при VCE вибуховий процес у більшості випадків є дефлаграцією — фронт полум'я поширюється зі швидкістю від кількох метрів на секунду до кількох сотень метрів на секунду (але нижче швидкості звуку). Лише у виняткових випадках (високореактивні речовини, сильна загроможненість, обмежений простір) дефлаграція може перейти у детонацію зі надзвуковою швидкістю фронту.

Ключовий фактор — загроможненість простору. Потужність вибуху паро-газової хмари визначається не стільки масою горючої речовини, скільки умовами, в яких відбувається горіння. У відкритому незагромождженому просторі (поле, паркова зона) хмара горючого газу при запалюванні іскрою просто згоряє без утворення значної ударної хвилі — відбувається так званий «спалах» (flash fire). Люди, що опинилися всередині хмари, зазнають

теплого ураження (опіки), але за межами хмари руйнувань практично не відбувається.

Ситуація кардинально змінюється, якщо хмара поширюється через загромождений простір — густу мережу трубопроводів, апаратів, металоконструкцій, стелажів. Перешкоди створюють турбулентність у потоці газу, що різко збільшує площу поверхні контакту полум'я з незгорілою сумішшю та прискорює горіння. Швидкість фронту полум'я зростає від кількох метрів на секунду до десятків та сотень метрів на секунду, і виникає потужна ударна хвиля, здатна руйнувати будівлі на значній відстані. Саме цим пояснюється, чому вибухи на промислових майданчиках (де є густе обладнання) є набагато потужнішими, ніж на відкритій території, навіть при однаковій масі горючого газу.

Методи оцінки наслідків VCE. Для прогнозування надлишкового тиску ударної хвилі та радіусів зон ураження розроблено кілька методів різного рівня складності.

Найпростішим є **метод TNT-еквівалентності**: енергію вибуху хмари перераховують у еквівалентну масу тротилу (TNT) і використовують відомі залежності надлишкового тиску від відстані для тротилових вибухів. Тротиловий еквівалент розраховується за формулою:

$$W(\text{TNT}) = \eta \times m \times \Delta H_c / \Delta H_{\text{TNT}}$$

де $W(\text{TNT})$ — маса тротилового еквіваленту (кг); η — ефективність вибуху (безрозмірна, зазвичай 0,01–0,10); m — маса горючого газу у хмарі (кг); ΔH_c — теплота згоряння горючого газу (кДж/кг); ΔH_{TNT} — теплота вибуху TNT (≈ 4680 кДж/кг).

Наприклад, для хмари пропану масою 10000 кг при ефективності 5%: $W(\text{TNT}) = 0,05 \times 10000 \times 46350 / 4680 \approx 5000$ кг TNT. Однак метод TNT-еквівалентності має суттєвий недолік: він передбачає точковий вибух, тоді як реальна парогазова хмара має великі розміри. У ближній зоні (всередині хмари) метод завищує тиск, а у дальній — дає прийнятні результати. Крім того, ефективність вибуху η є дуже невизначеним параметром і може змінюватися від 1% до 20% залежно від умов.

Більш точним є **мультиенергетичний метод (Multi-Energy, TNO)**, розроблений Нідерландською організацією прикладних наукових досліджень (TNO). Він розглядає хмару не як точкове джерело, а як набір окремих зон, кожна з яких вибухає з інтенсивністю, що визначається ступенем загроможденості саме цієї зони.

Найбільш сучасним є **метод Бейкера-Стрехлоу-Тенга (Baker-Strehlow-Tang, BST)**, який визначає швидкість полум'я (а отже, і надлишковий тиск) на основі трьох фізичних параметрів: ступеня загроможденості простору (congestion), ступеня обмеженості простору (confinement) та реактивності палива (fuel reactivity). Саме цей метод реалізовано у програмі ALOHA (версія 5.4.7), де користувач обирає тип запалювання (іскра/полум'я або детонація) та ступінь загроможденості (congested або uncongested), а програма на основі цих параметрів розраховує швидкість полум'я та надлишковий тиск ударної хвилі.

Рівні надлишкового тиску та їхні наслідки. Радіуси зон ураження при VCE визначаються за надлишковим тиском ударної хвилі — різницею між максимальним тиском у фронті хвилі та нормальним атмосферним тиском:

Надлишковий тиск	Ефекти
> 83 кПа (12 psi)	Повне руйнування залізобетонних конструкцій
55 кПа (8 psi)	Повне руйнування цегляних будівель, загибель людей
35 кПа (5 psi)	Серйозне пошкодження промислових будівель
24 кПа (3,5 psi)	Руйнування панельних стін, серйозні травми
17 кПа (2,5 psi)	Часткове руйнування будинків
6,9 кПа (1 psi)	Руйнування вікон, легкі травми від осколків скла
3,4 кПа (0,5 psi)	Часткове руйнування скла, безпечна межа для людей

Принципова різниця між VCE та токсичною хмарою. Зони ураження при вибуху мають майже кругову форму (ударна хвиля поширюється у всіх напрямках від центру), на відміну від витягнутих зон токсичних хмар, орієнтованих за вітром. Зони VCE зазвичай менші за площею, ніж зони токсичного впливу тієї самої аварії, але наслідки у ближній зоні значно тяжчі — миттєве руйнування будівель та масова загибель людей, тоді як при токсичному впливі є час на евакуацію та укриття.

3.7.2. Моделювання VCE у ALOHA: особливості

ALOHA моделює VCE для горючих газів та летючих рідин. При виборі горючої речовини (пропан, бутан, етилен, водень, бензин тощо) програма автоматично пропонує можливість моделювання не лише токсичної хмари, а й вибуху або пожежі.

Принципова відмінність від моделювання токсичних хмар: при моделюванні VCE рівнями небезпеки (LOC) є не концентрації токсиканту (AEGL), а **надлишковий тиск ударної хвилі (overpressure)**. ALOHA пропонує три стандартних рівні:

— червона зона: **8,0 psi (55,2 кПа)** — повне руйнування будівель, загибель людей від ударної хвилі та під завалами;

— помаранчева зона: **3,5 psi (24,1 кПа)** — серйозне пошкодження будівель, важкі травми;

— жовта зона: **1,0 psi (6,9 кПа)** — руйнування скла, порізи від осколків, легкі травми.

Ці рівні можна змінити відповідно до завдання (наприклад, встановити додатковий рівень 0,5 psi для визначення межі безпечної зони).

3.7.3. Покрокова інструкція: моделювання вибуху хмари пропану

Сценарій. На газонаповнювальній станції поблизу м. Дніпро (48.28°N, 35.03°E, висота 68 м) стався витік зрідженого нафтового газу (ЗНГ, прийняти як пропан) із горизонтальної циліндричної ємності об'ємом 50 м³ (заповнення 85%). У нижній частині ємності (5 см від дна) утворився отвір діаметром 8 см. Метеоумови: вітер з півночі (360°), швидкість 4 м/с, хмарність 40%, температура 25°C, вологість 50%. Місцевість — міська. Час аварії — 11:00, 10 серпня 2025 р. Через 10 хвилин після початку витоку хмари пропану, що утворилася, загорілася від іскри.

Крок 1. Введення місцезнаходження (SiteData → Location). Ввести: Location — Dnipro; Not in U.S.; Country — Ukraine; Offset to GMT — -2; Daylight Savings Time; Latitude 48°28'N; Longitude 35°03'E; Elevation — 68 m.

Крок 2. Дата та час (SiteData → Date & Time). Set constant time: 10.08.2025, 11:00.

Крок 3. Вибір хімічної речовини (SetUp → Chemical). Обрати PROPANE у списку Pure Chemicals. ALOHA завантажить параметри: молекулярна маса 44,10 г/моль, температура кипіння -44,1°F, LEL (нижня концентраційна межа вибуховості) = 2100 ppm, UEL (верхня межа) = 95000 ppm. ALOHA повідомить, що пропан є горючою речовиною і може бути змодельований як вибух або пожежа.

Крок 4. Метеоумови (SetUp → Atmospheric → User Input). Перше вікно: Wind Speed — 4 м/с; Wind Direction — 360°; Measurement Height — 3 м (person); Ground Roughness — Urban or Forest. Друге вікно: Cloud Cover — 4 (40%); Air Temperature — 25°C; Humidity — 50%; Inversion — No Inversion. ALOHA визначить клас стійкості автоматично.

Крок 5. Джерело витоку (SetUp → Source → Tank). Tank Type: Cylindrical, Horizontal. Ввести розміри ємності (діаметр ≈ 2,5 м, довжина ≈ 10,2 м для об'єму 50 м³) або безпосередньо Tank Volume = 50 м³. Tank contains liquid; Chemical stored at ambient temperature. Tank Mass: для ЗНГ (пропану) при

заповненні 85% об'єму та щільності рідкого пропану $\approx 490 \text{ кг/м}^3$ при 25°C , маса $= 50 \times 0,85 \times 490 \approx 20\,825 \text{ кг}$. Ввести $\approx 20\,800 \text{ кг}$.

Після введення параметрів ємності ALOHA відобразить вікно Type of Tank Failure із трьома варіантами сценарію. Для моделювання вибуху паро-газової хмари (VCE) обрати перший варіант — Leaking tank, chemical is not burning as it escapes into the atmosphere (витік без загоряння, речовина виходить в атмосферу). Після натискання ОК ввести параметри отвору (діаметр, розташування)

Circular opening, Diameter = 8 cm. Hole is at the bottom.

Потім ввести висоту утвореного отвору – 5 см.

ALOHA розрахує Source Strength — швидкість витоку пропану та загальну масу, що вивільнилася.

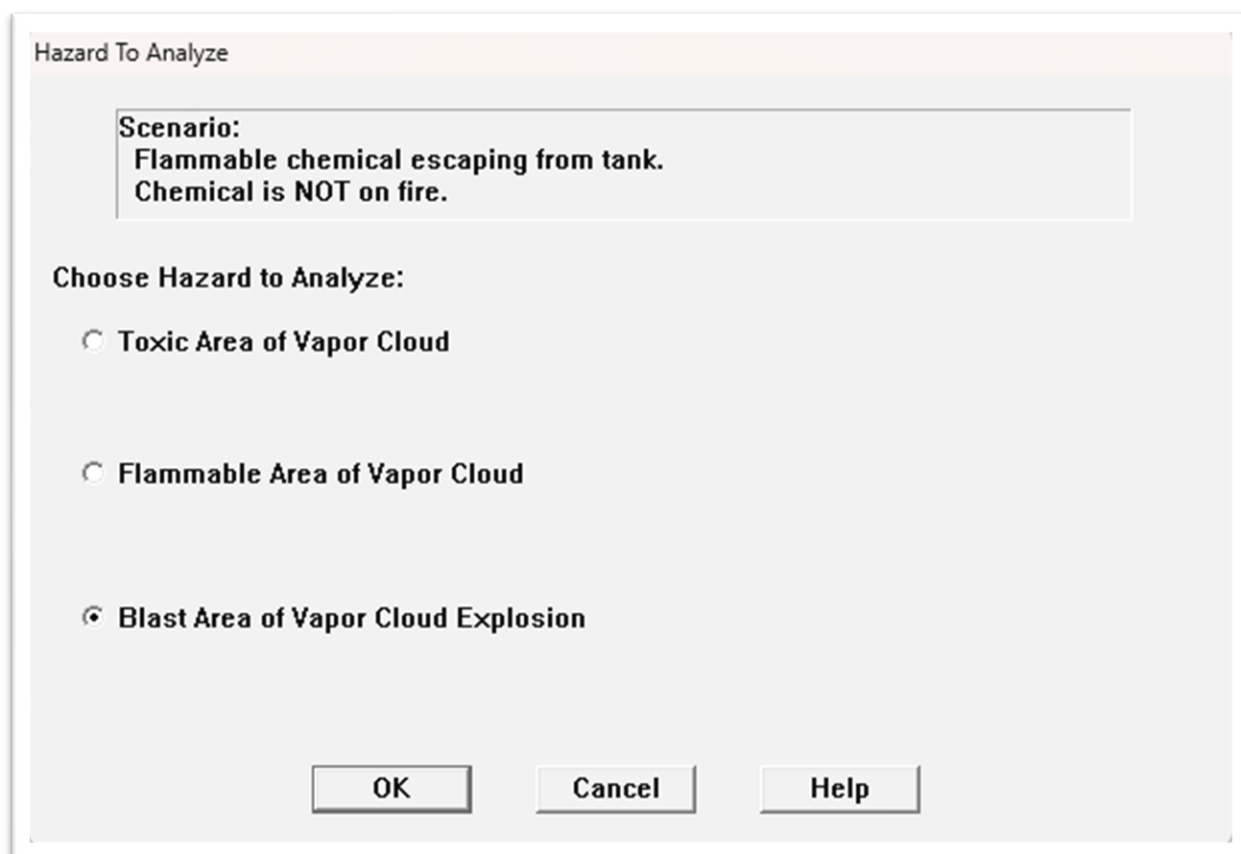
Крок 6. Вибір типу небезпеки (Display → Threat Zone).

Це ключовий крок, що відрізняється від моделювання токсичних хмар. При виборі Display → Threat Zone для горючої речовини ALOHA відкриє вікно вибору типу небезпеки (Threat Type), де пропонуються кілька варіантів:

Toxic Area of Vapor Cloud — зона токсичного впливу хмари. Обирається, коли горюча речовина є одночасно токсичною (наприклад, сірководень, аміак). ALOHA побудує зони за рівнями AEGL/ERPG, як у випадку звичайного моделювання токсичної хмари (підрозділ 3.3). Для пропану цей варіант не є актуальним, оскільки пропан практично нетоксичний (він діє лише як асфіксант при дуже високих концентраціях, що витісняють кисень).

Flammable Area of Vapor Cloud — зона, де концентрація пропану знаходиться між LEL та UEL (тобто де хмара є вибухонебезпечною). LOC задаються як відсотки від LEL: червона — 100% LEL (60% LEL за замовчуванням — зона, де вибух є найбільш імовірним), помаранчева — 60% LEL, жовта — 10% LEL (зона, де можливе загоряння при наявності джерела запалювання).

Blast Force of Vapor Cloud Explosion (Overpressure) — надлишковий тиск ударної хвилі при вибуху хмари. Саме цей варіант потрібен для визначення зон руйнування. Обрати його.



Скріншот 19: Вікно вибору типу небезпеки (Threat Type) з виділеним Overpressure

Після вибору «Blast Area of Vapor Cloud Explosion» з'являється вікно «**Vapor Cloud Explosion Parameters**» з трьома блоками параметрів.

Блок 1. Time of vapor cloud ignition (Час запалювання хмари).

unknown (show composite threat zone from all possible ignition times) — час запалювання невідомий. ALOHA розрахує «композитну» зону загрози, що об'єднує результати для всіх можливих моментів запалювання — від раннього (хмара ще мала) до пізнього (хмара досягла максимального розміру). Це найбільш консервативний варіант, що охоплює найгірший можливий випадок. **Обираємо цей варіант для нашого сценарію**, оскільки у більшості реальних аварій точний час запалювання невідомий.

known, ignition time is: — час запалювання відомий. Дозволяє ввести конкретний час (у хвилинах після початку витоку). ALOHA розрахує масу хмари на цей момент і побудує зону лише для цього сценарію. Наприклад, якщо ввести 10 хвилин, ALOHA визначить, скільки пропану витекло та утворило хмару за 10 хвилин, і розрахує вибух саме цієї маси. Цей варіант обирається, коли за умовою задачі час запалювання відомий.

Блок 2. Type of vapor cloud ignition (Тип запалювання).

ignited by spark or flame — запалювання іскрою або полум'ям. Це найтипівіший сценарій для промислових аварій: хмара загоряється від електричної іскри, гарячої поверхні, відкритого полум'я, удару металу об метал тощо. При цьому відбувається дефлаграція — фронт полум'я поширюється зі швидкістю нижче швидкості звуку. Надлишковий тиск ударної хвилі помірний. **Обираємо цей варіант**, оскільки він відповідає переважній більшості промислових аварій.

ignited by detonation — запалювання детонацією (вибуховим пристроєм або перехід дефлаграції у детонацію). При детонації фронт полум'я поширюється зі надзвуковою швидкістю, і надлишковий тиск значно вищий. Цей сценарій зустрічається рідко (лише для високореактивних речовин у загромодженому просторі або при навмисному ініціюванні) і дає набагато більші зони ураження.

Блок 3. Level of congestion (Ступінь загроможденості простору).

Це ключовий параметр, що замінює ручне введення yield. Ступінь загроможденості простору визначає, наскільки інтенсивно прискорюється фронт полум'я, а отже — наскільки потужним буде вибух.

congested, difficult to walk through (e.g. pipe rack, dense forest) — загромоджений простір, через який важко пройти. Приклади: технологічна установка НПЗ із густою мережею трубопроводів, апаратів та конструкцій; компресорна станція; щільна промислова забудова. При проходженні фронту полум'я через перешкоди виникає турбулентність, яка різко прискорює горіння та підвищує тиск ударної хвилі. Обирається для сценаріїв на промислових об'єктах із щільним обладнанням.

uncongested, easy to walk through (e.g. residential neighborhood) — незагромоджений простір, через який легко пройти. Приклади: відкрита територія, житловий район, паркова зона, територія газонаповнювальної станції (де обладнання розміщене з великими проміжками). Полум'я поширюється без значного прискорення, і надлишковий тиск нижчий. **Обираємо цей варіант для нашого сценарію**, оскільки газонаповнювальна станція є відносно відкритою територією.

Vapor Cloud Explosion Parameters

Time of vapor cloud ignition: Help

☒ unknown (show composite threat zone from all possible ignition times)

☐ known, ignition time is :

Type of vapor cloud ignition: Help

☒ ignited by spark or flame

☐ ignited by detonation

Level of congestion : Help
(in the flammable part of the vapor cloud)

☐ congested, difficult to walk through (e.g. pipe rack, dense forest)

☒ uncongested, easy to walk through (e.g. residential neighborhood)

OK Cancel

Скріншот 20: Вікно вибору фізичних параметрів вибуху

Після натискання ОК з'явиться наступне вікно з вибором рівнів LOC за надлишковим тиском.

Level of Concern: за замовчуванням ALOHA пропонує три рівні — 8,0 psi (червона), 3,5 psi (помаранчева), 1,0 psi (жовта). Залишити за замовчуванням або змінити відповідно до завдання.

Нижня частина вікна містить параметр «**Show wind direction confidence lines**» — лінії довірчого інтервалу напрямку вітру. Це важливий параметр, що відображає невизначеність реального напрямку поширення хмари.

only for longest threat zone — лінії довіри відображаються лише для найбільшої (жовтої) зони. Це варіант за замовчуванням, він дає чистіший та зрозуміліший графік. **Обираємо цей варіант** для стандартних завдань.

for each threat zone — *лінії довіри* відображаються для кожної з трьох зон окремо. Графік стає більш інформативним, але й більш насиченим. Цей варіант корисний для детального аналізу.

Що таке лінії довіри напрямку вітру. На Threat Zone Plot зони загрози відображаються як витягнуті фігури, орієнтовані за напрямком вітру. Однак реальний напрямок вітру ніколи не є абсолютно постійним — він коливається навколо середнього значення. Лінії довіри показують пунктирними лініями сектор, у межах якого може реально поширюватися хмара або ударна хвиля з урахуванням коливань вітру. Чим нестабільніша атмосфера (класи А, В), тим ширший сектор довіри. При стабільній атмосфері (класи Е, F) сектор вужчий, а хмара поширюється більш передбачувано.

На практиці лінії довіри означають: населений пункт, що знаходиться не точно за вітром, а під кутом до осової лінії хмари, все одно може опинитися у зоні ураження, якщо вітер дещо змінить напрямок. Тому при плануванні евакуації слід орієнтуватися не лише на осову лінію зон, а й на лінії довіри.

Overpressure Level of Concern

Select Overpressure Level of Concern:

Red Threat Zone

LOC: 8.0 psi = destruction of buildings

Orange Threat Zone

LOC: 3.5 psi = serious injury likely

Yellow Threat Zone

LOC: 1.0 psi = shatters glass

Show wind direction confidence lines:

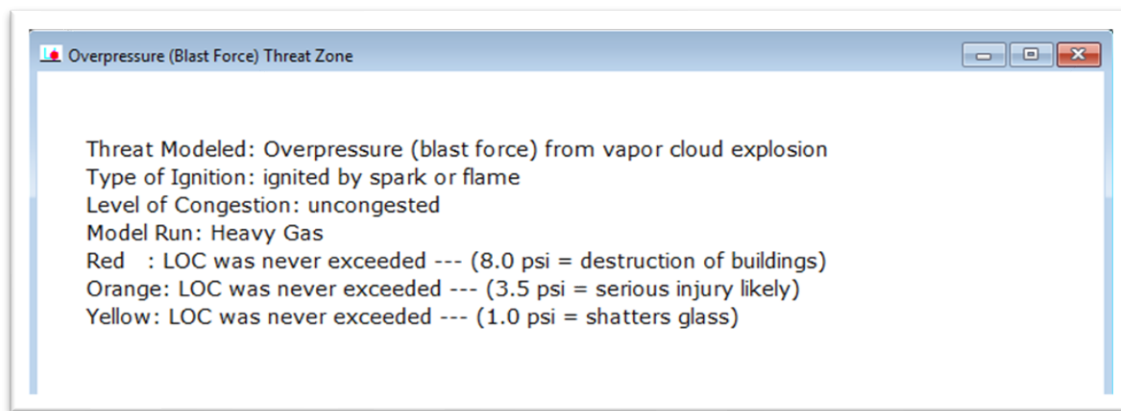
☒ only for longest threat zone

☐ for each threat zone

OK Cancel Help

Скріншот 21: Вікно параметрів VCE — Level of Concern

Після натискання ОК ALOHA має побудувати Threat Zone Plot із трьома зонами руйнування.



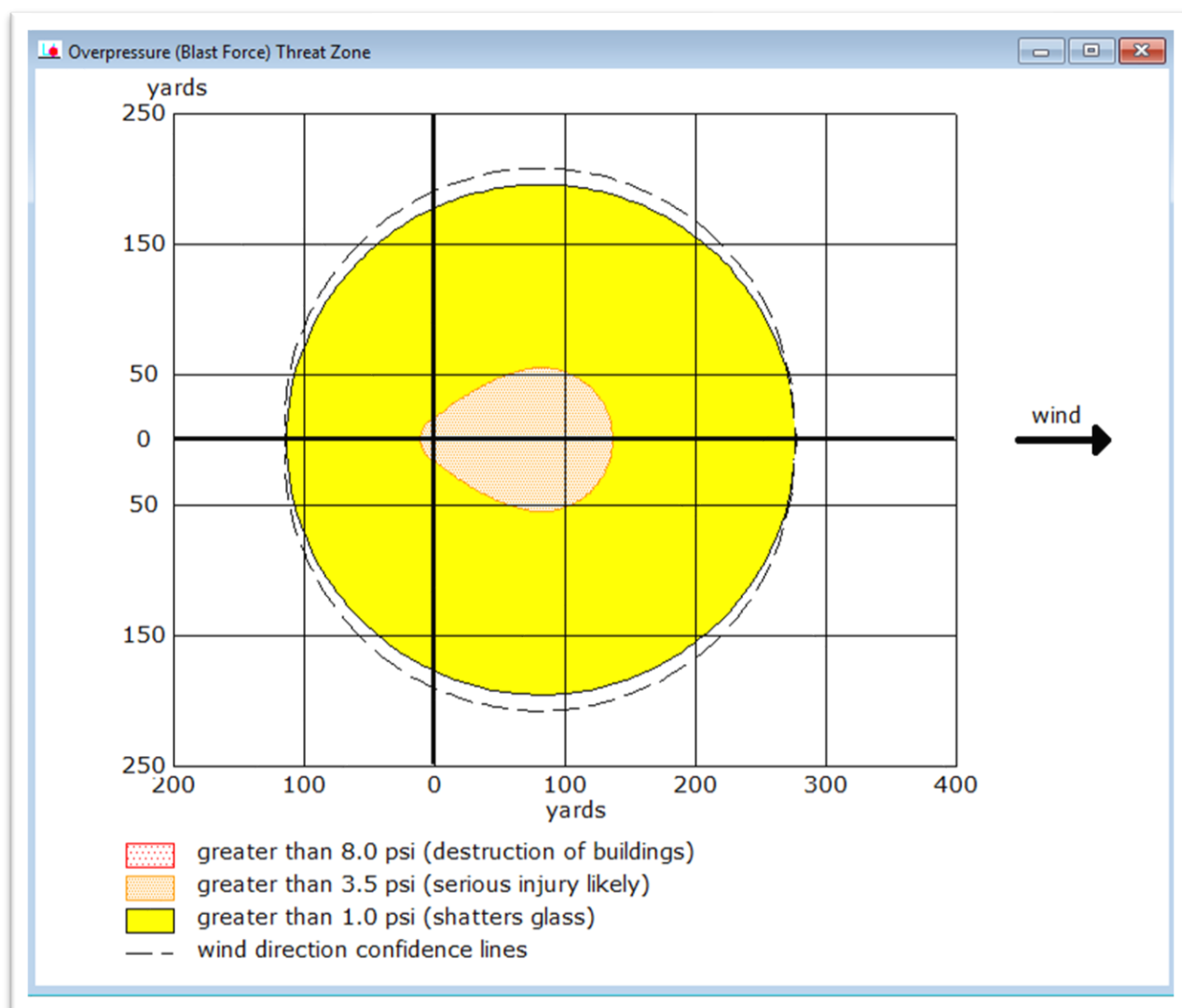
Скріншот 22: Вікно результату розрахунку

ALOHA показує «**LOC was never exceeded**» для всіх трьох зон — це означає, що при обраних параметрах (іскрове запалювання, незагромаджений простір) надлишковий тиск ударної хвилі **ніде не досягає навіть 1,0 psi (6,9 кПа)**.

Це пояснюється тим, що у незагромадженому просторі дефлаграція парогазової хмари відбувається повільно, фронт полум'я не прискорюється турбулентністю, і енергія горіння виділяється поступово, не створюючи значної ударної хвилі. Хмара просто згоряє (flash fire), спричиняючи теплове ураження всередині хмари, але не потужний вибух.

Це ілюструє ключову концепцію: сама по собі хмара горючого газу не обов'язково вибухає — вибух відбувається лише при наявності загромадженості або обмеженості простору.

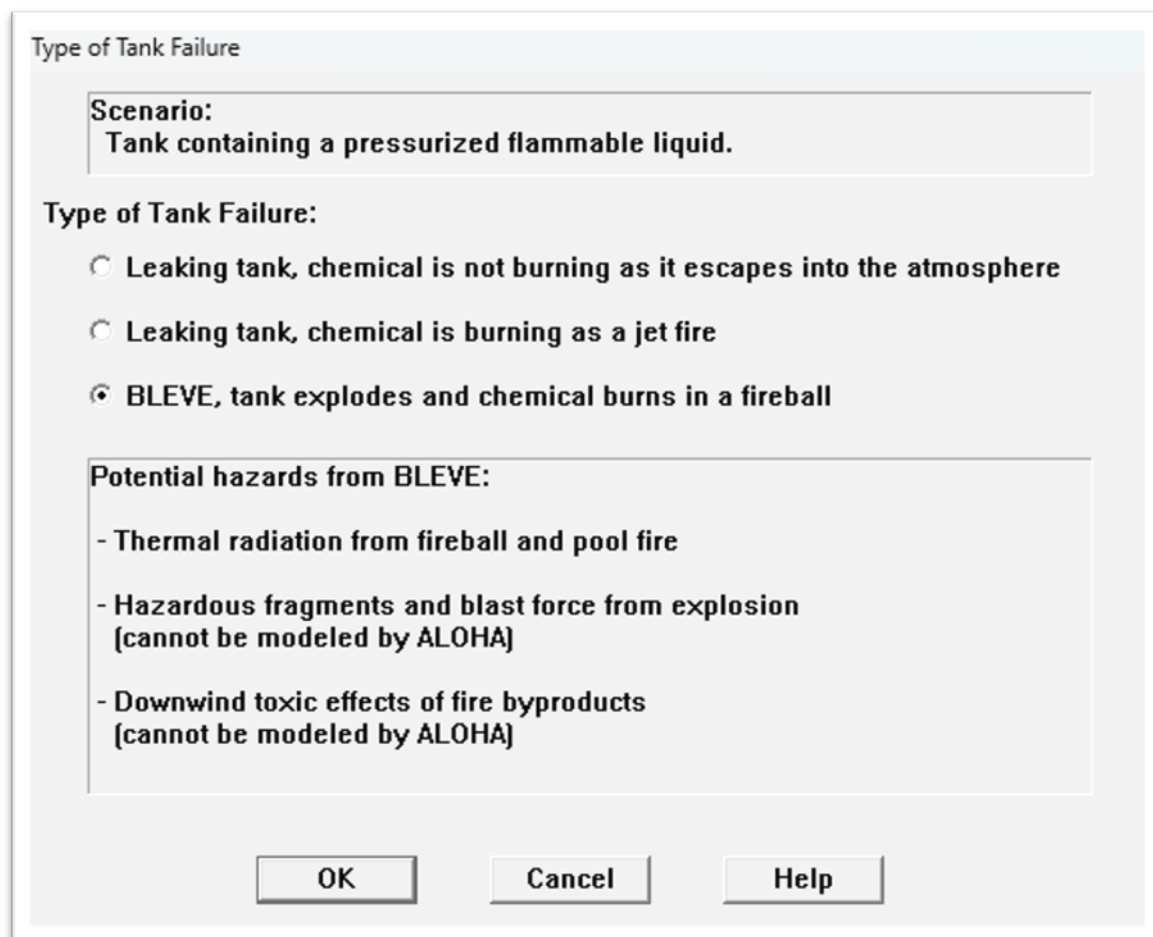
Якщо у вікні вибору фізичних параметрів вибуху обрати **congested, difficult to walk through (e.g. pipe rack, dense forest)**, тобто **затор, важкодоступний (наприклад, трубопровідна колія, густий ліс)**, тоді Threat Zone Plot із трьома зонами руйнування виглядатиме для даного прикладу так:



Скріншот 23: Threat Zone Plot для VCE — зони надлишкового тиску

Крок 7. Додаткове моделювання: BLEVE (вибух ємності з вогняною кулею).

Для моделювання сценарію BLEVE необхідно побудувати новий сценарій з іншим типом аварії ємності. Повернутися до Setup → Source → Tank. Ввести ті самі параметри ємності (діаметр 2,5 м, довжина 10,2 м, маса пропану 20 800 кг). У вікні «Type of Tank Failure» обрати третій варіант: «**BLEVE, tank explodes and chemical burns in a fireball**» — ємність руйнується вибухом, вміст згоряє у вигляді вогняної кулі.



Скріншот 24: Вікно вибору сценарію аварії

Після натискання ОК ALOHA розрахує параметри вогняної кулі та виведе їх у Text Summary: Діаметр вогняної кулі: 174 ярди. Тривалість горіння: 11 секунд.

Далі обрати Display → Threat Zone. ALOHA автоматично запропонує LOC у вигляді **теплового випромінювання** (thermal radiation), оскільки основна небезпека BLEVE — це саме теплове ураження від вогняної кулі. Стандартні рівні:

- червона зона: **10 кВт/м²** — загибель при впливі понад 60 с, опіки 3 ступеня;
- помаранчева зона: **5 кВт/м²** — опіки 2 ступеня при тривалому впливі;
- жовта зона: **2 кВт/м²** — больовий поріг при впливі понад 60 с, безпечна межа для населення.

Thermal Radiation Level of Concern

Select Thermal Radiation Level of Concern:

Red Threat Zone

LOC: 10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec

Orange Threat Zone

LOC: 5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec

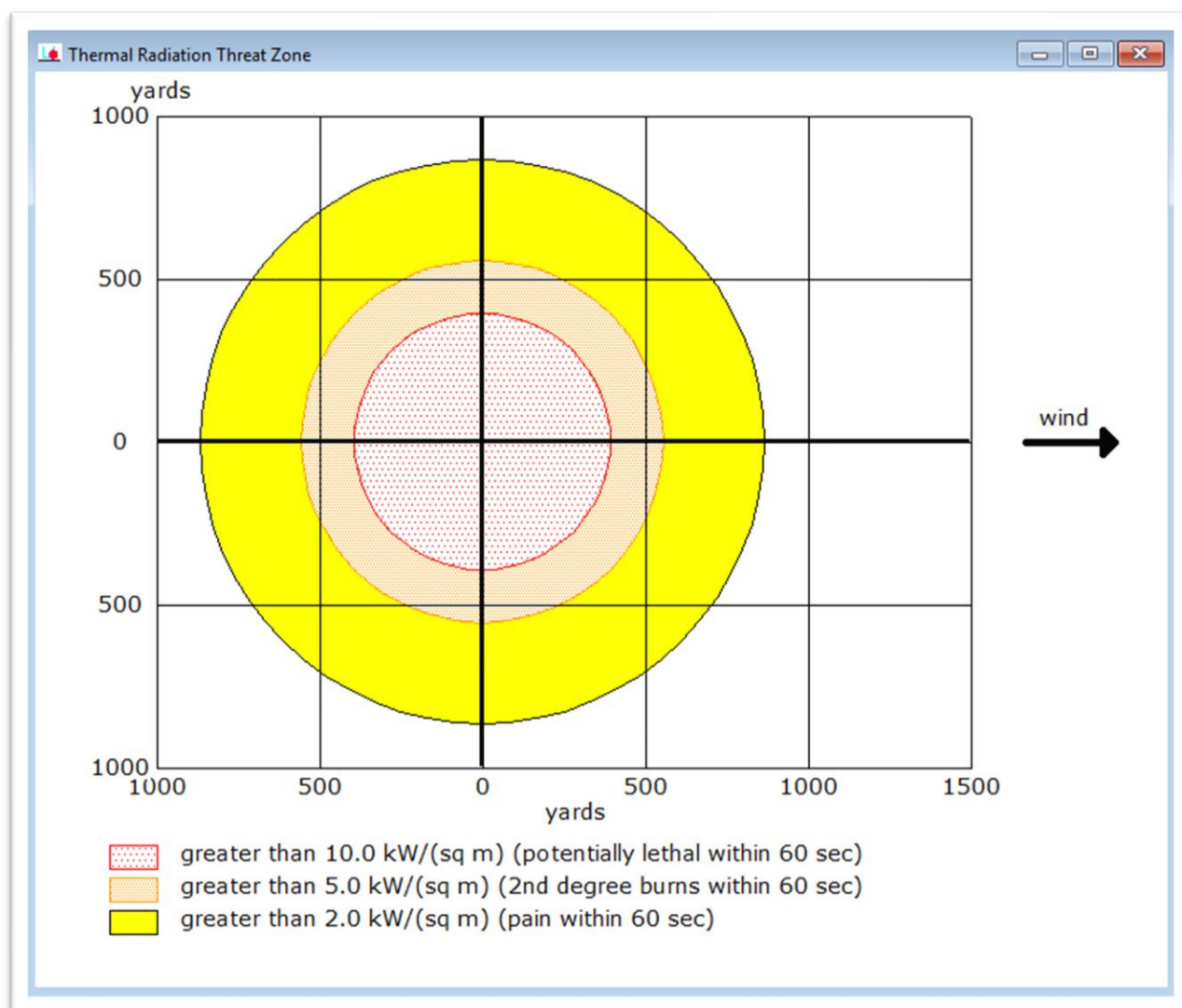
Yellow Threat Zone

LOC: 2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec

OK Cancel Help

Скріншот 25: Вікно вибору рівнів теплової радіації

ALOHA побудує кругові зони теплового випромінювання навколо місця вибуху ємності.



SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in horizontal cylindrical tank
 Tank Diameter: 2.5 meters Tank Length: 10.2 meters
 Tank Volume: 50.1 cubic meters
 Tank contains liquid
 Internal Storage Temperature: 25° C
 Chemical Mass in Tank: 20,800 kilograms
 Tank is 84% full
 Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
 Fireball Diameter: 174 yards Burn Duration: 11 seconds

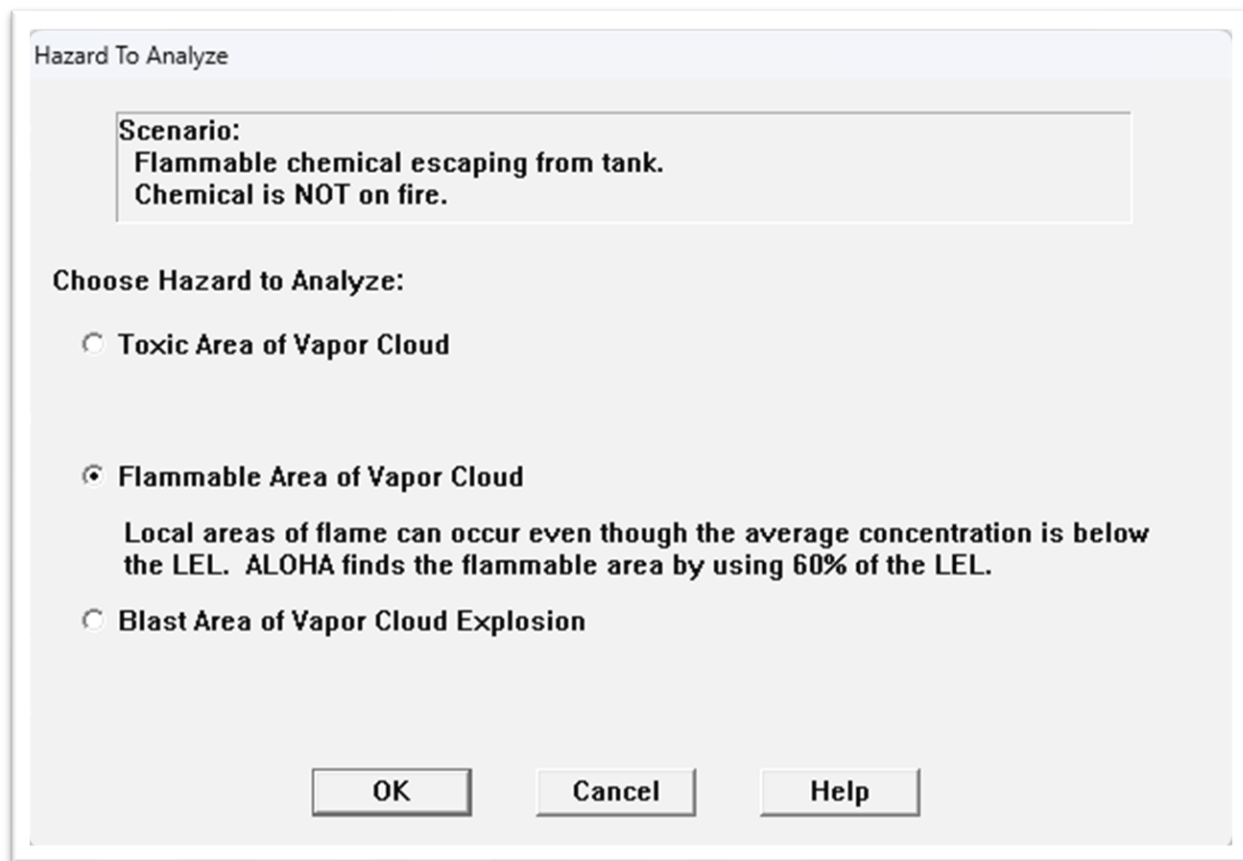
THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
 Red : 394 yards --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
 Orange: 556 yards --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
 Yellow: 866 yards --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

Скріншот 26: Threat Zone Plot для BLEVE — зони теплового випромінювання (радіуси) та текстова інформація з результатами моделювання

Крок 8. Додаткове моделювання: вибухонебезпечна зона хмари (Flammable Area).

Для повноти аналізу можна також повернутися до першого сценарію (Leaking tank, not burning) та у Display → Threat Zone обрати «**Flammable Area of Vapor Cloud**».



Скріншот 27: Вікно вибору сценарію моделювання вибухонебезпечної зони хмари

ALOHA побудує зону, де концентрація пропану перевищує частку від LEL (нижньої концентраційної межі вибуховості). Стандартні LOC (рівні безпеки):

— червона зона: **60% LEL** (12 600 ppm для пропану) — зона, де вибух найбільш імовірний;

— жовта зона: **10% LEL** (2 100 ppm) — зона, де загоряння можливе при наявності потужного джерела запалювання.

Flammable Level of Concern

Select Flammable Level of Concern:

Red Threat Zone

LOC: 12600 ppm = 60% LEL = Flame Pockets

Orange Threat Zone

LOC: [none]

Yellow Threat Zone

LOC: 2100 ppm = 10% LEL

Show wind direction confidence lines:

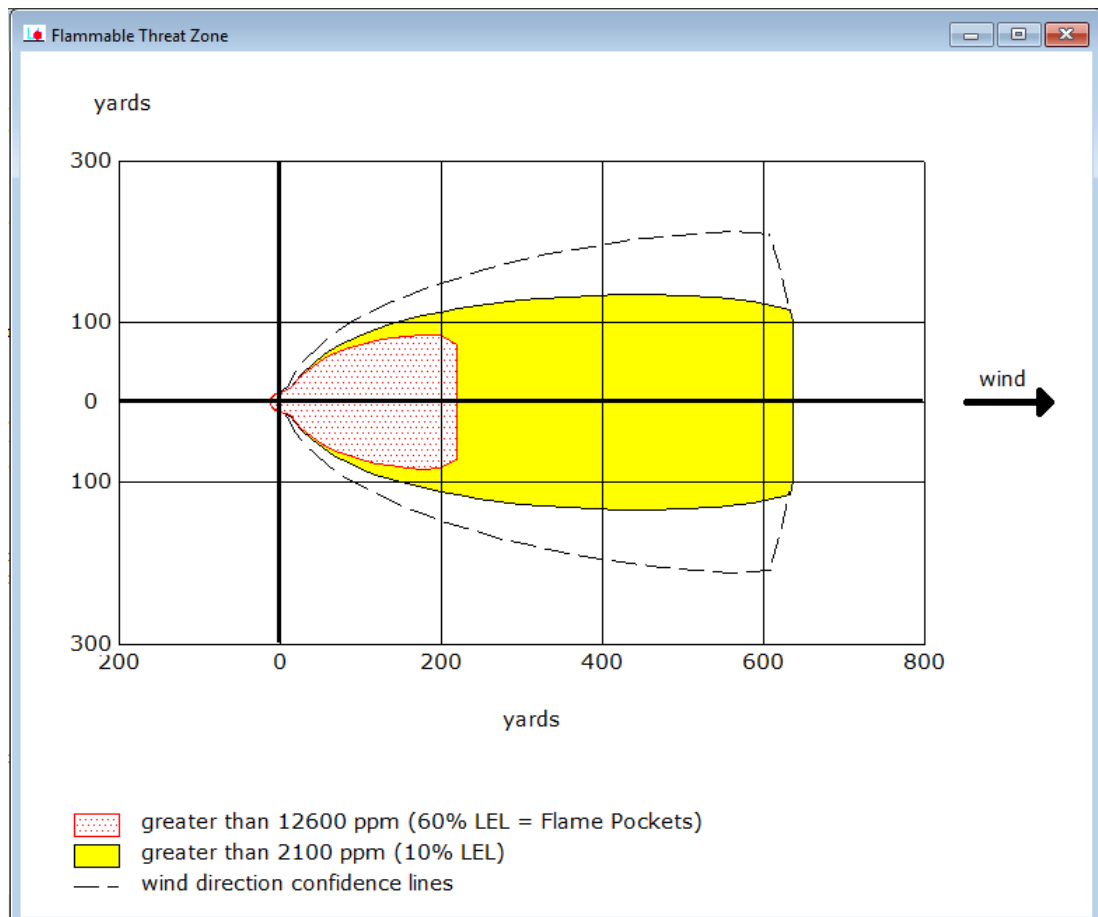
☒ only for longest threat zone

☐ for each threat zone

OK Cancel Help

Скріншот 28: Вікно вибору рівнів небезпеки

Ця зона показує, на якій відстані від місця витоку хмара залишається **вибухонебезпечною** — тобто, де повинні бути заборонені будь-які джерела запалювання (зварювальні роботи, рух автотранспорту, використання електрообладнання у незахищеному виконанні).



SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank

Flammable chemical escaping from tank (not burning)

Tank Diameter: 2.5 meters Tank Length: 10.2 meters

Tank Volume: 50.1 cubic meters

Tank contains liquid Internal Temperature: 25° C

Chemical Mass in Tank: 20,800 kilograms

Tank is 84% full

Circular Opening Diameter: 8 centimeters

Opening is 5 centimeters from tank bottom

Release Duration: 5 minutes

Max Average Sustained Release Rate: 11,700 pounds/min

(averaged over a minute or more)

Total Amount Released: 45,856 pounds

Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Flammable Area of Vapor Cloud

Model Run: Heavy Gas

Red : 219 yards --- (12600 ppm = 60% LEL = Flame Pockets)

Yellow: 637 yards --- (2100 ppm = 10% LEL)

Скріншот 29: Зони вибухонебезпечності хмари пропану та текстова інформація з результатами моделювання

3.7.4. Інтерпретація результатів VCE

Результати моделювання VCE для сценарію з пропаном у ALOHA наочно демонструють визначальний вплив загромадженості простору на потужність вибуху.

Параметри джерела (Source Strength). ALOHA розрахувала для витоку пропану з горизонтальної циліндричної ємності (50,1 м³, 20 800 кг, отвір 8 см знизу): тривалість витоку — 5 хвилин; максимальна швидкість витоку — 11 700 фунтів/хвилину (5 307 кг/хв); загальна маса вивільненого пропану — 45 856 фунтів (20 800 кг), тобто весь вміст ємності вивільнився протягом 5 хвилин. Витік відбувався як двофазний потік (суміш рідини та газу). Модель розсіювання — Heavy Gas (пропан у 1,5 рази важчий за повітря).

Сценарій А: незагромаджений простір (uncongested, spark ignition).

Результат ALOHA: Red (8,0 psi) — LOC was never exceeded; Orange (3,5 psi) — LOC was never exceeded; Yellow (1,0 psi) — LOC was never exceeded.

Жодна зона ураження не побудована. Це означає, що при дефлаграції парогазової хмари пропану у відкритому незагромаджені просторі (газонаповнювальна станція без густого обладнання) значної ударної хвилі не утворюється. Хмара просто згоряє у вигляді спалаху (flash fire), створюючи теплове ураження лише всередині хмари, але не руйнівну ударну хвилю за її межами. Цей результат є фізично обґрунтованим: без перешкод фронт полум'я рухається повільно (кілька метрів на секунду), і енергія горіння виділяється поступово, не створюючи компресії повітря.

Сценарій Б: загромаджений простір (congested, spark ignition).

Результат ALOHA: Red (8,0 psi — руйнування будівель) — кілька метрів від центру вибуху (зона майже не видима на графіку); Orange (3,5 psi — серйозні травми) — приблизно **70 ярдів (65 м)**; Yellow (1,0 psi — руйнування скла) — приблизно **230 ярдів (210 м)**.

Зони ураження мають майже кругову форму, дещо зміщену за вітром (оскільки хмара зноситься вітром перед запалюванням). Різниця з першим сценарієм є разючою: та сама маса пропану (20 800 кг), але при наявності загромадженості перешкоди створюють турбулентність, що різко прискорює фронт полум'я, і виникає потужна ударна хвиля.

Інтерпретація для прийняття рішень:

Зона повного руйнування (червона, 8,0 psi) — обмежена кількома метрами від центру вибуху. У цій зоні — повне руйнування конструкцій та загибель людей. Однак її малий радіус означає, що катастрофічне руйнування обмежується безпосередньо місцем вибуху хмари.

Зона серйозних пошкоджень (помаранчева, 3,5 psi, до 65 м) — часткове руйнування будівель, обвалення панелей, руйнування внутрішніх перегородок. Тяжкі травми від уламків конструкцій та скла. Можлива загибель людей у будівлях із легких конструкцій. Ця зона охоплює безпосередньо прилеглу територію підприємства.

Зона руйнування скла (жовта, 1,0 psi, до 210 м) — найбільш значуща з практичної точки зору. Практично повне руйнування віконного скла у радіусі понад 200 метрів. За статистикою, до 80% травм при VCE спричинені саме осколками скла. Якщо у цій зоні є житлова забудова, кількість постраждалих може бути значною.

Порівняння з токсичною хмарию хлору (підрозділ 3.4) наочно ілюструє різницю між двома типами небезпеки: токсична хмара хлору при аналогічному витoku (1 тонна) поширюється на 1,6–6,3 км, тоді як зона вибуху пропану (20,8 тонн — маса у 20 разів більша!) сягає лише 210 м. Токсичні хмари поширюються далі, але вибухи завдають більш руйнівних наслідків у ближній зоні. Для токсичної хмари є час на евакуацію та укриття, тоді як вибух відбувається миттєво.

3.7.5. Вплив загромадженості простору на результати VCE

Ступінь загромадженості простору є визначальним фактором потужності вибуху паро-газової хмари. Моделювання одного й того самого сценарію (витік 20 800 кг пропану, запалювання іскрою) при двох варіантах загромадженості дає кардинально різні результати:

Параметр	Незагромаджений простір (uncongested)	Загромаджений простір (congested)
Червона зона (8,0 psi)	Відсутня (LOC never exceeded)	Кілька метрів
Помаранчева зона (3,5 psi)	Відсутня	~65 м
Жовта зона (1,0 psi)	Відсутня	~210 м
Загальний висновок	Спалах (flash fire) без ударної хвилі	Потужний вибух із руйнуваннями

Ця різниця пояснюється фізикою прискорення полум'я. У незагромадженому просторі фронт полум'я рухається ламінарно зі швидкістю 2–5 м/с, і газ встигає розширюватися без створення значного надлишкового тиску. У загромадженому просторі перешкоди (трубопроводи, апарати, конструкції) турбулізують потік газу перед фронтом полум'я, різко збільшуючи площу поверхні горіння. Швидкість фронту зростає до десятків та сотень метрів на секунду, газ перед фронтом не встигає розширюватися, і виникає ударна хвиля.

ALOHA (версія 5.4.7) моделює цей ефект за допомогою методу Бейкера-Стрехлоу-Тенга (BST), де користувач обирає ступінь загроможженості (congested / uncongested) та тип запалювання (spark / detonation), а програма на основі цих параметрів розраховує швидкість полум'я та відповідний надлишковий тиск. Це значно точніше, ніж спрощений метод TNT-еквівалентності з ручним введенням ефективності вибуху (yield), оскільки BST базується на фізичних параметрах процесу.

Для повного аналізу рекомендується моделювати сценарій при різних комбінаціях параметрів:

Сценарій	Тип запалювання	Загроможженість	Очікуваний результат
А (мінімальний)	Іскра/полум'я	Незагроможжений	Зони відсутні (flash fire)
Б (типовий промисловий)	Іскра/полум'я	Загроможжений	Значні зони ураження
В (найгірший)	Детонація	Загроможжений	Максимальні зони ураження

Для навчальних цілей рекомендується промоделювати один і той самий сценарій при комбінаціях А та Б, щоб наочно побачити вплив загроможженості. Комбінація В (детонація) є рідкісним сценарієм, що зустрічається переважно для високореактивних речовин (водень, ацетилен, етилен) або при навмисному ініціюванні.

Практичний висновок: при проєктуванні промислових об'єктів, де зберігаються або переробляються горючі гази, необхідно мінімізувати загроможженість простору навколо потенційних джерел витоку. Це один із принципів «внутрішньої притаманної безпеки» (inherent safety) — спрощення конструювання обладнання для зменшення наслідків можливого вибуху. Результати моделювання також обґрунтовують мінімальні відстані від об'єктів зберігання ЗНГ до житлової забудови: для нашого сценарію жовта зона (руйнування скла) сягає 210 метрів при загроможженому просторі, тому санітарно-захисна зона повинна бути не менше цієї відстані.

3.8. Варіанти завдань для самостійного виконання

Загальне завдання. Встановити ALOHA, змоделювати аварійний сценарій за вихідними даними свого варіанта, отримати зони загрози за AEGL. До звіту включити: скріншоти всіх кроків введення даних, скріншот Threat Zone Plot, текстовий звіт (Text Summary), інтерпретацію результатів та рекомендації щодо дій. Кожний варіант 11–15 потребує моделювання VCE та/або BLEVE. Висота отвору у всіх варіантах завдань, де зазначено «знизу», «збоку» або «зверху»:

— «знизу» / «у нижній частині» → 5 см від дна;

- «збоку» / «посередині» → 50% висоти (для горизонтальної ємності з діаметром D : $D/2$, см);
- «у верхній частині» → 90–95% висоти від дна.
-

Варіант 1. Витік хлору на водоочисній станції Місце: Київ (50.45°N, 30.52°E). Дата/час: 20 липня, 14:00. Ємність: циліндрична горизонтальна, 1 тонна хлору. Отвір: круглий, 3 см, у верхній частині. Метеоумови: вітер з півночі (360°), 4 м/с, хмарність 30%, $T = 28^{\circ}\text{C}$, вологість 50%. Місцевість: міська.

Варіант 2. Витік аміаку на холодильній установці Місце: Одеса (46.48°N, 30.73°E). Дата/час: 10 січня, 08:00. Ємність: циліндрична вертикальна, 5 тонн аміаку. Отвір: круглий, 5 см, у нижній частині. Метеоумови: вітер зі сходу (90°), 2 м/с, хмарність 80%, $T = -5^{\circ}\text{C}$, вологість 85%. Місцевість: міська.

Варіант 3. Витік сірководню на нафтопереробному заводі Місце: Кременчук (49.07°N, 33.42°E). Дата/час: 5 вересня, 11:00. Джерело: пряме (Direct Source), безперервний викид 20 кг/хв протягом 30 хвилин. Метеоумови: вітер з південного заходу (225°), 3 м/с, хмарність 50%, $T = 22^{\circ}\text{C}$, вологість 55%. Місцевість: промислова.

Варіант 4. Витік хлору при транспортній аварії Місце: траса поблизу Вінниці (49.23°N, 28.47°E). Дата/час: 1 червня, 16:00. Джерело: пряме, одночасний викид із трьох балонів по 68 кг (загалом 204 кг) протягом 10 хвилин. Метеоумови: вітер з заходу (270°), 5 м/с, хмарність 40%, $T = 25^{\circ}\text{C}$, вологість 45%. Місцевість: сільська (Open Country).

Варіант 5. Витік аміаку на великому холодильному складі Місце: Харків (49.99°N, 36.23°E). Дата/час: 15 серпня, 06:00. Ємність: сферична, 25 тонн аміаку (заповнення 90%). Отвір: круглий, 8 см, збоку ємності. Метеоумови: вітер з півдня (180°), 1,5 м/с, хмарність 20%, $T = 18^{\circ}\text{C}$, вологість 70%. Місцевість: міська.

Варіант 6. Витік діоксиду сірки при аварії на ТЕС Місце: Бурштин (49.26°N, 24.63°E). Дата/час: 20 листопада, 09:00. Джерело: пряме,

безперервний викид 50 кг/хв протягом 60 хвилин. Метеоумови: вітер з північного заходу (315°), 6 м/с, хмарність 90%, $T = 2^\circ\text{C}$, вологість 80%. Місцевість: сільська.

Варіант 7. Витік хлороводню на хімічному підприємстві Місце: Суми (50.91°N , 34.80°E). Дата/час: 8 квітня, 12:00. Ємність: циліндрична горизонтальна, 3 тонни HCl (зріджений газ). Отвір: круглий, 4 см, знизу. Метеоумови: вітер з північного сходу (45°), 4 м/с, хмарність 60%, $T = 15^\circ\text{C}$, вологість 55%. Місцевість: промислова.

Варіант 8. Розлив бензину з автоцистерни (пожежа калюжі) Місце: Львів (49.84°N , 24.03°E). Дата/час: 25 травня, 15:00. Калюжа (Puddle): бензин, площа розливу 200 м^2 , глибина 2 см. Метеоумови: вітер з заходу (270°), 3 м/с, хмарність 30%, $T = 24^\circ\text{C}$, вологість 40%. Місцевість: міська. *Моделювати як Pool Fire, LOC — теплове випромінювання ($10, 5, 2\text{ кВт/м}^2$).*

Варіант 9. Витік аміаку — порівняння денних та нічних умов Місце: Запоріжжя (47.84°N , 35.14°E). Ємність: циліндрична, 10 тонн аміаку. Отвір: круглий, 5 см, збоку. **Сценарій А (день):** 15 липня, 14:00. Вітер 4 м/с, хмарність 20%, $T = 32^\circ\text{C}$. Місцевість: міська. **Сценарій Б (ніч):** 15 липня, 02:00. Вітер 1,5 м/с, хмарність 10%, $T = 20^\circ\text{C}$. Місцевість: міська. *Промоделювати обидва сценарії, порівняти зони загрози та пояснити різницю (клас стійкості, швидкість вітру, температура).*

Варіант 10. Витік хлору — порівняння різних розмірів отвору. Місце: Миколаїв (46.97°N , 32.00°E). Дата/час: 1 жовтня, 10:00. Ємність: циліндрична, 1 тонна хлору. Метеоумови: вітер з півдня (180°), 3 м/с, хмарність 50%, $T = 16^\circ\text{C}$, вологість 60%. Місцевість: міська. **Сценарій А:** отвір діаметром 2 см. **Сценарій Б:** отвір діаметром 5 см. **Сценарій В:** отвір діаметром 10 см. *Промоделювати три сценарії, порівняти зони загрози та швидкість витоку. Пояснити, як розмір отвору впливає на масштаб наслідків.*

Варіант 11. Вибух хмари пропану на газонаповнювальній станції. Місце: Дніпро (48.46°N , 35.05°E , висота 68 м). Дата/час: 10 серпня, 11:00. Ємність: циліндрична горизонтальна, 50 м^3 , пропан (ЗНГ), заповнення 85%. Отвір: круглий, 8 см, у нижній частині (5 см від дна). Метеоумови: вітер з півночі

(360°), 4 м/с, хмарність 40%, $T = 25^{\circ}\text{C}$, вологість 50%. Місцевість: міська. *Моделювати VCE двічі: (А) запалювання іскрою, незагромаджений простір; (Б) запалювання іскрою, загромаджений простір. Порівняти результати та пояснити причини відмінностей.*

Варіант 12. Вибух хмари бутану на нафтобазі. Місце: Полтава (49.59°N , 34.55°E , висота 130 м). Дата/час: 5 липня, 15:00. Ємність: сферична, 100 м^3 , бутан (n-BUTANE), заповнення 80%. Отвір: круглий, 10 см, збоку (50% висоти). Метеоумови: вітер зі сходу (90°), 3 м/с, хмарність 20%, $T = 30^{\circ}\text{C}$, вологість 45%. Місцевість: промислова (Open Country). *Моделювати VCE: запалювання іскрою, загромаджений простір (нафтобаза з обладнанням та трубопроводами). Додатково — моделювати BLEVE (обрати «BLEVE, tank explodes and chemical burns in a fireball» у вікні Type of Tank Failure). Порівняти радіуси зон VCE та BLEVE.*

Варіант 13. Вибух хмари водню на електролізній установці. Місце: Запоріжжя (47.84°N , 35.14°E , висота 50 м). Дата/час: 20 вересня, 09:00. Джерело: пряме (Direct Source), безперервний витік водню (HYDROGEN) 5 кг/хв протягом 15 хвилин. Метеоумови: вітер з заходу (270°), 5 м/с, хмарність 60%, $T = 18^{\circ}\text{C}$, вологість 55%. Місцевість: промислова. *Моделювати VCE: запалювання іскрою, загромаджений простір (електролізна установка з густим обладнанням). Додатково промоделювати варіант із запалюванням детонацією (ignited by detonation), оскільки водень має дуже широкий діапазон вибуховості ($LEL = 4\%$, $UEL = 75\%$) та високу реактивність, що робить перехід дефлаграції у детонацію більш імовірним, ніж для інших газів. Порівняти зони при spark та detonation.*

Варіант 14. Вибух хмари етилену на хімічному заводі. Місце: Одеса (46.48°N , 30.73°E , висота 40 м). Дата/час: 1 березня, 14:00. Ємність: циліндрична горизонтальна, 30 м^3 , етилен (ETHYLENE), під тиском, заповнення 70%. Отвір: круглий, 6 см, збоку (50% висоти). Метеоумови: вітер з південного заходу (225°), 4 м/с, хмарність 50%, $T = 8^{\circ}\text{C}$, вологість 70%. Місцевість: промислова. *Моделювати VCE двічі: (А) запалювання іскрою, загромаджений простір (хімічний завод із густим обладнанням); (Б) запалювання детонацією, загромаджений простір. Етилен належить до високореактивних газів, тому сценарій детонації є більш реалістичним, ніж для пропану. Порівняти зони обох сценаріїв.*

Варіант 15. Розлив бензину на нафтобазі (порівняння VCE, Flammable Area та Pool Fire). Місце: Київ (50.45°N, 30.52°E, висота 170 м). Дата/час: 15 червня, 13:00. Калюжа (Puddle): бензин (GASOLINE, AUTOMOTIVE), площа розливу 500 м², товщина шару 3 см. Метеоумови: вітер з південного заходу (225°), 3 м/с, хмарність 30%, Т = 28°C, вологість 45%. Місцевість: промислова. Промодельовати три сценарії для порівняння: (A) *Flammable Area of Vapor Cloud* — визначити межі вибухонебезпечної зони (LOC: 60% LEL та 10% LEL); (Б) *Blast Area of Vapor Cloud Explosion* — запалювання іскрою, загромождений простір (обладнання нафтобазу). Визначити зони надлишкового тиску; (В) *Pool Fire* — обрати у *Type of Tank Failure* варіант «*Leaking tank, chemical is burning*» або змодельовати пожежу калюжі. LOC за тепловим випромінюванням: 10, 5, 2 кВт/м². Порівняти радіуси зон усіх трьох сценаріїв, скласти зведену таблицю та визначити, який сценарій створює найбільшу загрозу для прилеглої території.

Вимоги до оформлення звіту

Звіт з виконання завдання повинен містити:

1. Титульний аркуш (дисципліна, тема, варіант, прізвище).
2. Вихідні дані (місце, час, речовина, параметри ємності, метеоумови) — у формі таблиці.
3. Скріншоти кожного кроку введення даних у ALOHA (Location, Date & Time, Chemical, Atmospheric Options, Source) — з коротким поясненням.
4. Скріншот текстового звіту (Text Summary) із результатами Source Strength.
5. Скріншот Threat Zone Plot із зонами загрози.
6. Таблиця результатів: відстані меж трьох зон (AEGL-1, AEGL-2, AEGL-3) та відповідні ефекти для здоров'я.
7. Інтерпретація та рекомендації: які об'єкти (житлові квартали, школи, лікарні) потрапляють у кожну зону; рекомендації щодо евакуації, укриття, засобів захисту.
8. Для варіантів 9 та 10 — порівняльний аналіз сценаріїв із поясненням причин відмінностей.
9. Для варіантів 11-15 обґрунтування обраних параметрів VCE: типу запалювання (іскра/полум'я або детонація) та ступеня загроможденості простору (congested / uncongested) з урахуванням характеру промислового об'єкта.
10. Скріншот вікна вибору типу небезпеки (Overpressure) та параметрів VCE.
11. Скріншот Threat Zone Plot для VCE із зонами надлишкового тиску.
12. Таблицю радіусів трьох зон ураження із зазначенням відповідного надлишкового тиску та очікуваних руйнувань.

13. Для варіантів 11, 12 та 15 із порівнянням сценаріїв — порівняльну таблицю результатів із поясненням причин відмінностей.
14. Порівняння результатів при різних параметрах VCE (congested vs uncongested або spark vs detonation) із поясненням фізичних причин відмінностей.
15. Висновок із рекомендаціями щодо мінімальних безпечних відстаней від об'єкта зберігання небезпечної речовини (або іншої горючої речовини) до житлової забудови, на основі жовтої зони (1,0 psi / 6,9 кПа — руйнування скла).

4. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

До розділу 1 (гострий вплив):

1. Чим принципово відрізняється оцінка гострого ризику від оцінки хронічного?
2. Чому для оцінки гострих впливів не можна використовувати RfC?
3. Три рівні AEGL — які ефекти відповідають кожному?
4. Для яких часових інтервалів встановлюються AEGL?
5. Як AEGL використовуються для визначення зон евакуації?
6. Що таке ERPG? Чим вони відрізняються від AEGL?
7. Що таке IDLH? Для чого використовується?
8. Як оцінюється гострий ризик при одночасному впливі кількох речовин?
9. Що описує закон Габера? Яке його практичне застосування?
10. Яка послідовність вибору нормативів гострого впливу рекомендована US EPA?

До розділу 2 (дермальний вплив):

11. Чому дермальний шлях часто недооцінюється при оцінці ризику?
12. Який шар шкіри є основним бар'єром для проникнення хімічних речовин?
13. Які фізико-хімічні властивості речовини сприяють дермальній абсорбції?
14. Назвіть чотири основних сценарії дермального впливу.
15. Що таке фактор адгезії ґрунту (AF)? Чому для дітей він вищий, ніж для дорослих?
16. Що таке фактор дермальної абсорбції (ABS)? Від чого він залежить?
17. Що таке коефіцієнт дермальної проникності (Kp)? У яких одиницях вимірюється?
18. Напишіть формулу ADD при контакті з забрудненим ґрунтом та поясніть кожен параметр.
19. Чому при прийнятті душу дермальний ризик від летких сполук може перевищувати пероральний?
20. Як інтегрується дермальний ризик із ризиком від інших шляхів надходження?

До розділу 3 (ALOHA)

21. Що таке ALOHA? Хто розробив цю програму?
22. Які типи небезпек може моделювати ALOHA?
23. Яка модель атмосферної дисперсії використовується в ALOHA?
24. Що таке Level of Concern (LOC)? Які LOC можна обрати для токсичних хмар?

25. Які вхідні дані потрібні для моделювання витоку токсичного газу в ALOHA?
26. Що означають червона, помаранчева та жовта зони на Threat Zone Plot?
27. Як клас стійкості атмосфери впливає на розміри зон загрози?
28. Чому нічні витoki зазвичай небезпечніші за денні?
29. Як розмір отвору в ємності впливає на швидкість витоку та розміри зон?
30. Які основні обмеження ALOHA?
31. Що таке вибух паро-газової хмари (VCE)? Чим він відрізняється від детонації?
32. Напишіть формулу розрахунку тротилового еквіваленту VCE.
33. Які рівні надлишкового тиску використовуються у ALOHA для побудови зон ураження VCE?
34. Які руйнування відповідають надлишковому тиску 8,0 psi? 3,5 psi? 1,0 psi?
35. Чому вибухи у загромождених просторах потужніші, ніж у відкритому полі?
36. Що таке BLEVE? Чим цей сценарій відрізняється від VCE?
37. Як вибір ступеня загроможденості (congested / uncongested) та типу запалювання (spark / detonation) впливає на результати моделювання VCE у ALOHA?
38. Чому зона загрози від токсичної хмари зазвичай більша за зону ураження від вибуху?

5. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Risk Assessment Guidance for Superfund. Vol. I: Human Health Evaluation Manual. Part A (Baseline Risk Assessment), Part B (Development of Preliminary Remediation Goals), Part E (Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment). US EPA.
2. Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs). US EPA. URL: <https://www.epa.gov/aegl>
3. Emergency Response Planning Guidelines (ERPGs). American Industrial Hygiene Association (AIHA).
4. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. National Institute for Occupational Safety and Health. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/>
5. Dermal Exposure Assessment: A Summary of EPA Approaches. US EPA, 2007.
6. Exposure Factors Handbook. US EPA, 2011 (updated 2022). URL: <https://www.epa.gov/expobox/exposure-factors-handbook>
7. Paustenbach D.J. Human and Ecological Risk Assessment: Theory and Practice. Wiley, 2002.
8. Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons / Ed. by C.D. Klaassen. 9th ed. McGraw-Hill, 2019.
9. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. 2nd ed. Center for Chemical Process Safety (CCPS), AIChE, 2000.
10. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 р. № 5403-VI (зі змінами).

Електронне видання

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

Методичні вказівки до самостійної роботи
«Спеціальні методи оцінки екологічних ризиків: гострий вплив, дермальне
надходження, комп'ютерне моделювання» для здобувачів другого рівня
вищої освіти
спеціальності Е2 Екологія

Укладач
КРАВЧЕНКО Інна Василівна

Підписано до друку _____
Формат 60×84 ¹/₁₆ Папір типограф. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов.друк.арк. _____. Облік. видавн. арк. _____.
Тираж _____ екз. Вид. № _____. Замовл.№ _____. Ціна договірна.

**Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля**

Адреса видавництва: м. Київ, вул. Іоанна Павла II, 17.
Телефон: +38(050) 218 04 78
E-mail: vidavnictvosnu.ua@gmail.com