

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГЕРАСИМЕНКО БОГДАН ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 622.692.4:504.054:519.87(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ ВИТОКІВ НАФТИ З НАФТОПРОВОДІВ І
ЇХ ВПЛИВ НА ЗАБРУДНЕННЯ ГРУНТОВОГО ПОКРИВУ.**

Спеціальність 185 – «Нафтогазова інженерія та технології»

Галузь знань 18 – «Виробництво та технології»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Б. В. Герасименко

Науковий керівник
Дорошенко Юлія Іванівна
кандидат технічних наук, доцент

АНОТАЦІЯ

Герасименко Б. В. Дослідження аварійних витоків нафти з нафтопроводів і їх вплив на забруднення ґрунтового покриву – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 185 «Нафтогазова інженерія та технології» галузі знань 18 «Виробництво та технології». Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуального науково-прикладного завдання підвищення достовірності прогнозування наслідків аварійних витоків нафти з магістральних нафтопроводів шляхом розроблення стохастичної моделі джерела витoku, математичної моделі міграції нафти у ґрунтовому середовищі та комплексної інженерно-екологічної методики оцінювання екологічних наслідків і підтримки прийняття рішень щодо локалізації та ліквідації аварій.

Виконано комплексний аналіз сучасного стану досліджень у сфері прогнозування аварійних витоків нафти, моделювання процесів її поширення у ґрунтовому середовищі та оцінювання екологічних наслідків аварій магістральних нафтопроводів. На основі бібліометричного аналізу, тематичної кластеризації та критичного узагальнення сучасних наукових праць встановлено основні тенденції розвитку предметної області, виявлено недостатню інтеграцію моделей прогнозування витoku, поширення забруднення та оцінювання екологічних наслідків, що обґрунтувало необхідність розроблення комплексного підходу до прогнозування аварійних ситуацій.

Розроблено стохастичну модель аварійного витoku нафти з магістрального нафтопроводу, яка враховує випадковий характер геометричних параметрів дефекту, коефіцієнта витрати, часу виявлення аварії, режимів роботи трубопровідної системи та процесу локалізації пошкодженої ділянки. Запропонований підхід забезпечує визначення квантильних оцінок обсягів

витоку (P_{25} , P_{50} , P_{75} , P_{95}), що дозволяє перейти від детермінованих розрахунків до ризик-орієнтованого прогнозування розвитку аварійних сценаріїв.

Розроблено математичну модель поширення нафти у ґрунтовому середовищі на основі узагальненого закону Дарсі та рівняння нерозривності із врахуванням процесів фільтрації та сорбції. Запропоновано аналітичний підхід до опису нестационарної міграції нафти у пористому середовищі, реалізовано ітераційний алгоритм узгодження параметрів витоку та характеристик ґрунту, що забезпечує моделювання взаємодії системи «трубопровід – ґрунтове середовище» з урахуванням зворотного впливу ґрунту на інтенсивність аварійного витоку.

Виконано параметричні дослідження впливу площі дефекту, коефіцієнта витрати, часу виявлення аварії, режимів роботи насосної станції та фізико-механічних властивостей ґрунтів на обсяг витоку і масштаби забруднення території. За результатами аналізу чутливості встановлено визначальні фактори формування аварійних втрат нафти та виконано економічне обґрунтування впровадження систем виявлення витоків із використанням показника очікуваної цінності досконалої інформації (EVPI).

Систематизовано статистичні дані щодо причин аварійних розгерметизацій магістральних нафтопроводів та використано їх для калібрування параметрів стохастичної моделі аварійного витоку. Запропоновано інтегральний безрозмірний показник екологічної шкоди, який забезпечує комплексне оцінювання впливу нафтового забруднення на ґрунтову матрицю, мікробіоту, рослинний покрив і мезофауну.

Розроблено інженерну методику просторово-часового зонування забруднених територій, яка передбачає виділення функціональних зон різного рівня екологічної небезпеки та обґрунтовує вибір технологій ремедіації залежно від масштабу аварії, характеристик ґрунтового середовища й прогнозованих параметрів поширення забруднення.

Узагальнено результати дослідження у вигляді комплексної інженерно-екологічної методики підтримки прийняття рішень, що поєднує стохастичне

прогнозування параметрів аварійного витоку, математичне моделювання поширення нафти у ґрунті, оцінювання екологічної шкоди, просторово-часове зонування території, вибір технологій ремедіації та післяаварійний моніторинг.

Достовірність отриманих результатів підтверджено теоретичним обґрунтуванням математичних моделей, аналізом граничних випадків, перевіркою виконання законів збереження, результатами параметричних досліджень, аналізом чутливості, порівнянням із відомими фізичними закономірностями та літературними даними щодо процесів фільтрації нафти у пористому середовищі.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробленні стохастичної моделі прогнозування аварійних витоків нафти, інженерної методики просторово-часового зонування забруднених територій, інтегрального показника екологічної шкоди та удосконаленні математичного опису процесів міграції нафти у ґрунтовому середовищі шляхом узгодження моделей фільтрації, сорбції та визначення концентрації забруднювача.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розроблених моделей і методик для прогнозування параметрів аварійних витоків нафти, оцінювання масштабів екологічного забруднення, обґрунтування інвестицій у системи виявлення витоків, вибору технологій ремедіації, підтримки прийняття інженерних рішень щодо ліквідації наслідків аварій та організації післяаварійного екологічного моніторингу. Отримані результати можуть бути використані підприємствами трубопровідного транспорту, природоохоронними установами, органами цивільного захисту, проєктними організаціями та у навчальному процесі закладів вищої освіти.

Отримані результати розширюють наукові засади прогнозування аварійних витоків нафти, математичного моделювання міграції нафтового забруднення та підтримки інженерно-екологічних рішень і можуть бути використані для підвищення рівня екологічної безпеки магістрального трубопровідного транспорту.

Ключові слова: математичне моделювання, магістральний нафтопровід, аварійний витік нафти, аварійний розлив, гідродинаміка витікання, коефіцієнт витрати, нестационарна фільтрація, пористе середовище, сорбція, ізотерма Фрейндліха, фізико-механічні властивості ґрунтів, зона забруднення, прогнозування аварій, екологічний ризик, локалізація аварій, ремедіація, екологічна безпека.

ABSTRACT

Herasymenko B. V. Research into accidental oil leaks from oil pipelines and their impact on soil contamination. – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 185 – "Oil and Gas Engineering and Technologies", Field of Knowledge 18 – "Production and Technologies". Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2026.

The dissertation is devoted to solving the relevant scientific and applied problem of improving the reliability of forecasting the consequences of emergency oil spills from trunk oil pipelines through the development of a stochastic spill source model, a mathematical model of oil migration in porous soil media, and a comprehensive engineering and environmental decision-support methodology for spill localization and remediation.

A comprehensive analysis of the current state of research in the field of emergency oil spill prediction, mathematical modelling of contaminant migration in soils, and environmental impact assessment of pipeline accidents has been performed. Based on bibliometric analysis, thematic clustering, and critical review of recent scientific publications, the main research trends have been identified, existing scientific gaps have been revealed, and the necessity of developing an integrated methodology for accident prediction has been substantiated.

A stochastic model of emergency oil leakage from trunk oil pipelines has been developed. Unlike existing deterministic approaches, the proposed model accounts for the uncertainty of defect geometry, discharge coefficient, spill detection time, pipeline operating conditions, and emergency isolation procedures. The developed approach enables quantile estimation of spill volumes (P25, P50, P75, and P95), providing a transition from deterministic calculations to risk-oriented prediction of accident scenarios.

A mathematical model describing oil migration in porous soil media has been developed based on the generalized Darcy law and the continuity equation while accounting for filtration and sorption processes. An analytical approach to modelling transient oil migration has been proposed together with an iterative algorithm that consistently couples pipeline leakage parameters with soil characteristics, allowing simulation of the interaction between the pipeline and the surrounding soil while considering the feedback effect of soil resistance on leakage intensity.

Parametric studies have been carried out to investigate the influence of defect size, discharge coefficient, spill detection time, pumping station operating conditions, and soil physical and mechanical properties on spill volume and contamination extent. Global sensitivity analysis identified the dominant factors governing spill development, while the Expected Value of Perfect Information (EVPI) approach was applied to justify economically feasible investments in leak detection systems.

Statistical data on the causes of emergency pipeline failures have been systematized and used to calibrate the stochastic spill model. An integrated dimensionless environmental damage indicator has been proposed for comprehensive assessment of oil contamination effects on soil matrix, microbiota, vegetation, and mesofauna.

An engineering methodology for spatial and temporal zoning of contaminated areas has been developed. The proposed approach distinguishes functional zones corresponding to different levels of environmental hazard and provides a basis for selecting appropriate remediation technologies according to spill magnitude, soil properties, and predicted contaminant migration.

The research results have been integrated into a comprehensive engineering and environmental decision-support methodology that combines stochastic spill prediction, mathematical modelling of oil migration, environmental damage assessment, spatial zoning, remediation planning, and post-accident environmental monitoring.

The reliability of the obtained results has been confirmed through theoretical substantiation of the mathematical models, limiting-case analysis, conservation-law verification, parametric investigations, global sensitivity analysis, and comparison with

established physical principles and published experimental data on oil filtration in porous media.

Scientific novelty lies in the development of a stochastic model for predicting emergency oil spills, an engineering methodology for spatial and temporal zoning of contaminated areas, an integrated environmental damage indicator, and the improvement of the mathematical description of oil migration in porous media through consistent coupling of filtration, sorption, and contaminant concentration models.

Practical significance of the obtained results consists in the possibility of applying the developed models and methodologies for predicting oil spill parameters, assessing environmental contamination, supporting economically justified investments in leak detection systems, selecting remediation technologies, supporting engineering decision-making during emergency response, and organizing post-accident environmental monitoring. The proposed methodology can be applied by pipeline operators, environmental protection authorities, civil protection agencies, engineering organizations, and higher education institutions.

The obtained results extend the scientific foundations of emergency oil spill prediction, mathematical modelling of contaminant migration in porous media, and engineering decision support, thereby contributing to improving the environmental safety of trunk oil pipeline transportation systems.

Keywords: mathematical modeling, main oil pipeline, emergency oil leak, emergency spill, hydrodynamics of outflow, flow coefficient, transient filtration, porous medium, sorption, Freundlich isotherm, physical and mechanical properties of soils, contamination zone, accident prediction, environmental risk, accident containment, remediation, environmental safety.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації

1. **Herasymenko, B. V., & Doroshenko Y. I.** (2026). Mathematical modeling of oil leakage dynamics from a pipeline into a po-rous medium considering soil filtration resistance. *PRECARPATHIAN BULLETIN OF THE SHEVCHENKO SCIENTIFIC SOCIETY. Number, (22(83), 222–233.* [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2026-22\(83\)-222-233](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2026-22(83)-222-233) **(Фахова стаття).** (Особистий внесок – розроблено математичну модель динаміки витоку нафти з трубопроводу в пористе середовище з урахуванням опору фільтрації ґрунту).
2. **Herasymenko, B.** (2026). Prediction of hydrocarbon pollution dispersion in soil environment and environmental risk assessment based on mathematical modeling. *Collection of Research Papers of the National Mining University, (84), 24–35.* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/84.024> **(Фахова стаття).** (Особистий внесок – одноосібна публікація)
3. Revitalization of Oil-Polluted Soils by Growing Phytoremediation Plants / Н. Hrytsuliak, A. Kotsyubynsky, V. Zaritskyu [et al.]. *Systems, Decision and Control in Energy VII.* Springer, Cham, 2024. P. 467–482. **(Стаття Scopus / Розділ монографії)** (Особистий внесок – проведено польові дослідження та проаналізовано отримані результати, що стали основою для публікації).

Тези наукових конференцій

4. **Gerasimenko B. V.** Study of damage to the soil cover on the linear part of oil pipelines... *Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2022. С. 24–26.* (Особистий внесок – одноосібна публікація)
5. **Herasymenko B.** Impact of hydrocarbon pollution on ecosystems. *Лісівнича освіта і наука: стан, проблеми та перспективи розвитку: матеріали IV*

Міжнар. наук.-практ. конф. Ломжа–Малин, 2024. (Особистий внесок – одноосібна публікація)

6. **Marych T., Herasymenko B., Zaritskiy V.** Assessment of the chemical composition of contaminated soils... *Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів і молодих вчених*. Івано-Франківськ, 2024. (Особистий внесок – зібрав інформацію та обробив її, сформулював висновки)
7. **Kotsyubynsky O., Herasymenko B.** Industry 4.0 in the transformation of the energy sector... *IV Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів і молодих вчених*. Івано-Франківськ, 2025. (Особистий внесок – зібрав інформацію та обробив її, сформулював висновки).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ АВАРІЙНИХ ВТРАТ НАФТИ ПРИ ТРУБОПРОВІДНОМУ ТРАНСПОРТІ ТА ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЇХ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ.....	25
1.1 Бібліометричний аналіз сучасного стану досліджень та формування інформаційної бази	25
1.2. Когнітивне картографування та тематична кластеризація предметної області за допомогою інструментарію VOSviewer.....	41
1.3 Сучасні підходи до дослідження гідродинаміки аварійних витоків нафти та впливу морфології дефектів.....	53
1.4 Математичне моделювання багатофазної фільтрації вуглеводнів у ґрунті з урахуванням гідродинамічного протитиску.....	56
1.5. Формування концепції подальших досліджень.....	60
Висновки до розділу 1.....	61
РОЗДІЛ 2 ОЦІНКА ВТРАТ НАФТИ ЧЕРЕЗ АВАРІЙНІ ВИТОКИ З ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ ТРУБОПРОВОДУ І РОЗРОБКА ЗАХОДІВ СКОРОЧЕННЯ	63
2.1 Постановка задачі та концептуальна структура стохастичної моделі...	65
2.2 Фізико-геометрична нелінійність дефекту та коефіцієнт витрати.....	68
2.2.1 Узагальнений коефіцієнт витрати з диференціацією за морфологією дефекту.....	68
2.2.2 Пружно-пластичне розкриття дефекту під дією внутрішнього тиску..	71
2.3 Просторовий характер витoku, стохастичне поширення невизначеностей та трифазна часова структура.....	74
2.3.1 Балансовий зв'язок з аналітичною моделлю фільтрації.....	74
2.3.2 Метод латинського гіперкубового планування.....	75
2.3.3 Трифазний інтеграл об'єму витoku.....	77
2.4 Результати моделювання, аналіз чутливості та економічна інтерпретація.....	81
2.4.1 Розподіли об'єму витoku.....	81
2.4.2 Глобальний аналіз чутливості: ієрархія факторів невизначеності.....	82
2.4.3 Економічна інтерпретація: EVPI та обґрунтування інвестицій у СВВ.	84
2.5 Верифікація та порівняльний аналіз з результатами 2017 року.....	89
Висновки до розділу 2.....	90

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ ВУГЛЕВОДНІВ У ҐРУНТІ ПРИ ПОЯВІ ВИТОКІВ З ТРУБОПРОВОДУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СОРБЦІЇ.....	92
3.1 Математичне моделювання нестационарної фільтрації нафти у пористому ґрунтовому середовищі.....	94
3.1.1 Вивід керуючого рівняння.....	95
3.1.2 Загальна стисливість пласта.....	97
3.1.3 Коефіцієнт п'єзопровідності та канонічне рівняння.....	98
3.1.4 Модель точкового джерела та постановка крайової задачі.....	99
3.1.5 Область застосування та основні припущення математичної моделі...	102
3.2 Аналітичний розв'язок задачі та ітераційний алгоритм врахування зворотного впливу.....	104
3.2.1 Послідовне застосування інтегральних перетворень.....	104
3.2.2 Обернені перетворення та аналітичний розв'язок.....	106
3.2.3 Квазістационарне наближення та характерний часовий масштаб.....	108
3.2.4 Рівняння витрати та нелінійний зворотний зв'язок.....	111
3.2.5 Ітераційний алгоритм.....	113
3.3 Порівняльний аналіз динаміки витоку, формування ареалу забруднення та врахування сорбції вуглеводнів.....	115
3.3.1 Параметри розрахунків та числові значення.....	115
3.3.2 Аналіз динаміки для супісків.....	117
3.3.3 Аналіз динаміки для суглинків.....	118
3.3.4 Просторова еволюція ареалу забруднення.....	120
3.3.5 Три фази формування ареалу забруднення.....	121
3.3.6 Механізми сорбції вуглеводнів у ґрунті.....	123
3.3.7 Коефіцієнт затримки та інтеграція сорбції в модель.....	126
3.4 Аналіз похибок математичної моделі.....	128
3.4.1 Похибки постановки задачі.....	128
3.4.2 Похибки вхідних даних.....	130
3.4.3 Оцінка адекватності та межі застосування моделі	132
3.4.4 Похибка обчислень.....	134
3.5 Верифікація моделі.....	135
3.5.1 Перевірка граничних та початкових умов.....	136
3.5.2 Перевірка на граничних випадках з відомим розв'язком.....	137
3.5.3 Перевірка збереження маси.....	138
3.5.4 Відповідність відомим фізичним закономірностям.....	138
3.5.5 Експериментальна верифікація на ґрунтовій фільтраційній колоні...	140
3.6 Обмеження моделі та шляхи їх подолання.....	141
3.6.1 Обмеження, пов'язані з постановкою задачі.....	141

3.6.2 Обмеження, пов'язані з властивостями рідини й режимом.....	142
3.6.3 Зведена характеристика обмежень.....	142
3.6.4 Межі коректного застосування.....	143
Висновки до розділу 3.....	144
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ АВАРІЙНИХ ВИТОКІВ НАФТИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ЗАХОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ.....	148
4.1 Структура причин аварійних розгерметизацій як основа калібрування моделі джерела.....	148
4.2 Вплив вуглеводневого забруднення на компоненти агроєкосистеми...	154
4.2.1 Первинне середовище ураження – ґрунтовий покрив.....	155
4.2.2 Реакція біотичних підсистем.....	157
4.2.3 Гармонізація змінної концентрації.....	160
4.2.4 Узагальнений індикатор екологічної шкоди.....	162
4.3 Просторово-часове зонування забрудненої території.....	165
4.4 Технологічне відображення зон на методи ремедіації.....	169
4.5 Загальна схема прийняття інженерно-екологічних рішень.....	174
4.6 Параметричні дослідження впливу ключових факторів на обсяг втрат та екологічний ареал.....	177
4.6.1 Вплив діаметра наскрізного дефекту.....	178
4.6.2 Вплив робочого тиску середовища.....	179
4.6.3 Вплив проникності ґрунту.....	180
4.6.4 Зв'язок джерела з обсягом ремедіаційних робіт.....	182
Висновки до розділу 4.....	184
ВИСНОВКИ.....	187
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	190
ДОДАТКИ.....	204

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

МН	Магістральний нафтопровід
ГДК	Гранично допустима концентрація
НПС	Нафтоперекачувальна станція
ПАР	Поверхнево-активні речовини
МКЕ	Метод скінченних елементів
МСР	Метод скінченних різниць
ОНС	Об'єкт навколишнього середовища
ЛОМ	Локально-одномірний метод
МЗН	Метод змінних напрямків
МСЕ	Метод суперелементів
АІМ	Агрегативно-імітаційний метод
СВВ	Система виявлення витоків
CFD	Computational Fluid Dynamics (обчислювальна гідродинаміка)
EVPI	Expected Value of Perfect Information (очікувана цінність досконалої інформації)
LHS	Latin Hypercube Sampling (метод латинського гіперкубового планування)
NAPL	Non-Aqueous Phase Liquid (рідина неводної фази)
LNAPL	Light Non-Aqueous Phase Liquid (легка рідина неводної фази)
SCC	Stress Corrosion Cracking (стрес-корозійне розтріскування)
ILI	In-Line Inspection (внутрішньотрубна діагностика)
EGIG	European Gas Pipeline Incident Data Group (Європейська група даних про інциденти на газопроводах)
VOS	Visualization of Similarities (візуалізація подібностей)
VOSviewer	Visualization of Similarities viewer (програма візуалізації подібностей)
E-RTTM	Extended Real-Time Transient Model (розширена модель перехідних процесів у реальному часі)
API	American Petroleum Institute (Американський нафтовий інститут)
CAPEX	Capital Expenditure (капітальні витрати)

Re	Число Рейнольдса (критерій гідродинамічної подібності)
Q	Витрата рідини (інтенсивність витоку), м ³ /с
P (p)	Тиск рідини в трубопроводі, Па
S	Площа поперечного перерізу отвору / дефекту, м ²
V	Об'єм витеклої нафти, м ³
K	Коефіцієнт фільтрації ґрунту, м/с
C	Концентрація забруднювача, кг/м ³
g	Прискорення вільного падіння, м/с ²
μ	Коефіцієнт витрати (у формулах витоку), безрозмірний
ν	Кінематична в'язкість нафти, м ² /с
ρ	Густина нафти, кг/м ³
θ	Об'ємна вологість ґрунту, безрозмірна
σ	Коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м

ВСТУП

Актуальність теми.

Магістральний трубопровідний транспорт є одним із найефективніших способів транспортування нафти на значні відстані та відіграє ключову роль у забезпеченні енергетичної безпеки держави. Надійність і безпечність функціонування магістральних нафтопроводів безпосередньо впливають на стабільність паливно-енергетичного комплексу, економічний розвиток країни та рівень екологічної безпеки. Водночас значна частина нафтотранспортної інфраструктури України експлуатується протягом тривалого часу, що зумовлює зростання ризику виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із корозійними пошкодженнями, старінням матеріалу труб, механічними навантаженнями, виробничими дефектами та несанкціонованими втручаннями в роботу трубопровідних систем.

Аварійні витoki нафти призводять до значних економічних втрат, забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, порушення функціонування природних екосистем та необхідності проведення дороговартісних відновлювальних заходів. Масштаби екологічних наслідків визначаються не лише обсягом втраченої нафти, а й швидкістю виявлення аварії, режимами роботи трубопровідної системи, геометричними характеристиками дефекту, фізико-механічними властивостями ґрунтів і процесами міграції забруднювача в ґрунтовому середовищі.

За останні десятиліття суттєво розширилися можливості математичного моделювання аварійних процесів у системах трубопровідного транспорту. Запропоновано численні моделі визначення параметрів витoku, оцінювання втрат нафти, прогнозування поширення забруднення та аналізу екологічних ризиків. Разом із тим більшість існуючих підходів розглядає окремі етапи розвитку аварійної ситуації ізольовано, що не забезпечує комплексного врахування взаємозв'язку процесів витікання нафти, зміни гідравлічного режиму роботи трубопроводу та її подальшої міграції в ґрунтовому середовищі.

Особливої актуальності набуває створення математичних моделей, які дозволяють комплексно враховувати режими роботи насосних станцій, час локалізації аварії, положення та геометричні параметри дефекту, а також фізико-механічні й сорбційні властивості ґрунтів. Такий підхід дає змогу підвищити достовірність прогнозування параметрів аварійних витоків, оцінювання масштабів забруднення територій і обґрунтування інженерних рішень щодо локалізації аварій та мінімізації їх екологічних наслідків.

Актуальність дисертаційного дослідження зумовлена необхідністю подальшого розвитку математичних моделей аварійного витоку нафти та прогнозування поширення нафтового забруднення в ґрунтовому середовищі з урахуванням особливостей функціонування магістральних трубопроводів і властивостей ґрунтів. Отримані результати спрямовані на підвищення достовірності прогнозування наслідків аварій, удосконалення науково-методичного забезпечення оцінювання екологічних ризиків і підтримки прийняття інженерних рішень під час локалізації та ліквідації аварійних ситуацій на об'єктах трубопровідного транспорту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до основних напрямів науково-дослідної діяльності Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та кафедри транспорту і зберігання енергоносіїв у межах досліджень, спрямованих на підвищення надійності, безпеки та екологічності функціонування систем трубопровідного транспорту енергоносіїв.

Тематика дослідження відповідає пріоритетним напрямам розвитку нафтогазової інженерії, пов'язаним із математичним моделюванням технологічних процесів транспортування нафти, дослідженням аварійних режимів експлуатації магістральних трубопроводів, прогнозуванням розвитку аварійних ситуацій, оцінюванням екологічних ризиків та розробленням науково обґрунтованих підходів до мінімізації негативного впливу аварійних витоків на компоненти навколишнього природного середовища.

Результати дисертаційної роботи спрямовані на розвиток науково-методичного забезпечення прогнозування параметрів аварійних витоків нафти, оцінювання масштабів забруднення ґрунтового середовища та підтримки прийняття інженерних рішень під час локалізації й ліквідації аварійних ситуацій на об'єктах трубопровідного транспорту. Одержані результати можуть бути використані під час удосконалення методів оцінювання екологічної безпеки магістральних нафтопроводів, планування аварійно-відновлювальних робіт та подальшого розвитку математичних моделей аварійних процесів у системах транспортування нафти.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення науково обґрунтованої методики прогнозування аварійних витоків нафти з магістральних нафтопроводів на основі стохастичного моделювання джерела витoku, математичного опису міграції нафти у ґрунтовому середовищі та комплексного оцінювання екологічних наслідків для підвищення обґрунтованості інженерно-екологічних рішень під час локалізації і ліквідації аварій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан проблеми аварійних витоків нафти з магістральних нафтопроводів, існуючі підходи до математичного моделювання аварійних процесів, оцінювання екологічних наслідків та ліквідації нафтового забруднення;
- розробити стохастичну модель аварійного витoku нафти, яка враховує невизначеність геометричних параметрів дефекту, коефіцієнта витрати, часу виявлення аварії та інших випадкових чинників;
- розробити математичну модель міграції нафти у ґрунтовому середовищі з урахуванням фільтраційних процесів, фізичних властивостей ґрунтів та особливостей поширення забруднення;
- розробити методику кількісного оцінювання екологічних наслідків аварійних витоків нафти шляхом інтегрального врахування впливу нафтового забруднення на основні компоненти агроєкосистем;

- розробити методику просторово-часового зонування забруднених територій та обґрунтувати вибір технологій ремедіації залежно від рівня екологічного ризику;
- виконати параметричні дослідження розроблених моделей та оцінити вплив основних факторів на масштаби аварійного витоку, поширення забруднення, екологічні наслідки й економічну доцільність природоохоронних заходів;
- узагальнити результати дослідження у вигляді комплексної інженерно-екологічної методики підтримки прийняття рішень під час ліквідації наслідків аварійних витоків нафти.

Об’єкт дослідження – процеси аварійного витікання нафти з магістральних трубопроводів та поширення нафтового забруднення в ґрунтовому середовищі.

Предмет дослідження – математичні моделі аварійного витоку нафти, процесів її поширення в ґрунтовому середовищі та закономірності впливу режимів функціонування магістральних трубопроводів, параметрів дефектів і фізико-механічних властивостей ґрунтів на формування зон забруднення.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано комплекс взаємопов’язаних теоретичних і прикладних методів дослідження, зокрема:

- методи системного аналізу – для аналізу сучасного стану проблеми аварійних витоків нафти та обґрунтування напрямів дослідження;
- бібліометричний аналіз та тематичну кластеризацію – для визначення сучасних тенденцій розвитку наукових досліджень і формування концептуальних напрямів роботи;
- методи математичного моделювання – для побудови моделей аварійного витоку нафти та прогнозування поширення забруднення;

- рівняння механіки рідин і газів, співвідношення гідравліки трубопроводів і рівняння Бернуллі – для визначення параметрів аварійного витоку;
- методи теорії фільтрації в пористих середовищах та математичні моделі сорбції – для опису процесів міграції нафти в ґрунтовому середовищі;
- аналітичні та чисельні методи дослідження диференціальних рівнянь – для розв'язання задач нестационарної фільтрації та аналізу взаємодії процесів витоку й поширення нафти;
- методи чисельного моделювання та комп'ютерних розрахунків – для реалізації математичних моделей, аналізу сценаріїв розвитку аварій та оцінювання отриманих результатів;
- методи порівняльного аналізу, узагальнення та верифікації – для оцінювання достовірності математичних моделей, аналізу їх похибок і визначення меж застосування.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні актуального науково-прикладного завдання підвищення достовірності прогнозування наслідків аварійних витоків нафти з магістральних трубопроводів шляхом удосконалення математичних моделей аварійного витоку та поширення нафтового забруднення в ґрунтовому середовищі.

Уперше:

- розроблено стохастичну модель прогнозування аварійного витоку нафти з магістральних нафтопроводів, яка, на відміну від існуючих підходів, враховує випадковий характер геометричних параметрів дефекту, коефіцієнта витрати, часу виявлення аварії та дозволяє визначати квантильні оцінки обсягів витоку.
- розроблено інженерну методику просторово-часового зонування території, забрудненої внаслідок аварійного витоку нафти, яка базується на результатах стохастичного прогнозування та математичного моделювання міграції нафти у ґрунтовому середовищі.

- запропоновано інтегральний безрозмірний показник екологічної шкоди, який забезпечує кількісне оцінювання сукупного впливу нафтового забруднення на ґрунт, мікробіоту, рослинність і мезофауну.

Удосконалено:

- математичний опис міграції нафти у ґрунтовому середовищі шляхом узгодження моделей фільтрації, насичення порового простору та визначення масової концентрації нафтопродуктів.

- підхід до економічного обґрунтування впровадження систем виявлення витоків на основі використання показника очікуваної цінності досконалої інформації (EVPI).

Набули подальшого розвитку:

- методичне забезпечення підтримки інженерно-екологічних рішень щодо ліквідації наслідків аварійних витоків нафти шляхом інтеграції моделей прогнозування витoku, поширення забруднення, екологічного оцінювання та вибору технологій ремедіації.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні комплексного науково-методичного забезпечення прогнозування аварійних витоків нафти з магістральних нафтопроводів, оцінювання їх екологічних наслідків та обґрунтування інженерно-екологічних рішень щодо локалізації й ліквідації аварій.

Розроблена стохастична модель аварійного витoku дозволяє перейти від детермінованих оцінок до ймовірнісного прогнозування обсягів втрат нафти із визначенням квантильних характеристик (P_{25} , P_{50} , P_{75} , P_{95}), що забезпечує більш обґрунтоване планування аварійно-відновлювальних заходів.

Запропонована математична модель міграції нафти у ґрунтовому середовищі та інженерна методика просторово-часового зонування забруднених територій можуть бути використані для оперативного прогнозування масштабів поширення забруднення, визначення зон екологічного ризику та вибору

першочергових природоохоронних заходів залежно від фактичних параметрів аварії.

Розроблений підхід до економічного обґрунтування впровадження систем виявлення витоків на основі показника очікуваної цінності досконалої інформації (EVPI) дозволяє визначати економічно доцільний обсяг інвестицій у системи моніторингу залежно від рівня аварійності трубопроводу та прогнозованих екологічних збитків.

Запропонована інженерно-екологічна методика підтримки прийняття рішень може бути використана:

- операторами магістральних нафтопроводів під час оцінювання ризиків експлуатації та планування модернізації систем виявлення витоків;
- природоохоронними підрозділами підприємств для прогнозування екологічних наслідків аварій та вибору технологій ремедіації;
- органами цивільного захисту під час планування аварійно-рятувальних робіт і мінімізації екологічних наслідків аварій;
- проєктними та науково-дослідними організаціями під час розроблення систем екологічного моніторингу та оцінювання ризиків експлуатації магістральних нафтопроводів.

Використання результатів дисертаційної роботи забезпечує підвищення обґрунтованості інженерних рішень під час експлуатації магістральних нафтопроводів, удосконалення планування аварійно-відновлювальних заходів та підвищення ефективності природоохоронних робіт за рахунок комплексного врахування невизначеності параметрів аварії, процесів міграції забруднення і просторово-часової оцінки екологічних наслідків.

Особистий внесок здобувача

Усі наукові результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. Автором проведено аналіз сучасного стану проблеми прогнозування аварійних витоків нафти з магістральних нафтопроводів, досліджено існуючі підходи до математичного моделювання аварійних процесів,

оцінювання екологічних наслідків та вибору технологій ліквідації нафтового забруднення.

Автором розроблено стохастичну модель прогнозування аварійного витоку нафти, виконано вибір випадкових параметрів моделі, обґрунтовано закони їх розподілу та реалізовано алгоритм параметричних розрахунків із визначенням квантильних характеристик обсягів витоку.

Самостійно розроблено математичну модель міграції нафти у ґрунтовому середовищі, виконано узгодження моделей фільтрації, насичення порового простору та визначення концентрації нафтопродуктів, проведено чисельні дослідження процесів поширення забруднення.

Автором систематизовано статистичні дані щодо причин аварійних розгерметизацій магістральних нафтопроводів, виконано їх аналіз та обґрунтовано використання отриманих результатів для калібрування параметрів стохастичної моделі аварійного витоку.

Самостійно розроблено методику кількісного оцінювання екологічних наслідків аварійних витоків нафти, запропоновано інтегральний показник екологічної шкоди, виконано просторово-часове зонування забруднених територій та сформовано рекомендації щодо вибору технологій ремедіації залежно від масштабу і характеру забруднення.

Автором виконано параметричні дослідження розроблених моделей, проведено економічне обґрунтування впровадження систем виявлення витоків із використанням показника очікуваної цінності досконалої інформації (EVPI), а також узагальнено результати дослідження у вигляді комплексної інженерно-екологічної методики підтримки прийняття рішень під час ліквідації наслідків аварійних витоків нафти.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать постановка окремих наукових завдань, розроблення математичних моделей, виконання розрахунків, аналіз і узагальнення отриманих результатів, підготовка графічного матеріалу та формулювання основних висновків. Конкретний внесок здобувача у кожній спільній публікації наведено у списку опублікованих праць.

Апробація результатів в дисертації

Основні положення доповідалися й обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях:

II Міжнародна наук.-практ. конференція «Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів» (Київ, 2022);

IV Міжнародна наук.-практ. конференція «Лісівнича освіта і наука» (Ломжа–Малин, 2024);

Всеукраїнські науково-практичні конференції здобувачів і молодих вчених (Івано-Франківськ, 2024, 2025).

Публікації

За темою дисертації опубліковано 7 наукових праць, зокрема 2 статті у фахових виданнях України, одна з яких є одноосібною, 1 розділ колективної монографії у виданні, індексованому міжнародною наукометричною базою Scopus, та 4 тези доповідей на наукових конференціях.

Структура роботи.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, науково-практичних рекомендацій, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 210 сторінок друкованого тексту, обсяг основного тексту становить 189 сторінка. Тестову частину ілюстровано 30 рисунками і 18 таблицями. Список літератури складає 107 назв, із них 100 латиницею.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ АВАРІЙНИХ ВТРАТ НАФТИ ПРИ ТРУБОПРОВІДНОМУ ТРАНСПОРТІ ТА ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЇХ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ

Аварійні витоки нафти з магістральних трубопроводів залишаються однією з найбільш складних техногенно-екологічних проблем нафтогазової галузі. Наслідки таких аварій визначаються не лише обсягом втрат нафти, а й масштабами забруднення ґрунтового середовища, тривалістю локалізації аварії та ефективністю подальших відновлювальних заходів. У зв'язку з цим особливого значення набуває розвиток математичних моделей, які забезпечують достовірне прогнозування перебігу аварійних процесів і дають можливість обґрунтовувати інженерні рішення щодо мінімізації їх екологічних наслідків.

За останні роки значно зросла кількість досліджень, присвячених математичному моделюванню аварійних витоків, поширенню нафти у ґрунтовому середовищі, аналізу ризиків та використанню цифрових технологій для підтримки прийняття рішень. Проте більшість із них розглядає окремі етапи аварійного процесу, тоді як комплексне врахування режимів роботи трубопроводу, параметрів дефекту та процесів міграції нафти у ґрунті залишається недостатньо дослідженим. З огляду на це у першому розділі виконано аналіз сучасного стану наукових досліджень із застосуванням бібліометричних методів, когнітивного картографування та критичного аналізу існуючих математичних моделей. Це дозволило визначити основні напрями розвитку предметної області, виявити наукові прогалини та обґрунтувати напрями подальших досліджень.

1.1 Бібліометричний аналіз сучасного стану досліджень та формування інформаційної бази

Сучасні дослідження у сфері аварійних витоків нафти мають виражений міждисциплінарний характер і охоплюють питання трубопровідного транспорту,

механіки рідин і газів, геотехніки, математичного моделювання, екологічної безпеки та цифрових технологій. За таких умов об'єктивне визначення сучасного стану наукової проблеми потребує застосування систематизованих методів аналізу наукової інформації, які дають змогу оцінити структуру предметної області, визначити основні напрями розвитку досліджень, виявити тенденції їх еволюції та окреслити існуючі наукові прогалини.

З цією метою у дисертаційній роботі застосовано бібліометричний аналіз як сучасний інструмент кількісного та якісного оцінювання наукових публікацій. Його використання дало змогу визначити ключові тематичні напрями досліджень, простежити динаміку розвитку предметної області, ідентифікувати провідні наукові школи, авторів та країни, а також сформувати інформаційну основу для подальшого критичного аналізу сучасних підходів до моделювання аварійних витоків нафти.

Для формування інформаційної бази дослідження використано міжнародну наукометричну базу даних **Scopus**, яка є однією з найбільших реферативних баз наукових публікацій та забезпечує широке охоплення сучасних досліджень у галузях нафтогазової інженерії, математичного моделювання, екологічної безпеки та наук про навколишнє середовище. Використання бази **Scopus** дало змогу сформувати репрезентативну вибірку сучасних наукових праць, необхідну для проведення бібліометричного аналізу, визначення актуальних напрямів розвитку досліджень і виявлення наукових проблем, пов'язаних із математичним моделюванням аварійних витоків нафти та прогнозуванням їх екологічних наслідків.

Інформаційний пошук здійснювався за спеціально сформованими пошуковими запитамі із використанням ключових слів, що характеризують аварійні витoki нафти, магістральні трубопроводи, математичне моделювання, процеси поширення забруднення, фільтрацію та екологічні наслідки аварій. Для підвищення релевантності отриманої вибірки застосовано логічні оператори пошуку, а також обмеження за предметними галузями, типами документів і часовим періодом публікацій. Після вилучення дублікатів і нерелевантних

джерел сформовано інформаційну базу, яка стала основою для проведення бібліометричного аналізу та подальшої тематичної кластеризації предметної області.

Зважаючи на міждисциплінарний характер досліджуваної проблематики, інформаційний пошук здійснювався за двома взаємодоповнювальними тематичними напрямками. Перший напрям охоплює дослідження, присвячені гідродинаміці аварійних процесів, математичному моделюванню витоків та визначенню параметрів аварійного розгерметизування трубопроводів. Другий напрям спрямований на дослідження процесів міграції нафти у ґрунтовому середовищі, її фізико-хімічної взаємодії з ґрунтом, моделювання процесів сорбції, інфільтрації та оцінювання екологічних наслідків аварійних розливів. Основні напрями бібліометричного пошуку та відповідні пошукові запити наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні напрями бібліометричного пошуку та відповідні пошукові запити у базі Scopus

Напрямок дослідження	Характеристика та наукове обґрунтування вибору	Синтаксис пошукового запиту в базі Scopus
1. Гідродинаміка аварійних процесів та моделювання витоків	Вектор спрямований на аналіз фізичних механізмів формування джерела забруднення. Акцент зроблено не на статичному описі інфраструктури, а на динамічних процесах: моделюванні розривів, нестационарних режимах течії та методах розрахунку швидкості витікання. Це дозволяє оцінити точність існуючих підходів до визначення об'ємів втрат нафти.	("pipeline" OR "oil transport") AND ("leakage" OR "outflow" OR "rupture") AND ("dynamics" OR "simulation" OR "modeling")
2. Моделювання міграції та фізико-хімічної взаємодії вуглеводнів у ґрунті	Вектор фокусується на поведінці політанта після контакту з літосферою. Для забезпечення чистоти вибірки пошук лімітовано контекстом аварійності, що дозволило відсіяти загальноєкологічні праці та сконцентруватися на математичному описі процесів інфільтрації, сорбції та розповсюдження плями забруднення від конкретного джерела.	("soil contamination" OR "porous media flow" OR "contaminant transport" OR "multiphase flow" OR "sorption" OR "infiltration" OR "environmental risk assessment" OR "bioremediation") AND ("oil" OR "petroleum" OR "hydrocarbon") AND ("pipeline" OR "transportation" OR "leakage" OR "spill" OR "accident")

Після первинного пошуку виконано експертне оцінювання та очищення сформованої вибірки, що передбачало вилучення дублікатів, нерелевантних документів і публікацій, зміст яких не відповідав предметній області дослідження. Сформована інформаційна база стала основою для подальшого бібліометричного аналізу, побудови карт наукових зв'язків, визначення провідних напрямів розвитку досліджень і виявлення наукових прогалин у сфері математичного моделювання аварійних витоків нафти.

За другим напрямом бібліометричного пошуку отримано 7738 документів, що майже вдвічі перевищує кількість публікацій, виявлених за першим напрямом. Такий результат свідчить, що проблематика екологічних наслідків аварійних витоків розглядається значно ширше, ніж питання безпосередньої гідродинаміки процесу витікання. Це пояснюється міждисциплінарним характером досліджень, до яких залучаються фахівці з екології, геології, ґрунтознавства, хімії та математичного моделювання. Отримані результати підтверджують, що сучасний науковий дискурс дедалі більше зосереджується на комплексному аналізі процесів взаємодії системи «нафта – ґрунтове середовище», що визначає актуальність подальшого розвитку інтегрованих математичних моделей.

Хронологічний розподіл наукових публікацій (рис. 1.1) свідчить про стійке зростання наукового інтересу до проблем аварійних витоків нафти та прогнозування їх екологічних наслідків. Апроксимація отриманих даних дозволяє виокремити два характерні етапи розвитку досліджень.

Перший етап (до 2010–2012 рр.) характеризується поступовим лінійним зростанням кількості наукових праць. У цей період переважали дослідження, спрямовані на аналіз причин виникнення аварій та ліквідацію їх наслідків, тоді як питання математичного прогнозування параметрів витoku та поширення забруднення розглядалися фрагментарно.

Другий етап (починаючи з 2013–2015 рр.) характеризується експоненціальним зростанням кількості публікацій. Така тенденція обумовлена критичним старінням значної частини нафтотранспортної інфраструктури,

посиленням міжнародних екологічних вимог, розвитком цифрових технологій моніторингу та широким упровадженням сучасних методів математичного моделювання аварійних процесів.

Незважаючи на відмінності у кількісних показниках, динаміка обох напрямів є синхронною, що свідчить про їх тісний взаємозв'язок. Розвиток методів моделювання аварійних витоків безпосередньо стимулює вдосконалення моделей прогнозування поширення забруднення та оцінювання екологічних ризиків. Саме інтеграція уточнених моделей гідродинаміки аварійного витоку з математичним описом міграції нафти у ґрунтовому середовищі визначає сучасний напрям розвитку досліджень і становить концептуальну основу цієї дисертаційної роботи.

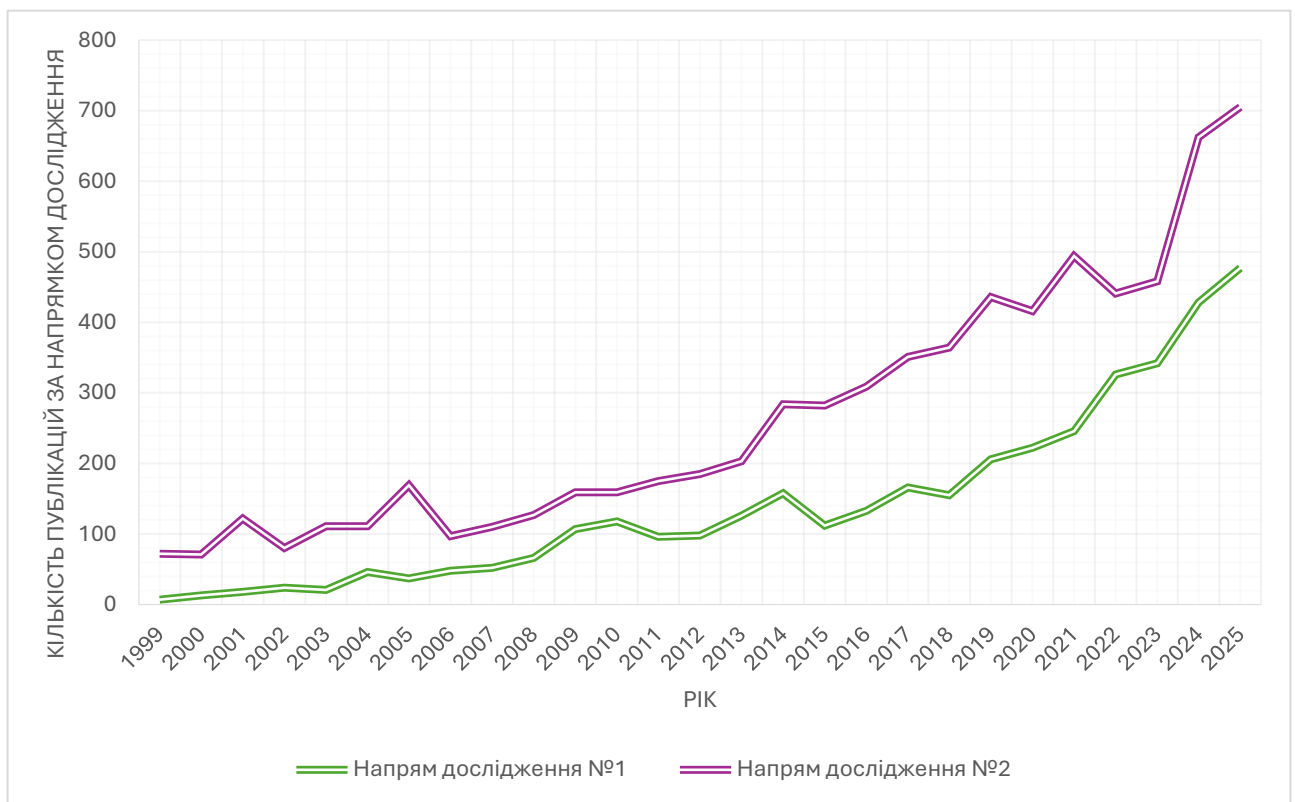


Рисунок 1.1 – Динаміка зростання наукового інтересу до проблем аварійних витоків нафти та забруднення ґрунтів (за даними бази Scopus)

Окрім кількісних характеристик публікаційної активності, важливим етапом бібліометричного аналізу є оцінювання наукової вагомості досліджень, що визначають сучасний розвиток предметної області. З цією метою проведено

ранжування отриманої вибірки за кількістю цитувань. Результати ранжування наведено в таблиці 1.2. Індекс цитування використано як один із найбільш поширених показників оцінювання наукового впливу публікацій та їхнього внеску в розвиток відповідного напрямку досліджень.

Таблиця 1.2 – Характеристика найбільш цитованих наукових праць, що формують теоретичний базис дослідження

Назва публікації / Рік видання	Кількість цитувань	Характеристика наукового результату та його значення для дисертаційної роботи
Гідродинаміка аварійних процесів (Напрямок 1)		
«Efficient pipeline for image-based patient-specific analysis of cerebral aneurysm hemodynamics: Technique and sensitivity» [9] Рік – 2005	531	Робота є фундаментальною у сфері обчислювальної гідродинаміки (CFD). Хоча об'єктом дослідження є біологічні судини, автори на основі аналізу чутливості довели, що геометрія каналу є домінуючим фактором, який визначає структуру потоку, тоді як в'язкість в певних межах можна нехтувати. Для нашої дисертації цей висновок є методологічним підґрунтям для розробки моделі витікання через щілиноподібні дефекти складної конфігурації."
«Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures - A technical review» [10] Рік - 2015	492	Оглядова праця систематизує знання про піттингову корозію як основну причину розгерметизації морських та наземних споруд. Автори наголошують на відсутності надійних предиктивних моделей, які б пов'язували глибину дефекту з ймовірністю аварійного витікання. Це підтверджує актуальність нашого завдання щодо встановлення залежності коефіцієнта витрати саме від геометричних параметрів корозійного отвору, що розвивається в часі.
«Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks» [11] Рік - 2008	363	Автори пропонують удосконалений підхід до симуляції витоків, який, на відміну від класичних гідравлічних розрахунків, базується на моделі, керованій тиском (pressure-driven analysis). Доведено, що ігнорування динаміки тиску призводить до значних похибок в оцінці об'ємів втрат рідини. Ця теза повністю корелює з нашою гіпотезою про необхідність врахування падіння тиску та фазових переходів у нафтопроводі під час аварії.

Закінчення таблиці 1.2

Моделювання процесів у ґрунті (Напрям 2)		
«Microbial production of surfactants and their commercial potential» [12] Рік - 1997	2171	Класична праця, що розкриває механізми взаємодії поверхнево-активних речовин із вуглеводнями. Показано, що зміна поверхневого натягу критично впливає на мобільність нафти та її доступність для біодеградації. У контексті нашої роботи це обґрунтовує необхідність включення параметрів сорбції та капілярних сил у математичну модель фільтрації, оскільки суто гравітаційні моделі не враховують фізико-хімічного утримання забрудника.
«Impact of shale gas development on regional water quality» [13] Рік - 2013	1247	У статті проаналізовано ризики міграції вуглеводнів через природні та техногенні тріщини у водоносні горизонти. Ключовим висновком є необхідність покращення розуміння процесів транспорту забруднюючих речовин (fate and transport) для коректної оцінки екологічних ризиків. Це безпосередньо вказує на актуальність розробки нашої методики просторового прогнозування зон забруднення при аварійних розливах.
«Microbial degradation of petroleum hydrocarbons» [14] Рік - 2017	1144	Робота присвячена біоремедіації та метаболізму вуглеводнів. Автором встановлено, що швидкість деградації нафти лімітується її фізичним станом у ґрунті та сорбційною здатністю матриксу. Це підтверджує важливість нашого підходу, де сорбція розглядається не просто як фактор затримки руху нафти, а як ключовий параметр для подальшого розрахунку ефективності ремедіаційних заходів.

У таблиці 1.2 наведено найбільш цитовані наукові праці за двома напрямками бібліометричного пошуку. Їх аналіз свідчить, що фундамент сучасних досліджень формують роботи, присвячені математичному моделюванню фізичних процесів, розвитку чисельних методів розрахунку та дослідженню закономірностей поширення забруднювальних речовин у природних середовищах. Водночас високий рівень цитованості мають переважно праці, результати яких мають універсальний характер і можуть бути використані для розв'язання широкого кола інженерних задач.

За першим напрямом бібліометричного пошуку («Гідродинаміка аварійних процесів та моделювання витоків») найбільш цитовані дослідження присвячені розвитку методів обчислювальної гідродинаміки, удосконаленню математичних моделей витікання рідин, аналізу багатофазних потоків і моделюванню нестационарних процесів у трубопровідних системах. Наведені в таблиці 1.2 праці підтверджують, що сучасні наукові дослідження орієнтовані на підвищення точності визначення параметрів аварійних витоків шляхом урахування змінного тиску, геометричних характеристик дефектів та особливостей розвитку аварійних режимів.

За другим напрямом («Моделювання міграції та фізико-хімічної взаємодії вуглеводнів у ґрунті») найбільш цитовані публікації присвячені процесам масопереносу, сорбції, інфільтрації, біодеградації та ремедіації забруднених територій. Як наведено в таблиці 1.2, сучасні дослідження приділяють значну увагу математичному опису взаємодії нафти з ґрунтовим середовищем, що дає змогу більш обґрунтовано прогнозувати масштаби та динаміку поширення забруднення.

Порівняльний аналіз найбільш цитованих наукових праць свідчить, що сучасні дослідження розвиваються у двох взаємопов'язаних напрямках. Перший зосереджений на вдосконаленні математичного опису процесів аварійного витікання нафти з трубопроводів, тоді як другий спрямований на дослідження закономірностей її міграції та трансформації у ґрунтовому середовищі. Водночас комплексні дослідження, які інтегрують зазначені напрями в межах єдиної математичної моделі, залишаються недостатньо поширеними. Це обумовлює необхідність подальшого розвитку інтегрованих математичних моделей, що комплексно враховують процеси аварійного витоку нафти та її поширення в ґрунтовому середовищі, і визначає один із ключових напрямів дисертаційного дослідження.

До десятки найбільш цитованих публікацій за обома напрямами також входять оглядові статті, присвячені систематизації сучасних підходів до виявлення та ліквідації аварійних розливів нафти. Разом із тим для цілей

дисертаційного дослідження першочергове значення мають експериментальні та розрахункові роботи, наведені в таблиці 1.2, оскільки саме вони містять первинні математичні моделі, що стали основою для подальшого розвитку та удосконалення.

Проведений аналіз свідчить, що сучасні дослідження розвиваються у двох взаємопов'язаних напрямках: удосконалення математичного опису процесів аварійного витікання нафти та дослідження закономірностей її міграції у ґрунтовому середовищі. Водночас комплексні моделі, які одночасно враховують процеси витоку, поширення забруднення та взаємодію нафти з ґрунтовим середовищем, залишаються недостатньо поширеними. Це обумовлює необхідність подальшого розвитку інтегрованих математичних моделей, що поєднують зазначені напрями досліджень.

Важливим показником розвитку будь-якого наукового напрямку є сформованість наукових шкіл і кола дослідників, які визначають основні тенденції його еволюції. Аналіз публікаційної активності авторів дає змогу ідентифікувати провідних учених, наукові підходи яких найбільшою мірою вплинули на формування сучасних методів моделювання аварійних витоків нафти та оцінювання їх екологічних наслідків.

За результатами бібліометричного аналізу першого напрямку («Гідродинаміка аварійних процесів та моделювання витоків») встановлено групу дослідників, праці яких формують інтелектуальне ядро предметної області (рис. 1.2). Найбільшу публікаційну активність мають Li Y., Mahgerefteh H., Liu C. та O'Rourke T.D., наукові роботи яких присвячені розвитку методів виявлення аварійних витоків, математичному моделюванню нестационарних процесів у трубопроводах і вдосконаленню алгоритмів прогнозування параметрів витоку.

Аналіз наукових праць зазначених авторів свідчить, що сучасні дослідження спрямовані на підвищення точності математичних моделей шляхом поєднання чисельних методів гідродинаміки з експериментальними даними та інформацією систем моніторингу. Такий підхід забезпечує зменшення похибок визначення параметрів аварійного витоку і підтверджує актуальність подальшого

вдосконалення математичного опису процесу витікання нафти, що відповідає одному із завдань дисертаційного дослідження.

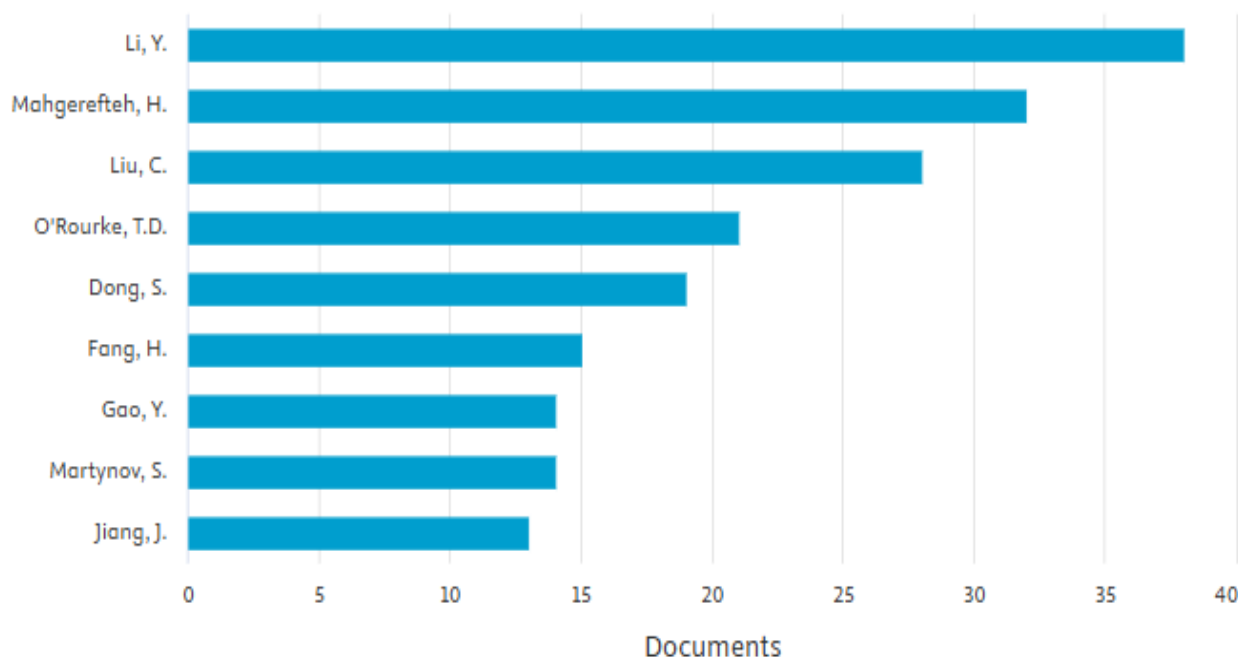


Рисунок 1.2 – Розподіл кількості публікацій за авторством у межах Напрямку 1 (Гідродинаміка аварійних процесів) за даними бази Scopus

На відміну від першого напрямку, структура публікаційної активності за другим напрямом («Моделювання процесів у ґрунтовому середовищі») характеризується більшою міждисциплінарністю та ширшим колом дослідників (рис. 1.3). Найбільшу кількість публікацій мають Lee K., Shirazi S.A., Venosa A.D. та Prince R.C., наукові праці яких присвячені дослідженню процесів масопереносу вуглеводнів, сорбції, біодеградації та ремедіації забруднених територій.

Аналіз публікацій зазначених авторів свідчить, що сучасні дослідження дедалі більше орієнтовані на математичне моделювання поведінки забруднювальних речовин у багатофазних природних середовищах. Значна увага приділяється кількісному опису процесів взаємодії нафти з ґрунтом, що забезпечує підвищення достовірності прогнозування масштабів і динаміки поширення забруднення.

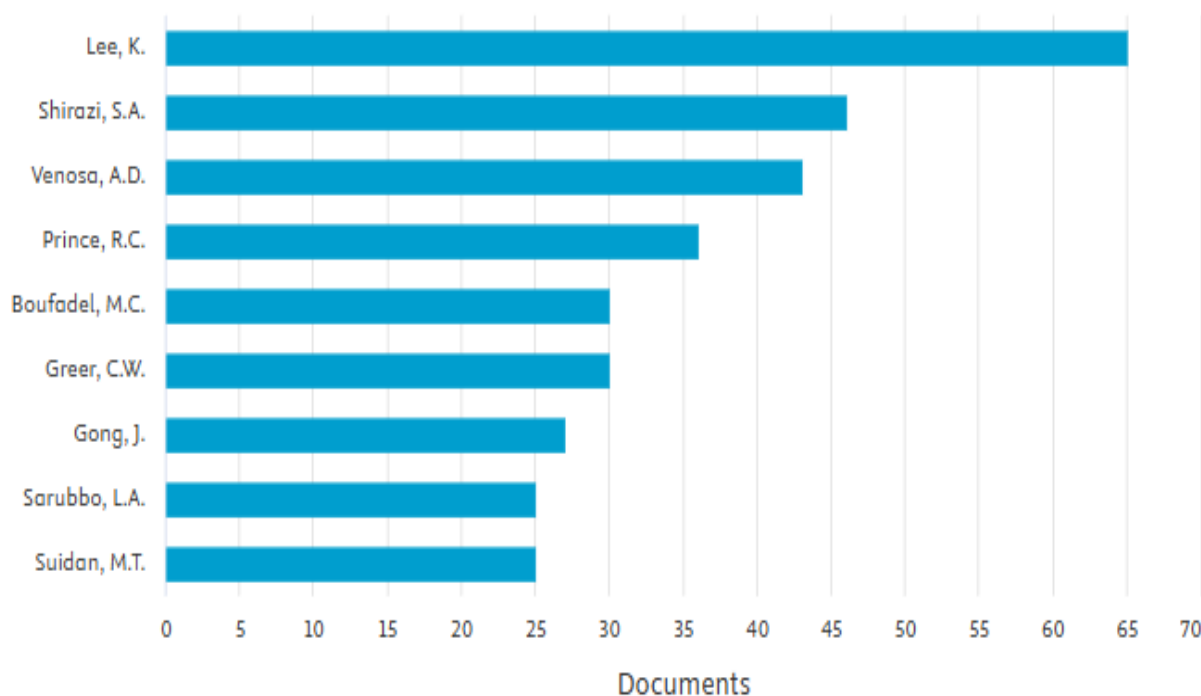
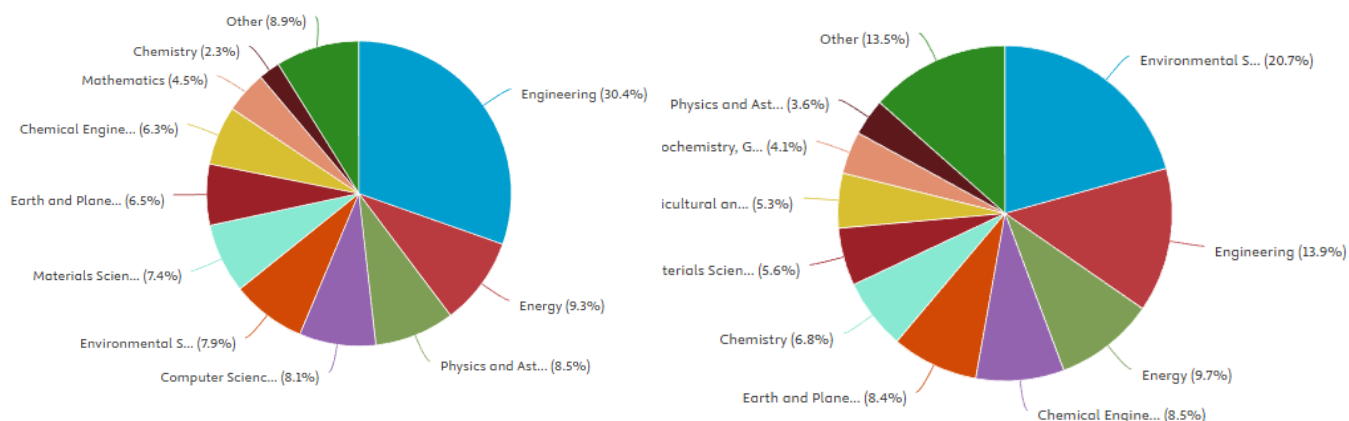


Рисунок 1.3 – Ранжування авторів за кількістю публікацій у межах Напрямку 2 (Моделювання процесів у ґрунті) за даними бази Scopus

Порівняльний аналіз авторських колективів за двома напрямками досліджень свідчить про формування двох відносно самостійних наукових шкіл. Перша спеціалізується на математичному описі процесів аварійного витікання нафти та гідродинаміці трубопровідних систем, друга – на дослідженні процесів міграції нафти у ґрунтовому середовищі та оцінюванні екологічних наслідків аварій. Водночас кількість досліджень, у яких поєднано зазначені напрями в межах єдиного математичного підходу, залишається обмеженою. Це підтверджує доцільність розроблення інтегрованих моделей, здатних комплексно описувати як процес аварійного витоку, так і подальше поширення нафти у ґрунтовому середовищі.

Для більш повного визначення сучасної структури предметної області проведено аналіз розподілу публікацій за предметними галузями, результати якого наведено на рисунку 1.4. Дисциплінарна структура досліджень демонструє суттєві відмінності у наукових підходах до вивчення аварійних витоків нафти та їх екологічних наслідків.



Напрямок 1 (Гідродинаміка)

Напрямок 2 (Екологія ґрунтів)

Рисунок 1.4 – Розподіл наукових публікацій за предметними областями для Напрямку 1 та Напрямку 2 за даними Scopus

Для напрямку 1 («Гідродинаміка аварійних процесів») характерним є переважання технічних і прикладних дисциплін. Як наведено на рисунку 1.4, найбільшу частку становлять:

- інженерія, у межах якої розробляються конструктивні рішення, методи технічної діагностики та моделі функціонування трубопровідних систем;
- енергетика, що охоплює питання забезпечення надійності та безпеки транспортування енергоносіїв;
- комп'ютерні науки, розвиток яких пов'язаний із застосуванням чисельних методів, цифрового моделювання та інтелектуальних систем виявлення аварійних витоків.

Домінування зазначених предметних галузей підтверджує, що перший напрям досліджень орієнтований насамперед на підвищення надійності функціонування трубопровідних систем і вдосконалення методів прогнозування параметрів аварійного витоку.

На відміну від нього, напрям 2 («Моделювання процесів у ґрунтовому середовищі») характеризується значно ширшою дисциплінарною структурою. Відповідно до рисунка 1.4, провідними предметними галузями є:

- науки про навколишнє середовище, що охоплюють оцінювання екологічних наслідків аварійних витоків;
- науки про Землю, у межах яких досліджуються фізико-механічні властивості ґрунтів, процеси фільтрації та міграції забруднювальних речовин;
- хімічна інженерія, яка забезпечує математичний опис фізико-хімічних процесів взаємодії нафти з ґрунтовим середовищем, зокрема сорбції, десорбції та деградації вуглеводнів.

Порівняння дисциплінарної структури двох напрямів досліджень свідчить, що сучасний розвиток проблематики аварійних витоків нафти відбувається на перетині інженерних, природничих та екологічних наук. Саме інтеграція методів математичного моделювання аварійного витоку з моделями міграції нафти у ґрунтовому середовищі є одним із найбільш перспективних напрямів подальших досліджень і визначає концептуальну основу цієї дисертаційної роботи.

Порівняльний аналіз отриманих результатів свідчить, що сучасні дослідження переважно розглядають процеси аварійного витікання нафти та її подальшого поширення у ґрунтовому середовищі як окремі наукові напрями. У першому випадку основна увага приділяється інженерним аспектам забезпечення герметичності трубопроводних систем і математичному моделюванню параметрів витоку, у другому – прогнозуванню міграції нафти, фізико-хімічним процесам її взаємодії з ґрунтом та оцінюванню екологічних наслідків аварій.

Водночас результати проведеного бібліометричного аналізу підтверджують доцільність інтеграції зазначених напрямів у межах єдиного математичного підходу. Саме поєднання моделей аварійного витоку з моделями масопереносу нафти у ґрунтовому середовищі створює передумови для підвищення достовірності прогнозування розвитку аварійних ситуацій і становить концептуальну основу дисертаційного дослідження.

Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку міждисциплінарних досліджень, що поєднують досягнення інженерних, екологічних та природничих наук. Це підтверджується результатами бібліометричного аналізу, які свідчать про перетин предметних галузей у сферах енергетики, ресурсоефективності, наук про навколишнє середовище та математичного моделювання, де розв'язання актуальних науково-прикладних завдань потребує комплексного використання методів і підходів різних наукових напрямів.

Для визначення глобальних центрів розвитку досліджень у сфері аварійних витоків нафти проведено аналіз розподілу наукових публікацій за країнами та територіями. Результати аналізу наведено на рисунках 1.5 та 1.6. Географічний розподіл публікацій свідчить про тісний взаємозв'язок між рівнем розвитку паливно-енергетичного комплексу країни, масштабами трубопровідної інфраструктури та інтенсивністю наукових досліджень, спрямованих на підвищення її надійності й екологічної безпеки.

Як наведено на рисунку 1.5, за напрямом «Гідродинаміка аварійних процесів» найбільшу публікаційну активність демонструють Китай та США. Лідерство Китаю зумовлене масштабним розвитком трубопровідної інфраструктури та активним упровадженням цифрових систем моніторингу й діагностики технічного стану трубопроводів. Для США визначальним чинником є тривала експлуатація значної кількості магістральних трубопроводів, що обумовлює необхідність удосконалення методів оцінювання їх технічного стану, прогнозування аварійних ситуацій і мінімізації ризиків виникнення витоків.

Високу публікаційну активність також демонструють Канада та Іран, що пояснюється стратегічною роллю нафтотранспортної інфраструктури в економіці цих країн та необхідністю забезпечення її безпечної експлуатації. Отримані результати підтверджують, що інтенсивність наукових досліджень безпосередньо пов'язана з практичною потребою у вдосконаленні методів моделювання аварійних процесів і підвищенні рівня екологічної безпеки трубопровідного транспорту.

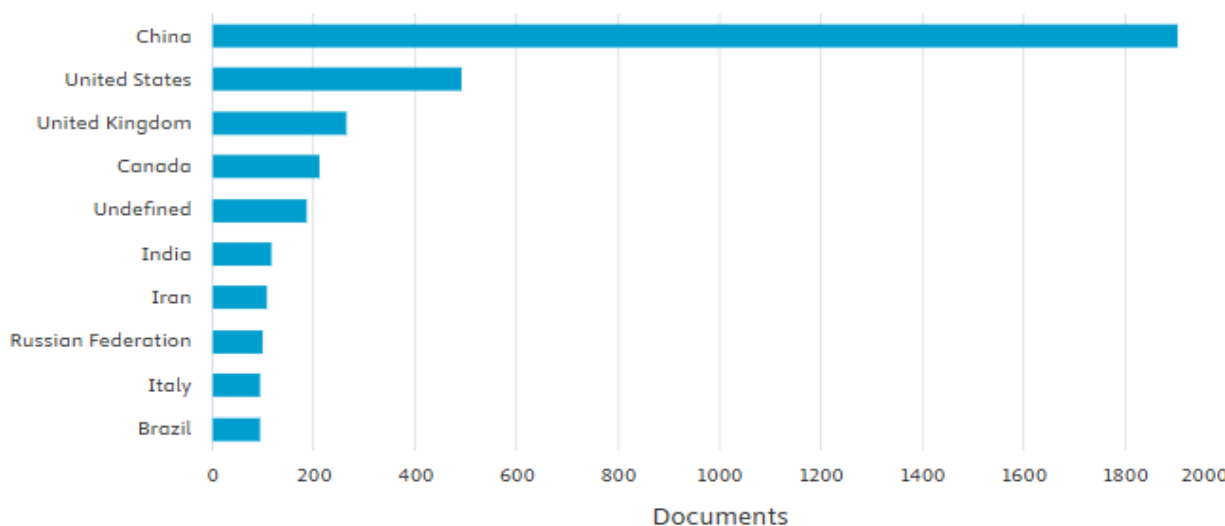


Рисунок 1.5 – Розподіл наукових публікацій за країнами в межах Напрямку 1 (згідно з базою Scopus)

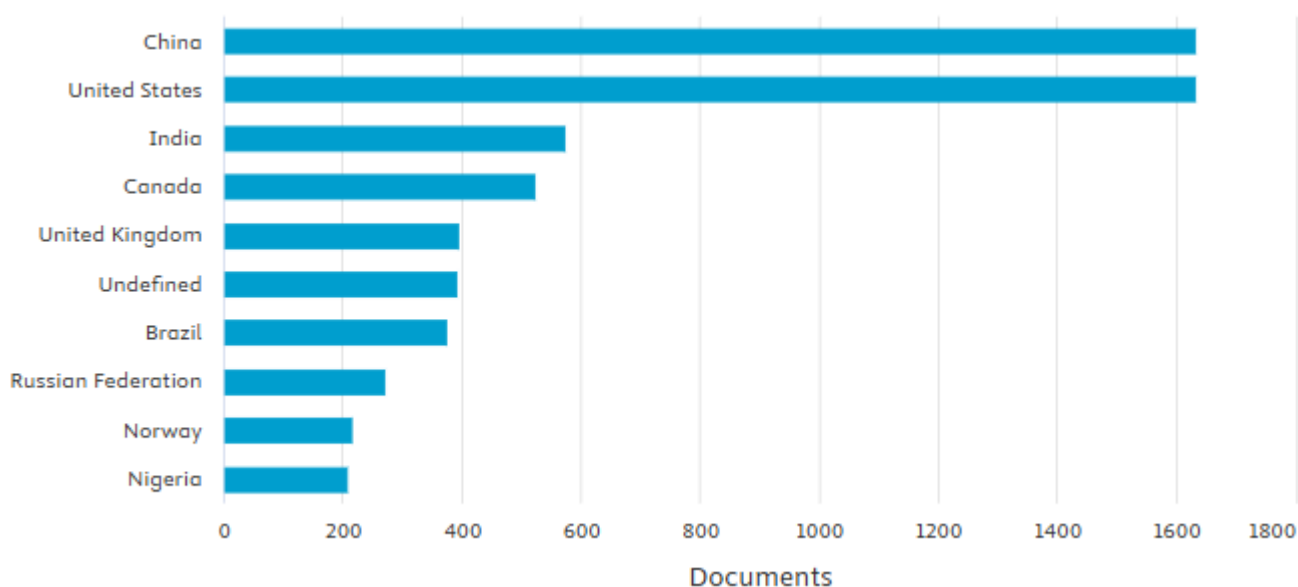


Рисунок 1.6 – Розподіл наукових публікацій за країнами в межах Напрямку 2 (згідно з базою Scopus)

Напрямок 2 («Моделювання процесів у ґрунтовому середовищі») характеризується дещо іншою географічною структурою публікаційної активності (рис. 1.6). Хоча Китай і США зберігають провідні позиції, суттєво зростає частка публікацій, виконаних науковцями Індії та країн Європейського Союзу, насамперед Німеччини й Італії. Це свідчить про посилення уваги до

проблем екологічної ремедіації, сталого використання земельних ресурсів та мінімізації наслідків техногенного забруднення. Для країн Європейського Союзу характерним є зосередження досліджень на питаннях прогнозування поширення забруднення, відновлення екосистем і розроблення технологій очищення ґрунтів, що підтверджується значною кількістю публікацій, присвячених процесам сорбції, біодеградації та ремедіації вуглеводневих забруднень.

Аналіз географічного розподілу наукових публікацій також засвідчив участь українських дослідників у розвитку зазначеної предметної області. Незважаючи на менші кількісні показники порівняно з провідними науковими центрами світу, наявність публікацій українських авторів у виданнях, що індексуються в базі Scopus, свідчить про інтеграцію вітчизняної наукової спільноти до міжнародного наукового простору та її внесок у розвиток сучасних підходів до моделювання аварійних витоків нафти.

Узагальнення результатів бібліометричного аналізу дає підстави стверджувати, що дослідження аварійних витоків нафти та їхнього впливу на ґрунтове середовище перебувають на етапі активного розвитку. Експоненціальне зростання кількості публікацій, формування провідних наукових шкіл, висока цитованість фундаментальних досліджень і розширення міждисциплінарної взаємодії свідчать про накопичення значного обсягу наукових знань, які потребують інтеграції в межах комплексних математичних моделей.

Проведений аналіз підтвердив доцільність виділення двох взаємопов'язаних напрямів досліджень: інженерного, орієнтованого на моделювання процесів аварійного витоку, та еколого-геоекологічного, спрямованого на дослідження міграції нафти й оцінювання екологічних наслідків аварій. Водночас встановлено, що більшість сучасних наукових праць присвячена окремим аспектам проблеми – визначенню параметрів витоку, моделюванню процесів масопереносу, оцінюванню екологічних ризиків або розробленню систем виявлення аварійних ситуацій. Комплексне врахування режимів функціонування магістрального трубопроводу, параметрів дефекту,

процесів локалізації аварії та подальшого поширення нафти у ґрунтовому середовищі представлено недостатньо.

Таким чином, результати бібліометричного аналізу підтверджують наявність наукової прогалини, пов'язаної з відсутністю інтегрованого підходу до математичного моделювання аварійних витоків нафти та прогнозування їх екологічних наслідків. Саме ця обставина обумовлює необхідність подальшого розвитку комплексних математичних моделей і визначає напрям дисертаційного дослідження.

Разом із тим бібліометричний аналіз дозволяє оцінити лише кількісні характеристики розвитку предметної області та загальні тенденції її еволюції. Для більш глибокого дослідження внутрішньої структури наукових знань, встановлення взаємозв'язків між ключовими тематичними напрямками та виявлення сучасних дослідницьких кластерів на наступному етапі виконано когнітивне картографування із застосуванням програмного комплексу VOSviewer.

1.2. Когнітивне картографування та тематична кластеризація предметної області за допомогою інструментарію VOSviewer

Для переходу від кількісного бібліометричного аналізу до якісного дослідження структури предметної області застосовано методи мережевої візуалізації. Такий підхід дає змогу виявити взаємозв'язки між ключовими поняттями, визначити тематичні кластери, встановити домінуючі напрями розвитку наукових досліджень та ідентифікувати наукові прогалини, що залишаються недостатньо опрацьованими.

Одним із найбільш поширених інструментів для виконання таких досліджень є програмний комплекс VOSviewer (*Visualization of Similarities*), розроблений науковцями Лейденського університету. Методологія VOS ґрунтується на аналізі подібності між бібліографічними даними та забезпечує їх візуалізацію у вигляді двовимірних мережових карт, що формуються на основі метаданих

наукометричних баз даних, зокрема Scopus [15]. Наукова обґрунтованість цього підходу підтверджується фундаментальними роботами Н. ван Ека та Л. Вальтмана [16], а також його широким використанням у сучасних дослідженнях, присвячених розвитку енергетичної інфраструктури, екологічній безпеці та аналізу наукових напрямів [17, 18].

Інтерпретація результатів когнітивного картографування базується на аналізі трьох основних елементів мережевої моделі:

- вузлів, які відповідають окремим ключовим словам. Розмір вузла пропорційний частоті використання відповідного терміна у вибірці наукових публікацій, що характеризує його значущість у досліджуваній предметній області;

- кластерів, які формуються автоматично на основі сили взаємозв'язків між ключовими словами. Кожний кластер об'єднує терміни, що найчастіше спільно використовуються в наукових публікаціях, і відображає окремий тематичний напрям досліджень;

- зв'язків та відстаней між вузлами, які характеризують ступінь взаємопов'язаності окремих наукових понять. Чим меншою є відстань між вузлами, тим тісніше пов'язані відповідні тематики у сучасних дослідженнях.

Сформовані за результатами бібліометричного пошуку масиви бібліографічних метаданих за двома напрямками дослідження було експортовано у форматі CSV та опрацьовано в середовищі VOSviewer. Для побудови когнітивних карт використано метод спільної появи ключових слів (*co-occurrence analysis*), який дозволяє визначити структуру предметної області, виокремити тематичні кластери та встановити взаємозв'язки між основними напрямками сучасних досліджень.

Результати когнітивного картографування за напрямом «Гідродинаміка аварійних процесів та моделювання витоків» наведено на рисунку 1.7, а за напрямом «Моделювання міграції та фізико-хімічної взаємодії вуглеводнів у ґрунті» – на рисунку 1.8.

Аналіз мережевої структури, наведеної на рисунку 1.7, дозволяє виокремити кілька взаємопов'язаних тематичних кластерів, які відображають сучасні напрями розвитку досліджень у сфері математичного моделювання аварійних витоків нафти.

Центральне місце на карті займає кластер, сформований навколо ключових термінів «pipeline», «oil spill» та «accidents», які характеризують фундаментальні аспекти аварійності трубопровідного транспорту. Тісні зв'язки цих термінів із поняттями «risk assessment» та «environmental impact» свідчать про інтеграцію інженерних задач моделювання аварійних витоків із проблемами оцінювання екологічних ризиків та мінімізації негативного впливу на довкілля.

Окремий тематичний кластер об'єднує дослідження, присвячені математичному та чисельному моделюванню. Домінування термінів «numerical simulation», «computational fluid dynamics (CFD)» та «mathematical models» свідчить про активний розвиток високоточних методів чисельного моделювання процесів аварійного витоку. Наявність тісних зв'язків із поняттями «finite element method» та «turbulence modeling» підтверджує, що сучасні моделі враховують складний характер нестационарних процесів та широко використовують методи математичної фізики.

Наступний тематичний кластер об'єднує дослідження, пов'язані із системами виявлення аварійних витоків. Ключові терміни «leak detection systems», «sensors», «acoustic sensing» та «signal processing» характеризують сучасний розвиток засобів моніторингу трубопровідних систем. Водночас аналіз мережевої структури показує, що цей напрям має відносно слабші зв'язки з кластером математичного моделювання, що свідчить про недостатню інтеграцію моделей прогнозування параметрів витоку із сучасними системами моніторингу.

Важливе місце у структурі когнітивної карти займає кластер, пов'язаний із фізико-гідравлічними аспектами процесу витікання. До нього входять терміни «pressure drop», «discharge coefficient» та «transient flow», які безпосередньо характеризують процеси формування аварійного витоку. Їх центральне положення у структурі мережі свідчить про визначальну роль параметрів

нестационарної течії та коефіцієнта витрати у побудові математичних моделей аварійних процесів.

На периферії когнітивної карти розташований кластер, що об'єднує дослідження з аналізу надійності трубопровідних систем. Основними термінами цього напрямку є «reliability», «failure analysis» та «corrosion». Незважаючи на допоміжний характер щодо проблематики математичного моделювання витоків, результати цих досліджень є важливими для встановлення причин виникнення дефектів та оцінювання факторів, що впливають на розвиток аварійних ситуацій.

Таким чином, результати когнітивного картографування першого напрямку свідчать, що сучасні дослідження охоплюють широкий спектр питань – від математичного моделювання процесів витікання та чисельної гідродинаміки до діагностики технічного стану трубопроводів і оцінювання екологічних ризиків. Водночас аналіз мережевої структури дозволяє зробити висновок про недостатню інтеграцію моделей прогнозування параметрів аварійного витоку із системами моніторингу та моделями подальшого поширення забруднення, що обумовлює необхідність аналізу другого напрямку досліджень, присвяченого процесам міграції нафти у ґрунтовому середовищі.

Рисунок 1.7 – Мережева візуалізація когнітивних кластерів предметної області за напрямом «Гідродинаміка аварійних процесів та моделювання витоків»

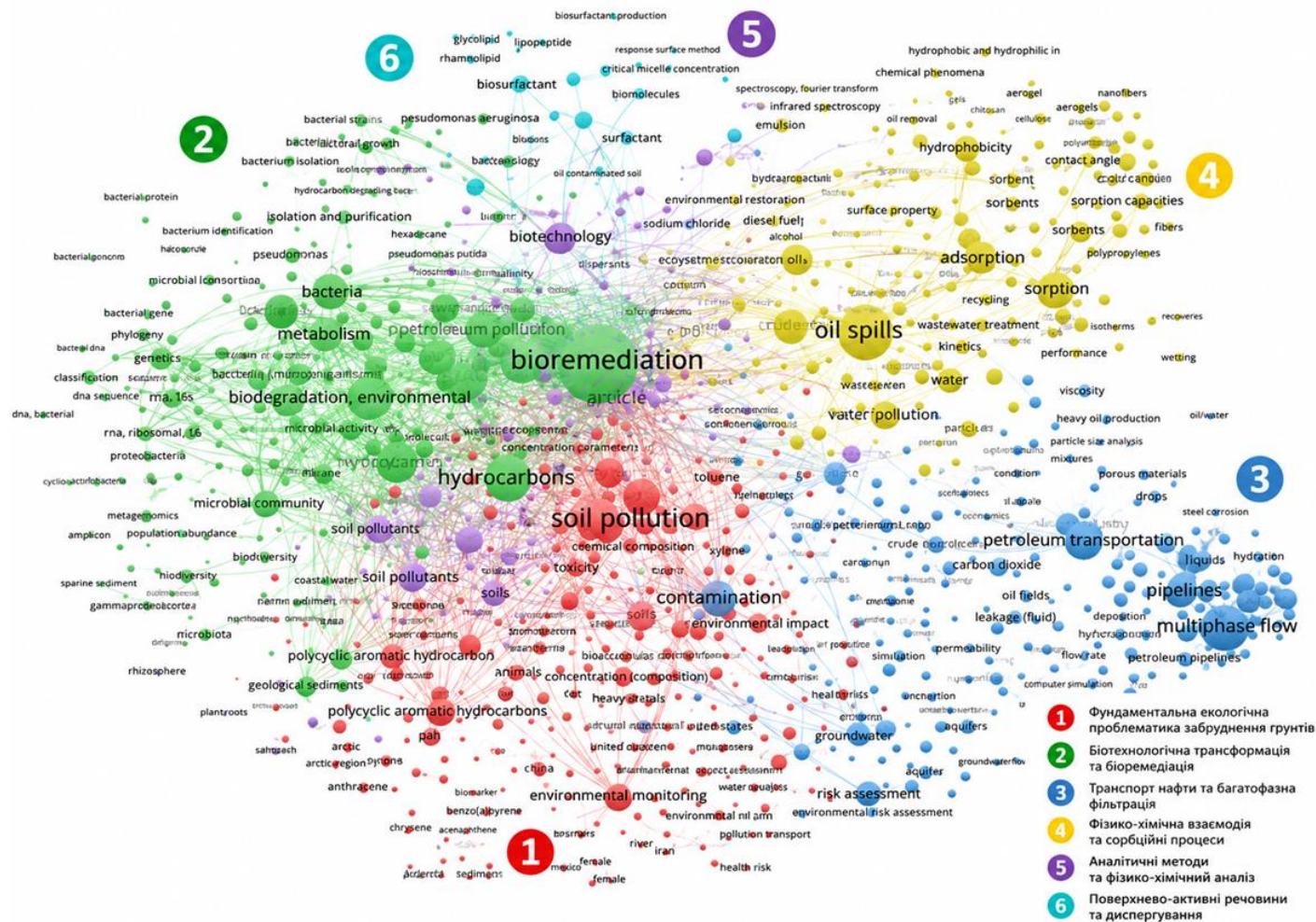


Рисунок 1.8 - Мережева візуалізація когнітивних кластерів предметної області за напрямом «Моделювання міграції та фізико-хімічної взаємодії вуглеводнів у ґрунтовому середовищі»

Аналіз мережевої структури, наведеної на рисунку 1.8, дозволяє виокремити кілька взаємопов'язаних тематичних кластерів, які характеризують сучасний стан досліджень процесів міграції нафти у ґрунтовому середовищі та оцінювання екологічних наслідків аварійних витоків.

Центральне місце на когнітивній карті займає кластер, сформований навколо ключових термінів «**bioremediation**», «**oil spills**», «**hydrocarbons**» та «**soil pollution**». Домінування цих понять свідчить, що сучасні дослідження переважно орієнтовані на оцінювання наслідків нафтового забруднення та розроблення методів відновлення порушених природних екосистем.

Окремий тематичний кластер об'єднує дослідження, присвячені математичному моделюванню процесів міграції забруднювальних речовин у пористому середовищі. Найбільш вагомими термінами є «**porous media**», «**multiphase flow**», «**numerical simulation**» та «**contaminant transport**», що характеризують сучасний розвиток моделей багатофазного масопереносу вуглеводнів у ґрунтах. Наявність тісних зв'язків між зазначеними поняттями підтверджує широке використання чисельних методів для прогнозування поширення забруднення.

Самостійний тематичний кластер формують дослідження фізико-хімічної взаємодії нафти з ґрунтовим середовищем. Домінування термінів «**sorption**», «**adsorption**», «**retention**» та «**kinetics**» свідчить про зростання інтересу до моделювання процесів утримання вуглеводнів ґрунтовим матриксом. Саме ці процеси визначають інтенсивність міграції забруднювальних речовин та істотно впливають на просторово-часові характеристики зон забруднення.

Окремий кластер охоплює дослідження, присвячені біологічним методам очищення забруднених територій. Терміни «**biodegradation**», «**bacteria**», «**microbial community**» та «**biotechnology**» характеризують сучасний розвиток біотехнологічних підходів до ремедіації нафтового забруднення. Аналіз мережевої структури свідчить, що зазначений напрям тісно пов'язаний із дослідженнями фізико-хімічних процесів, однак має відносно слабші зв'язки з математичним моделюванням процесів аварійного витоку.

Значну увагу також приділено дослідженням токсикологічних аспектів нафтового забруднення та оцінюванню ризиків для компонентів навколишнього середовища. Вузли **«groundwater»**, **«water pollution»**, **«toxicity»** та **«risk assessment»** характеризують напрям, пов'язаний із прогнозуванням негативного впливу забруднювальних речовин на водні ресурси та екосистеми.

Таким чином, результати когнітивного картографування другого напрямку свідчать, що сучасні дослідження охоплюють широкий спектр питань – від фізико-хімічних процесів взаємодії нафти з ґрунтом до математичного моделювання багатофазного масопереносу, біоремедіації та оцінювання екологічних ризиків. Водночас аналіз мережевої структури дозволяє зробити висновок про недостатню інтеграцію моделей аварійного витоку нафти з моделями її подальшої міграції, сорбції та трансформації у ґрунтового середовищі. Саме ця обставина обумовлює доцільність застосування комплексного підходу до математичного моделювання аварійних процесів.

Окремої уваги заслуговує хронологічна візуалізація мережі ключових слів, яка дозволяє простежити еволюцію тематичних напрямів досліджень у часі. На рисунках 1.10 та 1.11 наведено карти, побудовані на основі середнього року появи ключових термінів у наукових публікаціях. Для полегшення інтерпретації результатів на рисунках умовно виділено три етапи розвитку предметної області ((1)–(3)), що відображають послідовну зміну наукових пріоритетів.

Етап ② (2017–2020 pp.) характеризується активним розвитком засобів виявлення аварійних витоків. Як показано на рисунку 1.10, ключові терміни **«leak detection systems»**, **«acoustic sensors»**, **«signal processing»** та **«monitoring techniques»** характеризують етап інтенсивного впровадження сучасних систем моніторингу трубопровідного транспорту. Основна увага дослідників була зосереджена на скороченні часу між виникненням аварії та її виявленням, тоді як питання кількісного прогнозування параметрів витоку ще не займали провідного місця серед наукових пріоритетів.

Найбільш сучасний етап розвитку досліджень, що відповідає вузлам із найпізнішими середніми роками появи, характеризується переорієнтацією на

математичне моделювання складних нестационарних процесів. Домінування термінів «**transient flow**», «**computational fluid dynamics (CFD)**», «**multiphase flow**» та «**numerical simulation of leak**» [19, 20] свідчить про широке використання високоточних чисельних методів для прогнозування параметрів аварійних витоків. Одночасно зростає кількість досліджень, у яких питання гідродинаміки поєднуються з оцінюванням екологічних ризиків і процесами взаємодії трубопроводу з навколишнім середовищем. Це підтверджує сучасну тенденцію до інтеграції інженерних і екологічних підходів у моделюванні аварійних ситуацій.

Аналіз темпоральної структури другого напрямку досліджень (рис. 1.11) також свідчить про послідовну еволюцію наукових підходів. На початковому етапі аналізованого періоду (2012–2016 рр.) переважали дослідження, присвячені оцінюванню екологічних наслідків аварійних розливів, процесам забруднення підземних вод, токсикологічним характеристикам нафтопродуктів та біоремедіації. Домінування термінів «**environmental impact**», «**groundwater**», «**polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)**» та «**bioremediation**» свідчить, що основна увага приділялася аналізу наслідків забруднення та розробленню методів відновлення порушених екосистем.

Упродовж 2018–2021 рр. науковий інтерес поступово зміщується до дослідження фізичних процесів міграції нафти у пористому середовищі. Зростання значущості термінів «**porous media**», «**numerical simulation**» та «**multiphase flow**» свідчить про активне впровадження чисельних методів для опису багатофазного руху вуглеводнів у ґрунтах та врахування взаємодії нафти з водою й повітрям.

Найбільш сучасний етап розвитку досліджень (2022–2026 рр.) характеризується підвищеною увагою до фізико-хімічних процесів, що визначають поведінку нафти у ґрунтовому середовищі. Домінування термінів «**sorption kinetics**», «**adsorption mechanisms**», «**retention**» та «**complex contaminant transport modeling**» [21] свідчить про перехід від загального опису процесів поширення забруднення до детального моделювання механізмів сорбції

та утримання вуглеводнів ґрунтовим середовищем. Саме ці процеси значною мірою визначають швидкість міграції забруднення, конфігурацію зон ураження та ефективність прогнозних моделей.

Результати темпорального аналізу підтверджують, що сучасні дослідження дедалі більше орієнтуються на інтеграцію моделей фільтрації, багатофазного масопереносу та сорбційних процесів. Водночас аналіз когнітивної карти свідчить, що комплексні математичні моделі, які одночасно враховують параметри аварійного витоку, процеси міграції нафти та її фізико-хімічну взаємодію з ґрунтовим середовищем, залишаються недостатньо представленими. Це обумовлює актуальність подальшого розвитку інтегрованих моделей прогнозування аварійних витоків нафти.

Результати когнітивного картографування та тематичної кластеризації підтвердили, що сучасні дослідження у сфері аварійних витоків нафти розвиваються за кількома взаємопов'язаними напрямками, серед яких провідне місце займають математичне моделювання процесів витікання, дослідження міграції забруднювальних речовин у ґрунтовому середовищі, оцінювання екологічних ризиків та розроблення систем моніторингу трубопровідного транспорту.

Аналіз мережевої структури виявив недостатню інтеграцію моделей, що описують процес аварійного витоку, із моделями поширення нафти у ґрунтовому середовищі. Крім того, у сучасних дослідженнях недостатньо уваги приділено комплексному врахуванню режимів роботи магістрального трубопроводу, параметрів дефекту, часу локалізації аварії, характеристик запірної арматури та фізико-механічних властивостей ґрунтів у межах єдиної математичної моделі.

Таким чином, результати когнітивного картографування дозволили встановити структуру сучасної предметної області, визначити ключові тематичні напрями, оцінити еволюцію наукових досліджень та виявити недостатньо досліджені аспекти моделювання аварійних витоків нафти. Отримані результати стали методологічною основою для подальшого аналізу сучасних математичних моделей аварійного витоку, який наведено у наступному підрозділі.

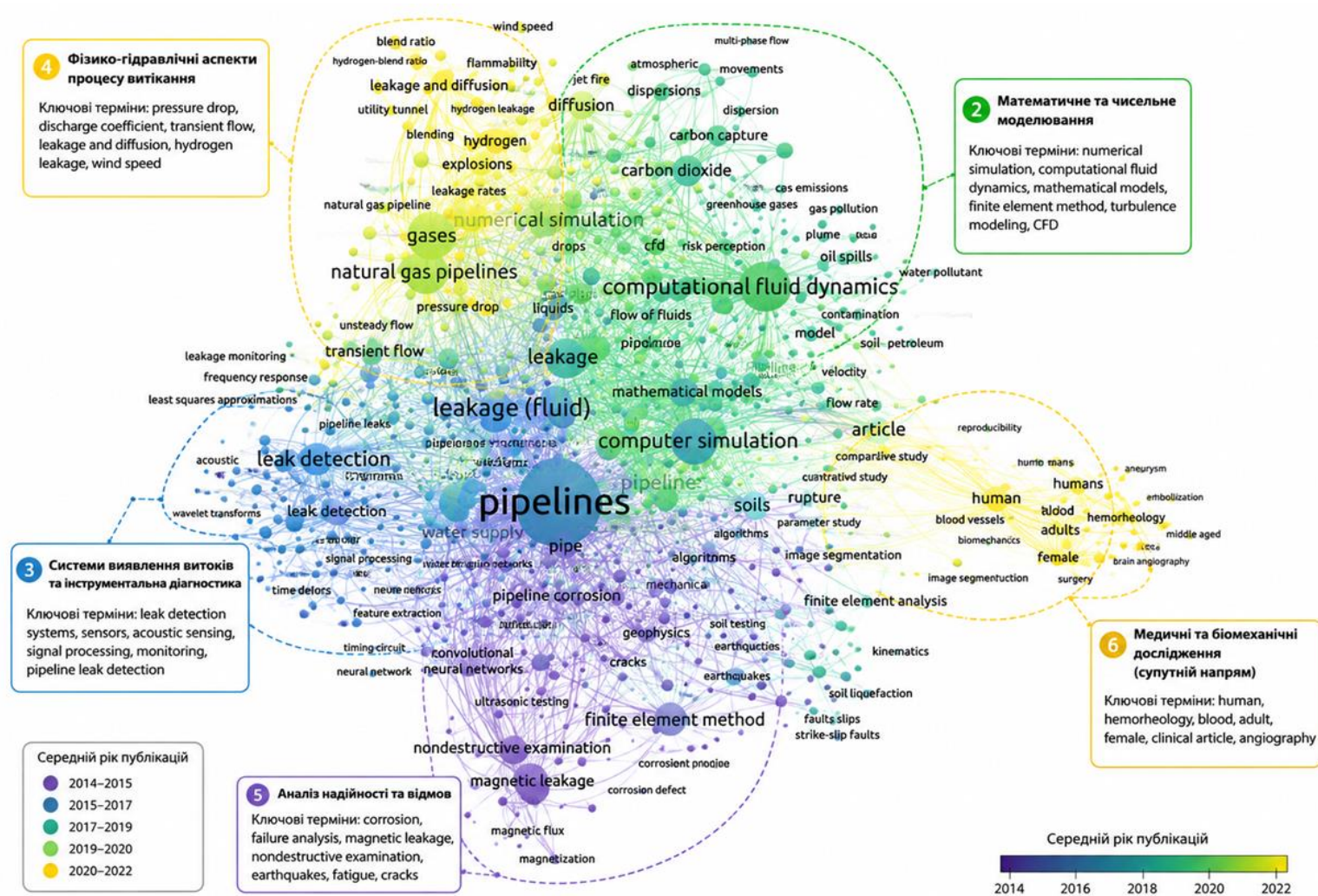


Рисунок 1.10 – Хронологічна карта розвитку тематичних напрямів досліджень аварійних витоків нафти (умовно виділено три етапи розвитку предметної області)

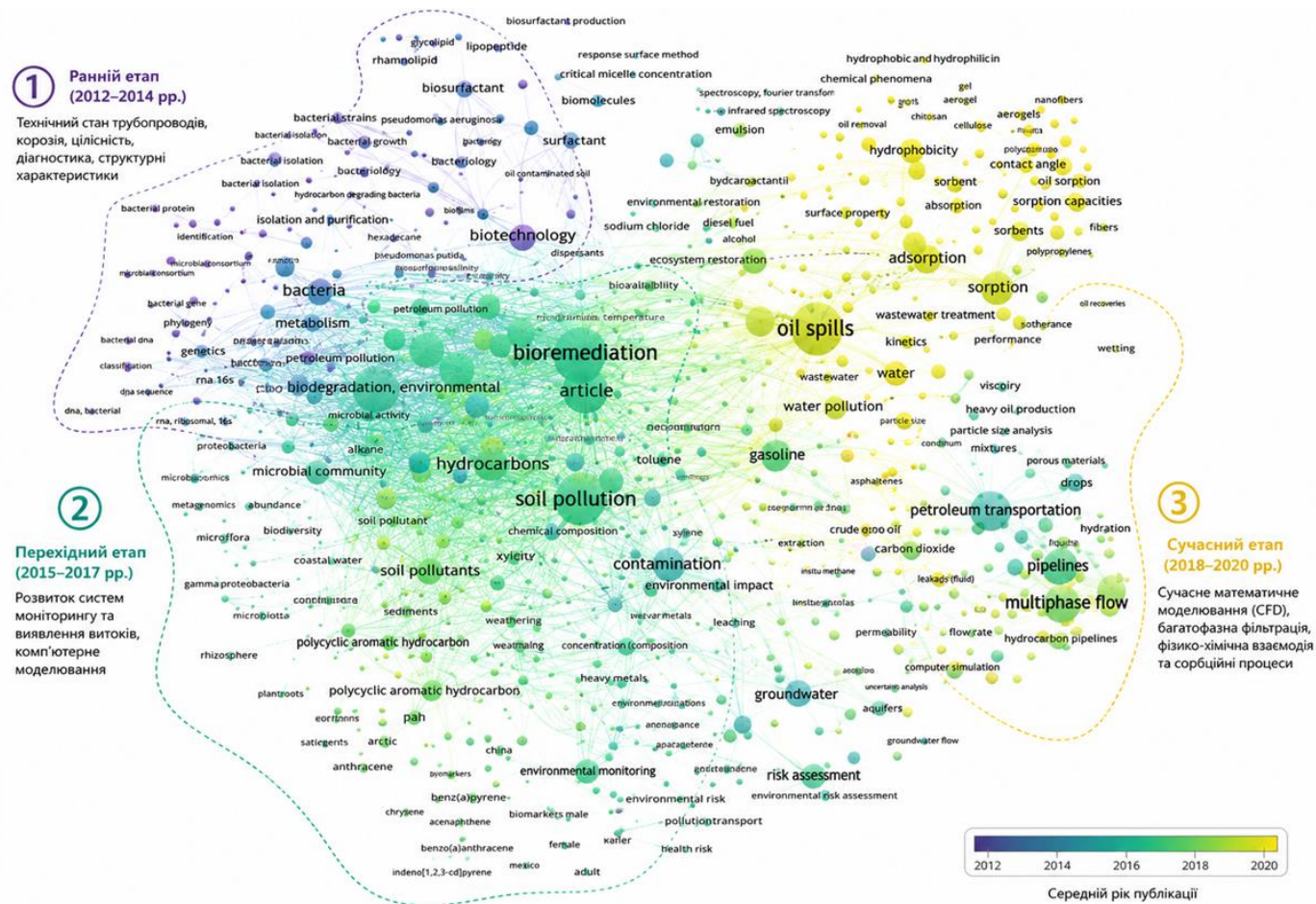


Рисунок 1.11 –Хронологічна карта розвитку досліджень процесів міграції нафти у ґрунтовому середовищі (умовно виділено три етапи розвитку предметної області)

1.3. Сучасні підходи до дослідження гідродинаміки аварійних витоків нафти та впливу морфології дефектів

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених гідродинаміці аварійних витоків нафти з магістральних трубопроводів, проблема підвищення достовірності прогнозування параметрів витoku залишається актуальною. Сучасні математичні моделі базуються на фундаментальних законах механіки рідин і газів та дозволяють визначати основні характеристики витікання залежно від тиску в трубопроводі, геометричних параметрів дефекту, фізичних властивостей нафти й умов течії. Водночас більшість відомих моделей орієнтована на аналіз окремих факторів, тоді як у реальних умовах експлуатації магістральних нафтопроводів процес аварійного витoku визначається сукупною дією параметрів дефекту, режимів роботи трубопровідної системи, часу локалізації аварії та інших експлуатаційних чинників. Це обумовлює необхідність подальшого вдосконалення математичних моделей, здатних комплексно враховувати зазначені фактори та забезпечувати більш достовірне прогнозування параметрів аварійного витoku.

Аналіз сучасної наукової літератури свідчить, що методи обчислювальної гідродинаміки стали одним із важливих інструментів дослідження процесів аварійного витікання. Використання системи рівнянь Нав'є–Стокса у поєднанні з моделями турбулентності $k-\varepsilon$ та $k-\omega$ *Shear Stress Transport (SST)* [25, 26] забезпечило можливість детального аналізу полів швидкостей і тиску, турбулентної дисипації енергії, утворення вихрових структур та кавітаційних явищ у зоні дефекту трубопроводу [27]. Разом із тим застосування чисельних методів переважно спрямоване на дослідження локальної структури потоку, тоді як для інженерного прогнозування параметрів аварійного витoku основне значення зберігають аналітичні та напівемпіричні моделі.

Результати сучасних досліджень також показують, що гідродинаміка потоку всередині магістрального трубопроводу істотно впливає на характеристики струменя витoku. Встановлено, що зі збільшенням швидкості поздовжнього потоку змінюється траєкторія витікаючого струменя, зменшується

площа гідродинамічного звуження (*vena contracta*), що, своєю чергою, призводить до зниження загального коефіцієнта витрати [28]. Зазначені закономірності мають важливе практичне значення під час оцінювання втрат нафти на початковому етапі аварії, коли насосні агрегати ще підтримують високий тиск у трубопровідній системі.

Одним із найменш досліджених напрямів залишається оцінювання впливу морфології дефекту на параметри аварійного витіку та величину коефіцієнта витрати. Традиційно під час інженерних розрахунків дефекти апроксимували простими геометричними формами – колом для локальних пошкоджень або прямокутником для тріщин [29]. Однак результати експериментальних досліджень відбракованих ділянок трубопроводів свідчать, що реальні дефекти, сформовані внаслідок пітингової корозії, механічних пошкоджень або стрес-корозійного розтріскування, мають складну нерегулярну геометрію. Це істотно впливає на процес витікання. Встановлено, що навіть за однакової площі поперечного перерізу коефіцієнт витрати для щілиноподібних тріщин і круглих отворів може суттєво відрізнятись [30].

Для вузьких стрес-корозійних тріщин характерним є істотне зростання гідравлічного опору внаслідок впливу в'язкого тертя на шорстких стінках дефекту. За таких умов використання сталого значення коефіцієнта витрати стає недостатньо обґрунтованим. Сучасні математичні моделі враховують його залежність від гідравлічного діаметра дефекту, довжини каналу витікання, локальної шорсткості поверхні та звивистості тріщини [31]. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із використанням рівняння Дарсі–Вейсбаха для визначення втрат напору безпосередньо всередині дефекту. Відповідно до сучасних моделей загальний перепад тиску розглядається як сума втрат на вході у дефект, втрат на тертя вздовж каналу витікання та втрат на виході [32].

Суттєвий вплив на процес аварійного витікання має також деформація дефекту під дією внутрішнього тиску. Аналіз сучасних досліджень показує, що пружні та пластичні деформації стінки трубопроводу можуть призводити до зміни площі розкриття тріщини безпосередньо під час розвитку аварії [23, 30].

Унаслідок цього площа витоку стає функцією часу та внутрішнього тиску в трубопроводі [33]. Водночас більшість існуючих аналітичних моделей і надалі розглядає геометричні параметри дефекту як сталі величини [24], що може бути однією з причин заниження прогнозованих обсягів витоку на початкових стадіях аварійного процесу.

Не менш важливим аспектом дослідження є аналіз нестационарності процесу спорожнення трубопроводу як цілісної гідродинамічної системи. Сучасні наукові підходи передбачають поділ процесу аварійного витоку на кілька послідовних стадій, кожна з яких характеризується домінуванням різних фізичних процесів [34]. Перша стадія відповідає відносно сталому витіканню під дією напору працюючих насосних агрегатів. Друга стадія пов'язана з пружною декомпресією, що виникає після припинення перекачування та закриття лінійних засувів. На цьому етапі витік підтримується за рахунок вивільнення потенційної енергії пружно стиснутої рідини та релаксації деформованих стінок трубопроводу. Третя стадія характеризується тривалим безнапірним гравітаційним спорожненням окремих ділянок траси.

Моделювання зазначених стадій істотно ускладнюється під час транспортування легких вуглеводнів або нафти із підвищеним вмістом розчинених газів. За таких умов різке зниження тиску супроводжується фазовими переходами та дегазацією, що призводить до зміни реологічних властивостей транспортованого продукту [35, 36]. Формування двофазного потоку «рідина–газ» у зоні дефекту може спричинити виникнення режиму критичного витікання, за якого масова витрата обмежується місцевою швидкістю поширення звуку в багатофазному середовищі, яка є нижчою, ніж у чистій рідині [34]. Крім того, складний характер розподілу тиску поблизу дефекту залишається предметом наукових досліджень і дискусій [33].

Аналіз сучасних публікацій свідчить, що, незважаючи на значний прогрес у моделюванні окремих фізичних процесів, комплексні математичні моделі, які одночасно враховують зміну геометрії дефекту під дією внутрішнього тиску, нестационарну декомпресію трубопроводу та багатофазний характер течії,

залишаються недостатньо розробленими. Це обмежує можливості підвищення точності прогнозування параметрів аварійного витоку та потребує подальшого розвитку інтегрованих математичних моделей.

Проведений аналіз сучасних підходів до математичного моделювання аварійних витоків нафти показав, що існуючі моделі забезпечують достатньо точний опис окремих фізичних процесів, однак лише частково враховують комплексний вплив експлуатаційних факторів, які визначають розвиток аварійної ситуації на магістральних трубопроводах. Недостатньо дослідженими залишаються питання одночасного врахування режимів роботи насосних станцій, часу закриття лінійних засувів, геометричних параметрів і просторового положення дефекту відносно осі трубопроводу, а також взаємозв'язку цих чинників із подальшим поширенням нафти у ґрунтовому середовищі. Це обумовлює необхідність удосконалення математичних моделей аварійного витоку нафти шляхом інтеграції зазначених факторів у єдину розрахункову схему, що забезпечить підвищення достовірності прогнозування параметрів витоку та масштабів поширення нафтового забруднення. Саме такий підхід реалізовано у другому та третьому розділах дисертаційної роботи.

1.4. Математичне моделювання багатофазної фільтрації вуглеводнів у ґрунті з урахуванням гідродинамічного протитиску

Після виходу нафти за межі трубопроводу процес її поширення визначається фізико-механічними властивостями ґрунтового середовища. Тому математичне моделювання міграції вуглеводнів у ґрунті є одним із ключових етапів прогнозування екологічних наслідків аварійних витоків. Розв'язання цієї задачі потребує комплексного використання методів підземної гідродинаміки, механіки пористих середовищ, термодинаміки та математичного моделювання процесів масопереносу.

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що протягом останніх років відбулося суттєве вдосконалення моделей фільтрації нафти у ґрунтах. Якщо

ранні дослідження переважно базувалися на однофазних моделях із використанням класичного закону Дарсі [37], то сучасні підходи орієнтовані на застосування багатofазних, багатокomпонентних та неізотермічних моделей, які дозволяють одночасно враховувати рух нафтової фази, води та ґрунтового повітря як у ненасиченій, так і в насиченій зонах ґрунтового масиву [38].

Основою більшості сучасних моделей багатofазної фільтрації є рівняння Річардса (Richards equation) та узагальнений закон Дарсі для багатofазного потоку. Рівняння збереження маси для нафтової фази формулюється з урахуванням локальної насиченості, пористості ґрунту, густини рідини та відносної фазової проникності [38, 39]. При цьому одним із найскладніших елементів математичного опису залишається визначення функцій відносної проникності та капілярного тиску, які мають нелінійний характер і залежать від структури порового простору, змочуваності ґрунту та історії процесів насичення і дренажування [39].

Для опису гідравлічних характеристик ґрунтів найбільшого поширення набули моделі Брукса–Корі (Brooks–Corey) та ван Генухтена (van Genuchten), які встановлюють взаємозв'язок між ефективною насиченістю та капілярним тиском через параметри порового середовища [40, 41]. Водночас класичне рівняння Річардса має певні обмеження під час моделювання швидкоплинних інфільтраційних процесів, характерних для початкової стадії аварійного витоку. З цієї причини у сучасних дослідженнях широко застосовуються модифікації моделі Гріна–Ампта (Green–Ampt), які дозволяють більш адекватно описувати формування фронту інфільтрації за умов інтенсивного надходження нафти до ґрунтового середовища [42].

Результати експериментальних і теоретичних досліджень свідчать, що модифікована модель Гріна–Ампта ефективно застосовується для аналізу процесів інфільтрації у специфічних природних умовах, зокрема у мерзлих ґрунтах під час їх відтавання, коли температурні зміни істотно впливають на в'язкість нафти та її фільтраційні властивості [43]. Окрему увагу приділено дослідженню процесів утворення водонафтових емульсій у поровому просторі.

Встановлено, що підвищення ефективної в'язкості суміші призводить до зменшення швидкості вертикальної інфільтрації та сприяє латеральному поширенню забруднення вздовж меж окремих ґрунтових горизонтів [44].

Одним із перспективних напрямів розвитку сучасних моделей є врахування взаємодії між джерелом витоку та ґрунтовим середовищем, що проявляється у формуванні гідродинамічного протитиску. На відміну від традиційних моделей, які розглядають витікання рідини у середовище з атмосферним тиском, у реальних умовах експлуатації магістральних трубопроводів нафта надходить у пористий ґрунтовий масив, який чинить додатковий опір руху рідини. Результати сучасних досліджень [45, 46], виконаних із застосуванням мікроскопічної візуалізації потоків та порово-мережевого моделювання, підтверджують формування локального поля тиску в зоні дефекту, яке впливає на параметри аварійного витоку.

Зростання гідродинамічного протитиску призводить до зменшення ефективного перепаду тиску на дефекті трубопроводу, що, відповідно, супроводжується зниженням витрати нафти через пошкодження [35]. Величина цього ефекту визначається проникністю, пористістю та початковою вологістю ґрунту. Для малопроникних ґрунтів формування локального надлишкового тиску відбувається значно швидше, ніж у піщаних або гравійних середовищах, що необхідно враховувати під час побудови математичних моделей аварійного витоку [46].

Подальше ускладнення процесу пов'язане з можливістю розвитку суфозійних явищ та локального руйнування структури ґрунту. За високих градієнтів тиску можуть формуватися переважні канали фільтрації, що змінюють проникність ґрунтового середовища та характер поширення нафти. Для опису таких процесів застосовуються положення теорії поропружності, відповідно до яких зміна порового тиску викликає зміну напружено-деформованого стану ґрунтового скелета, а це, своєю чергою, впливає на пористість і проникність середовища [38].

Незважаючи на наявність наукових праць, присвячених дослідженню взаємодії ґрунтового середовища з процесом аварійного витоку [47, 48], питання побудови інтегрованих математичних моделей, які б забезпечували двосторонній зв'язок між нестационарним падінням тиску в магістральному трубопроводі та зміною фільтраційного опору ґрунтового середовища, залишається недостатньо опрацьованим. Більшість сучасних досліджень ґрунтується на використанні чисельних моделей, що забезпечують детальний опис окремих фізичних процесів, проте потребують значної кількості вхідних параметрів і суттєвих обчислювальних ресурсів. Водночас для задач оперативного прогнозування масштабів аварійного забруднення, оцінювання екологічних ризиків та підтримки прийняття управлінських рішень актуальним є розвиток аналітичних і напіваналітичних моделей, які забезпечують достатню точність розрахунків за прийнятних обчислювальних витрат. Одним із перспективних напрямів є використання методів інтегральних перетворень, зокрема перетворень Лапласа та Фур'є, для просторово-часового аналізу полів тиску та процесів фільтрації.

Аналіз сучасних моделей свідчить, що достовірність прогнозування поширення нафти у ґрунтовому середовищі значною мірою визначається коректністю встановлення початкових параметрів аварійного витоку. З огляду на це процеси витікання нафти з трубопроводу та її подальшої фільтрації доцільно розглядати як взаємопов'язані етапи єдиного процесу прогнозування розвитку аварійної ситуації.

Таким чином, аналіз сучасних моделей багатofазної фільтрації показав, що підвищення достовірності прогнозування поширення нафти можливе лише за умови комплексного врахування процесів аварійного витікання, фільтрації, гідродинамічного протитиску та фізико-хімічної взаємодії нафти з ґрунтовим середовищем. Це визначає доцільність розроблення інтегрованої математичної моделі, у якій процеси витікання та міграції нафти розглядаються як взаємопов'язані складові єдиної системи прогнозування екологічних наслідків аварій на магістральних нафтопроводах.

1.5. Формування концепції подальших досліджень

Проведений аналіз сучасних наукових досліджень показав, що проблема прогнозування наслідків аварійних витоків нафти з магістральних трубопроводів залишається актуальною та потребує подальшого розвитку. Незважаючи на значну кількість наукових праць, більшість існуючих підходів орієнтована на дослідження окремих етапів аварійного процесу, зокрема визначення параметрів витoku, моделювання поширення забруднення або оцінювання екологічних ризиків. Водночас взаємозв'язок між процесами витікання нафти, режимами роботи трубопровідної системи та міграцією забруднення у ґрунтовому середовищі враховується недостатньо.

Аналіз літературних джерел засвідчив, що більшість математичних моделей аварійного витoku базується на спрощених припущеннях щодо сталості режимів роботи трубопроводу, незмінності геометричних параметрів дефекту та миттєвого припинення витoku після локалізації аварії. У реальних умовах розвитку аварійної ситуації на обсяг втрат нафти істотно впливають режими роботи насосних станцій, час закриття лінійних засувів, геометричні характеристики та просторове положення дефекту, а також фізико-механічні властивості ґрунтового середовища. Недостатнє врахування зазначених чинників обмежує достовірність прогнозування параметрів аварійного витoku та масштабів нафтового забруднення.

Установлено також, що сучасні моделі міграції нафти у ґрунтовому середовищі здебільшого розглядають процеси фільтрації, сорбції або оцінювання екологічних ризиків окремо. Проте достовірне прогнозування розвитку аварійної ситуації потребує комплексного врахування взаємодії процесів витікання, багатофазної фільтрації, сорбції та фізико-механічних властивостей ґрунтів, які визначають характер і швидкість поширення забруднення.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що математичне моделювання процесу аварійного витoku, поширення нафти у ґрунтовому

середовищі та оцінювання екологічних наслідків доцільно розглядати як взаємопов'язані складові єдиної системи прогнозування. За такого підходу результати моделювання кожного етапу використовуються як вихідні дані для наступного, що забезпечує узгодженість математичних моделей та підвищує достовірність прогнозування розвитку аварійної ситуації.

З урахуванням встановлених наукових прогалів у дисертаційній роботі запропоновано комплексний підхід до математичного моделювання аварійних витоків нафти, який передбачає інтегроване врахування режимів роботи магістрального трубопроводу, часу локалізації аварії, геометричних характеристик і просторового положення дефекту, процесів багатofазної фільтрації, сорбції та фізико-механічних властивостей ґрунтового середовища. Реалізацію зазначеного підходу, розроблення відповідних математичних моделей та їх практичне застосування наведено у наступних розділах дисертаційної роботи.

Висновки до розділу 1

У першому розділі виконано комплексний аналіз сучасного стану наукових досліджень, присвячених проблемі аварійних витоків нафти з магістральних трубопроводів та оцінюванню їх екологічних наслідків. На основі бібліометричного аналізу, когнітивного картографування та критичного аналізу сучасних математичних моделей визначено основні напрями розвитку досліджень, встановлено тенденції застосування методів математичного моделювання, оцінювання екологічних ризиків, моделювання міграції нафти у ґрунтовому середовищі та використання сучасних цифрових інструментів аналізу.

Проведений аналіз показав, що існуючі математичні моделі аварійних витоків переважно описують окремі фізичні процеси та ґрунтуються на спрощених припущеннях щодо умов витікання. У більшості моделей недостатньо враховуються режими роботи насосних станцій, час закриття

лінійних засувів, геометричні характеристики і просторове положення дефекту, а також зміна параметрів витоку в процесі розвитку аварії. Це обмежує достовірність прогнозування обсягів втрат нафти та параметрів аварійного витоку.

Установлено, що сучасні моделі поширення нафтового забруднення у ґрунтовому середовищі, як правило, розглядають процеси багатофазної фільтрації, сорбції та оцінювання екологічних ризиків окремо. Водночас достовірне прогнозування розвитку аварійної ситуації потребує комплексного врахування взаємодії процесів витікання нафти, багатофазної фільтрації, сорбції та фізико-механічних властивостей ґрунтового середовища.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що підвищення достовірності прогнозування наслідків аварійних витоків можливе лише за умови інтегрованого математичного моделювання взаємопов'язаних процесів, які відбуваються на різних етапах розвитку аварії. Такий підхід передбачає узгоджений розрахунок параметрів аварійного витоку, моделювання міграції нафти у ґрунтовому середовищі та оцінювання екологічних наслідків як складових єдиної системи прогнозування.

Виявлені наукові прогалини визначили концепцію подальших досліджень та стали підґрунтям для розроблення математичних моделей, наведених у наступних розділах дисертаційної роботи. У другому розділі розроблено математичну модель аварійного витоку нафти, яка враховує режими роботи насосних станцій, процес локалізації аварії запірною арматурою, геометричні характеристики та просторове положення дефекту. Отримані результати використано як початкові умови для подальшого моделювання поширення нафтового забруднення у ґрунтовому середовищі.

РОЗДІЛ 2 ОЦІНКА ВТРАТ НАФТИ ЧЕРЕЗ АВАРІЙНІ ВИТОКИ З ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ ТРУБОПРОВОДУ І РОЗРОБКА ЗАХОДІВ СКОРОЧЕННЯ

Питання достовірного прогнозування обсягу нафти, що втрачається внаслідок аварійної розгерметизації магістрального нафтопроводу, тривалий час розглядалося у вітчизняній нафтогазовій науці переважно в межах детермінованого підходу. Одним із таких підходів є методика, запропонована А. Я. Ждеком (2017) [49], яка ґрунтується на класичному рівнянні Торрічеллі, доповненому ітераційним уточненням коефіцієнта витрати та трифазним описом процесу витікання. Запропонована методика стала важливим етапом розвитку математичного моделювання аварійних витоків нафти, оскільки поєднала класичні гідродинамічні залежності з урахуванням особливостей функціонування магістральних нафтопроводів. Її працездатність була підтверджена шляхом порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними, отриманими на ділянках «Долина – Дрогобич» та «Жулин – Надвірна».

Разом із тим аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що детермінована постановка задачі, яка передбачає визначення єдиного розрахункового значення обсягу витоку, не повною мірою відображає реальний характер аварійних процесів і не відповідає сучасним принципам ризик-орієнтованого управління. Робочий тиск у трубопроводі, геометричні характеристики дефекту, час виявлення аварії, параметри функціонування насосних станцій, фізико-механічні властивості ґрунту та інші чинники на момент виникнення аварії відомі лише з певним рівнем невизначеності. Для окремих параметрів діапазон епістемічної невизначеності може перевищувати один порядок величини, що істотно впливає на достовірність прогнозування наслідків аварійних витоків.

Більшість чинних нормативно-методичних документів орієнтує інженерів і диспетчерський персонал на використання єдиного розрахункового значення,

отриманого шляхом підстановки середніх параметрів у математичну модель витікання. Такий підхід не враховує можливий діапазон розвитку аварійної ситуації, ускладнює кількісне оцінювання ризиків та не забезпечує достатнього інформаційного підґрунтя для обґрунтування заходів із підвищення надійності трубопровідних систем, удосконалення систем виявлення витоків, планування ремонтних робіт і формування страхових резервів. Водночас сучасні міжнародні стандарти, зокрема ДСТУ ISO 31000:2018 «Менеджмент ризиків. Принципи та настанови» та API RP 1175 «Pipeline Leak Detection Program Management», передбачають застосування ризик-орієнтованих підходів, що базуються на імовірнісному описі можливих сценаріїв розвитку аварій [50, 51].

Метою даного розділу є розвиток існуючого математичного апарату прогнозування аварійних витоків нафти шляхом переходу від детермінованої до стохастичної постановки задачі з комплексним урахуванням фізико-геометричної нелінійності дефектів та просторової взаємодії потоку нафти з ґрунтовим середовищем. На відміну від традиційного підходу, що забезпечує отримання єдиного розрахункового значення обсягу витоку, запропонована методика дозволяє визначати функцію розподілу ймовірностей, медіанні значення, довірчі інтервали та критичні сценарії розвитку аварійної ситуації.

У межах розділу виконано:

- калібрування коефіцієнта витрати з урахуванням морфологічних категорій дефектів, характерних для магістральних нафтопроводів Прикарпатського регіону;
- глобальний аналіз чутливості математичної моделі з метою визначення найбільш впливових факторів невизначеності;
- економічну інтерпретацію результатів із використанням показника Expected Value of Perfect Information (EVPI);
- порівняння отриманих результатів із розрахунками, виконаними за методикою А. Я. Ждека (2017) для тих самих ділянок магістральних нафтопроводів.

Об'єктом дослідження є магістральні нафтопроводи системи «Дружба», представлені сталевими трубопроводами із зовнішнім діаметром 377–820 мм, товщиною стінки 7–11 мм та робочим тиском до 6 МПа. На відміну від традиційних моделей, у яких стінка трубопроводу розглядається як абсолютно жорстка конструкція, у запропонованому підході враховано фізико-геометричну нелінійність процесу деформування. За робочих тисків у зонах концентрації напружень поблизу корозійних дефектів можуть виникати локальні пружно-пластичні деформації, що призводять до збільшення ефективної площі витіку. Урахування зазначеного чинника забезпечує підвищення достовірності прогнозування параметрів аварійного витіку, що підтверджується результатами математичного моделювання, наведеними у наступних підрозділах.

2.1 Постановка задачі та концептуальна структура стохастичної моделі

Класична методика [49], покладена в основу більшості галузевих підходів до оцінювання аварійних втрат нафти, базується на квазістаціонарному описі процесу витікання, відповідно до якого миттєва об'ємна витрата визначається співвідношенням Торрічеллі–Бернуллі:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (2.1)$$

де Q – об'ємна витрата витіку, м³/с; μ – коефіцієнт витрати; A – площа отвору дефекту, м²; $\Delta P = P - P_{\text{atm}}$ – перепад тиску між внутрішнім простором трубопроводу та зовнішнім середовищем, Па; ρ – густина нафти, кг/м³.

Формулу (2.1) отримано за припущення квазістаціонарності течії та нестисності рідкої фази. Перше припущення є достатньо обґрунтованим для першої та третьої фаз аварійного процесу, коли характерний час зміни тиску істотно перевищує час проходження пружної хвилі трубопроводом. Для другої фази його застосування розглядається як інженерне наближення. Припущення про нестисність також є коректним для рідкої нафти при робочих тисках до 10

МПа, оскільки модуль об'ємної пружності нафти ($K \approx 1,5 \cdot 10^9$ Па) забезпечує відносну стисливість менше 0,7 % у характерному діапазоні перепадів тиску. Загальний об'єм втрат визначають інтегруванням рівняння (2.1) протягом трьох послідовних фаз розвитку аварії: від моменту виникнення дефекту до зупинки насосних агрегатів (фаза I), у період інерційного витікання після припинення перекачування (фаза II) та під час гравітаційного спорожнення ізолюваної ділянки трубопроводу до атмосферного тиску (фаза III).

Разом із тим застосування залежності (2.1) до умов експлуатації магістральних нафтопроводів Карпатського регіону має низку принципових обмежень. Насамперед це стосується вибору коефіцієнта витрати. У вітчизняній практиці традиційно використовується значення ($\mu=0,62$), отримане для турбулентного витікання води через гострокрайовий круглий отвір у тонкій стінці. Проте переважна більшість аварійних пошкоджень магістральних нафтопроводів пов'язана з корозійними процесами та стрес-корозійним розтріскуванням, які формують отвори складної або щілиноподібної форми. Для таких дефектів експериментально встановлені значення коефіцієнта витрати перебувають у межах 0,475–0,617 [24].

Іншим принциповим обмеженням класичної моделі є її детермінований характер. Формула (2.1) дозволяє визначити лише одне розрахункове значення витрати, тоді як для сучасних задач управління ризиками необхідно оцінювати весь можливий спектр сценаріїв розвитку аварійної ситуації.

Концептуальну структуру запропонованої стохастичної моделі наведено на рисунку 2.1.

Запропонована архітектура визначає послідовність взаємодії окремих модулів математичної моделі та слугує методологічною основою подальших математичних побудов, наведених у підрозділах 2.2–2.4.

Запропонована модель зберігає трифазну часову структуру процесу витікання [49], проте принципово розширює її можливості на трьох взаємопов'язаних рівнях.

На вхідному рівні детерміновані параметри замінюються відповідними законами розподілу ймовірностей, сформованими за результатами аналізу експлуатаційних даних магістральних нафтопроводів системи «Дружба», а також ділянок «Долина – Дрогобич» і «Жулин – Надвірна».

На рівні обчислювального ядра коефіцієнт витрати розглядається як функція, що залежить від морфології дефекту, режиму течії та фізико-геометричної нелінійності деформування стінки трубопроводу в зоні пошкодження.

На вихідному рівні формуються стохастичні розподіли прогнозованих параметрів, на основі яких визначаються медіанні значення, довірчі інтервали, квантилі та індекси глобальної чутливості Соболя.



Рисунок 2.1 – Трирівнева концептуальна структура запропонованої стохастичної моделі оцінки об'єму витоку нафти.

Параметри першого рівня генеруються методом латинського гіперкуба (Latin Hypercube Sampling, LHS) і передаються до обчислювального ядра, де послідовно визначаються нелінійна площа дефекту ($A(P)$), узагальнений коефіцієнт витрати $\tilde{\mu}$ інтегральний об'єм витоку за трьома фазами аварійного процесу. На третьому рівні формуються розподіли величин V і V_{eff} , визначаються квантильні характеристики, індекси чутливості та економічні показники. Отримана функція витрати $Q(t)$ використовується як вхідна функція-джерело під час розв'язання задачі фільтрації, розглянутої у розділі 3.

Запропонований підхід відповідає сучасним принципам імовірнісної оцінки ризику (Probabilistic Risk Assessment, PRA), закріпленим у ДСТУ ISO 31000:2018, та узгоджується з рекомендаціями API RP 1175 щодо управління програмами виявлення витоків [53, 54]. На відміну від традиційних детермінованих методик, він забезпечує комплексне врахування невизначеностей вхідних параметрів і створює методологічну основу для кількісного оцінювання ризиків аварійних витоків нафти.

2.2 Фізико-геометрична нелінійність дефекту та коефіцієнт витрати

2.2.1 Узагальнений коефіцієнт витрати з диференціацією за морфологією дефекту

У базовій методиці [49] коефіцієнт витрати визначався ітераційно як функція числа Рейнольдса з використанням фіксованого асимптотичного значення 0,62. У запропонованій роботі цей підхід узагальнено шляхом диференціації коефіцієнта витрати за морфологічним типом дефекту та введення фізично обґрунтованої поправки, що враховує геометрію каналу витоку:

$$\tilde{\mu}\left(M, \frac{L}{d_h}\right) = \mu_{\infty}(M) \cdot \varphi\left(\frac{L}{d_h}\right) \quad (2.2)$$

де $\mu_{\infty}(M)$ – асимптотичне значення коефіцієнта витрати для повністю розвиненого турбулентного режиму, що залежить від морфологічного типу

дефекту M ; $\varphi(L/d_h)$ – поправка на відношення товщини стінки L до гідравлічного діаметра отвору d_h , що враховує перехід між гідродинамічними режимами «гострокрайї отвір – короткий насадок – довгий канал».

Таким чином, коефіцієнт витрати перестає бути сталою величиною і розглядається як функція конструктивних особливостей дефекту та умов формування струменя витоку. Наведені значення використовуються як базові параметри подальшого математичного моделювання та можуть уточнюватися під час калібрування моделі за експериментальними даними.

Значення μ_∞ стосуються одиночного дефекту. За наявності колонії близько розташованих дефектів (пітинг, каскади тріщин) зведення до єдиної ефективної площі є коректним лише з урахуванням їх взаємного впливу: $A_{\text{еф}} = \sum A_i \cdot \beta_{\text{взаєм}}$, де $\beta_{\text{взаєм}} \leq 1,0$ враховує гідродинамічну інтерференцію сусідніх отворів. Цей чинник прийнято як обмеження моделі та напрям її подальшого уточнення.

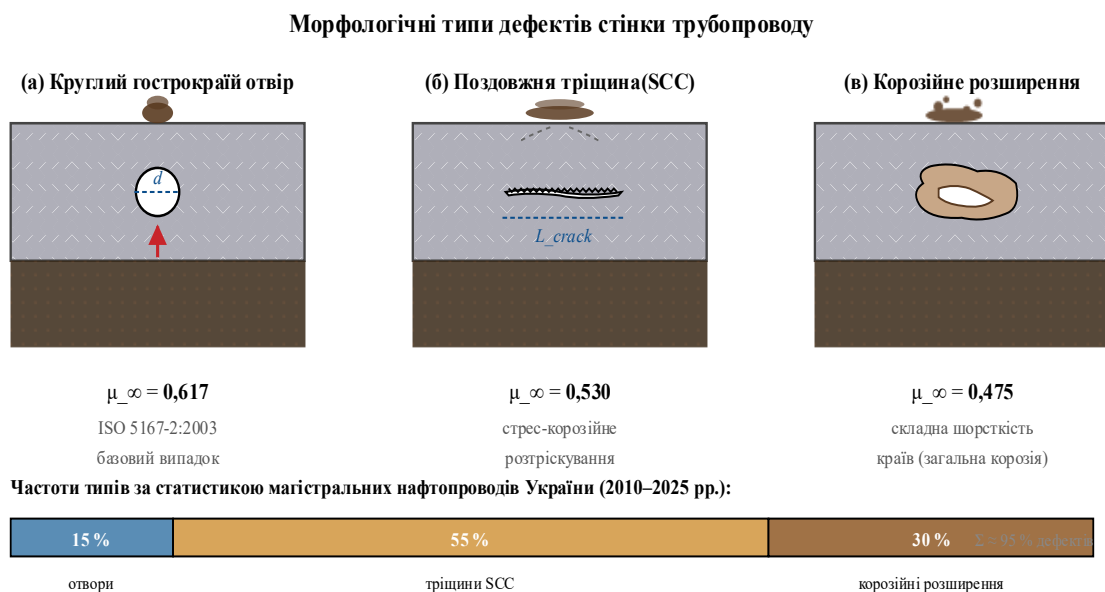


Рисунок 2.2 – Морфологічні типи дефектів стінки трубопроводу та відповідні значення асимптотичного коефіцієнта витрати μ_∞ : (а) круглий гострокрайї отвір; (б) поздовжня тріщина SCC; (в) корозійне розширення зі складною шорсткістю країв. Нижній рядок – емпіричний розподіл частот трьох типів дефектів за статистикою аварій на МН України (2010–2025 рр.), що охоплює близько 95 % зафіксованих аварій.

Поправка $\phi(L/d_h)$ розрізняє три гідродинамічні режими (рис. 2.3):

1. **Гострокрайй отвір** ($L/d_h < 0,5$): струмінь стискається у зоні *vena contracta*, не торкаючись стінок каналу; $\phi \approx 1,00$.
2. **Короткий насадок типу Борда** ($0,5 \leq L/d_h \leq 1,5$): розширений струмінь повторно приєднується до стінок, пікове значення $\phi \approx 1,05$ при $L/d_h \approx 1$.
3. **Довгий канал з тертям** ($L/d_h > 1,5$): домінують втрати на тертя по довжині, ϕ логарифмічно спадає до 0,85–0,95 для типових товщин стінки.

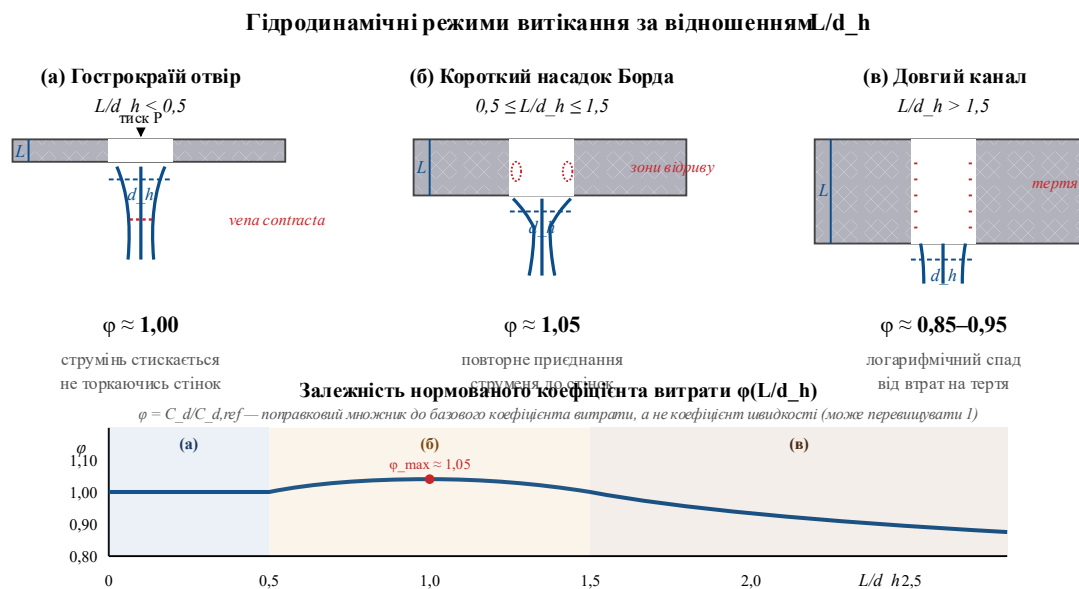


Рисунок 2.3 – Гідродинамічні режими витікання залежно від безрозмірного відношення L/d_h : (а) гострокрайй отвір ($\phi \approx 1,00$); (б) короткий насадок Борда ($\phi \approx 1,05$); (в) довгий канал з тертям ($\phi \approx 0,85-0,95$). Нижня панель – якісна залежність $\phi(L/d_h)$ з позначенням трьох зон та максимумом при $L/d_h \approx 1$. Рисунок є власною побудовою як узагальнення класичних гідравлічних залежностей за даними [24, 52].

Слід зазначити, що множник ϕ є нормованою поправкою до коефіцієнта витрати $\phi = C_d/C_{d,ref}$ (за базове прийнято $C_{d,ref} = 0,617$ для круглого гострокрайго отвору), а не коефіцієнтом швидкості. На відміну від коефіцієнта швидкості,

який за визначенням не перевищує одиниці, геометричний поправковий множник ϕ може бути більшим за одиницю: у режимі короткого насадка струмінь повторно приєднується до стінок, переріз заповнюється повністю, і ефективний коефіцієнт витрати зростає вище значення для гострокраїго отвору. При цьому сам коефіцієнт витрати C_d у всіх режимах залишається меншим за одиницю, що відповідає класичній гідромеханіці [24, 52].

Запропонований поділ на три режими використовується під час подальшого формування узагальненого коефіцієнта витрати та забезпечує врахування зміни структури потоку залежно від геометрії дефекту. Це дозволяє застосовувати єдину математичну модель для різних типів аварійних пошкоджень магістральних трубопроводів.

2.2.2 Пружно-пластичне розкриття дефекту під дією внутрішнього тиску

Одним із принципів обмежень класичних моделей аварійного витікання є припущення про незмінність геометрії дефекту протягом усього процесу витікання. Насправді під дією внутрішнього тиску відбувається пружне та пружно-пластичне розкриття країв дефекту, що призводить до збільшення його ефективної площі. Для врахування цього явища в роботі запропоновано математичну модель фізико-геометричної нелінійності дефекту, відповідно до якої площа дефекту розглядається як функція внутрішнього тиску. Площа дефекту A описується нелінійною функцією тиску:

$$A(P) = A_0 \cdot \left[1 + \gamma \cdot \left(\frac{P D}{2 L \sigma_y} \right)^\beta \right] \quad (2.3)$$

де A_0 – початкова площа дефекту при атмосферному тиску, м^2 ; D – зовнішній діаметр трубопроводу, м ; L – товщина стінки, м ; σ_y – *межа текучості матеріалу труби* ($\sigma_y = 415 \text{ МПа}$ для сталі класу X60); γ – безрозмірний коефіцієнт

морфологічної нестабільності дефекту; β – показник фізико-геометричної нелінійності деформаційного відгуку стінки [59, 60, 61].

Запропонована залежність є узагальненням класичних моделей витікання, у яких площа дефекту вважається сталою величиною. На відміну від них, рівняння (2.3) враховує зміну геометрії дефекту в процесі розвитку аварії.

Безрозмірна комбінація $\sigma_\theta/\sigma_y = PD/(2L\sigma_y)$ – це кільцеве напруження за формулою Лапласа для тонкостінної труби, нормоване на межу текучості. Відношення σ_θ/σ_y є фізично природним параметром нормалізації: воно дорівнює нулю при відсутності тиску і наближається до одиниці при досягненні кільцевого руйнування. Для типових умов Прикарпаття ($P = 4$ МПа, $D = 530$ мм, $L = 8$ мм) маємо $\sigma_\theta/\sigma_y \approx 0,32$. Таким чином, саме відносний рівень кільцевих напружень визначає інтенсивність нелінійного розкриття дефекту.

При чисто пружному розкритті приймається $\beta = 1,0$; при переході металу в околі концентратора напружень у пружно-пластичний стан показник зростає до $1,1 \leq \beta \leq 1,35$. Значення показника β встановлено за результатами чисельного моделювання методом скінченних елементів, методика якого описана нижче.

Коефіцієнт γ калібрується за результатами МСЕ-моделювання та приймає значення у діапазоні 0,3–0,8 для типових геометрій дефектів. За типових умов ($P = 4$ МПа, $\gamma = 0,4$, $\beta = 1,2$) приріст площі дефекту становить близько 10 %, що дає 7–8 % приріст оцінки витрати порівняно з лінеаризованою моделлю. За умов близьких до граничного тиску ($P = 5,5$ –6 МПа) або для дефектів із зонами пластичних деформацій цей ефект посилюється до 12–15 %.

Результати скінченно-елементного (МСЕ) розрахунку нелінійного розширення ефективної площі дефекту для чотирьох типових конфігурацій узагальнено в табл. 2.1; вони підтверджують прийнятий у моделі діапазон приросту площі 4–12 %, що й зумовлює відповідне підвищення точності оцінки витрати на 8–15 %. Незалежним підтвердженням суттєвості фізико-геометричної нелінійності слугує робота [59], де показано, що похибка суто пружного наближення відносно пружно-пластичного нелінійно зростає зі збільшенням внутрішнього тиску й може перевищувати 20 %.

Для кількісної оцінки впливу фізико-геометричної нелінійності проведено серію скінченно-елементних розрахунків для найбільш характерних конфігурацій дефектів. Основні результати наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати МСЕ-розрахунку нелінійного розширення площі наскрізного дефекту під дією внутрішнього тиску

Конфігурація дефекту (a/t ; P , МПа)	Показник β	Початкова площа A_0 , мм ²	Нелінійна площа A , мм ² (приріст ΔA , %)
Поздовжня тріщина SCC ($a/t = 0,25$; $P = 4,0$)	1,10	20,0	20,8 (+4 %)
Корозійний свищ ($a/t = 0,40$; $P = 4,0$)	1,20	20,0	22,0 (+10 %)
Корозійний свищ ($a/t = 0,55$; $P = 5,5$)	1,30	20,0	22,4 (+12 %)
Поздовжня тріщина ($a/t = 0,60$; $P = 6,0$)	1,35	20,0	22,4 (+12 %)

Як видно з таблиці 2.1, зі збільшенням відносної глибини дефекту та внутрішнього тиску спостерігається нелінійне зростання ефективної площі дефекту. Для характерних умов експлуатації магістральних нафтопроводів приріст площі становить від 4 до 12 %, що обумовлює відповідне збільшення прогнозованої витрати та підтверджує необхідність урахування фізико-геометричної нелінійності під час математичного моделювання аварійних витоків.

Таким чином, запропонована модель фізико-геометричної нелінійності дозволяє відмовитися від припущення про сталу площу дефекту та врахувати її зміну під дією внутрішнього тиску. Поєднання залежностей (2.2) та (2.3) формує узагальнений опис процесу витікання, у якому коефіцієнт витрати визначається морфологією дефекту, а ефективна площа – напружено-деформованим станом стінки трубопроводу. Отримані співвідношення використовуються під час побудови інтегральної математичної моделі аварійного витоку, наведеної у наступних підрозділах.

2.3 Просторовий характер витоку, стохастичне поширення невизначеностей та трифазна часова структура

2.3.1 Балансовий зв'язок з аналітичною моделлю фільтрації

Під час аварійної розгерметизації підземного магістрального нафтопроводу процес витікання не обмежується лише виходом нафти через дефект стінки труби. Після потрапляння у ґрунтове середовище формується складна система взаємодії між потоком нафти та пористим середовищем, унаслідок чого виникає зворотний гідродинамічний вплив ґрунту на процес витікання. Саме врахування цього взаємозв'язку є необхідною умовою побудови узгодженої математичної моделі аварійного процесу. Детальний аналітичний розв'язок цієї крайової задачі у двовимірній постановці із застосуванням послідовних інтегральних перетворень Фур'є та Лапласа наведено у розділі 3. З огляду на складність повної зв'язаної задачі у цьому розділі застосовано модульний підхід. Він передбачає окреме визначення миттєвої витрати нафти $Q(t)$ за рівняннями (2.1)–(2.3), тоді як зворотний вплив фільтраційного протитиску враховується через узагальнення часу τ_{inert} (фаза II) та характерної висоти напору H (фаза III) [62–64]. Такий підхід забезпечує узгодження моделей витікання та фільтрації без втрати фізичного взаємозв'язку між ними. Фільтраційний протитиск ґрунту описується як сума капілярної та в'язкісної складових: $\Delta P_{\text{прот}} = \rho_w g h_{\text{кап}} + \mu Q / (kA)$, де перший доданок відповідає капілярному тиску, а другий – в'язкісному опору фільтрації за законом Дарсі (μ – динамічна в'язкість, k – проникність ґрунту, A – площа фронту фільтрації). Таким чином, ефективний перепад тиску на дефекті визначається не лише параметрами трубопроводу, а й фільтраційними властивостями навколишнього ґрунту.

Результати аналітичного моделювання фільтрації дозволяють оцінити не лише загальний об'єм витоку, а й розподіл нафти між рухомою та іммобілізованою фазами. Для цього вводиться коефіцієнт іммобілізації, який визначається співвідношенням:

$$f_{\text{immob}} = \frac{V - V_{\text{eff}}}{V}, \quad V_{\text{eff}} = V \cdot (1 - f_{\text{immob}}) \quad (2.4)$$

Запропонований підхід забезпечує перехід від оцінювання загального об'єму витоку до визначення об'єму нафти, який потенційно може мігрувати до водоносних горизонтів і формувати вторинне забруднення навколишнього середовища.

Слід підкреслити, що для вільнофазової нафти (LNAPL) поняття *коефіцієнта затримки* R_d у його класичному визначенні застосовується лише до розчиненої у воді фракції вуглеводнів і дає $R_d \approx 5-50$ для типових суглинків. Для оцінки сумарної іммобілізованої фракції *вільної* нафти використовується концепція *залишкової насиченості LNAPL* (S_{or}), яка для дерново-карбонатних суглинків Прикарпаття становить $S_{or} = 0,10-0,30$ від порового простору. З урахуванням LNAPL-захоплення, сорбції розчиненої частини та утримання у тупикових порах сумарна іммобілізована фракція для гумусованих суглинків Прикарпаття становить $0,35-0,55$. У подальших розрахунках коефіцієнт іммобілізації приймається випадковою величиною з нормальним законом розподілу $f_{\text{immob}}=0,45 \pm 0,10$, параметри якого наведено у таблиці 2.2 [65].

2.3.2 Метод латинського гіперкубового планування

Перехід від детермінованого до стохастичного моделювання виконано шляхом генерації ансамблю реалізацій вхідних параметрів **методом латинського гіперкубового планування** (Latin Hypercube Sampling, LHS). Такий підхід забезпечує ефективніше використання обмеженої кількості реалізацій порівняно з класичним методом Монте-Карло та широко застосовується у задачах глобального аналізу чутливості й оцінювання ризиків. Для досягнення статистичної збіжності оцінок квантилів P_5 та P_{95} з відносною похибкою не гірше 2 % достатньо $N = 5000$ реалізацій; це підтверджено пробними розрахунками з потроєнням N , які не змінили крайових квантилів у межах третьої значущої цифри. Перелік параметрів стохастичної моделі та

характеристики обраних розподілів наведено у таблиці 2.2. Вибір стохастичних параметрів здійснювався з урахуванням фізичної природи кожної величини, доступних експлуатаційних даних та вимог до статистичної стійкості моделі. Вибір типу розподілу фізично обґрунтований:

- **Нормальний закон розподілу** – застосовано для параметрів, що характеризуються симетричним розподілом значень (робочий тиск, висота геодезичного напору, густина нафти, іммобілізована фракція).
- **Логнормальний закон розподілу** – використано для параметрів із додатною асиметрією та мультиплікативним характером невизначеності (початкова площа дефекту, час виявлення витoku).
- **Рівномірний закон розподілу** – застосовано для топографічного коефіцієнта ξ , для якого в межах заданого діапазону всі значення вважаються рівноймовірними. Водночас відношення L/d_h не розглядається як незалежна випадкова величина, оскільки визначається детерміновано за співвідношенням товщини стінки трубопроводу та ефективного діаметра дефекту. Тому цей параметр виключено з переліку незалежних змінних, що генеруються методом LHS [66].
- **Дискретний категоріальний розподіл** – використано для опису морфологічного типу дефекту [67].

Таблиця 2.2 – Стохастичні параметри моделі та обрані типи розподілів

Параметр	Позначення	Розподіл	Характеристики
Робочий тиск у точці витoku, МПа	P	Нормальний	$\mu P = 4,0$; $\sigma P = 0,4$
Початкова площа дефекту, см ²	A_0	Логнормальний	медіана 2,0; $\sigma_{ln} = 0,8$
Висота геодезичного напору, м	H	Нормальний	$\mu H = 12$; $\sigma H = 3$
Густина нафти, кг/м ³	ρ	Нормальний	$\mu \rho = 855$; $\sigma \rho = 15$
Морфологія дефекту	M	Дискретний	отвір: 0,15
Час виявлення витoku, хв	t_{detect}	Суміш логнормальних розподілів	медіана 12 хв; хвости до 2–4 год; $\sigma_{ln} = 0,4$
Характерний час фази II, с	τ_{inert}	Нормальний	$\mu \tau = 300$; $\sigma \tau = 60$
Топографічний коефіцієнт фази III	ξ	Рівномірний	[1,0; 2,5]
Іммобілізована фракція (сумарна)	f_{immob}	Нормальний	$\mu_f = 0,45$; $\sigma_f = 0,10$

Відношення $L/dhL/d_hL/dh$ не задається як незалежний параметр моделі, а визначається детерміновано через товщину стінки трубопроводу LLL , що є сталою для досліджуваної ділянки, та ефективний гідравлічний діаметр сформованого дефекту dhd_hdh . Тому цей параметр не включено до переліку випадкових величин, що генеруються методом латинського гіперкубового планування.

Для забезпечення узгодженості між стохастичною моделлю, розробленою у цьому розділі, та аналітичними дослідженнями, наведеними у розділі 3, подальші розрахунки виконано для одного характерного підкритичного сценарію з параметрами $A_0 \approx 0,8 \text{ см}^2$ та $P_0 = 3,0 \text{ МПа}$. Зазначений сценарій відповідає приблизно 20-му процентилу розподілу площі дефекту (табл. 2.2) і використовується як репрезентативний приклад застосування розробленої моделі. При цьому результати розділу 2 характеризують повний ансамбль можливих реалізацій, тоді як розділ 3 демонструє детальний аналітичний розв'язок для одного з характерних сценаріїв аварії.

Сформований ансамбль випадкових параметрів використовується на наступному етапі для визначення статистичного розподілу об'єму витоку, проведення глобального аналізу чутливості та оцінювання впливу невизначеності окремих параметрів на результати моделювання.

2.3.3 Трифазний інтеграл об'єму витоку

Процедурний алгоритм стохастичного моделювання складається з таких кроків.

Крок 1. Задаються крайові умови для досліджуваної ділянки: геометричний профіль траси, гідрогеологічні характеристики ґрунтів, проектний тиск, відстань до запірних арматур.

Крок 2. Методом LHS генерується матриця $N \times m = 5000 \times 10$ випадкових вхідних векторів відповідно до розподілів табл. 2.2.

Крок 3. Для кожного k -го вектора розраховується площа $A^{(k)}(P^{(k)})$ за формулою (2.3) та коефіцієнт $\tilde{\mu}^{(k)}$ за формулою (2.2).

Крок 4. Обчислюється динаміка витрати $Q(t)$ по трьох фазах:

– *Фаза I – стабільний витік до виявлення.* Тиск підтримується насосами на рівні P_0 , витрата стала:

$$Q_0^{(k)} = \tilde{\mu}^{(k)} \cdot A^{(k)} \cdot \sqrt{\frac{2 P_0^{(k)}}{\rho^{(k)}}}, \quad V_1^{(k)} = Q_0^{(k)} \cdot t_{\text{detect}}^{(k)} \quad (2.5)$$

Параметр t_{detect} включає час інструментального виявлення аварії, прийняття рішення оператором та інерцію відключення НПС і закриття кранів. Оскільки цей час суттєво залежить від режиму експлуатації, замість єдиного детермінованого значення прийнято суміш режимів: стаціонарний (медіана 10–15 хв), перехідний пуск/зупинка НПС (45–90 хв) та нічний/аварійний (2–4 год). За польовими випробуваннями на 175-кілометровому нафтопроводі суто інструментальне виявлення методом хвилі тиску триває близько 10–40 с, проте підтвердження й локалізація сигналу в реальних умовах потребують значно більшого часу [68]. Використання стохастичного опису часу виявлення аварії дозволяє врахувати реальну варіабельність процесу локалізації та забезпечує формування повного розподілу можливих значень об'єму витоку.

Незважаючи на те, що хвиля зниження тиску після утворення дефекту поширюється трубопроводом за кілька секунд, фактичний час припинення витоку визначається не швидкістю поширення хвилі тиску, а тривалістю виявлення аварії, підтвердження сигналу, прийняття рішення та закриття запірної арматури. Тому для базового сценарію розрахунків прийнято час 12 хв.

– *Фаза II – пружна декомпресія ізольованої ділянки.* Після зупинки агрегатів надлишковий тиск спадає експоненційно:

$$P_{II}(t) = P_0 \cdot \exp \left[-\frac{t - t_{\text{detect}}}{\tau_{\text{inert}}} \right] \quad (2.6)$$

Слід розрізняти два фізично різні часові масштаби. Акустичний час пробігу хвилі тиску $t_{\text{ак}} = L/c \approx 3\text{--}10$ с – це час, за який збурення тиску добігає до запірної арматури ділянки.

Натомість повне спорожнення пружно стисненого об'єму ділянки триває значно довше й визначається запасеним об'ємом стисненої рідини та витратою через дефект: $t_{\text{декомп}} = \Delta V_{\text{пружн}}/Q_{\text{вит}}$. Для прийнятих параметрів ($D = 530$ мм, $L = 5$ км, $t = 8$ мм, $\Delta P = 4$ МПа, $A \approx 2$ см²) оцінка за прийнятими параметрами дає $t_{\text{декомп}} \approx 380$ с, що узгоджується з прийнятим характерним часом $\tau_{\text{inert}} \approx 300$ с і знімає удавану суперечність між часом декомпресії та акустичним часом.

Характерний час $\tau_{\text{inert}} \approx 300$ с для ізольованої ділянки довжиною 3–10 км відповідає сумарній пружній стисливості системи «рідина – трубопровід» $\beta^* \approx 10^{-9}$ Па⁻¹ при витраті $Q_0 \sim 10$ л/с. Оскільки $Q \propto \sqrt{P}$, маємо $Q_{\text{II}}(t) = Q_0 \cdot \exp[-(t - t_{\text{detect}})/(2\tau_{\text{inert}})]$. Інтегруванням від t_{detect} до $t_{\text{detect}} + 3\tau_{\text{inert}}$ одержуємо:

$$V_{\text{II}}^{(k)} = Q_0^{(k)} \cdot 2\tau_{\text{inert}}^{(k)} \cdot (1 - e^{-3/2}) \approx 1,554 Q_0^{(k)} \tau_{\text{inert}}^{(k)}.$$

Числовий коефіцієнт $2(1 - e^{-3/2}) = 1,5537$ є точним аналітичним результатом інтегрування, що виправдовує округлення до 1,55 у (2.7). На межі фази II (при $t = t_{\text{detect}} + 3\tau_{\text{inert}}$) залишкова витрата складає $Q_0 e^{-3/2} \approx 0,22 Q_0$, після чого режим переходить до фази III [69].

– Фаза III – гравітаційне спорожнення під дією геодезичного напору. Після інерційної декомпресії єдиним джерелом руху нафти є гідростатичний тиск стовпа у ділянках траси, розміщених вище точки розгерметизації. Об'єм втрат визначається топологією профілю ізольованої ділянки:

$$V_{\text{III}}^{(k)} = \xi^{(k)} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot H^{(k)} \quad (2.7)$$

де $\pi D^{2/4}$ – площа поперечного перерізу труби; $H^{(k)}$ – характерна різниця висот між найвищою точкою заповненого сегменту профілю та місцем витоку; $\xi^{(k)} \in [1,0; 2,5]$ – топографічний коефіцієнт, що враховує співвідношення між горизонтальною довжиною та вертикальним падінням профілю [70].

У верхніх точках профілю додатково перевіряється умова суцільності потоку: якщо у локальному максимумі тиск падає до тиску насичених парів ($P \leq P_{\text{пар}}$), утворюється вакуумна газова порожнина, яка розриває сифон і блокує перетікання нафти з віддаленіших схилів; у цьому разі об'єм фази III обмежується стоком лише з ділянки між місцем аварії та найближчим «горбом» профілю, що робить оцінку об'єму витоку консервативнішою [71].

Для оцінки часового масштабу фази III використовується адаптоване рівняння Торрічеллі для приведенного резервуара:

$$t_{\text{drain}}^{(k)} \approx \frac{2 \xi^{(k)} \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{H^{(k)}}}{\tilde{\mu}^{(k)} A^{(k)} \sqrt{2g}} \quad (2.8)$$

Формула (2.8) використовується як оцінка часового масштабу фази III для побудови графіків $Q(t)$; кінцевий об'єм V_{III} визначається статичним балансовим співвідношенням (2.8). За типових параметрів ($H \approx 12$ м, $\xi \approx 1,5$, $A_0 \approx 2$ см²) формула (2.8) дає $t_{\text{drain}} \approx 40\text{--}80$ хв залежно від розміру дефекту, що узгоджується з даними інструментальних реєстрацій аварій.

Крок 5. Інтегральний об'єм витоку:

$$V^{(k)} = V_I^{(k)} + V_{\text{II}}^{(k)} + V_{\text{III}}^{(k)} \quad (2.9)$$

Крок 6. Ефективний об'єм забруднення:

$$V_{\text{eff}}^{(k)} = V^{(k)} \cdot (1 - f_{\text{immob}}^{(k)}) \quad (2.10)$$

Крок 7. Статистична обробка результатів: побудова функцій густини і кумулятивного розподілу, розрахунок квантилів P_5 , P_{25} , P_{50} , P_{75} , P_{95} та індексів чутливості.

Таким чином, запропонована трифазна схема дозволяє послідовно врахувати основні фізичні механізми формування аварійного витоку: роботу насосних агрегатів, пружну декомпресію ізольованої ділянки та подальше гравітаційне спорожнення трубопроводу. Отриманий інтегральний об'єм витоку

використовується як вихідна інформація для моделювання поширення нафтового забруднення у ґрунтовому середовищі, розглянутого в наступному розділі.

Характерну еволюцію $Q(t)$ та $P(t)$ упродовж трьох фаз показано на рис. 2.4. Площі трьох заштрихованих ділянок під кривою $Q(t)$ дорівнюють об'ємам V_I , V_{II} , V_{III} відповідно.

Фаза I – стабільний витік до $t_{\text{detect}} \approx 12$ хв; фаза II – пружна декомпресія тривалістю $3\tau_{\text{inert}} \approx 15$ хв; фаза III – гравітаційне спорожнення тривалістю 40–80 хв залежно від розміру дефекту. Заштриховані ділянки – об'єми V_I , V_{II} , V_{III} . На нижній частині рисунка наведено відповідні розрахункові співвідношення для кожної з фаз процесу [66].

2.4 Результати моделювання, аналіз чутливості та економічна інтерпретація

2.4.1 Розподіли об'єму витоку

За результатами 5000 реалізацій стохастичного моделювання методом латинського гіперкубового планування отримано розподіли повного об'єму аварійного витоку V та ефективного об'єму забруднення V_{eff} . Їх статистичні характеристики наведено нижче.

Модель реалізована засобами Python (NumPy 2.1, SciPy 1.14) з фіксованим зерном генератора псевдовипадкових чисел для відтворюваності результатів. Розрахунки виконано для магістрального нафтопроводу системи «Дружба»: діаметр 530 мм, сталь X60 ($\sigma_y = 415$ МПа), робочий тиск 4,0 МПа, нафта Долинського родовища ($\rho = 855$ кг/м³).

Розподіл повного об'єму втрат V характеризується вираженою правосторонньою асиметрією, що є характерним для процесів із мультиплікативним характером невизначеності. Статистичний аналіз показав, що медіана розподілу становить $P_{50} = 16,6$ м³, середнє значення $\bar{V} = 21,9$ м³,

стандартне відхилення $\sigma_V = 18,3 \text{ м}^3$, а квантилі розподілу складають: $P_5 = 7,3 \text{ м}^3$; $P_{25} = 11,4 \text{ м}^3$; $P_{75} = 26,0 \text{ м}^3$; $P_{95} = 52,2 \text{ м}^3$.

Після врахування сорбційно-капілярної іммобілізації за формулою (2.10): медіана V_{eff} становить $9,1 \text{ м}^3$, критичний квантиль $P_{95} = 29,5 \text{ м}^3$ [72].

Вертикальні пунктирні лінії маркують P_{50} та P_{95} розподілу V , що полегшує візуальну інтерпретацію меж найбільш імовірних та критичних сценаріїв. Виражена права асиметрія свідчить про неприйнятність орієнтації лише на середні значення при оцінці страхових ризиків.

Значна різниця між медіаною ($9,1 \text{ м}^3$) та 95-м перцентилем ($29,5 \text{ м}^3$) свідчить про високий рівень невизначеності розвитку аварійного процесу. Це підтверджує, що використання лише середніх значень при оцінюванні екологічних і страхових ризиків є недостатнім. Для планування поточних рекультиваційних заходів доцільно використовувати медіанне значення як найбільш імовірний сценарій, тоді як визначення розмірів екологічних резервів і страхових фондів має базуватися на квантилі P_{95} , який характеризує розумно несприятливий сценарій з імовірністю перевищення близько 5 % [73].

2.4.2 Глобальний аналіз чутливості: ієрархія факторів невизначеності

Для кількісного оцінювання впливу окремих факторів невизначеності на результати моделювання виконано глобальний аналіз чутливості із застосуванням лінійної метамоделі в логарифмічних координатах:

$$\ln V = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot \ln x_i + \varepsilon \quad (2.11)$$

де x_i – нормалізовані вхідні параметри, β_i – *стандартизовані регресійні коефіцієнти (Standardized Regression Coefficients, SRC)*.

Запропонована форма метамоделі дає можливість оцінити внесок кожного вхідного параметра у формування загальної дисперсії вихідної величини.

Квадрати нормованих стандартизованих регресійних коефіцієнтів $\beta_i^2/\sum_j \beta_j^2$ за умови високого коефіцієнта детермінації моделі ($R^2 \geq 0,9$) використовувалися як наближення до індексів Соболя першого порядку S_i , що характеризують частку загальної дисперсії $\ln V$, пояснену кожним фактором окремо. Коефіцієнт детермінації метамоделі $R^2 = 0,96$ підтверджує її адекватність. Аналіз показав, що найбільший внесок у загальну дисперсію моделі забезпечує площа дефекту A_0 (86,4 %). Другим за значущістю фактором є час виявлення аварії t_{detect} (8,1 %). Внесок геодезичного напору становить 1,8 %, топографічного коефіцієнта – 1,6 %, коефіцієнта витрати – 1,0 %, часу другої фази – 0,8 %, робочого тиску – 0,3 %, тоді як сумарний внесок інших параметрів не перевищує 0,1 %. Сума індексів складає 100,0 %, що підтверджує повноту декомпозиції. Оскільки відношення L/d_h належить до групи факторів із сумарним внеском менше 0,1 %, уточнення його діапазону до $[0,1; 0,5]$ та переведення в детерміновані змінні змінює медіану й квантиль P_{95} у межах менш ніж 0,5 %, що підтверджує стійкість отриманих результатів.

Для перевірки стійкості отриманих висновків виконано серію додаткових розрахунків зі зміною ширини логнормального розподілу площі дефекту A_0 , що моделює різний рівень точності внутрішньотрубної діагностики (табл. 2.3). Отримані результати свідчать, що навіть за істотного зменшення невизначеності площі дефекту вона залишається одним із визначальних факторів моделі, тоді як другим за значущістю стає час виявлення аварії. Це підтверджує доцільність першочергового розвитку систем внутрішньотрубної діагностики та подальшого вдосконалення систем оперативного виявлення витоків [74].

Таблиця 2.3 – Робастність ієрархії факторів чутливості при зменшенні невизначеності A_0

$\sigma_{\ln(A_0)}$	$S_{A_0}, \%$	$S_{t_{\text{detect}}}, \%$	$S_H, \%$	$S_\xi, \%$	$S_\tau, \%$
0,80 (поточний рівень)	86,4	8,1	1,8	1,6	0,8
0,50 (звичайна діагностика)	72,1	17,3	3,1	3,0	1,6
0,30 (точна діагностика)	48,6	32,6	5,4	5,1	3,1
0,15 (висока точність ILI)	19,1	51,7	8,2	7,8	4,8

Отримані результати підтверджують, що найбільший потенціал підвищення достовірності прогнозування пов'язаний зі зменшенням невизначеності площі дефекту. Після досягнення високої точності її визначення вирішального значення набуває оперативність виявлення аварії. Таким чином, результати аналізу чутливості визначають пріоритетні напрями вдосконалення систем діагностики та моніторингу магістральних нафтопроводів.

2.4.3 Економічна інтерпретація: EVPI та обґрунтування інвестицій у СВВ

Перехід до стохастичного опису дозволяє застосувати байєсівську концепцію **очікуваної цінності досконалої інформації** (Expected Value of Perfect Information, EVPI). EVPI визначає граничний обсяг капітальних інвестицій у системи виявлення витоків (СВВ), що зменшують епістемічну невизначеність:

$$EVPI = E_{\theta}[\max_a U(a, \theta)] - \max_a E_{\theta}[U(a, \theta)] \quad (2.12)$$

де a – рішення про вибір типу СВВ; θ – вектор випадкових параметрів витоку; $U(a, \theta)$ – функція корисності, що залежить від загальних збитків (втрачена нафта, екологічні штрафи, рекультивація, втрата ділової репутації).

За результатами проведеного стохастичного моделювання для типового сценарію аварії на магістральному нафтопроводі системи «Дружба» отримано, що очікувана повна величина збитків $E[\text{Loss}]$ становить 1,0–1,5 млн USD, а очікувана цінність досконалої інформації (EVPI) оцінюється у межах 700–800 тис. USD на одну потенційну аварію, що відповідає приблизно 60–75 % очікуваних збитків.

Результати проведеного моделювання показали, що скорочення часу виявлення аварії від 60 хв (ручний контроль) до 5 хв при використанні сучасних

інструментальних систем типу E-RTTM потенційно дозволяє зменшити математичне сподівання сумарних збитків на 65–70 %.

Отримана оцінка характеризує середній ефект для прийнятих у моделі сценаріїв і може змінюватися залежно від параметрів трубопроводу, режимів його експлуатації та умов локалізації аварії. За середньої частоти розгерметизацій $\lambda = 0,15\text{--}0,40$ аварії на 1000 км·рік та розрахункового горизонту 20 років (ставка дисконтування $r = 10\%$) гранично допустимий обсяг інвестицій у систему виявлення витоків для контрольованої ділянки трубопроводу довжиною 200 км визначається за залежністю [75]:

$$\text{CAPEX}_{\max} = \text{EVPI} \cdot k \cdot \frac{\lambda \cdot L_{\text{sec}}}{1000} \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-T}}{r} \quad (2.13)$$

де $k = 0,65\text{--}0,70$ – частка зниження збитків при впровадженні СВВ, L_{sec} – довжина контрольованої ділянки трубопроводу, км; T – розрахунковий період експлуатації, років; r – ставка дисконтування.

На відміну від традиційного використання EVPI для оцінювання доцільності додаткових досліджень, у даній роботі цей показник застосовано для визначення максимально економічно доцільного обсягу інвестицій у системи виявлення витоків магістральних нафтопроводів.

Таким чином результати стохастичного моделювання безпосередньо трансформуються у практичні інженерні рекомендації.

Підстановка числових значень у формулу (2.13), з урахуванням ануїтетного множника $(1 - 1,1^{-20})/0,1 = 8,514$, дає оцінку максимально економічно доцільного обсягу капітальних інвестицій:

$$\text{CAPEX}_{\max} \approx 130\text{--}380 \text{ тис. USD} \quad (2.14)$$

Отриманий діапазон відображає зміну частоти аварійності ($\lambda = 0,15\text{--}0,40$ аварії на 1000 км·рік) та ефективності сучасних систем виявлення витоків у межах прийнятих сценаріїв моделювання. Центральне значення становить близько 233 тис. USD при $\lambda = 0,27$ аварії на 1000 км·рік. Порівняння отриманих

результатів із ринковою вартістю впровадження сучасних систем виявлення витоків типу LeakSPY або аналогічних рішень (150–250 тис. USD для ділянки довжиною 200 км) свідчить про економічну доцільність таких інвестицій [53].

Оскільки величини збитків і EVPI прямо пропорційні ціні нафти та тарифам екологічних санкцій, для практичного використання результатів моделювання доцільно представляти залежність EVPI від ціни нафти та рівня екологічних санкцій у вигляді номограми або сімейства кривих.

Такий підхід дозволяє швидко оцінити економічно обґрунтований рівень інвестицій у системи виявлення витоків за різних ринкових умов. Зокрема, подвоєння екологічних санкцій (реалістичний сценарій у контексті євроінтеграції) пропорційно зсуває верхню межу економічно доцільних інвестицій у системи виявлення витоків.

Для кількісної оцінки впливу аварійності трубопроводу на економічно доцільний обсяг інвестицій виконано серію параметричних розрахунків при зміні частоти аварійності трубопроводу та різних ефективності систем виявлення витоків ($k = 0,60; 0,65; 0,70$). Отримані результати наведено на рис. 2.4.

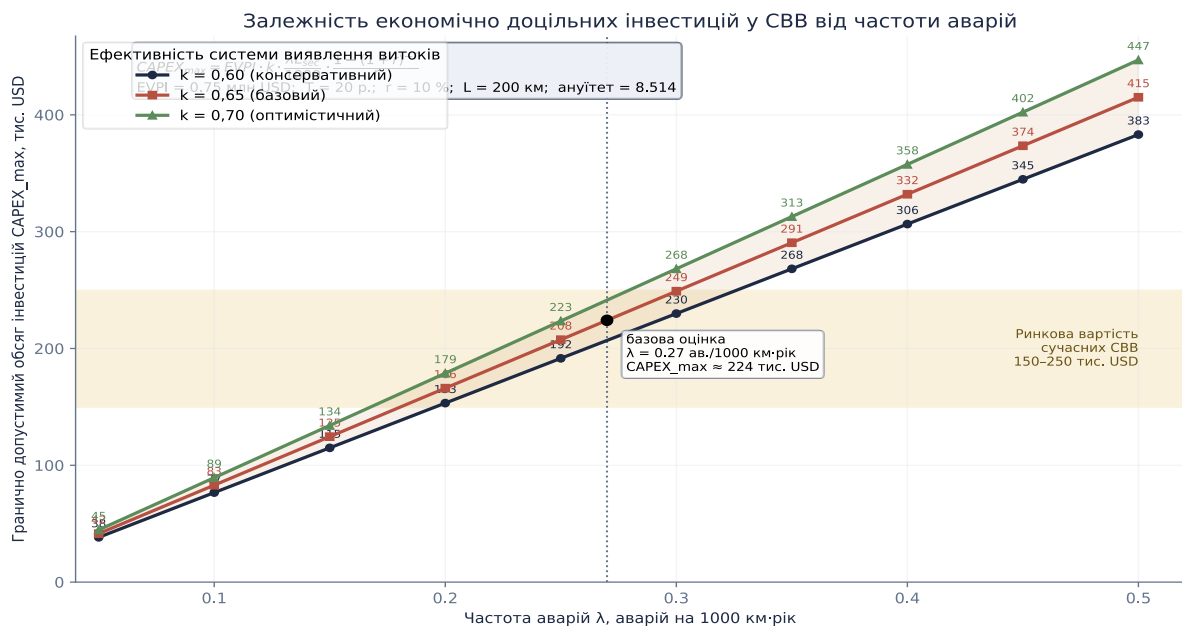


Рисунок 2.4 – Залежність економічно доцільних інвестицій $CAPEX_{max}$ від частоти аварій.

Як видно з рис. 2.4, зі збільшенням аварійності трубопроводу економічно доцільний обсяг інвестицій зростає практично лінійно для всіх трьох сценаріїв ефективності СВВ.

Таблиця 2.24 – Результати параметричних розрахунків економічно доцільного обсягу інвестицій CAPEX_{max} залежно від частоти аварійності трубопроводу

λ , аварій/(1000 км·рік)	CAPEX _{min}	CAPEX _{база}	CAPEX _{max}
0,10	91	129	168
0,20	182	259	336
0,30	273	388	505
0,40	364	517	673
0,50	455	646	841

Числові результати таблиці повністю узгоджуються з графічними залежностями, наведеними на рис. 2.6, що підтверджує стійкість отриманих закономірностей. Аналіз результатів, наведених на рис. 2.6 та в табл. 2.24, дозволяє зробити такі висновки. Для базової частоти аварій $\lambda = 0,27$ ав./(1000 км·рік) економічно доцільний обсяг інвестицій (≈ 207 – 241 тис. USD залежно від сценарію k) перекиває типову ринкову вартість сучасних СВВ (150–250 тис. USD на 200 км), що підтверджує економічну виправданість їх впровадження. Зі збільшенням аварійності трубопроводу гранично виправданий обсяг інвестицій зростає практично пропорційно, сягаючи 380–450 тис. USD за $\lambda \geq 0,45$, що обґрунтовує диференційований (ризик-орієнтований) підхід до модернізації нафтотранспортної інфраструктури. Практично це означає, що оператор трубопроводу може, знаючи власну статистику аварійності, безпосередньо визначити максимально економічно виправданий бюджет модернізації систем виявлення витоків без проведення додаткових економічних досліджень.

Слід зазначити, що значення CAPEX_{max} прямо пропорційне величині EVPI. Тому підвищення вартості нафти або посилення екологічних вимог приводить до відповідного збільшення економічно доцільного обсягу інвестицій у системи виявлення витоків. Наведені на рис. 2.6 значення відповідають

консервативній оцінці $EVPI = 0,75$ млн USD; за верхньої межі діапазону вартості збитків уся сім'я кривих зміщується вгору приблизно в 1,5 раза.

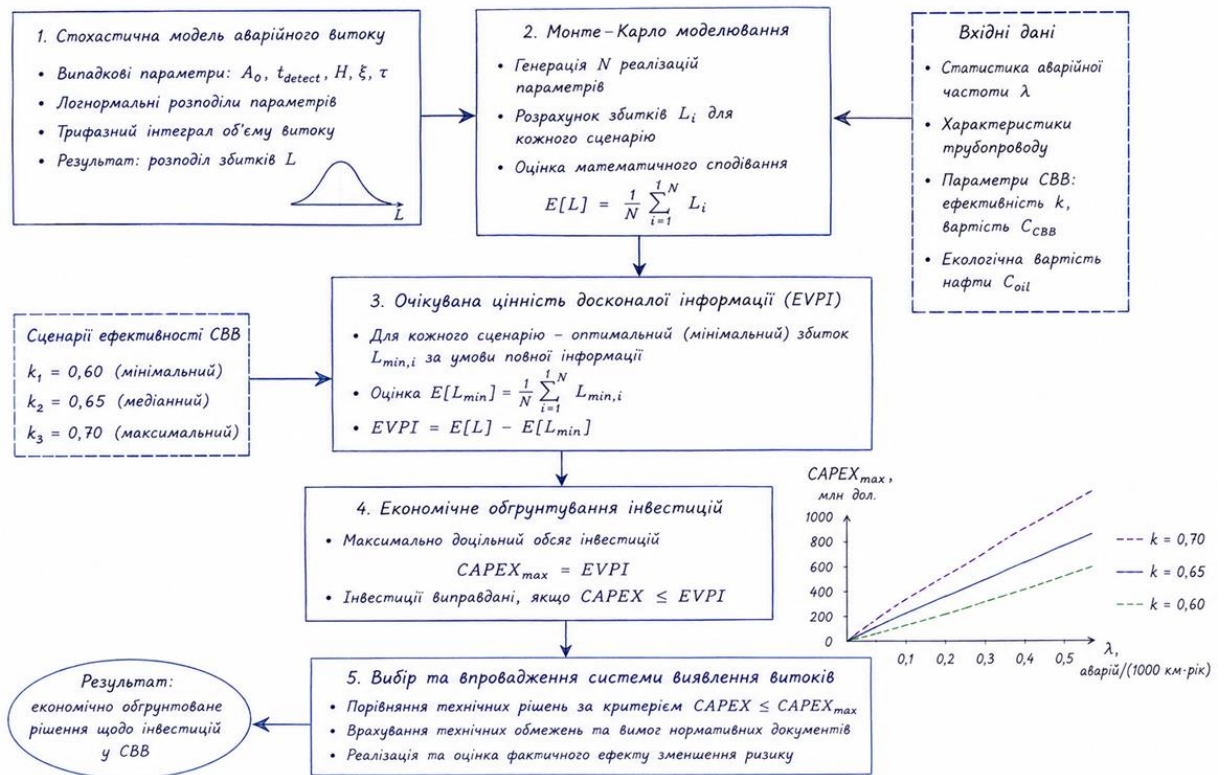


Рисунок 2.5 – Послідовність економічного обґрунтування інвестицій у систему виявлення витоків на основі показника EVPI.

Запропонована послідовність дозволяє перейти від результатів стохастичного моделювання аварійного витоку до кількісного обґрунтування інвестиційних рішень.

На відміну від традиційного використання EVPI лише як показника цінності інформації, у роботі він використовується як інженерний критерій вибору максимально економічно доцільного бюджету впровадження систем виявлення витоків.

Запропонований підхід узгоджується із сучасною практикою ризик-орієнтованого управління активами та положеннями ДСТУ ISO 31000:2018 і API RP 1130. Він забезпечує перехід від стохастичної оцінки невизначеності до

кількісного обґрунтування інвестиційних рішень щодо впровадження систем виявлення витоків.

Таким чином, запропонований підхід забезпечує завершений перехід від стохастичного моделювання аварійних витоків до кількісного економічного обґрунтування інвестицій у системи їх виявлення.

Поєднання показника EVPI з результатами параметричних розрахунків дозволяє визначати доцільний рівень фінансування систем моніторингу залежно від аварійності конкретної ділянки трубопроводу та може бути використане як практичний інструмент під час планування модернізації магістральних нафтопроводів, вибору систем виявлення витоків та оцінювання доцільності природоохоронних інвестицій..

2.5 Верифікація та порівняльний аналіз з результатами 2017 року

Для оцінювання узгодженості запропонованої стохастичної моделі з результатами попередніх досліджень виконано порівняльний аналіз із детермінованою моделлю А. Я. Ждека (2017), побудованою для тих самих ділянок магістральних нафтопроводів. Порівняльні дані – у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняння результатів детермінованої та стохастичної моделей оцінювання повного об'єму аварійного витоку V за різними методиками

Метод оцінки	«Долина – Дрогобич», м ³	«Жулин – Надвірна», м ³
Класична детермінована, $\mu = 0,62$	22,4	17,6
Стохастична модель – P_{25}	11,4	8,7
Стохастична модель – медіана P_{50}	16,6	13,5
Стохастична модель – P_{75}	26,0	22,4
Стохастична модель – P_{95}	52,2	46,6
Перцентиль класичного результату	$\approx P_{67}$	$\approx P_{56}$

Результати, наведені у табл. 2.4, свідчать, що детермінована оцінка [76] (22,4 м³ для «Долина – Дрогобич») відповідає 67-му перцентилію стохастичного розподілу – тобто є помірно консервативною верхньою оцінкою, а не «найбільш

імовірним» сценарієм. Медіана ($P_{50} = 16,6 \text{ м}^3$) приблизно на 26 % менша за класичну оцінку. Отже, детерміновану оцінку можна розглядати як окремий квантиль стохастичного розподілу, тобто як частковий випадок запропонованої моделі:

$$V_{\text{класич}} \approx F_V^{-1}(0,67 \mid \text{стохастична модель}) \quad (2.15)$$

де F_V^{-1} – квантильна функція розподілу об'єму витоку. Аналогічна відповідність ($\approx P_{56}$) для ділянки «Жулин – Надвірна» підтверджує системний характер цього зміщення [77].

Отримані результати свідчать, що запропонована стохастична модель не суперечить попереднім детермінованим розрахункам, а розширює їх, забезпечуючи можливість кількісного оцінювання невизначеності прогнозу та ризиків розвитку аварійної ситуації.

Проведене порівняння слід розглядати як перевірку внутрішньої узгодженості моделі, оскільки калібрування розподілів параметрів виконувалося на основі даних тих самих ділянок магістральних нафтопроводів. Незалежна експериментальна перевірка моделі на інших об'єктах є предметом подальших досліджень та може бути реалізована за участю експлуатаційних служб ПАТ «Укртранснафта» [62].

Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено стохастичну математичну модель оцінювання об'єму аварійного витоку нафти з магістральних трубопроводів, яка, на відміну від існуючих детермінованих підходів, забезпечує кількісне врахування невизначеності експлуатаційних параметрів та формування імовірнісного розподілу можливих сценаріїв розвитку аварії. Запропонована модель базується на трифазній часовій структурі процесу витікання та узгоджується з принципами ризик-орієнтованого управління відповідно до вимог ДСТУ ISO 31000:2018.

Удосконалено математичний опис процесу аварійного витоку шляхом урахування фізико-геометричної нелінійності дефекту, що дозволило врахувати пружно-пластичне розширення ефективної площі пошкодження під дією внутрішнього тиску. Встановлено, що врахування цього ефекту забезпечує збільшення розрахункової витрати нафти на 8–15 % порівняно з традиційними лінеаризованими моделями, усуваючи характерне для них систематичне заниження результатів.

За результатами глобального аналізу чутливості встановлено, що найбільший вплив на невизначеність прогнозованого об'єму витоку має площа дефекту, внесок якої становить 86,4 % загальної дисперсії результату. Частка впливу часу виявлення аварії складає 8,1 %, тоді як вплив інших параметрів є істотно меншим. Отримані результати обґрунтовують пріоритетність підвищення точності внутрішньотрубної діагностики та вдосконалення систем раннього виявлення витоків.

На основі концепції очікуваної цінності досконалої інформації (EVPI) виконано економічне обґрунтування доцільного рівня капітальних інвестицій у системи виявлення витоків. Для контрольної ділянки трубопроводу довжиною 200 км встановлено економічно обґрунтований діапазон інвестицій 130–380 тис. USD, що підтверджує практичну доцільність впровадження сучасних систем моніторингу технічного стану магістральних нафтопроводів.

Порівняльний аналіз із детермінованою моделлю А. Я. Ждека (2017) підтвердив узгодженість отриманих результатів. Показано, що детермінована оцінка відповідає приблизно 67-му перцентилю стохастичного розподілу для ділянки «Долина – Дрогобич» та 56-му перцентилю для ділянки «Жулин – Надвірна». Це свідчить, що запропонована стохастична модель не суперечить існуючим підходам, а розширює їх, забезпечуючи можливість кількісного врахування невизначеності, оцінювання ризиків та обґрунтування інженерних рішень щодо підвищення безпеки експлуатації магістральних нафтопроводів.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ ВУГЛЕВОДНІВ У ҐРУНТІ ПРИ ПОЯВІ ВИТОКІВ З ТРУБОПРОВОДУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СОРБЦІЇ

У другому розділі дисертаційної роботи розроблено математичну модель аварійного витоку нафти з магістрального нафтопроводу, яка враховує режими роботи насосних станцій, процес локалізації аварії запірною арматурою, фізико-геометричну нелінійність дефекту та стохастичний характер основних параметрів витікання. Результатом моделювання є визначення просторово-часової залежності витрати нафти, що надходить у навколишнє середовище через дефект трубопроводу.

Подальший розвиток аварійної ситуації визначається вже не процесом витікання в трубопроводі, а закономірностями поширення нафти у ґрунтовому середовищі. Після виходу за межі труби нафта починає взаємодіяти з пористою структурою ґрунту, внаслідок чого одночасно відбуваються процеси фільтрації, капілярного перерозподілу, часткової іммобілізації, сорбції на поверхні ґрунтових частинок та формування локального фільтраційного протитиску. Саме ці процеси визначають швидкість міграції забруднення, геометричні розміри забрудненої зони, тривалість активного поширення вуглеводнів і масштаби подальшого негативного впливу на навколишнє природне середовище.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених моделюванню фільтрації у пористих середовищах, більшість відомих математичних моделей розглядає процес витоку та процес поширення нафти у ґрунті як незалежні задачі. При цьому вплив зростаючого фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність витоку, як правило, не враховується або задається у вигляді спрощених емпіричних залежностей. Такий підхід не дозволяє адекватно описати взаємодію системи «трубопровід – ґрунтове середовище» та може призводити до суттєвих похибок під час прогнозування обсягів витоку і масштабів забруднення.

У цьому розділі процес аварійного витоку розглядається як взаємопов'язана гідродинамічна система, у якій параметри витікання визначають

умови фільтрації, а фільтраційний опір ґрунту, своєю чергою, впливає на інтенсивність подальшого витоку. Такий взаємний зв'язок реалізовано шляхом поєднання математичної моделі витоку, розробленої у другому розділі, з аналітичною моделлю нестационарної фільтрації вуглеводнів у пористому середовищі.

При побудові математичної моделі прийнято такі основні припущення:

- ґрунт розглядається як однорідне ізотропне пористе середовище;
- процес фільтрації описується в однофазному наближенні;
- фізичні властивості нафти та ґрунту в межах розрахункової області вважаються сталими;
- температурні ефекти, випаровування легких фракцій і біохімічне розкладання вуглеводнів не враховуються;
- рух нафти у ґрунті підпорядковується узагальненому закону Дарсі та рівнянню нерозривності.

Прийняті припущення відповідають умовам оперативного прогнозування розвитку аварії на початкових стадіях її виникнення і забезпечують можливість отримання аналітичного розв'язку без втрати основних фізичних закономірностей процесу.

Метою цього розділу є розроблення математичної моделі нестационарної фільтрації нафти у пористому ґрунтовому середовищі, отримання аналітичного розв'язку задачі із застосуванням інтегральних перетворень Фур'є та Лапласа, розроблення алгоритму ітераційного врахування фільтраційного протитиску ґрунту під час визначення параметрів аварійного витоку, дослідження впливу фізико-механічних властивостей різних типів ґрунтів на формування зони забруднення та аналіз ролі сорбційних процесів у просторово-часовій еволюції нафтового забруднення.

На відміну від існуючих підходів, у цьому розділі запропоновано узгоджену математичну постановку задачі, яка поєднує процеси витікання нафти з трубопроводу, її подальшу фільтрацію у ґрунті та формування зворотного гідродинамічного впливу ґрунтового середовища на інтенсивність витоку. Це

створює єдину розрахункову основу для подальшого прогнозування просторового поширення нафтового забруднення, оцінювання екологічних ризиків та обґрунтування інженерних рішень щодо локалізації аварій [77].

3.1 Математичне моделювання нестационарної фільтрації нафти у пористому ґрунтовому середовищі

Після виходу нафти за межі трубопроводу процес розвитку аварії визначається закономірностями її фільтрації у пористому ґрунтовому середовищі. Саме цей етап формує просторові масштаби забруднення, тривалість міграції вуглеводнів та рівень екологічного ризику, тому його математичний опис є ключовою складовою прогнозування наслідків аварії. Прогнозування масштабів забруднення вимагає кількісного опису гідродинаміки фільтрації нафти у пористому середовищі з урахуванням пружної реакції скелета ґрунту та стисливості рідини. Незважаючи на розвиток сучасних систем виявлення витоків, після встановлення факту аварії основною задачею залишається прогнозування просторово-часового поширення нафти у ґрунті, яке належить до класу задач підземної гідродинаміки пористих середовищ і потребує побудови відповідної математичної моделі.

Існуючі підходи до розв'язання таких задач прийнято поділяти на два класи. Чисельні методи – скінченних різниць, скінченних елементів, контрольного об'єму – забезпечують гнучкість при моделюванні складної геометрії та неоднорідних середовищ, проте вимагають значних обчислювальних ресурсів і зазвичай погано працюють поблизу точкових джерел через скінченну точність дискретизації. Аналітичні підходи, побудовані на функціях Гріна та інтегральних перетвореннях, дають замкнений розв'язок для довільної точки простору і часу та явно виявляють параметри, які визначають характер процесу. Саме тому для цілей дисертаційного дослідження обрано аналітичний шлях побудови моделі – з подальшим врахуванням нелінійного зворотного впливу через ітераційну надбудову. З огляду на необхідність отримання аналітичних

залежностей між параметрами аварійного витоку та характеристиками ґрунтового середовища у дисертаційній роботі обрано аналітичний підхід, який надалі доповнюється ітераційною процедурою врахування нелінійного протитиску ґрунту.

Принциповим обмеженням класичних аналітичних розв'язків для фільтраційних задач є припущення про сталість витрати джерела. У реальних умовах ґрунт чинить зростаючий гідродинамічний опір потоку, формуючи зону підвищеного пластового тиску навколо місця розгерметизації. Цей зворотний тиск зменшує ефективний перепад між трубопроводом та зовнішнім середовищем, переводячи процес у нестационарний режим зі спадною витратою. Отже, математична постановка задачі повинна забезпечувати одночасний опис двох взаємопов'язаних процесів: поширення пружного збурення тиску у пористому середовищі та зміни інтенсивності витоку під впливом сформованого фільтраційного протитиску. Саме побудові такої зв'язаної моделі присвячено подальші підрозділи цього розділу.

3.1.1 Вивід керуючого рівняння

Для математичного опису поширення нафти у пористому ґрунтовому середовищі використано рівняння нестационарної фільтрації, отримане шляхом поєднання рівняння нерозривності для стисливої рідини в деформівному пористому середовищі з узагальненим законом Дарсі. Такий підхід дозволяє описати просторово-часовий розподіл надлишкового тиску, який виникає внаслідок аварійного надходження нафти до ґрунту та визначає подальшу динаміку її поширення.

Розглянемо елементарний контрольний об'єм пористого середовища $dV = dx dy dz$. Зміна маси флюїду, що міститься в цьому об'ємі протягом часу dt , дорівнює різниці між потоками, які надходять до контрольного об'єму та залишають його, з урахуванням внутрішнього джерела:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f n) dV + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{V}) dV = q_s dV$$

де ρ_f – густина флюїду, n – пористість, $\mathbf{V}$ – вектор швидкості фільтрації м/с, q_s – масова інтенсивність джерела кг/(м³·с).

Для опису швидкості руху флюїду використано узагальнений закон Дарсі

$$\mathbf{V} = -k/\mu \nabla P,$$

де k – проникність ґрунту, м²; μ – динамічна в'язкість нафти, Па·с; P – надлишковий тиск у пористому середовищі, Па.

Розкриваючи часову похідну рівняння нерозривності через стисливість флюїду та пористого середовища, підставляючи закон Дарсі й виконуючи лінеаризацію рівнянь, отримуємо керуюче рівняння нестационарної фільтрації. Під час лінеаризації нехтували нелінійними членами другого порядку малості, пропорційними квадратам градієнта тиску, що є обґрунтованим для режимів повільної фільтрації, характерних для міграції нафти у ґрунтовому середовищі. Після введення узагальненої стисливості пласта рівняння набуває вигляду:

$$\beta^* \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + Q_v(x, y, t) \quad (3.1)$$

де β^* – загальна стисливість пласта, Па⁻¹; k – проникність ґрунту, м²; μ – динамічна в'язкість нафти, Па·с; Q_v – об'ємна інтенсивність джерела на одиницю об'єму, с⁻¹; P – надлишковий тиск у пористому середовищі відносно гідростатичного, Па.

Перевірка розмірнісної узгодженості рівняння (3.1) підтверджує коректність його запису. Для лівої частини маємо

$$[\beta^* \partial P / \partial t] = \text{Па}^{-1} \cdot \text{Па/с} = \text{с}^{-1}.$$

а для дифузійного члена

$$[(k/\mu) \partial^2 P / \partial x^2] = \text{м}^2 / (\text{Па} \cdot \text{с}) \cdot \text{Па/м}^2 = \text{с}^{-1}.$$

Збіг розмірностей підтверджує правильність використання загальної стисливості β^* при формулюванні рівняння у змінній надлишкового тиску. На відміну від коефіцієнта питомого зберігання S_s , який застосовується при записі

рівнянь через гідравлічний напір, параметр β^* безпосередньо характеризує стисливість системи у термінах тиску, що є більш коректним для задач аварійної фільтрації нафти.

На відміну від класичних постановок задачі, отримане рівняння використовується не ізольовано, а як складова зв'язаної математичної моделі системи «**магістральний нафтопровід – ґрунтове середовище**». Інтенсивність джерела $Q_v(x, y, t)$ визначається результатами моделі аварійного витоку, розробленої у розділі 2, що забезпечує узгоджений опис взаємного впливу процесів витікання нафти та її подальшої фільтрації у ґрунті. Саме це рівняння надалі використовується як базове керуюче рівняння для побудови аналітичного розв'язку задачі нестационарної фільтрації.

3.1.2 Загальна стисливість пласта

Загальна стисливість пористого середовища характеризує здатність системи «ґрунтовий скелет – флюїд» змінювати свій об'єм під дією зміни тиску. Вона визначає швидкість поширення пружного збурення у пористому середовищі та є одним із ключових параметрів математичної моделі нестационарної фільтрації.

У роботі загальну стисливість прийнято у вигляді

$$\beta^* = \alpha + n \beta_f \quad [\text{Па}^{-1}] \quad (3.2)$$

де α – коефіцієнт стисливості скелета пористого середовища, Па^{-1} ; n – пористість; β_f – коефіцієнт стисливості рідини (нафти), Па^{-1} .

Перший доданок у формулі (3.2) характеризує пружну деформацію мінерального скелета ґрунту. Відповідно до принципу ефективних напружень Карла Терцагі (Terzaghi's effective stress principle), зміна порового тиску викликає перерозподіл ефективних напружень у ґрунтовому масиві, що супроводжується зміною його деформаційного стану та порового об'єму. Цей процес кількісно характеризується коефіцієнтом стисливості скелета ґрунту (α), значення якого

визначають експериментально за результатами компресійних випробувань відповідного типу ґрунту.

Другий доданок ($n \beta_f$) враховує стисливість самої нафти, яка заповнює поровий простір. Оскільки флюїд займає лише частину загального об'єму, його внесок у загальну стисливість пропорційний пористості середовища. Таким чином, параметр (β^*) комплексно враховує пружні властивості як ґрунтового скелета, так і рідкої фази.

У класичній гідрогеології часто використовують параметр питомого зберігання

$$S_s = \rho_f g \beta^* [\text{м}^{-1}].$$

де S_s має розмірність м^{-1} . Цей параметр застосовується при записі рівнянь фільтрації через гідравлічний напір. У даній роботі математична модель сформульована безпосередньо у змінній надлишкового тиску, тому використання загальної стисливості (β^*) є більш коректним і забезпечує розмірнісну узгодженість керуючого рівняння (3.1). Перехід до параметра питомого зберігання у цьому випадку потребував би додаткового введення зв'язку між тиском і гідравлічним напором.

Запропоноване формулювання дозволяє безпосередньо використовувати рівняння (3.1) для побудови аналітичного розв'язку задачі нестационарної фільтрації та забезпечує узгодженість математичного опису з моделлю аварійного витоку, розробленою у другому розділі дисертаційної роботи.

3.1.3 Коефіцієнт п'єзопровідності та канонічне рівняння

Після ділення рівняння (3.1) на загальну стисливість β^* одержуємо коефіцієнт п'єзопровідності

$$\chi = \frac{k}{\mu \beta^*} \quad [\text{м}^2/\text{с}] \quad (3.3)$$

Коефіцієнт п'єзопровідності χ характеризує швидкість поширення пружного гідродинамічного збурення у пористому середовищі та визначає характерний часовий масштаб процесу фільтрації. За фізичним змістом він є аналогом коефіцієнта температуропровідності $a = \lambda/(\rho c_p)$ у рівнянні теплопровідності Фур'є. Завдяки цій аналогії математичний апарат нестационарної теплопровідності (функції Гріна, інтегральні перетворення, метод джерел і стоків, метод дзеркальних відображень) може бути адаптований до задач нестационарної фільтрації. Саме на цьому підході ґрунтується побудова аналітичного розв'язку, наведена у підрозділі 3.2.

Введення χ приводить керуюче рівняння до канонічного вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + \frac{Q_v}{\beta^*} \quad (3.4)$$

де всі члени мають однакову розмірність [Па/с], що підтверджує внутрішню узгодженість формулювання. Рівняння (3.4) є двовимірним параболічним рівнянням дифузійного типу, для якого існують ефективні аналітичні методи побудови фундаментальних розв'язків.

3.1.4 Модель точкового джерела та постановка крайової задачі

У межах прийнятих припущень витік нафти з магістрального трубопроводу моделюється як точкове джерело об'ємної витрати Q_0 [м³/с], розташоване в точці (x_0, y_0) усередині пористого ґрунтового напівпростору ($y_0 > 0$). Фізична обґрунтованість моделі точкового джерела забезпечується порівнянням характерних розмірів: діаметр отвору розгерметизації (одиниці міліметрів) на три–чотири порядки менший за характерну відстань спостереження (метри), що є стандартним критерієм правомірності точкового наближення в математичній фізиці.

Двовимірна постановка задачі отримується шляхом осереднення тривимірного джерела вздовж вертикальної координати з характерним

масштабом L , що відповідає товщині розрахункового шару. Такий підхід широко застосовується під час моделювання припливу до вертикальних свердловин у пластовій гідродинаміці. Член джерела записується через добуток дельта-функцій Дірака і функції Гевісайда:

$$\frac{Q_v}{\beta^*} = f_0 \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) H(t), \quad f_0 = \frac{Q_0}{L \beta^*} \quad (3.5)$$

де $H(t)$ – функція Гевісайда ($H(t) = 0$ при $t < 0$, $H(t) = 1$ при $t \geq 0$), що моделює миттєве вмикання джерела в момент розгерметизації; $\delta(\cdot)$ – дельта-функція Дірака; f_0 – приведена інтенсивність джерела, що має розмірність $[\text{Па} \cdot \text{м}^2/\text{с}]$. Перевірка: $f_0 \delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$ має розмірність $[\text{Па} \cdot \text{м}^2/\text{с}] \cdot [\text{м}^{-2}] = [\text{Па}/\text{с}]$, що збігається з розмірністю лівої частини рівняння (3.4).

Підставляючи (3.5) у (3.4), отримуємо рівняння нестационарної фільтрації для напівпростору $y > 0$:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + f_0 \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) H(t) \quad (3.6)$$

Початкова умова відображає стан гідростатичної рівноваги до моменту розгерметизації:

$$P(x, y, 0) = 0 \quad (3.7)$$

Гранична умова на земній поверхні ($y = 0$) задається у вигляді однорідної умови Діріхле:

$$P(x, 0, t) = 0 \quad (3.8)$$

Гранична умова (3.8) відповідає випадку, коли поверхня ґрунту перебуває під атмосферним тиском і є відкритою для дренажу флюїду. Таке припущення є коректним для водонасиченого пористого середовища та забезпечує математичну коректність побудови функції Гріна. На нескінченній відстані від джерела тискове збурення повністю згасає:

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} P = 0, \quad \lim_{y \rightarrow \infty} P = 0 \quad (3.9)$$

Слід зазначити, що умова (3.8) є математичною ідеалізацією. У приповерхневій зоні аерації на процес поширення нафти додатково впливає капілярний тиск. Капілярний тиск P_c для циліндричного капіляра радіусом r визначається рівнянням Юнга–Лапласа:

$$P_c = \frac{2 \sigma \cos \theta}{r} \quad (3.10)$$

де σ – поверхневий натяг на межі нафта–вода (для легких нафт $\sigma \approx 20 - 30$ мН/м), θ – крайовий кут змочування. Для типових суглинкових ґрунтів з $r \sim 0,5$ мкм капілярний тиск сягає $P_c \sim 80 - 100$ кПа, що може суттєво обмежити вертикальне поширення нафти вгору. Таким чином, запропонована модель найбільш адекватно описує процес фільтрації нижче рівня ґрунтових вод, тоді як для зони аерації забезпечує консервативну верхню оцінку швидкості поширення забруднення. Схему розрахункової області із зазначенням основних елементів постановки задачі (трубопровід, точкове джерело, граничні умови та система координат) наведено на рис. 3.1.

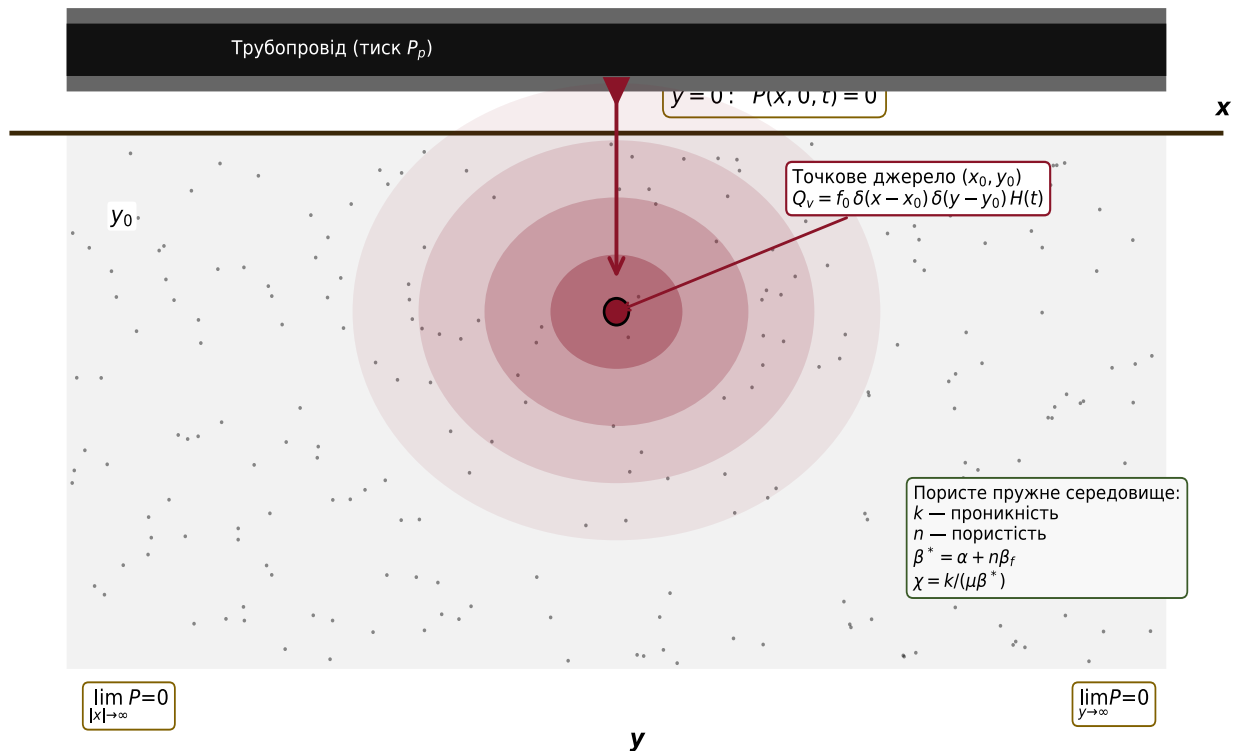


Рисунок 3.1 – Схема розрахункової області задачі фільтрації нафти з трубопроводу у пористий напівпростір ґрунту

Таким чином, сформульовано крайову задачу нестационарної фільтрації нафти у пористому напівпросторі, яка базується на рівнянні п'єзопровідності (3.4), доповненому точковим джерелом (3.5), початковою умовою (3.7) та граничними умовами (3.8)–(3.9). Сформульована крайова задача є математичною основою побудови аналітичного розв'язку із застосуванням інтегральних перетворень Фур'є та Лапласа, який наведено у підрозділі 3.2 [62].

3.1.5 Область застосування та основні припущення математичної моделі

Запропонована математична модель нестационарної фільтрації ґрунтується на низці фізично обґрунтованих припущень, які забезпечують можливість отримання аналітичного розв'язку задачі та визначають межі практичного застосування одержаних результатів. Формулювання цих припущень є необхідним для коректної інтерпретації результатів моделювання й подальшого розвитку моделі у напрямі врахування більш складних фізичних процесів.

У моделі прийнято, що пористе середовище є однорідним та ізотропним у межах розрахункової області. Це означає, що коефіцієнт проникності ґрунту, його пористість і загальна стисливість вважаються сталими в просторі. Таке припущення є обґрунтованим для локальних ділянок магістральних нафтопроводів, де інженерно-геологічні умови істотно не змінюються в межах характерної зони поширення забруднення.

Процес руху нафти описується узагальненим законом Дарсі, справедливим для ламінарної фільтрації у пористому середовищі. Використання цього закону є коректним за малих швидкостей руху флюїду, коли інерційні складові залишаються незначними порівняно з силами в'язкого тертя. Для більшості аварійних витоків через дефекти невеликої площі такі умови виконуються, що підтверджується результатами експериментальних і натурних досліджень.

При побудові моделі використано лінеаризоване рівняння нестационарної фільтрації, яке передбачає сталість фізичних властивостей нафти (густини та

динамічної в'язкості) та нехтування нелінійною залежністю проникності ґрунту від ступеня його насичення. Таке припущення дозволяє отримати аналітичний розв'язок задачі та дослідити вплив основних фізичних параметрів на характер поширення збурення тиску.

Витік нафти представлено точковим джерелом, що є коректним за умови, коли характерний розмір дефекту істотно менший за характерний розмір області поширення забруднення. Для наскрізних дефектів магістральних трубопроводів, розміри яких становлять одиниці або десятки міліметрів, а характерні масштаби процесу фільтрації вимірюються метрами й десятками метрів, таке наближення забезпечує достатню точність опису процесу.

Модель побудовано у двовимірній постановці, що відповідає поперечному перерізу області фільтрації. Таке спрощення є виправданим для початкової стадії розвитку аварійного витоку, коли просторовий розподіл тиску поблизу місця розгерметизації визначається переважно процесами у вертикальній площині. Перехід до повної тривимірної постановки потребує застосування чисельних методів і значно збільшує обсяг необхідних вхідних даних.

У межах цього підрозділу розглядається лише процес гідродинамічної фільтрації нафти у пористому середовищі. Процеси сорбції, капілярного утримання, багатофазної взаємодії та фізико-хімічної трансформації вуглеводнів не включено до керуючого рівняння, оскільки вони істотно ускладнюють математичну постановку задачі. Їхній вплив розглядається окремо в наступних підрозділах дисертаційної роботи.

Таким чином, запропонована математична модель є адекватною для дослідження початкових стадій аварійного поширення нафти у водонасичених пористих ґрунтах, дозволяє отримати аналітичний розв'язок задачі нестационарної фільтрації та створює математичну основу для подальшого врахування сорбційних процесів, нелінійних ефектів і взаємодії фільтраційного потоку з ґрунтовим середовищем.

3.2 Аналітичний розв'язок задачі та ітераційний алгоритм врахування зворотного впливу

3.2.1 Послідовне застосування інтегральних перетворень

Аналітичний розв'язок крайової задачі (3.6)–(3.9) будується шляхом послідовного застосування синус-перетворення Фур'є за просторовою координатою y та перетворення Лапласа за часовою координатою t . Вибір синус-перетворення Фур'є зумовлений тим, що воно природним чином задовольняє однорідну умову Діріхле (3.8) на межі напівпростору $y = 0$, тоді як косинус-перетворення відповідало б умові Неймана. Перетворення Лапласа ефективно враховує початкову умову (3.7) і переводить часову похідну в алгебраїчний множник.

Введемо позначення для образів шуканої функції. Синус-перетворення Фур'є за змінною y :

$$\tilde{P}_F(x, \xi, t) = \int_0^\infty P(x, y, t) \sin(\xi y) dy \quad (3.11)$$

Перетворення Лапласа за часом t , застосоване до фур'є-образу:

$$\hat{P}_F(x, \xi, s) = \int_0^\infty \tilde{P}_F(x, \xi, t) e^{-st} dt \quad (3.12)$$

Послідовне застосування цих перетворень дозволяє звести початкову крайову задачу для двовимірного рівняння у частинних похідних до звичайного диференціального рівняння відносно просторової координати x .

Застосування синус-перетворення Фур'є. Спочатку застосовуємо перетворення (3.11) до рівняння (3.6). Ключовим кроком є використання стандартної властивості синус-перетворення другої похідної:

$$\mathcal{F}_s \left[\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right] = -\xi^2 \tilde{P}_F - \xi P(x, 0, t) \quad (3.13)$$

Формула (3.13) отримується дворазовим інтегруванням частинами з урахуванням граничних умов (3.8) і (3.9). Враховуючи граничну умову (3.8), за якої другий доданок у (3.13) обертається на нуль, отримуємо часткове диференціальне рівняння відносно фур'є-образу:

$$\frac{\partial \tilde{P}_F}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 \tilde{P}_F}{\partial x^2} - \chi \xi^2 \tilde{P}_F + f_0 \delta(x - x_0) \sin(\xi y_0) H(t) \quad (3.14)$$

Перетворення Фур'є автоматично врахувало граничну умову (3.8) і звело двовимірну задачу до задачі з одним просторовим виміром x при параметрі ξ . Член $-\chi \xi^2 \tilde{P}_F$ відповідає затуханню окремих фур'є-гармонік (аналогічно реакції першого порядку в хімічній кінетиці), причому характерний час затухання гармоніки з хвильовим числом ξ становить $(\chi \xi^2)^{-1}$.

Застосування перетворення Лапласа. Застосовуємо перетворення (3.12) до рівняння (3.14). За нульової початкової умови (3.7) маємо $\tilde{P}_F(x, \xi, 0) = 0$, тому $\partial \tilde{P}_F / \partial t$ у образі Лапласа переходить у $s \hat{P}_F$. Після алгебраїчних перетворень одержуємо неоднорідне звичайне диференціальне рівняння другого порядку відносно x із параметрами ξ і s :

$$\chi \frac{\partial^2 \hat{P}_F}{\partial x^2} - (s + \chi \xi^2) \hat{P}_F = -\frac{f_0}{s} \delta(x - x_0) \sin(\xi y_0) \quad (3.15)$$

Розв'язок рівняння (3.15) методом функцій Гріна. Розв'язок однорідного рівняння, що відповідає (3.15), має вигляд $\hat{P}_{F,h} = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x}$, де

$$\gamma = \sqrt{\frac{s + \chi \xi^2}{\chi}} \quad (3.16)$$

Параметр γ характеризує просторовий масштаб експоненціального затухання збурення у трансформованому просторі.

Вимога обмеженості розв'язку при $|x| \rightarrow \infty$, що випливає з умов (3.9), означає $C_1 = 0$ для $x > x_0$ і $C_2 = 0$ для $x < x_0$. Умови зшивки через дельта-функцію в точці $x = x_0$ (неперервність розв'язку і стрибок першої похідної,

пропорційний коефіцієнту при δ) дають розв'язок неоднорідного рівняння у вигляді функції Гріна за координатою x :

$$\hat{P}_F(x, \xi, s) = \frac{f_0 \sin(\xi y_0)}{2\chi s \gamma} e^{-\gamma|x-x_0|} \quad (3.17)$$

Отриманий вираз (3.17) є образом фундаментального розв'язку (функції Гріна) у просторі інтегральних перетворень. Подальше відновлення функції тиску у фізичному просторі здійснюється шляхом послідовного виконання обернених перетворень Лапласа та Фур'є, що розглянуто у наступному підрозділі.

Фізичний зміст множників, що входять до формули (3.17), полягає в такому: множник $\sin(\xi y_0)$ з'явився з образу джерела (синус-перетворення від $\delta(y - y_0)$); $1/(2\chi\gamma)$ – амплітудний множник функції Гріна одновимірного рівняння; $e^{-\gamma|x-x_0|}$ описує експоненціальне затухання збурення в просторі з «просторовою константою» γ^{-1} , що зростає при малих s і ξ – тобто довгохвильові, повільні складові затухають повільніше [78]. Таким чином, усі множники у виразі (3.17) мають чітке математичне та фізичне тлумачення, що підтверджує коректність побудови функції Гріна та фізичну узгодженість отриманого аналітичного розв'язку.

3.2.2 Обернені перетворення та аналітичний розв'язок

Для отримання розв'язку у фізичному просторі необхідно послідовно виконати обернені перетворення Лапласа та Фур'є. Спочатку до виразу (3.17) застосовується обернене перетворення Лапласа з використанням теореми про згортку та табличних співвідношень. Враховуючи, що $\gamma\sqrt{\chi} = \sqrt{s + \chi\xi^2}$, і використовуючи теорему про зсув $\mathcal{L}^{-1}[F(s + a)](t) = e^{-at} \mathcal{L}^{-1}[F(s)](t)$, отримуємо:

$$\tilde{P}_F(x, \xi, t) = \frac{f_0 \sin(\xi y_0)}{2\chi} \int_0^t \frac{e^{-\chi\xi^2(t-\tau)}}{\sqrt{\pi\chi(t-\tau)}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{4\chi(t-\tau)}\right) d\tau \quad (3.18)$$

Отриманий вираз (3.18) є згортою просторової функції Гріна з часовою характеристикою джерела. Підінтегральна функція містить два множники: перший множник $e^{-\chi\xi^2(t-\tau)}/\sqrt{\pi\chi(t-\tau)}$ описує гауссівське ядро дифузії з експоненціальним затуханням, а другий – просторовий гауссіан $\exp[-(x-x_0)^2/(4\chi(t-\tau))]$. Перший множник зменшується з ростом ξ , що відображає природне загасання дрібномасштабних компонент у дифузійному процесі.

Наступним етапом є виконання оберненого синус-перетворення Фур'є:

$$P(x, y, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \tilde{P}_F(x, \xi, t) \sin(\xi y) d\xi \quad (3.19)$$

Для аналітичного обчислення інтеграла за спектральною змінною ξ використовується відома інтегральна тотожність Гауссового типу:

$$\int_0^\infty e^{-A\xi^2} \sin(B\xi) \sin(C\xi) d\xi = \frac{\sqrt{\pi}}{4\sqrt{A}} [e^{-(B-C)^2/(4A)} - e^{-(B+C)^2/(4A)}] \quad (3.20)$$

де $A = \chi(t - \tau)$, $B = y$, $C = y_0$. Тотожність (3.20) є прямим наслідком формули Гаусса при заміні $\sin(B\xi)\sin(C\xi) = 1/2 [\cos((B - C)\xi) - \cos((B + C)\xi)]$ та переході до симетричного інтегрування.

Після підстановки (3.20) у (3.19) та елементарних спрощень одержуємо шуканий аналітичний розв'язок у вигляді функції Гріна для задачі нестационарної дифузії у напівпросторі:

$$P(x, y, t) = \frac{f_0}{4\pi\chi} \int_0^t \frac{1}{t-\tau} \left[\exp\left(-\frac{r_+^2}{4\chi(t-\tau)}\right) - \exp\left(-\frac{r_-^2}{4\chi(t-\tau)}\right) \right] d\tau \quad (3.21)$$

де введено позначення для квадратів відстаней від точки спостереження (x, y) до реального та уявного джерел:

$$r_+^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2, \quad r_-^2 = (x - x_0)^2 + (y + y_0)^2 \quad (3.22)$$

Рівняння (3.21) є основним результатом аналітичної частини дослідження та визначає часово-просторовий розподіл надлишкового тиску у пористому напівпросторі для довільного моменту часу і довільної точки спостереження.

Отриманий аналітичний розв'язок є базовою моделлю лінійної задачі фільтрації. На відміну від класичних постановок, у подальшому він використовується як ядро авторського ітераційного алгоритму, який враховує нелінійний зворотний вплив фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність витоку. Саме ця ітераційна процедура є основним елементом наукової новизни запропонованої математичної моделі та забезпечує перехід від класичної лінійної постановки до узгодженого моделювання системи «трубопровід – пористе середовище».

Фізичний зміст отриманого розв'язку. Фізична інтерпретація двох доданків у формулі (3.21) розкривається методом зображень: перший доданок відповідає внеску реального точкового джерела у точці (x_0, y_0) ; другий – внеску уявного джерела-стоку (з протилежним знаком) у дзеркальній точці $(x_0, -y_0)$. Ця пара джерело–стік автоматично забезпечує виконання граничної умови (3.8): на лінії $y = 0$ маємо $r_+ = r_-$ і внески двох доданків взаємно компенсуються. Метод зображень є класичним прийомом у теорії рівнянь математичної фізики і широко використовується в пластовій гідродинаміці для обліку непроникних і дренажних кордонів. Слід також відзначити зв'язок розв'язку (3.21) з функцією Гріна для рівняння теплопровідності у необмеженому просторі. За відсутності межі $y = 0$ розв'язок містив би лише перший доданок. Другий доданок характеризує вплив дренажної поверхні напівпростору та кількісно відображає додаткове розсіювання надлишкового тиску через відкриту межу. Саме ця особливість відрізняє отриманий розв'язок від класичної функції Гріна для необмеженого середовища та забезпечує його придатність для моделювання аварійних витоків із підземних трубопроводів [63].

3.2.3 Квазістаціонарне наближення та характерний часовий масштаб

Для практичних інженерних розрахунків значний інтерес становить квазістаціонарний режим, який реалізується за умови

$$t \gg r^2 / (4\chi)$$

тобто після того, як фронт гідродинамічного збурення охоплює область характерного розміру r . У цьому випадку інтеграл у формулі (3.21) допускає асимптотичне подання через інтегральну показникову функцію Ei :

$$P(x, y, t) \approx \frac{f_0}{4\pi\chi} \left[Ei\left(-\frac{r_+^2}{4\chi t}\right) - Ei\left(-\frac{r_-^2}{4\chi t}\right) \right] \quad (3.23)$$

де $Ei(-u) = -\int_u^\infty e^{-s}/s \, ds$ ($u > 0$).

При малих значеннях аргументу $u \ll 1$, що відповідає великим моментам часу або невеликим відстаням від джерела, інтегральна показникова функція має асимптотичне наближення

$$Ei(-u) \approx \ln u + \gamma_E,$$

де $\gamma_E \approx 0,5772$ – стала Ейлера–Маскероні.

Логарифмічний характер залежності відображає особливість двовимірних дифузійних процесів: зі збільшенням часу поблизу джерела формується квазістаціонарний розподіл тиску, який змінюється значно повільніше, ніж у початковій нестаціонарній фазі. Завдяки цьому наближення (3.23) є зручним для інженерних оцінок і реалізується стандартними математичними бібліотеками, зокрема функцією `scipy.special.expi` у Python.

Аналіз отриманого аналітичного розв'язку дозволяє ввести характерний часовий масштаб процесу – час, необхідний для поширення гідродинамічного збурення на відстань r від місця витоку:

$$t^* = \frac{r^2}{4\chi} \quad (3.24)$$

Величина t^* визначає межу між двома режимами розвитку процесу. При

$$t < t^*$$

домінує нестаціонарна стадія формування поля тиску, тоді як за

$$t > t^*$$

розподіл тиску переходить у квазістаціонарний режим, а його подальша еволюція визначається переважно повільною зміною граничних умов. За

математичною природою параметр t^* є повним аналогом характерного часу встановлення температурного поля у задачах нестационарної теплопровідності.

Для характерної глибини залягання магістрального трубопроводу $r \approx 1,5$ м оцінки за формулою (3.24) показують істотну залежність швидкості розвитку процесу від фільтраційних властивостей ґрунту. Для супісків ($\chi \approx 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$) характерний час становить приблизно

$$t^* \approx 6 \text{ с},$$

тобто формування поля тиску практично завершується протягом кількох секунд. Для суглинків ($\chi \approx 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$)

$$t^* \approx 600 \text{ с},$$

а в окремих випадках перевищує десять хвилин. Таким чином, різниця коефіцієнта п'єзопровідності майже на два порядки величини зумовлює принципово різну динаміку розвитку аварійного витoku: у проникних ґрунтах гідродинамічне збурення швидко поширюється в навколишньому середовищі, тоді як у слабопроникних формується локальна зона підвищеного тиску, яка істотно впливає на інтенсивність подальшого витoku. Просторово-часову еволюцію поля надлишкового тиску для ранньої та квазістаціонарної стадій процесу наведено на рис. 3.2. Отримані результати слугують основою для побудови ітераційної моделі взаємодії системи «трубопровід – пористе середовище», розглянутої в наступному підрозділі [79].

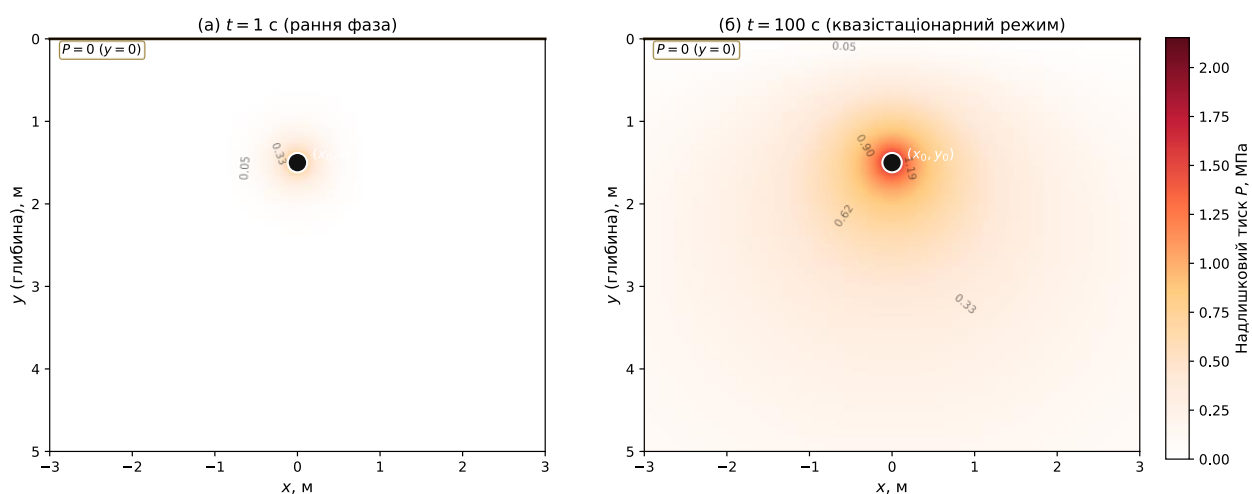


Рисунок 3.2 – Поле надлишкового тиску у напівпросторі ґрунту (супіски, $\chi \approx 0,098 \text{ м}^2/\text{с}$): а) рання фаза $t = 1 \text{ с}$; б) квазістаціонарний режим $t = 100 \text{ с}$

3.2.4 Рівняння витрати та нелінійний зворотний зв'язок

Отриманий аналітичний розв'язок (3.21) побудований за припущення постійної об'ємної витрати джерела Q_0 . Однак в реальних умовах аварійного витоку інтенсивність витікання не є сталою, оскільки визначається ефективним перепадом тиску між внутрішнім об'ємом трубопроводу та навколишнім ґрунтовим середовищем. У цьому випадку витрата нафти через отвір розгерметизації визначається рівнянням Бернуллі для витікання рідини під тиском:

$$Q_{\text{вит}} = \mu_d \omega \sqrt{\frac{2 (P_p - P_{\text{зовн}})}{\rho}} \quad (3.25)$$

де P_p – робочий тиск у трубопроводі, Па; $P_{\text{зовн}}$ – тиск, сформований у ґрунтовому середовищі безпосередньо в зоні витоку, Па; ρ – густина нафти, кг/м³; ω – площа отвору розгерметизації, м²; μ_d – коефіцієнт витрати.

Коефіцієнт витрати μ_d враховує сумарний вплив звуження струменя (vena contracta) та місцевих гідравлічних втрат у зоні отвору. Для гострокромкових отворів, характерних для наскрізних корозійних пошкоджень магістральних трубопроводів, експериментальні дослідження показують значення

$$\mu_d = 0,611 \pm 0,02 ,$$

яке практично не залежить від числа Рейнольдса при

$$\text{Re} > 10^4.$$

Для характерних умов аварійного витоку (діаметр дефекту близько 10 мм, перепад тиску близько 3 МПа) число Рейнольдса становить

$$\text{Re} \sim 8 \cdot 10^5,$$

що повністю обґрунтовує використання сталого коефіцієнта витрати.

Перевірка розмірності рівняння (3.25) підтверджує його фізичну коректність:

$$[\omega\sqrt{2\Delta P/\rho}] = \text{м}^2 \cdot \text{м/с} = \text{м}^3/\text{с},$$

тобто права частина має розмірність об'ємної витрати.

Особливістю поставленої задачі є наявність взаємного впливу процесів витікання та фільтрації. З одного боку, величина зовнішнього тиску $P_{\text{зовн}}$ визначається розв'язком рівняння фільтрації (3.21) і залежить від інтенсивності витоку. З іншого боку, відповідно до рівняння (3.25), сама витрата безпосередньо визначається величиною цього тиску. Таким чином формується нелінійний зворотний зв'язок між трубопроводом та пористим середовищем.

Математично задача зводиться до пошуку нерухомої точки нелінійного оператора

$$Q = \mathcal{T}(Q) \equiv \mu_d \omega \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_p - P(x_0, y_0, t; Q))}, \quad (3.26)$$

де функція $P(x_0, y_0, t; Q)$ визначається аналітичним розв'язком (3.21).

Оскільки зі збільшенням витрати джерела зростає фільтраційний тиск у зоні розгерметизації, функція $P(x_0, y_0, t; Q)$ є монотонно зростаючою відносно Q . Водночас права частина рівняння (3.26) є монотонно спадною функцією цієї ж змінної. За таких умов нелінійне рівняння має єдиний фізично допустимий розв'язок, який може бути знайдений чисельними методами пошуку нерухомої точки, зокрема методом простих ітерацій, методом бісекції або методом Брента [80].

Саме ітераційне врахування цього нелінійного зворотного зв'язку є основною відмінністю запропонованої моделі від класичних аналітичних розв'язків задач фільтрації, у яких витрата джерела вважається сталою. Це забезпечує узгоджене моделювання взаємодії системи «трубопровід – пористе середовище» та підвищує фізичну достовірність прогнозування аварійного витоку.

3.2.5 Ітераційний алгоритм

Запропонована математична модель містить нелінійний зворотний зв'язок між процесами витікання нафти та формуванням фільтраційного тиску у ґрунтовому середовищі. У зв'язку з цим безпосередній аналітичний розв'язок рівняння (3.26) відсутній, тому для визначення часової динаміки витрати використано покрокову ітераційну процедуру [80].

Алгоритм базується на дискретизації часової осі з кроком Δt . На кожному часовому кроці виконується послідовне уточнення величини витрати до досягнення збіжності між двома сусідніми ітераціями. Такий підхід забезпечує узгоджене розв'язання взаємопов'язаної системи «трубопровід – пористе середовище» та дозволяє врахувати поступове наростання фільтраційного протитиску.

Структуру алгоритму наведено у табл. 3.1, а його послідовність проілюстровано блок-схемою на рис. 3.3.

Таблиця 3.1 – Ітераційний алгоритм розрахунку динаміки витоку з урахуванням зворотного впливу фільтраційного опору ґрунту

Крок	Зміст операції	Розрахункова формула
1. Ініціалізація	Початкова витрата за відсутності фільтраційного протитиску	$Q^{(0)} = \mu_d \omega \sqrt{2P_p / \rho}$
2. Розрахунок тиску	Визначення фільтраційного тиску в зоні витоку	$P_{\text{зобн}}^{(i)} = P(x_0, y_0, t_i; Q^{(i-1)})$ за (3.21) або (3.23)
3. Коригування витрати	Перерахунок витрати з урахуванням протитиску	$Q^{(i)} = \mu_d \omega \sqrt{2(P_p - P_{\text{зобн}}^{(i)}) / \rho}$
4. Перевірка збіжності	Виконання критерію збіжності	$\ Q^{(i)} - Q^{(i-1)} \ < \varepsilon$
5. Перехід	Якщо критерій виконано – перехід до наступного кроку часу; інакше – повторення ітерації	$t_{i+1} = t_i + \Delta t$

Критерій збіжності задається параметром ϵ , який вибирається таким чином, щоб відносна похибка визначення витрати не перевищувала 0,1 % від її поточного значення.

За такого критерію забезпечується стійка збіжність ітераційного процесу при моделюванні часової динаміки витоку, що дозволяє ефективно реалізувати алгоритм у програмному середовищі.

Точність часової інтеграції визначається вибором кроку дискретизації. За достатньо малого значення Δt ступінчаста апроксимація функції $Q(t)$ рівномірно збігається до розв'язку нелінійної задачі. У роботі крок часу обирається відповідно до співвідношення

$$\Delta t \leq 0,1 t^* \quad (3.27)$$

де t^* – характерний часовий масштаб процесу, визначений формулою (3.24).

Обрана умова забезпечує не менше десяти часових вузлів на нестационарній стадії процесу, що є достатнім для коректного відтворення швидкої зміни витрати у початковий період аварії та гарантує стійкість чисельної реалізації алгоритму.

Таким чином, запропонований ітераційний алгоритм забезпечує узгоджене розв'язання взаємопов'язаних процесів витікання нафти та її фільтрації у пористому середовищі, дозволяє врахувати нелінійний вплив фільтраційного протитиску на інтенсивність витоку і є практичною реалізацією розробленої математичної моделі.

Використання алгоритму створює основу для проведення чисельних експериментів і подальшого аналізу впливу гідрогеологічних характеристик ґрунту на розвиток аварійного процесу.

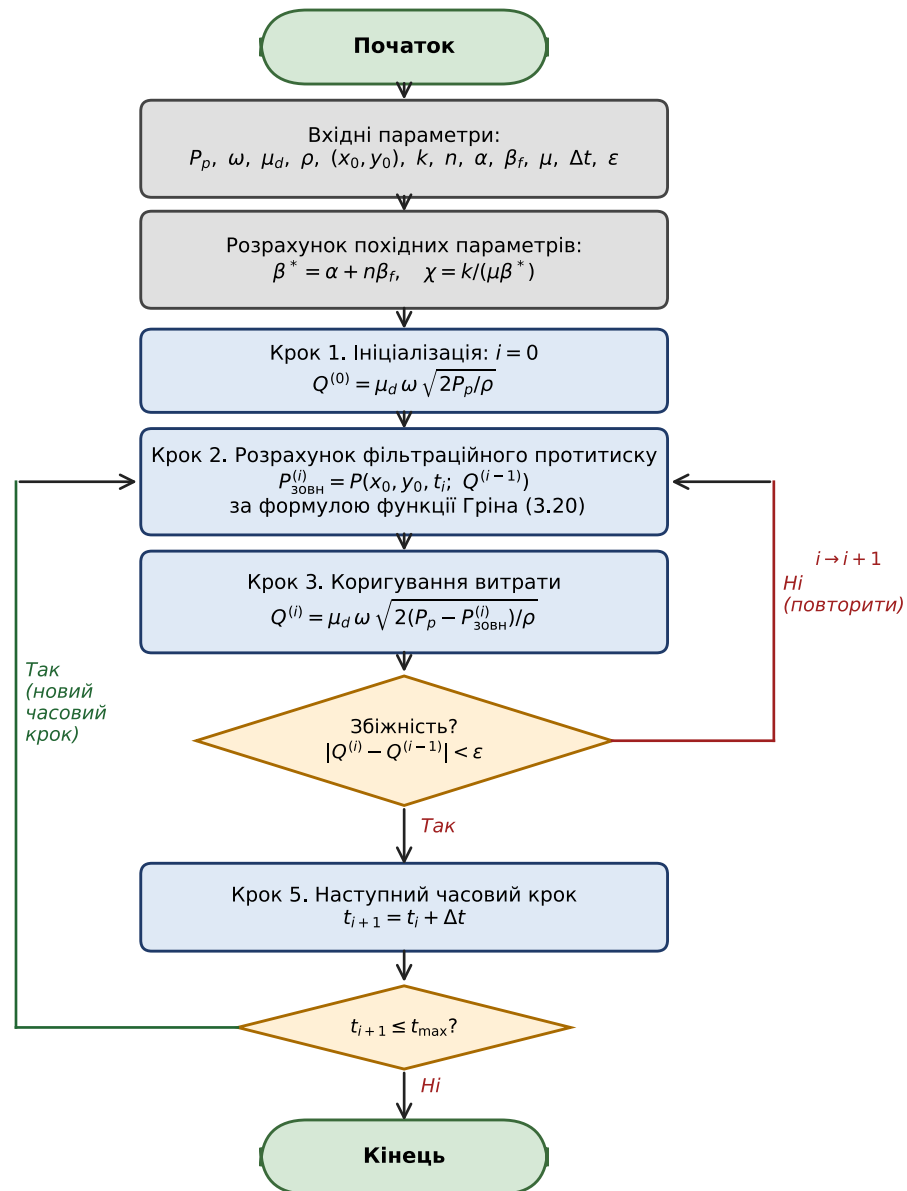


Рисунок 3.3 – Блок-схема ітераційного алгоритму розрахунку динаміки витоку з урахуванням зворотного впливу фільтраційного опору ґрунту

3.3 Порівняльний аналіз динаміки витоку, формування ареалу забруднення та врахування сорбції вуглеводнів

3.3.1 Параметри розрахунків та числові значення

Для перевірки працездатності розробленої математичної моделі та оцінювання впливу фільтраційних властивостей ґрунту на розвиток аварійного

процесу проведено серію чисельних експериментів для двох найбільш поширених у зоні прокладання магістральних нафтопроводів типів ґрунтів – супісків і суглинків. Параметри нафти та ґрунтів, прийняті в розрахунках, наведено в табл. 3.2. Розрахунковий отвір розгерметизації – діаметром 10 мм; робочий тиск у трубопроводі $P_p = 3,0$ МПа; місце розгерметизації $(x_0, y_0) = (0; 1,5 \text{ м})$.

Таблиця 3.2 – Параметри нафти та ґрунтів, прийняті в розрахунках

Параметр	Символ	Супіски	Суглинки	Одиниці
Проникність	k	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-13}$	м^2
Пористість	n	0,30	0,40	–
Стисливість скелета	α	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	Па^{-1}
Стисливість нафти	β_f	$7,0 \cdot 10^{-10}$	$7,0 \cdot 10^{-10}$	Па^{-1}
Загальна стисливість пласта	$\beta^* = \alpha + n\beta_f$	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$	Па^{-1}
Коефіцієнт п'єзопровідності	$\chi = k/(\mu \beta^*)$	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^{-4}$	$\text{м}^2/\text{с}$
Динамічна в'язкість нафти	μ	0,010	0,010	$\text{Па} \cdot \text{с}$
Густина нафти	ρ	850	850	$\text{кг}/\text{м}^3$

Наведені у табл. 3.2 параметри свідчать, що проникність супісків перевищує проникність суглинків приблизно у 100 разів. Внаслідок цього коефіцієнт п'єзопровідності також відрізняється майже на два порядки величини ($9,8 \cdot 10^{-2}$ проти $9,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$). Оскільки коефіцієнт п'єзопровідності відповідно до формули (3.3) обернено пропорційний динамічній в'язкості нафти, сезонні зміни температури можуть впливати на швидкість поширення гідродинамічного збурення. Підвищення температури супроводжується зменшенням в'язкості нафти і, відповідно, збільшенням коефіцієнта п'єзопровідності.

Розрахунки виконувалися відповідно до алгоритму, наведеного у табл. 3.1, із використанням чисельної процедури пошуку нерухомої точки оператора (3.26).

Толерантність $\varepsilon = 10^{-5} Q^{(i)}$. Розрахункова сітка за часом – логарифмічна, від 0,5 с до $2 \cdot 10^4$ с. Логарифмічна часова шкала обрана з огляду на те, що характерні часові масштаби процесу, визначені за формулою (3.24), для супісків і суглинків відрізняються майже на два порядки величини. Такий підхід забезпечує достатню деталізацію як початкової швидкоплинної стадії, так і тривалого квазістаціонарного режиму.

За результатами чисельного моделювання побудовано часові залежності зміни фільтраційного протитиску та об'ємної витрати аварійного витоку. Отримані залежності наведено на рис. 3.4.

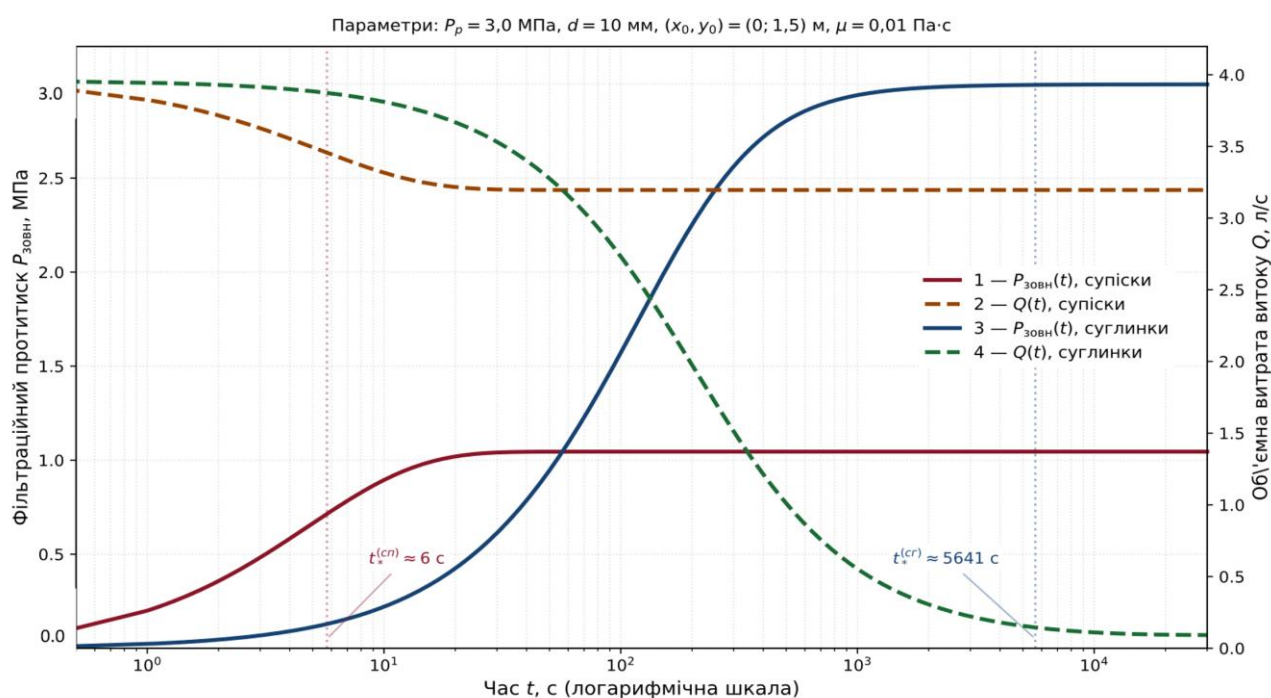


Рисунок 3.4 – Часові залежності фільтраційного протитиску $P_{\text{зовн}}(t)$ та об'ємної витрати аварійного витоку $Q(t)$ для супісків і суглинків

3.3.2 Аналіз динаміки для супісків

Кількісний аналіз залежностей, наведених на рис. 3.4, показує, що для супісків процес аварійного витоку характеризується швидким встановленням квазістаціонарного режиму. Незважаючи на однакову початкову витрату $Q^{(0)} \approx 3,96$ л/с, яка визначається лише параметрами трубопроводу та геометрією

дефекту, вже протягом перших секунд після початку витоку формується поле фільтраційного тиску в навколишньому ґрунті.

Фільтраційний протитиск швидко зростає і вже через 20–30 с досягає квазістаціонарного рівня близько 1,0 МПа. Одночасно об'ємна витрата плавно зменшується до приблизно 3,2 л/с, тобто лише на 17–18 % від початкового значення.

Отриманий характер процесу пояснюється високою проникністю супісків ($k=1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$) та відповідно високим коефіцієнтом п'єзопровідності ($\chi \approx 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$). За таких умов надлишковий тиск, що виникає біля місця розгерметизації, швидко поширюється у пористому середовищі. Відповідно до формули (3.24), характерний час формування поля тиску становить лише $t^* \approx 6 \text{ с}$, після чого процес переходить у квазістаціонарний режим.

Висока проникність супісків забезпечує ефективний відтік нафти від джерела витоку, унаслідок чого локальний фільтраційний протитиск залишається порівняно невеликим і не створює істотного додаткового гідравлічного опору витіканню. Саме тому інтенсивність витоку зменшується незначно, а практично весь об'єм нафти продовжує надходити у ґрунтове середовище [82].

Таким чином, для супіщаних ґрунтів визначальним фактором екологічного ризику є не зменшення інтенсивності витоку, а висока швидкість просторового поширення забруднення. Це свідчить про необхідність максимально раннього виявлення аварії та оперативної локалізації осередку забруднення, оскільки навіть відносно коротка затримка призводить до формування значної площі нафтового ураження.

3.3.3 Аналіз динаміки для суглинків

Для суглинків спостерігається принципово інший характер перебігу процесу, обумовлений значно меншою проникністю пористого середовища. Відповідно до формули (3.24), характерний час формування поля тиску

становить $t^* \approx 5640$, тобто майже у три порядки перевищує аналогічне значення для супісків. Це свідчить про тривале збереження нестационарного режиму фільтрації.

На відміну від супісків, фільтраційний протитиск у суглинках наростає поступово – протягом сотень і тисяч секунд. У процесі розвитку витoku він досягає значень, достатніх для істотного зменшення ефективного перепаду тиску між внутрішньою порожниною трубопроводу та навколишнім ґрунтом. У результаті об'ємна витрата поступово знижується від початкового значення 3,96 л/с до приблизно 0,1–0,2 л/с, тобто більш ніж у двадцять разів.

Такий характер процесу пояснюється низькою проникністю суглинків ($k=1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$), що істотно обмежує швидкість просочування нафти крізь поровий простір. Через повільне відведення рідини від місця витoku в локальній зоні формується область підвищеного фільтраційного тиску, яка створює додатковий гідравлічний опір і зменшує ефективний перепад тиску $\Delta P = P_p - P_{\text{зовн}}$ у рівнянні (3.25). Саме цей механізм забезпечує інтенсивне самогальмування процесу витікання.

Отримані результати дозволяють сформулювати важливий практичний висновок. Низька проникність ґрунту не означає зменшення екологічної небезпеки аварії. Хоча інтенсивність витoku поступово істотно знижується, значна частина нафти накопичується безпосередньо поблизу місця розгерметизації, формуючи локальні осередки високої концентрації забруднення. Це ускладнює подальшу рекультивацію та збільшує тривалість природного самоочищення ґрунту.

Якісну верифікацію отриманих результатів забезпечує порівняння характерного часу, визначеного за формулою (3.24), з експериментально отриманими кривими на рис. 3.4. Моменти переходу від нестационарної до квазістационарної стадії добре узгоджуються з розрахованими значеннями t^* , що підтверджує внутрішню узгодженість запропонованої математичної моделі [83].

3.3.4 Просторова еволюція ареалу забруднення

Аналітичний розв'язок (3.21) у поєднанні з ітераційним алгоритмом (табл. 3.1) дозволяє визначити не лише часову зміну фільтраційного тиску, а й просторову еволюцію ареалу нафтового забруднення. Для цього використовується закон Дарсі, відповідно до якого вектор фільтраційної швидкості визначається градієнтом поля надлишкового тиску:

$$V = V_x \hat{i} + V_y \hat{j} \quad (3.28)$$

$$V_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad V_y = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3.29)$$

Слід зазначити, що швидкість V , визначена за законом Дарсі, є фільтраційною (об'ємною) швидкістю, тобто характеризує витрату рідини, віднесену до повної площі поперечного перерізу пористого середовища. Істинна швидкість переміщення нафти в порах є більшою і визначається як відношення швидкості Дарсі до пористості середовища.

Компоненти градієнта тиску отримують диференціюванням аналітичного розв'язку (3.21), у результаті чого маємо

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{f_0(x - x_0)}{8\pi\chi^2} \int_0^t \frac{1}{(t - \tau)^2} \left[\exp\left(-\frac{r_+^2}{4\chi(t - \tau)}\right) - \exp\left(-\frac{r_-^2}{4\chi(t - \tau)}\right) \right] d\tau \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{f_0}{8\pi\chi^2} \int_0^t \frac{1}{(t - \tau)^2} \left[(y - y_0) \exp\left(-\frac{r_+^2}{4\chi(t - \tau)}\right) - (y + y_0) \exp\left(-\frac{r_-^2}{4\chi(t - \tau)}\right) \right] d\tau \quad (3.31)$$

Отримані співвідношення визначають розподіл компонент швидкості у кожній точці пористого середовища. Горизонтальна складова характеризує латеральне поширення забруднення, тоді як вертикальна визначає інтенсивність

проникнення нафти в глибину ґрунтового масиву. Наявність другого експоненціального доданка у формулах (3.30)–(3.31), який відповідає уявному джерелу, забезпечує виконання граничної умови на поверхні ґрунту та призводить до зменшення вертикальної складової швидкості поблизу межі напівпростору.

Для побудови траєкторій розвитку ареалу часовий інтервал моделювання розбивається на кроки Δt , що задовольняють умову (3.27). На кожному часовому кроці за співвідношеннями (3.29)–(3.31) визначаються компоненти вектора швидкості у вузлах розрахункової сітки. Переміщення фронту забруднення протягом поточного кроку оцінюється добутком локальної швидкості на тривалість кроку $V\Delta t$. Послідовне накопичення таких приростів дозволяє побудувати контури ареалу забруднення для будь-якого моменту часу.

Аналіз отриманих результатів показує, що формування ареалу відбувається у три характерні стадії. На початковому етапі переважає вертикальне гравітаційне проникнення нафти вглиб ґрунту. Після формування області підвищеного тиску процес переходить у стадію переважно горизонтального поширення, а на завершальному етапі визначальну роль починають відігравати капілярні явища та сорбційна взаємодія з ґрунтовим середовищем. Саме ці процеси розглянуто в наступному підрозділі.

3.3.5 Три фази формування ареалу забруднення

Аналіз отриманих розрахункових залежностей дозволив встановити характерну послідовність розвитку нафтового забруднення у пористому ґрунтовому середовищі. Незважаючи на безперервний характер процесу, у його часово-просторовій еволюції можна виділити три характерні фази, які відрізняються переважаючими механізмами перенесення вуглеводнів. Схематичне зображення цих фаз наведено на рис. 3.5.

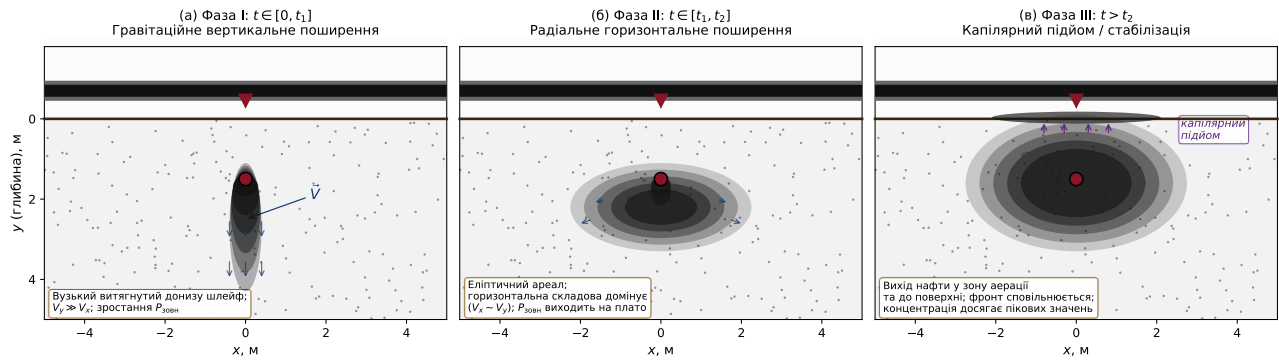


Рисунок 3.5 – Три фази формування ареалу забруднення ґрунту: (а) гравітаційне вертикальне поширення; (б) радіальне горизонтальне поширення; (в) капілярний підйом та стабілізація

Фаза I – гравітаційне вертикальне поширення. На початковому етапі після виникнення розгерметизації основним механізмом переміщення нафти є її проникнення вглиб ґрунтового масиву під дією градієнта тиску та сили тяжіння. У цей період вертикальна складова швидкості фільтрації суттєво перевищує горизонтальну, що зумовлює формування вузького витягнутого осередку забруднення безпосередньо під місцем витоку. Оскільки фільтраційний протитиск ще не встиг сформуватися, інтенсивність витоку практично відповідає максимальному значенню, визначеному характеристиками трубопроводу та дефекту. Тривалість цієї фази залежить насамперед від проникності ґрунту і може змінюватися від кількох секунд для високопроникних супісків до десятків хвилин для малопроникних суглинків.

Фаза II – радіальне горизонтальне поширення. Після формування області підвищеного фільтраційного тиску біля місця аварії швидкість вертикального проникнення поступово зменшується, а поширення забруднення починає відбуватися переважно у горизонтальному напрямку. У цей період формується основна площа нафтової плями, а контури ареалу поступово набувають еліптичної форми. Геометрія ареалу визначається співвідношенням горизонтальної та вертикальної проникності ґрунту. Для більшості природних

ґрунтів горизонтальна проникність перевищує вертикальну внаслідок природної шаруватості, тому переважає латеральне поширення забруднення.

Фаза III – капілярна стабілізація та сорбційне закріплення. На завершальному етапі інтенсивність фільтраційного перенесення істотно зменшується, а визначальними стають капілярні явища та взаємодія нафти з твердою фазою ґрунту. У зоні аерації можливий повільний капілярний підйом легких фракцій нафти, тоді як основна її маса поступово сорбується ґрунтовими частинками. Саме на цій стадії відбувається стабілізація просторових меж ареалу забруднення та формування залишкового нафтового забруднення, яке визначає подальшу ефективність природного самоочищення і технологій ремедіації.

Слід зазначити, що наведений поділ є умовним. У реальних умовах окремі фази можуть частково перекриватися в часі, а їх тривалість визначається проникністю та пористістю ґрунту, фізико-хімічними властивостями нафти, температурними умовами, рівнем ґрунтових вод і наявністю легких летких фракцій. Проте саме така трифазна схема найбільш повно відображає закономірності просторового розвитку аварійного забруднення та є зручною для подальшого моделювання сорбційних процесів і вибору технологій рекультивації.

Отримана трифазна схема формування ареалу забруднення є основою для подальшого врахування фізико-хімічної взаємодії нафти з ґрунтом. На наступному етапі дослідження розглянуто процеси сорбції вуглеводнів, які визначають ефективний об'єм рухомої нафти та довгострокову екологічну небезпеку забруднення.

3.3.6 Механізми сорбції вуглеводнів у ґрунті

Розглянута вище математична модель описує гідродинамічне поширення нафти у пористому середовищі. Проте фактичні масштаби забруднення визначаються не лише процесами фільтрації, а й фізико-хімічною взаємодією вуглеводнів із твердою фазою ґрунту. Частина нафти залишається рухомою та

продовжує міграцію, тоді як інша закріплюється на поверхні або всередині ґрунтових частинок. Саме сорбційні процеси визначають швидкість поширення забруднення, його біодоступність, тривалість природного самоочищення та ефективність подальшої ремедіації [84].

Залежно від механізму взаємодії між молекулами вуглеводнів і ґрунтовим середовищем розрізняють три основні види сорбції: адсорбцію, абсорбцію та хемосорбцію. Схематично їх наведено на рис. 3.6.

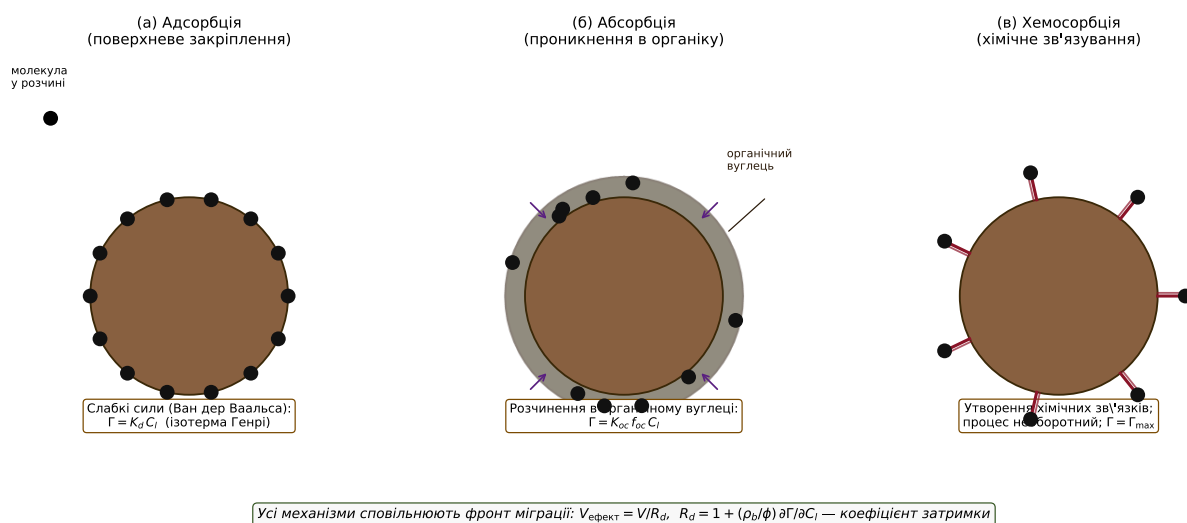


Рисунок 3.6 – Основні механізми сорбції вуглеводнів у пористому ґрунті:

(а) адсорбція; (б) абсорбція; (в) хемосорбція

Адсорбція (рис. 3.6, а) полягає у поверхневому закріпленні молекул вуглеводнів на поверхні мінеральних частинок ґрунту внаслідок слабких міжмолекулярних взаємодій (сил Ван-дер-Ваальса, дипольних і гідрофобних взаємодій). Для невеликих концентрацій процес достатньо точно описується лінійною ізотермою Генрі

$$\Gamma = K_d C_l \quad (3.32)$$

де Γ – питома кількість сорбованого вуглеводню (кг/кг ґрунту), K_d – коефіцієнт розподілу ($\text{м}^3/\text{кг}$), C_l – концентрація вуглеводню у рідкій фазі ($\text{кг}/\text{м}^3$).

За високих концентрацій поверхневі центри сорбції поступово заповнюються, тому більш адекватною є ізотерма Фрейндліха:

$$\Gamma = K_F C_l^{1/n_F} \quad (3.33)$$

де K_F та n_F – емпіричні сорбції. При $n_F = 1$ рівняння (3.33) переходить у лінійну ізотерму Генрі (3.32). Адсорбція є переважно фізичним і частково оборотним процесом: зі зменшенням концентрації частина молекул може десорбуватися та знову переходити у рідку фазу.

Абсорбція (рис. 3.6, б) характеризується проникненням молекул вуглеводнів у внутрішню структуру органічної речовини ґрунту. Її інтенсивність описують через коефіцієнт розподілу між органічним вуглецем і водою:

$$\Gamma = K_{oc} f_{oc} C_l \quad (3.34)$$

де f_{oc} – масова частка органічного вуглецю в ґрунті.

Для більшості органічних забруднювачів коефіцієнт K_{oc} визначають за емпіричним співвідношенням Карікгоффа:

$$\log K_{oc} = 0,82 \log K_{ow} + 0,14 \quad (3.35)$$

де K_{ow} – коефіцієнт розподілу октанол–вода. Із збільшенням молекулярної маси та гідрофобності вуглеводнів значення K_{oc} зростає, що пояснює значно сильніше закріплення важких нафтових фракцій у ґрунті порівняно з легкими ароматичними сполуками.

Хемосорбція (рис. 3.6, в) пов'язана з утворенням хімічних зв'язків між молекулами вуглеводнів і активними поверхневими центрами мінеральної фази. На відміну від фізичної сорбції, цей процес характеризується значно меншою оборотністю та описується ізотермою Ленгмюра

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{\max} K_L C_l}{1 + K_L C_l} \quad (3.36)$$

де K_L – стала Ленгмюра, $\Gamma_{\max}$ – максимальна сорбційна ємність ґрунту.

За умови $K_L C_l \ll 1$ ізотерма Ленгмюра переходить у лінійну ізотерму Генрі, а при $K_L C_l \gg 1$ наближається до насичення $\Gamma \rightarrow \Gamma_{\max}$. Таким чином, вона описує як область малих концентрацій, так і режим заповнення активних центрів сорбції [85].

Для аварійних витоків сирої нафти найбільший внесок у формування залишкового забруднення, як правило, забезпечують процеси фізичної адсорбції та абсорбції, тоді як хемосорбція розвивається повільніше і проявляється переважно під час тривалого контакту нафти з мінеральною фазою ґрунту. Саме тому при подальшому математичному моделюванні доцільно використовувати ізотерми, які адекватно описують фізичну сорбцію в широкому діапазоні концентрацій.

Отримані закономірності є підґрунтям для вибору математичної моделі сорбції, яка використовується в наступному підрозділі при інтеграції сорбційних процесів у модель поширення нафтового забруднення.

3.3.7 Коефіцієнт затримки та інтеграція сорбції в модель

Кумулятивний вплив сорбційних процесів на динаміку поширення забруднення кількісно характеризується коефіцієнтом затримки R_d (англ. *retardation factor*):

$$R_d = 1 + \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial \Gamma}{\partial C_l} \quad (3.37)$$

де ρ_b – об'ємна (насипна) густина ґрунту, кг/м^3 ; n – пористість; $\partial \Gamma / \partial C_l$ – похідна ізотерми сорбції в точці поточної концентрації. Для лінійної ізотерми (3.32) $\partial \Gamma / \partial C_l = K_d = \text{const}$, тому коефіцієнт затримки R_d є сталим.. Для нелінійних ізотерм (3.33), (3.36) R_d залежить від місцевої концентрації C_l , що призводить до деформації форми концентраційного фронту.

Ефективна швидкість міграції забруднювача у пористому середовищі визначається співвідношенням:

$$V_{\text{ефект}} = \frac{V}{R_d} \quad (3.38)$$

тобто фронт забруднення поширюється у R_d разів повільніше, порівняно з гідродинамічною швидкістю, визначеною рівняннями (3.29).

Для більшості нафтопродуктів у ґрунтах із помірним вмістом органічного вуглецю ($f_{oc} \sim 1 - 3 \%$) характерні значення коефіцієнта затримки перебувають у межах 5–50. Для окремих високогідрофобних компонентів важких нафтових фракцій, що характеризуються високими коефіцієнтами розподілу, величина R_d може суттєво перевищувати наведений діапазон і досягати кількох сотень. Це свідчить про значно повільнішу міграцію таких компонентів у ґрунтовому середовищі порівняно з легкими ароматичними вуглеводнями.

Інтеграція сорбції в розроблену аналітичну модель фільтрації може бути виконана двома шляхами. Перший полягає у включенні до рівняння переносу додаткового члена, який враховує накопичення сорбованої фази, що приводить до модифікованого рівняння адвекції–дифузії

$$R_d \frac{\partial C_l}{\partial t} + \frac{V}{n} \cdot \nabla C_l = D_{\text{дис}} \Delta C_l \quad (3.39)$$

де $D_{\text{дис}}$ – коефіцієнт гідродинамічної дисперсії.

Другий підхід ґрунтується на використанні аналітичного розв'язку (3.21) з подальшим урахуванням сорбційного уповільнення шляхом введення ефективної швидкості (3.38). Для більшості практичних інженерних задач саме такий підхід є достатнім, оскільки дозволяє зберегти переваги аналітичної моделі та істотно спростити розрахунки [86].

Слід зазначити, що величина коефіцієнта затримки (R_d) залежить не лише від фізико-хімічних властивостей нафти та гранулометричного складу ґрунту, а й від його вологості, температури та вмісту органічної речовини. Зі зменшенням вологості вода меншою мірою конкурує з органічними сполуками за активні сорбційні центри, унаслідок чого сорбційна здатність ґрунту зростає, а коефіцієнт затримки збільшується. Аналогічний вплив мають температура та кислотність середовища, що підтверджено результатами експериментальних досліджень [88]. З огляду на це вологість ґрунту доцільно розглядати як окремий фактор невизначеності при оцінюванні процесів міграції нафти. У подальших дослідженнях її може бути включено до глобального аналізу чутливості поряд із проникністю, пористістю та сорбційними характеристиками середовища.

Таким чином, отриманий у підрозділах 3.1–3.2 аналітичний розв'язок задачі фільтрації, доповнений ітераційним алгоритмом врахування нелінійного зворотного впливу та математичним описом сорбційних процесів, утворює завершену модель прогнозування поширення нафтового забруднення у пористому ґрунтовому середовищі. Запропонований підхід забезпечує комплексний опис взаємопов'язаних гідродинамічних і фізико-хімічних процесів, що визначають міграцію вуглеводнів у ґрунті, та створює теоретичне підґрунтя для вдосконалення методів прогнозування аварійних забруднень і вибору ефективних технологій ремедіації. Конкретизація сорбційних параметрів для різних типів ґрунтів і нафтопродуктів, а також їх експериментальна ідентифікація становлять предмет подальших досліджень [87].

3.4 Аналіз похибок математичної моделі

Оцінювання похибок математичної моделі є необхідним етапом її верифікації та визначення меж практичного застосування. Аналіз джерел невизначеності дозволяє встановити ступінь достовірності отриманих результатів, оцінити вплив прийнятих припущень на точність прогнозування та визначити напрями подальшого вдосконалення моделі. У роботі всі джерела похибок систематизовано за їх походженням і поділено на три основні групи: похибки математичної постановки задачі, похибки вхідних параметрів та похибки чисельної реалізації. Такий підхід дає змогу комплексно оцінити сумарну невизначеність моделі та встановити внесок окремих факторів у загальну похибку прогнозування.

3.4.1 Похибки постановки задачі

Похибки постановки задачі зумовлені прийнятими при побудові математичної моделі припущеннями та спрощеннями фізичних процесів. Вони

мають переважно систематичний характер і визначають межі застосовності запропонованої моделі.

Двовимірне наближення. Математична модель побудована для двовимірної області (x, y) , що передбачає відсутність суттєвих змін параметрів уздовж осі трубопроводу (z) у межах характерної товщини розрахункового шару (L) . Таке припущення є коректним за умови

$$H/L \lesssim 0,3,$$

де H – характерний вертикальний розмір ареалу забруднення. Для глибини залягання трубопроводу $y_0 = 1,5$ ця умова виконується. У випадку інтенсивного тривимірного розвитку процесу двовимірна модель може дещо завищувати поперечні розміри ареалу забруднення.

Лінеаризація закону фільтрації. Керуюче рівняння (3.1) базується на узагальненому законі Дарсі, який передбачає лінійну залежність між швидкістю фільтрації та градієнтом тиску. Порушення цієї залежності можливе лише при переході до нелінійного режиму течії, що характеризується числом Рейнольдса для пористого середовища

$$Re_\phi = \rho V \sqrt{k} / \mu.$$

Для всіх розглянутих режимів розрахункові значення $Re_\phi \ll 1$, тому використання лінійного закону Дарсі є обґрунтованим, а відповідна складова похибки є неістотною.

Однофазне наближення. У моделі нафту розглянуто як єдину рухому фазу, тоді як у реальних умовах її поширення супроводжується витісненням води й повітря з порового простору та подоланням капілярного опору. Нехтування багатofазністю призводить до певного завищення швидкості міграції фронту забруднення. Така похибка має консервативний характер, оскільки забезпечує оцінку розвитку аварійного забруднення «із запасом», що є доцільним при прогнозуванні екологічних ризиків.

Однорідність та ізотропність ґрунту. У моделі прийнято сталі значення проникності та стисливості в межах розрахункової області. Насправді природні ґрунти характеризуються шаруватою будовою, просторовою неоднорідністю та

анізотропією фільтраційних властивостей. Унаслідок цього реальний ареал забруднення може набувати витягнутої еліптичної форми, тоді як запропонована модель описує усереднений характер процесу.

Нехтування капілярним тиском. На поверхні ґрунту використано граничну умову Діріхле (3.8), яка відповідає атмосферному тиску. У реальному середовищі в зоні аерації додатково діє капілярний тиск, величина якого для суглинків за оцінкою рівняння (3.10) становить близько 80–100 кПа. Порівняно з робочим тиском трубопроводу ($P_p = 3,0$) МПа його вплив не перевищує приблизно 3 %, тому для розглянутих режимів аварійного витоку цією складовою можна знехтувати без істотної втрати точності.

Таким чином, прийняті припущення не виходять за межі класичних положень теорії фільтрації у пористих середовищах і забезпечують достатню точність математичного опису процесу аварійного витоку нафти. Більшість із них має консервативний характер, тобто не призводить до заниження прогнозованих масштабів забруднення, що є важливою перевагою запропонованої моделі під час оцінювання екологічних ризиків.

3.4.2 Похибки вхідних даних

Найвагомішим джерелом невизначеності під час практичного застосування запропонованої моделі є похибки визначення вхідних параметрів. Навіть за повної адекватності математичної постановки точність прогнозування істотно залежить від достовірності характеристик ґрунту та властивостей нафти. Для кількісної оцінки впливу невизначеності окремих параметрів на результати розрахунків використано класичний закон поширення похибок:

$$\left(\frac{\sigma_\chi}{\chi}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\mu}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\beta^*}}{\beta^*}\right)^2 \quad (3.40)$$

Рівняння (3.40) безпосередньо впливає з означення коефіцієнта п'єзопровідності (3.3) і показує, що за незалежності випадкових похибок відносні невизначеності окремих параметрів додаються у квадратурі.

Для оцінювання прийнято характерні значення похибок лабораторного визначення фізичних властивостей пористих середовищ: відносна похибка визначення проникності становить приблизно $\sigma_k/k \approx 35\%$, динамічної в'язкості нафти – $\sigma_\mu/\mu \approx 8\%$, загальної стисливості пласта – $\sigma_{\beta^*}/\beta^* \approx 20\%$. Підстановка цих значень у рівняння (3.40) дає

$$\frac{\sigma_\chi}{\chi} \approx \sqrt{0,35^2 + 0,08^2 + 0,20^2} \approx 0,41 \quad (3.41)$$

Отже, навіть за використання сучасних лабораторних методів коефіцієнт п'єзопровідності може бути визначений з відносною похибкою близько $\pm 40\%$. Оскільки характерний час процесу t^* обернено пропорційний коефіцієнту п'єзопровідності (3.24), аналогічна невизначеність переноситься і на оцінку тривалості нестационарної фази. Водночас характерний розмір ареалу забруднення, який пропорційний χ , змінюється приблизно на $\pm 20\%$. Таким чином, найбільший вплив на достовірність прогнозу має точність визначення проникності ґрунту.

Невизначеність геометричних параметрів дефекту. Початкова витрата через отвір пропорційна площі його поперечного перерізу, тобто квадрату діаметра. Тому відносна похибка визначення витрати приблизно вдвічі перевищує похибку вимірювання діаметра отвору. За невизначеності діаметра на рівні $\pm 20\%$ очікувана похибка початкової витрати становить близько $\pm 40\%$, що робить геометрію дефекту одним із визначальних чинників точності прогнозу.

Температурний фактор. Динамічна в'язкість нафти істотно залежить від температури. За зниження температури від $+20\text{ }^\circ\text{C}$ до $+5\text{ }^\circ\text{C}$ вона може збільшуватися у 2–3 рази, що відповідно призводить до пропорційного зменшення коефіцієнта п'єзопровідності згідно з формулою (3.3). Така залежність формує систематичну сезонну похибку, яку доцільно враховувати шляхом введення температурної поправки до фізичних властивостей нафти.

Узагальнену характеристику основних джерел невизначеності математичної моделі наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Зведена характеристика джерел та оцінок похибок моделі

<i>Джерело похибки</i>	<i>Тип</i>	<i>Орієнтовний вплив</i>	<i>Напрямок впливу</i>
Невизначеність проникності k	Вхідні дані	визначальний ($\approx 35 \% \text{ у } \chi$)	у обидва боки
Невизначеність стисливості β^*	Вхідні дані	помітний ($\approx 20 \% \text{ у } \chi$)	у обидва боки
Невизначеність в'язкості μ	Вхідні дані	малий ($\approx 8 \% \text{ у } \chi$)	у обидва боки
Сумарна похибка χ за (3.41)	Вхідні дані	$\approx \pm 40 \%$	у обидва боки
Невизначеність діаметра отвору	Вхідні дані	визначальний для витрати ($\approx \pm 40 \%$)	у обидва боки
Температурний фактор (зимовий режим)	Вхідні дані	значний при $T < 5^\circ\text{C}$	систематичний
Однофазне наближення	Структурна	завищує швидкість фронту	в один бік (консерв.)
Двовимірність	Структурна	завищує поперечний ареал	в один бік
Анізотропія / неоднорідність	Структурна	спотворює форму ареалу	у обидва боки
Нехтування капілярним тиском	Структурна	$\approx 3 \%$	в один бік
Числове інтегрування	Числова	пренебрежимо мала	—

Отже, результати аналізу показують, що найбільший внесок у сумарну невизначеність прогнозу вносять проникність ґрунту та геометричні параметри дефекту трубопроводу. Саме підвищення точності визначення цих параметрів є найбільш ефективним шляхом покращення достовірності прогнозування аварійних витоків нафти.

3.4.3 Оцінка адекватності та межі застосування моделі

Розроблена математична модель побудована на основі класичних положень теорії фільтрації пористих середовищ, закону Дарсі, рівняння нерозривності та рівняння Бернуллі для витікання рідини через отвір. Аналіз прийнятих припущень і виконана оцінка похибок дозволяють визначити область коректного застосування моделі та оцінити її практичну придатність для прогнозування аварійних витоків нафти.

Запропонована модель є адекватною за таких умов:

- ламінарний режим фільтрації у пористому середовищі, за якого виконується закон Дарсі ($Re_\phi \ll 1$);
- локальний характер джерела витоку, коли діаметр дефекту значно менший за характерні розміри області поширення забруднення;

- відсутність різко вираженої просторової неоднорідності ґрунтового масиву;
- відносно сталий рівень ґрунтових вод протягом розрахункового періоду;
- переважання напірного механізму поширення над процесами випаровування, природне біологічне розкладання нафтопродуктів та хімічної трансформації нафтопродуктів.

У зазначених межах модель забезпечує фізично узгоджений опис формування поля надлишкового тиску, динаміки витрати через отвір розгерметизації та просторового розвитку ареалу забруднення.

Особливістю запропонованого підходу є врахування нелінійного зворотного впливу фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність витіку. На відміну від більшості класичних моделей, у яких витрата джерела приймається сталою, у даній роботі вона визначається як результат взаємодії двох процесів: витікання нафти з трубопроводу та наростання фільтраційного протитиску в пористому середовищі. Це дозволяє більш адекватно описувати розвиток аварії у часі та отримувати реалістичні оцінки зміни витрати.

Разом із тим модель має певні обмеження. Вона не враховує багатофазну фільтрацію системи «нафта – вода – повітря», капілярний гістерезис, просторову анізотропію проникності, деформацію ґрунтового масиву при значних механічних навантаженнях, а також біохімічну деградацію вуглеводнів у процесі тривалого перебування забруднення в ґрунті. Для умов складної геологічної будови або значної неоднорідності середовища запропонований аналітичний підхід доцільно використовувати як базову модель, результати якої можуть уточнюватися чисельними методами.

Практична цінність моделі полягає в тому, що всі її параметри мають чіткий фізичний зміст і можуть бути визначені експериментально або отримані за результатами інженерно-геологічних вишукувань. Це забезпечує можливість використання моделі під час оперативного прогнозування розвитку аварійних ситуацій, оцінювання екологічних ризиків, планування локалізації забруднення та вибору технологій відновлення.

Таким чином, виконаний аналіз підтверджує, що запропонована математична модель є внутрішньо узгодженою, фізично обґрунтованою та придатною для розв'язання інженерних задач прогнозування поширення нафтового забруднення при аварійних витоках із магістральних нафтопроводів. Встановлені межі її застосування не знижують практичної цінності отриманих результатів, а визначають напрями подальшого розвитку моделі шляхом урахування багатофазної фільтрації, анізотропії пористого середовища та комплексних фізико-хімічних процесів міграції вуглеводнів.

3.4.4 Похибка обчислень

Третю групу становлять похибки чисельної реалізації аналітичного розв'язку. На відміну від структурних похибок моделі та невизначеності вхідних даних, вони мають суто числовий характер і визначаються обраними алгоритмами інтегрування та параметрами дискретизації.

Аналітичний розв'язок (3.21) містить інтеграл за часовою координатою, який під час практичної реалізації обчислюється чисельними методами. Точність його обчислення залежить від застосованого алгоритму інтегрування та кількості вузлів дискретизації. За використання сучасних адаптивних методів чисельного інтегрування величина цієї похибки може бути зменшена до рівня, що є істотно меншим за невизначеність вхідних параметрів моделі.

Контроль точності обчислень здійснюється шляхом аналізу збіжності чисельного інтегрування. Для цього кількість вузлів інтегрування послідовно збільшують, а отримані результати порівнюють між собою. Якщо подальше згущення сітки практично не впливає на значення шуканих величин, чисельний розв'язок вважається збіжним.

Таким чином, похибки чисельної реалізації не є визначальним джерелом невизначеності запропонованої моделі. Основний внесок у сумарну похибку прогнозування формують невизначеність проникності ґрунту, геометричних параметрів дефекту трубопроводу та інших вхідних характеристик середовища.

Це свідчить про те, що підвищення достовірності прогнозів пов'язане насамперед із уточненням експериментально визначених параметрів, а не з удосконаленням чисельної процедури розрахунку.

3.5 Верифікація моделі

Оцінювання достовірності розробленої математичної моделі здійснюється на двох взаємопов'язаних рівнях: **верифікації** та **валідації**. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до перевірки математичних моделей фізичних процесів і дозволяє оцінити як коректність математичного опису, так і його відповідність реальним умовам аварійного поширення нафти в пористому середовищі.

Перший етап передбачає **верифікацію моделі**, тобто перевірку правильності математичного розв'язання сформульованої крайової задачі. На цьому етапі встановлюється, чи є отриманий аналітичний розв'язок (3.21) коректним розв'язком рівняння п'єзопровідності (3.6), чи задовольняє він початкову умову (3.7), граничні умови (3.8)–(3.9), а також чи зберігає фізичну узгодженість при граничних переходах і зміні параметрів задачі.

Другий етап полягає у валідації моделі, тобто оцінюванні її здатності адекватно описувати реальний процес міграції нафти в ґрунтовому середовищі. Для цього результати теоретичних розрахунків порівнюються з експериментальними даними, отриманими під час досліджень на лабораторній ґрунтовій фільтраційній колоні, яка відтворює процес поширення нафтопродуктів у пористому середовищі. Таке порівняння дозволяє оцінити точність прогнозування глибини проникнення забруднювача, швидкості його поширення та характеру формування ареалу забруднення.

Поєднання процедур верифікації та валідації забезпечує комплексну оцінку достовірності запропонованої математичної моделі та підтверджує можливість її використання для прогнозування розвитку аварійних витоків нафти з магістральних трубопроводів.

У наступних підрозділах послідовно наведено результати верифікації математичного розв'язку та валідації моделі за експериментальними даними, що дозволяє всебічно оцінити її достовірність і практичну придатність.

3.5.1 Перевірка граничних та початкових умов

Першим етапом верифікації є перевірка того, що отриманий аналітичний розв'язок (3.21) задовольняє всі умови крайової задачі (3.6)–(3.9), для якої його було побудовано.

Перевірка граничної умови на поверхні ґрунту. Для граничної умови Діріхле (3.8) покладемо $y = 0$ у формулі (3.21). Згідно з означеннями (3.22), у цьому випадку відстані до реального та уявного джерел стають однаковими:

$$r_+^2 = r_-^2 = (x - x_0)^2 + y_0^2.$$

Внаслідок цього обидва експоненціальні доданки в інтегралі (3.21) збігаються, а їх різниця тотожно дорівнює нулю. Отже,

$$P(x, 0, t) \equiv 0,$$

тобто гранична умова (3.8) виконується точно для будь-яких значень координати x та часу t . Такий результат є прямим наслідком застосування методу зображень, який забезпечує автоматичне виконання граничної умови на межі напівпростору.

Перевірка початкової умови. Розглянемо границю при $t \rightarrow 0$. У цьому випадку верхня та нижня межі інтегрування у формулі (3.21) збігаються, тому значення інтеграла прямує до нуля. Відповідно,

$$P(x, y, 0) = 0,$$

що повністю відповідає початковій умові (3.7) та фізично означає відсутність надлишкового тиску в пористому середовищі до моменту виникнення аварійного витoku.

Перевірка умови на нескінченності. При віддаленні від джерела витoku ($|x| \rightarrow \infty$ або $y \rightarrow \infty$) величини r_+ та r_- необмежено зростають. За таких умов експоненціальні множники у формулі (3.21) прямують до нуля, що приводить до виконання співвідношення

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} P(x, y, t) = 0, \lim_{y \rightarrow \infty} P(x, y, t) = 0.$$

Отже, виконується гранична умова (3.9), яка відображає фізично обґрунтоване згасання надлишкового тиску на значній відстані від місця розгерметизації.

Таким чином, аналітичний розв'язок (3.21) повністю задовольняє початкову та всі граничні умови сформульованої крайової задачі. Це підтверджує коректність його побудови та є першим етапом верифікації розробленої математичної моделі.

3.5.2 Перевірка на граничних випадках з відомим розв'язком

Другий тест – переконатися, що в окремих випадках наш розв'язок збігається з класичними результатами, отриманими іншими авторами та іншими методами.

Випадок 1: джерело далеко від поверхні. Якщо джерело занурене глибоко ($y_0 \rightarrow \infty$), вплив поверхні зникає. У розв'язку (3.21) другий (дзеркальний) доданок прямує до нуля, бо $r_- \rightarrow \infty$, і залишається лише перший доданок:

$$P_{\infty}(r, t) = \frac{f_0}{4\pi\chi} \int_0^t \frac{1}{t - \tau} \exp\left(-\frac{r^2}{4\chi(t - \tau)}\right) d\tau \quad (3.42)$$

Це – добре відома функція джерела для рівняння дифузії у необмеженому просторі. Її докладно вивчено в класичних працях з теорії теплопровідності та підземної гідродинаміки. Збіг нашого розв'язку з нею у цьому граничному випадку є вагомим свідченням його правильності.

Випадок 2: усталений (стаціонарний) режим. За великих часів процес виходить на усталений режим, у якому тиск перестає змінюватися. Для двовимірної задачі з точковим джерелом біля дренованої поверхні усталений розв'язок описується логарифмічною функцією – він добре відомий у теорії потенціалу та гідродинаміці свердловин. Перехід нашого нестационарного розв'язку через квазістаціонарне наближення (3.23) при $t \rightarrow \infty$ дає саме таку

логарифмічну залежність тиску від відстані. Це підтверджує, що модель коректно описує не лише перехідний процес, а й його кінцевий усталений стан.

3.5.3 Перевірка збереження маси

Фундаментальний фізичний закон, який модель зобов'язана поважати, – збереження маси. Уся нафта, що надійшла з трубопроводу, має десь перебувати: накопичитися в пружно стиснутому пористому середовищі або витекти через дренавану поверхню. Кумулятивний об'єм, що надійшов від джерела за час t , дорівнює інтегралу витрати:

$$V_{\text{дж}}(t) = \int_0^t Q(\tau) d\tau \quad (3.43)$$

Цей об'єм має точно дорівнювати сумі об'єму, «запасеного» у середовищі через його пружну стисливість, та об'єму, що дренавався через поверхню. Перевірку балансу зручно вбудувати безпосередньо в ітераційний алгоритм (табл. 3.1): на кожному кроці підсумовують усі складові й контролюють рівність.

3.5.4 Експериментальна верифікація на ґрунтовій фільтраційній колоні

Для підтвердження адекватності моделі реальному процесу проведено серію лабораторних дослідів з фільтрації нафти крізь ґрунт у вертикальній фільтраційній колоні. Установка є вертикальною прозорою циліндричною колоною на металевій станині із завантажувальною лійкою та вимірювальною шкалою глибини вздовж стінки. Прозора стінка дозволяє візуально фіксувати положення фронту нафти, а шкала – зчитувати глибину його проникнення. Дослід відтворює у керованих умовах саме той процес, який описує модель – проникнення нафти в пористе середовище під дією тиску та гравітації – і дозволяє безпосередньо зіставити виміряні характеристики поширення з розрахунковими.

Досліди виконано для двох ґрунтів різної проникності (пісок дрібнозернистий та супісок), що дало змогу перевірити модель у діапазоні фільтраційних властивостей.

Оскільки колона реалізує одновимірну вертикальну фільтрацію, для зіставлення базову модель розділу застосовували в її 1D-формі – рівнянні інфільтрації, що є прямим наслідком закону Дарсі (3.29) та закону збереження маси. У дослідях реєстрували дві незалежні величини у часі: глибину фронту нафти та кумулятивний профільований об'єм, – які зіставляли з розрахунком за виміряною проникністю ґрунту. Перший критерій перевіряє кінематику фронту, другий – баланс маси.

Результат верифікації. Для обох ґрунтів отримано добрий кількісний збіг розрахунку з експериментом як за динамікою фронту, так і за профільованим об'ємом. Узгодженість оцінено через приведену похибку:

$$\gamma = \frac{\Delta_{\text{макс}}}{X_N} \cdot 100 \% \quad (3.44)$$

За результатами всіх дослідів приведена похибка моделі не перевищує 1,3 % (як за положенням фронту, так і за об'ємом), а максимальна відносна похибка в окремих точках становить близько 6 % – вона очікувано більша на початку досліду, де абсолютні значення малі. Слід чітко розмежовувати ці два показники: наведена в табл. 3.5 величина $\leq 1,3 \%$ є приведеною похибкою (нормованою на весь діапазон вимірювання), тоді як відносна похибка в окремій точці сягає $\leq 6 \%$; саме остання є коректною мірою точності для малих абсолютних значень. Водночас контрольована одновимірна лабораторна колона мінімізує, але не усуває защемлення повітря, капілярний гістерезис і неоднорідність набивки, тому для польового масштабу очікувана похибка є вищою.

Отримані значення повністю узгоджуються з оцінкою невизначеності вхідних даних з підрозділу 3.4: модель не вносить власних систематичних похибок понад те, що задається точністю вимірювання параметрів ґрунту. Знакозмінний характер відхилень підтверджує відсутність систематичної помилки моделі. Зведення результатів наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результат експериментальної верифікації моделі

Ґрунт	Контрольована величина	Приведена похибка γ	Макс. відносна похибка
Пісок дрібнозернистий	глибина фронту	1,08 %	2,4 %
Пісок дрібнозернистий	профільтрований об'єм	1,34 %	3,3 %
Супісок	глибина фронту	1,33 %	3,4 %
Супісок	профільтрований об'єм	1,14 %	5,9 %
Загалом за всіма дослідями	–	$\leq 1,3 \%$	$\leq 5,9 \%$

Таким чином, лабораторний експеримент підтвердив, що модель не лише математично коректна, а й адекватно відтворює реальну фізику проникнення нафти в ґрунт – кількісно (приведена похибка $\leq 1,3 \%$) та якісно.

3.5.5 Відповідність відомим фізичним закономірностям

Перевірка, що модель відтворює якісні закономірності, які давно встановлені й не викликають сумнівів. Результати перевірки зведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Перевірка відповідності розв'язку відомим закономірностям

Перевірка	Що вимагає теорія / фізика	Поведінка моделі	Результат
Гранична умова на поверхні	$P = 0$ при $y = 0$ для всіх x, t	$r_+ = r_- \rightarrow$ різниця тотожно нуль	виконується точно
Початкова умова	$P = 0$ при $t = 0$	інтеграл стягується до нуля	виконується точно
Згасання на нескінченності	$P \rightarrow 0$ при віддаленні	обидва гауссіани $\rightarrow 0$	виконується точно
Граничний випадок $y_0 \rightarrow \infty$	функція джерела в необмеженому середовищі (3.42)	дзеркальний доданок зникає	збіг з класичним розв'язком
Усталений режим $t \rightarrow \infty$	логарифмічний розв'язок (Тім)	(3.23) дає логарифм при $t \rightarrow \infty$	збіг з класичним розв'язком
Збереження маси	надходження = запас + дренаж	контролюється на кожному кроці	баланс зводиться
Розмірності рівнянь (3.1)–(3.39)	усі члени однакової розмірності	покрокова перевірка	без порушень
Зростання фронту	радіус зони $\sim \sqrt{\chi t}$	впливає з (3.24)	відповідає дифузії
Зв'язок тиску й витрати	протитиск росте – витрата падає	видно на рис. 3.4	відповідає фізиці

Усі наведені у табл. 3.4 перевірки модель проходить. Вони доводять *математичну коректність* розв'язку – те, що він правильно розв'язує поставлені рівняння й узгоджується з класичними результатами. Однак математично бездоганний розв'язок ще не гарантує, що самі вихідні рівняння адекватно описують реальне поширення нафти в ґрунті. Відповідь на це питання дає лабораторний експеримент, описаний нижче.

3.6 Обмеження моделі та шляхи їх подолання

Формулювання меж аналітичної моделі так само важливе, як і самі результати: воно убезпечує від застосування моделі там, де вона давала б хибні прогнози, і водночас намічає напрями подальшого розвитку. Нижче систематизовано основні обмеження, їхній практичний наслідок і можливий шлях їх подолання.

3.6.1 Обмеження, пов'язані з постановкою задачі

Однофазність потоку. Модель описує нафту як єдину рідину в повністю насиченому середовищі, не враховуючи витіснення води й повітря. Найкраще вона працює нижче рівня ґрунтових вод. Для сухої (ненасиченої) зони вона дає лише консервативну верхню оцінку швидкості, бо не враховує капілярного опору, який гальмує нафту. Шлях подолання – перехід до дво- або трифазної моделі на основі функцій відносної фазової проникності, що вже потребує числових розв'язань.

Ізотропність та однорідність. Модель приймає однакову проникність усюди й у всіх напрямках. Реальний ґрунт шаруватий і анізотропний, тому реальний ареал часто витягнутий горизонтально, а не круглий. Шлях подолання – введення різної проникності за горизонталлю й вертикаллю; за такого узагальнення аналітичний розв'язок зберігає свою форму після відповідного масштабування координат.

Двовимірність. Площинна постановка точна, поки вертикальний масштаб ареалу не перевищує приблизно третини товщини розрахункового шару. За сильного тривимірного поширення модель завищує поперечні розміри. Шлях подолання – розширення до тривимірної постановки додатковим перетворенням Фур'є за третьою координатою.

3.6.2 Обмеження, пов'язані з властивостями рідини й режимом

Однокомпонентна нафта. Модель трактує нафту як однорідну рідину зі сталими властивостями. Для оцінки загального масштабу ареалу й динаміки витрати цього достатньо.

Але вона не розрізняє легкі й важкі фракції, які насправді мігрують по-різному (це частково компенсує сорбційний блок підрозділу 3.3.7 через коефіцієнт затримки). Для прогнозу хімічного складу забруднення в різних зонах потрібна багатокомпонентна модель переносу.

Стала в'язкість. Властивості нафти прийнято незмінними, тоді як в'язкість помітно залежить від температури. Для теплого сезону це не критично, але взимку похибка може стати великою. Шлях подолання простий – підставляти в'язкість, що відповідає фактичній температурі ґрунту, через температурну поправку.

Лінійний закон Дарсі. Для тиску магістральних нафтопроводів нелінійні поправки до закону Дарсі мізерні, тож це обмеження практично не діє в розглянутому діапазоні умов.

3.6.3 Зведена характеристика обмежень

Усі обмеження, разом з умовами застосовності та можливими альтернативами, зведені в табл. 3.6. Перш ніж застосовувати модель до конкретного випадку, варто переконатися, що умови застосовності виконуються.

Таблиця 3.6 – Зведена характеристика обмежень моделі

№	Обмеження	Умова застосовності	Наслідок порушення	Шлях подолання
1	Однофазна фільтрація	зона повного водонасичення	завищення швидкості фронту	дво-/трифазна модель
2	Ізотропність, однорідність	слабка анізотропія й шаруватість	спотворена форма ареалу	тензор проникності
3	Двовимірність	$H/L \lesssim 0,3$	завищення поперечного ареалу	тривимірна постановка
4	Лінійний закон Дарсі	$Re_\phi < 1$ (виконується)	занижений опір потоку	рівняння Форхгеймера
5	Дискретизація часу	усунено в ітерації при $\Delta t \leq 0,1 t^*$	зростання похибки при великих Δt	зменшення кроку Δt
6	Однокомпонентна нафта	оцінка загального ареалу	без розрізнення фракцій	багатокомпонентний перенос
7	Стала в'язкість	помірні температури (5–20 °C)	велика похибка взимку	поправка $\mu(T)$

3.6.4 Межі коректного застосування

Підсумовуючи, розроблена модель є коректним і ефективним інструментом за таких умов:

- за типом ґрунту – середовища помірної та низької проникності (супіски, суглинки, глини) у зоні повного водонасичення, ізотропні або слабо анізотропні;
- за параметрами аварії – витоки через корозійні дефекти діаметром у межах одиниць–десятків міліметрів, робочий тиск у звичайному для магістральних нафтопроводів діапазоні, нафти середньої густини за пластової температури;
- за горизонтом прогнозу – від перших секунд до перших місяців після початку витоку;

– за метою – оцінка розмірів ареалу, динаміки витрати, часу досягнення критичних відстаней для задач екологічного ризику й планування рекультивації.

За межами цих умов модель слід застосовувати у скоригованому вигляді (за рекомендаціями табл. 3.6) або переходити до повноцінних числових симуляторів багатофазної фільтрації. Головна цінність аналітичної моделі – у її прозорості: вона явно показує, які параметри й як впливають на результат, дає миттєвий розрахунок без складних обчислень і слугує надійним еталоном для перевірки складніших числових моделей.

Таким чином, розроблена аналітична модель призначена насамперед для оперативного прогнозування розвитку аварійних витоків нафти у водонасичених пористих ґрунтах, оцінювання динаміки витрати, формування поля надлишкового тиску та прогнозування просторового розвитку ареалу забруднення. Основними перевагами моделі є аналітична форма розв'язку, висока швидкість розрахунків, можливість врахування нелінійного зворотного впливу фільтраційного опору та прозора фізична інтерпретація всіх параметрів. Для складних природних умов (багатофазна фільтрація, виражена анізотропія, тріщинуваті породи, багатокомпонентний склад нафти) запропонований підхід може використовуватися як базова модель або еталон для верифікації більш складних числових симуляторів.

Висновки до розділу 3

Побудовано двовимірну математичну модель нестационарної фільтрації нафти з трубопроводу в пористе ґрунтове середовище. Керуюче рівняння (3.1) сформульовано на основі узагальненого закону Дарсі та рівняння нерозривності у термінах надлишкового тиску з використанням загальної стисливості пласта (3.2): $\beta^* = \alpha + n\beta_f$ [Па⁻¹], що забезпечує повну розмірнісну узгодженість усіх членів рівняння. Введений коефіцієнт п'єзопровідності (3.3) $\chi = k/(\mu \beta^*)$ [м²/с] виступає кількісною мірою інерційності пружного пористого середовища і

визначає швидкість поширення фронту гідродинамічного збурення. Докладно обґрунтовано відмінність між параметрами β^* і $S_s = \rho_f g \beta^*$ та умови коректного їх застосування в тисковому і напірному формулюваннях рівняння фільтрації.

Витік нафти формалізовано як точкове джерело сталої об'ємної витрати (3.5) через добуток двох дельта-функцій Дірака та функції Гевісайда, що моделює миттєве вмикання джерела в момент розгерметизації. Граничну умову на поверхні ґрунту задано у вигляді однорідної умови Діріхле (3.8). Оцінено порядок капілярного тиску у суглинках за рівнянням Юнга–Лапласа (3.10): $P_c \sim 80 - 100$ кПа, що обмежує застосовність моделі до зони повного водонасичення та дає консервативну верхню оцінку швидкості міграції для зони аерації.

Отримано замкнений аналітичний розв'язок (3.21) крайової задачі (3.6)–(3.9) у формі функції Гріна для нестационарної дифузії у напівпросторі – шляхом послідовного застосування синус-перетворення Фур'є (3.11) та перетворення Лапласа (3.12). Ключовими кроками виводу є табличний інтеграл (3.20) та обернені перетворення (3.18)–(3.19). Структуру розв'язку (3.21) розкриває метод зображень: суперпозиція реального джерела в точці (x_0, y_0) та уявного дзеркального стоку в точці $(x_0, -y_0)$ автоматично забезпечує виконання умови (3.8). Для квазістационарного режиму запропоновано наближену форму (3.23) через інтегральну показникову функцію Ei .

Запропоновано ітераційний алгоритм (табл. 3.1) врахування нелінійного зворотного впливу зростаючого фільтраційного опору на витрату витоку. Нелінійний зворотний зв'язок між тиском і витратою формалізовано як задачу пошуку нерухомої точки оператора (3.26), що гарантує єдиність та знаходимість розв'язку. Обґрунтовано умову вибору кроку дискретизації (3.27): $\Delta t \leq 0,1 t^*$, де t^* – характерний часовий масштаб (3.24).

Виведено характерний часовий масштаб (3.24) $t^* = r^2/(4\chi)$, що визначає тривалість нестационарної фази. Розрахунки для $r = 1,5$ м дали: для супісків $t^* \approx 6$ с; для суглинків $t^* \approx 5640$ с. Ця відмінність у два порядки величини зумовлює якісно різну поведінку витоку для різних типів ґрунтів і має

визначальне значення для оцінки сумарного обсягу вилитої нафти до досягнення квазістаціонарного режиму.

Проведено порівняльний аналіз динаміки витоків для двох типів ґрунтів (табл. 3.2). При однакових початкових умовах ($Q^{(0)} \approx 3,96$ л/с): для супісків витрата стабілізується на рівні $\approx 3,2$ л/с (зниження на $\approx 18\%$); для суглинків витрата падає до 0,1–0,2 л/с (зниження більш ніж у 20 разів) при наближенні протитиску до $P_p = 3,0$ МПа. Виявлено нелінійний ефект: висока проникність не обов'язково означає «легкий» витік, оскільки в супісках швидко вичерпується пружна ємність ближньої зони, тоді як у суглинках протитиск концентрується локально.

На основі аналітичного розв'язку (3.21) та закону Дарсі (3.28)–(3.31) побудовано модель просторового формування ареалу забруднення ґрунту. Виділено три характерні фази процесу: фаза I – переважно вертикальне гравітаційне поширення; фаза II – радіальне горизонтальне поширення з формуванням еліптичного ареалу; фаза III – капілярний підйом нафти. Для фази I запропоновано кількісний критерій її завершення: $|V_y/V_x| < 2$.

Розглянуто концептуальну роль сорбції вуглеводнів у ґрунті – адсорбції (ізотерми (3.32), (3.33)), абсорбції в органічну речовину (3.34) та хемосорбції (3.36). Кумулятивний ефект сорбційних процесів кількісно описано через коефіцієнт затримки (3.37) R_d та ефективну швидкість міграції (3.38) $V_{\text{ефект}} = V/R_d$. Наведено числовий приклад: для н-гептану через послідовне застосування (3.35), (3.34), (3.37) отримано $R_d \approx 834$, що ілюструє принципове значення сорбції. Запропоновано підхід до інтеграції сорбції в гідродинамічну модель: модифіковане рівняння адвекції–дифузії (3.39) та постобробка розв'язку (3.21) через ефективні швидкості (3.38).

Розроблений у розділі теоретичний інструмент – аналітичний розв'язок (3.21) у поєднанні з ітераційним алгоритмом (табл. 3.1) та концептуальним апаратом сорбції (3.32)–(3.39) – формує методологічну основу для подальших досліджень, представлених у наступному розділі.

Подальший розвиток запропонованої моделі доцільно спрямувати на незалежну крос-платформну верифікацію у сучасних інженерних пакетах (ANSYS Mechanical, ANSYS Fluent, HYDRUS-2D), розширення моделі на багатофазну постановку для системи «нафта–вода–повітря», врахування температурної залежності фізичних властивостей нафти, інтеграцію експериментально визначених ізотерм сорбції для конкретних типів ґрунтів та врахування анізотропії проникності природних пористих середовищ.

Запропонована математична модель поєднує аналітичний розв'язок задачі фільтрації, нелінійний механізм урахування зворотного впливу ґрунтового протитиску та концептуальний опис сорбційних процесів, що забезпечує можливість оперативного прогнозування розвитку аварійних витоків нафти і може бути використане як інженерний інструмент для оцінювання екологічних ризиків та планування заходів з локалізації і ліквідації забруднення.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ АВАРІЙНИХ ВИТОКІВ НАФТИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ЗАХОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ

Метою цього розділу є побудова сполучної ланки між гідродинамічно-фільтраційним апаратом попередніх розділів і прикладними задачами екологічного моніторингу, оцінки збитків і планування відновлювальних заходів. Конкретними завданнями виступають:

- 1) аналіз структури причин аварійних розгерметизацій як емпіричної основи для уточнення стохастичних параметрів моделі джерела;
- 2) систематизація механізмів негативного впливу вуглеводневого забруднення на компоненти агроєкосистеми та формалізація узагальненого індикатора екологічної шкоди;
- 3) розробка інженерної методики просторово-часового зонування забрудненої території як прямого розширення поля $C_{oil}(x, y, t)$;
- 4) обґрунтування технологічного відображення зон на сукупність методів ремедіації;
- 5) узагальнення всього циклу прогнозування та управління аварійним розливом у вигляді послідовної інженерно-екологічної методики.

4.1 Структура причин аварійних розгерметизацій як основа калібрування моделі джерела

Адекватний вибір вхідних розподілів імовірностей для рівня І стохастичної моделі розділу 2 неможливий без емпіричного аналізу історичних даних експлуатації нафтотранспортної системи. На сьогодні в Україні експлуатується понад 40 тис. км магістральних і промислових трубопроводів для транспортування нафти та газу; середній строк експлуатації окремих ділянок становить від 20 до 48 років, причому значна частина основних фондів вичерпала проєктний ресурс [89]. Це обумовлює якісно іншу структуру ризику порівняно з

системами, збудованими у 2000-х роках: домінуючою причиною відмов є не виробничий брак, а накопичена втома матеріалу та прогресуюча зовнішня корозія в умовах нестабільного катодного захисту.

За оцінками Держенергонагляду, питома частота відмов на найстаріших ділянках Прикарпатського та Придніпровського регіонів у 3–5 разів перевищує середньоєвропейський показник для магістральних нафтопроводів, що знаходяться в порівнянних умовах ґрунтово-кліматичного середовища. Ця диспропорція є прямим наслідком відкладеного технічного переоснащення: за відсутності планомірної заміни секцій, що відпрацювали проєктний строк, сумарна тривалість деградаційного процесу перевищує розрахункову, а ймовірнісна крива відмов набуває ненормальної (правоасиметричної) форми з важким хвостом – саме тим видом розподілу, для точного описання якого і розроблено стохастичну модель. За результатами систематизації даних про порушення герметичності лінійної частини нафтопроводів автором у виділено п'ять основних категорій причин аварійних розгерметизацій.

Розподіл за частотою фіксації наведено на рис. 4.1; кількісні частки за категоріями становлять:

- зовнішні фізичні (силові) впливи на трубопровід, включаючи кримінальні врізки – 34,7 %;
- порушення норм і правил під час будівництва та ремонту, відхилення від проєктних рішень – 24,7 %;
- корозійні пошкодження труб, запірно-регулювальної арматури – 23,5 %;
- порушення технічних умов виготовлення труб і обладнання – 12,4 %;
- помилкові дії експлуатаційного та ремонтного персоналу – 4,7 %.

Сума категорій дорівнює 100,0 %.

Важливо підкреслити статистичну репрезентативність наведеного розподілу: вибірка охоплює аварійні події, зафіксовані на різних технологічних ланках – від магістральних ниток до промислових колекторів – та у різних природно-кліматичних умовах України. Регіональна неоднорідність виявляється передусім у частці корозійних відмов: у ґрунтах зі значною засоленістю та

підвищеним вмістом сульфатредуючих бактерій (окремі ділянки Причорномор'я та зони зрошення) цей показник зростає до 30–35 %, тоді як для трас у помірному кліматі Прикарпаття залишається поблизу середнього значення 23,5 %. Частка кримінальних врізок (складова категорії «зовнішні фізичні впливи»), за даними Укртрансгазу та Укртранснафти, коливається між 12 і 20 % від усіх зафіксованих розгерметизацій і демонструє пряму кореляцію зі зростанням ціни вуглеводнів, що відповідає загальносвітовій тенденції, задокументованій у звітах EGIG (European Gas pipeline Incident data Group).

Наявність такої структурованої і географічно розгалуженої вибірки є необхідною передумовою для того, щоб параметри стохастичної моделі розділу 2 набули репрезентативного емпіричного підґрунтя, а не залишалися значеннями за замовчуванням з міжнародних баз даних, які можуть систематично відхилятися від реальності вітчизняної трубопровідної інфраструктури [90].

Розподіл причин аварійних розгерметизацій лінійної частини магістральних нафтопроводів

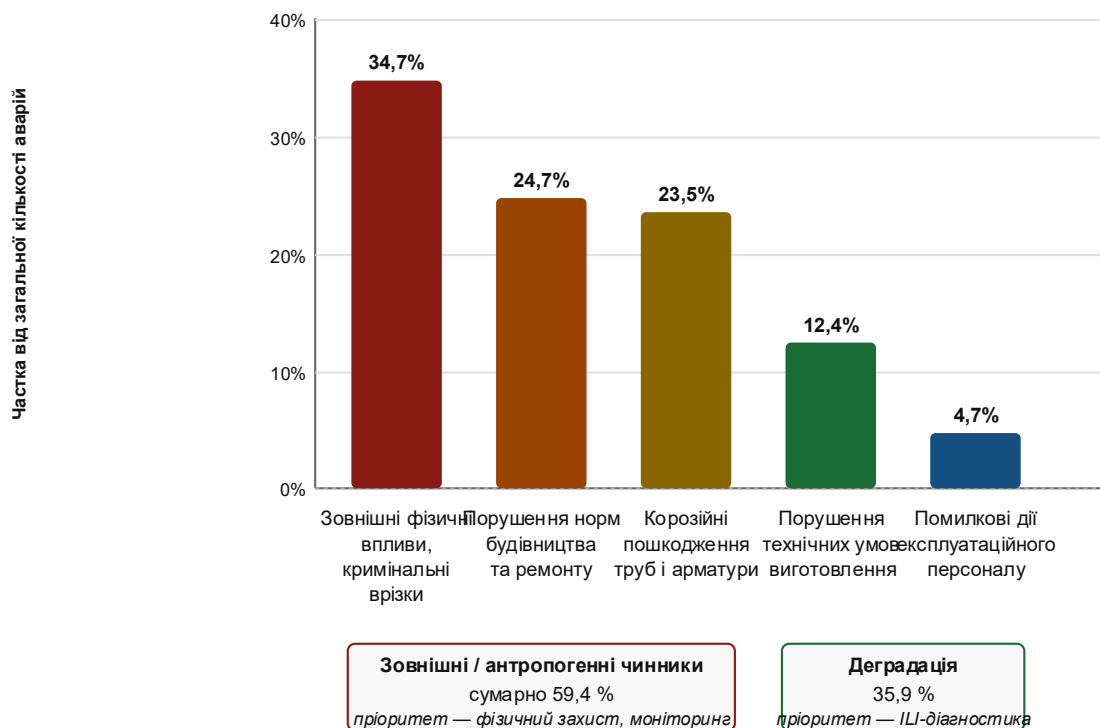


Рисунок 4.1 – Структура причин аварійних розгерметизацій лінійної частини магістральних нафтопроводів.

Статистичний розподіл причин аварій має не лише описове, а й методичне значення, оскільки визначає підхід до калібрування стохастичної моделі аварійного витоку. З цією метою результати аналізу, наведені на рис. 4.1, систематизовано в табл. 4.1, де показано взаємозв'язок між основними причинами розгерметизацій та параметрами моделі.

Таблиця 4.1 – Використання структури причин аварійних розгерметизацій під час калібрування стохастичної моделі аварійного витоку

Причина аварії	Частка, %	Використання у стохастичній моделі
Зовнішні фізичні впливи, кримінальні врізки	34,7	Формування сценаріїв механічних пошкоджень із великими площами дефектів та підвищеним коефіцієнтом витрати
Порушення норм будівництва та ремонту	24,7	Уточнення розподілу геометричних параметрів дефектів і початкових умов моделювання
Корозійні пошкодження труб і арматури	23,5	Калібрування статистичного розподілу площі дефекту та прогнозування поступового розвитку витоку
Порушення технічних умов виготовлення	12,4	Формування альтернативних сценаріїв виникнення дефектів матеріалу
Помилкові дії експлуатаційного персоналу	4,7	Уточнення часових параметрів виявлення та локалізації аварії

Наведені в табл. 4.1 результати свідчать, що різні причини аварійних розгерметизацій формують різні механізми виникнення дефектів трубопроводу, а отже впливають на початкові параметри моделювання аварійного витоку. Так, корозійні пошкодження переважно характеризуються поступовим розвитком дефекту та відносно невеликими площами отворів, тоді як зовнішні механічні впливи можуть призводити до значних локальних руйнувань із високою початковою витратою нафти. Урахування цих особливостей під час калібрування стохастичної моделі забезпечує використання реальних експлуатаційних даних і

підвищує достовірність прогнозування параметрів аварійного витоку та його екологічних наслідків.

Практичне використання наведеного статистичного розподілу в стохастичній моделі здійснюється за кількома взаємопов'язаними напрямками.

Морфологічна декомпозиція коефіцієнта витрати. Кожна з технічно обумовлених категорій причин (зовнішні впливи, корозія, порушення ТУ виготовлення) пов'язана з характерною морфологією дефекту, а отже й з характерним діапазоном асимптотичного коефіцієнта витрати μ_{∞} за класифікацією підрозділу 2.2:

- зовнішні втручання дають переважно круглі гострокраї отвори помірної площі – $\mu_{\infty} \approx 0,617$;
- корозійні пошкодження формують або поздовжні стрес-корозійні тріщини ($\mu_{\infty} \approx 0,530$), або складно профільовані свищі ($\mu_{\infty} \approx 0,475$);
- порушення ТУ виготовлення проявляються здебільшого як локалізовані дефекти зварних швів, для яких прийнято усереднене значення $\mu_{\infty} \approx 0,55$.

Дві інші категорії – порушення норм будівництва (24,7 %) і помилкові дії персоналу (4,7 %) – впливають не стільки на саму морфологію наскрізного отвору, скільки на параметри виявлення аварії та реакції на неї. Тому їх внесок враховується не у розподілі μ_{∞} , а у розподілі часу виявлення t_{detect} . Розподіли часу виявлення, прийняті у моделі: $t_{\text{detect}} \sim U[0,5; 3,0]$ год для виражених аварій з раптовим падінням тиску (типово зовнішні втручання); $t_{\text{detect}} \sim U[12; 168]$ год для дрібних корозійних свищів («малих витоків»), які не змінюють параметрів режиму в межах чутливості системи моніторингу. Як показано у підрозділі 2.4, ця двопорядкова різниця часу виявлення формує «хвостовий» характер квантилів P_{75} та P_{95} розподілу сумарного об'єму V .

Таким чином морфологія дефекту визначає вибір асимптотичного коефіцієнта витрати, який використовується під час параметризації моделі витоку, розробленої у розділі 2.

Групування причин аварій за можливістю превентивного впливу. Доцільно також об'єднати категорії за можливістю превентивного впливу: до

антропогенно обумовленої групи відносяться зовнішні втручання, порушення норм будівництва й помилкові дії персоналу – разом 64,1 %; до групи деградаційних механізмів – корозія та порушення ТУ виготовлення – 35,9 %. Отримане співвідношення свідчить, що переважна частина причин аварій потенційно може бути зменшена організаційними та технічними заходами, що підтверджує доцільність ризик-орієнтованого управління трубопровідними системами. Така структура аргументує необхідність комплексного підходу до підвищення надійності системи: інвестицій не лише у внутрішньотрубну діагностику (як це впливає з EVPI-аналізу розділу 2 щодо інформативної цінності даних про геометрію дефекту), але й у засоби фізичного захисту траси та посилення нагляду під час будівельно-монтажних робіт.

З позиції байєсівського оновлення моделі (підрозділ 4.5) зазначений поділ на «керовані» й «деградаційні» категорії має принципове значення: параметри деградаційної групи (швидкість корозії, залишкова товщина стінки) накопичуються у базах даних внутрішньотрубної інспекції і слугують безпосереднім вхідним матеріалом для апостеріорного уточнення розподілів μ_∞ та A_0 через теорему Байєса. Натомість параметри антропогенно обумовленої групи – час виявлення t_{detect} і реакція персоналу – є суттєво суб'єктивнішими і краще описуються сценарним підходом: «нормальний» сценарій (система SCADA спрацювала вчасно) і «погіршений» (витік виявлений лише за зовнішніми ознаками або при обльоті траси). Розподіл $U[0,5; 3,0]$ год відповідає нормальному сценарію; розподіл $U[12; 168]$ год – погіршеному. Стохастична модель розділу 2 через вибірку Латинського гіперкубу автоматично охоплює обидва сценарії пропорційно до апіорних ймовірностей, що наведені у підрозділі 2.4.

Таким чином встановлено, що структура причин аварійних розгерметизацій визначає не лише статистичний розподіл відмов трубопроводу, а й принципи формування початкових параметрів стохастичної моделі аварійного витоку. Використання фактичних експлуатаційних даних для калібрування моделі забезпечує підвищення достовірності прогнозування

обсягів витоку та екологічних наслідків аварій, а також створює основу для подальшого байєсівського уточнення параметрів моделі за результатами експлуатаційного моніторингу.

4.2 Вплив вуглеводневого забруднення на компоненти агроєкосистеми

Нафта та її похідні належать до найпоширеніших антропогенних забруднювачів навколишнього середовища завдяки токсичності, високій міграційній здатності та значній абсорбційній стійкості у пористих ґрунтах.

З хімічної точки зору сира нафта є надзвичайно складною сумішшю, що містить від кількох сотень до кількох тисяч індивідуальних сполук, об'єднаних у чотири основні групи за хімічною структурою: аліфатичні вуглеводні (алкани та циклоалкани), ароматичні вуглеводні (включаючи поліциклічні ароматичні вуглеводні – ПАВ), асфальтени та смоли. Для оцінки екологічного впливу ця гетерогенність принципово важлива: різні фракції мають кардинально різні коефіцієнти розчинності у воді, коефіцієнти Генрі, логарифми октанол-водних коефіцієнтів розподілу (K_{ow}) і, відповідно, різну біодоступність і токсичність. Легкі аліфатичні фракції ($C_5 - C_{12}$) є найбільш токсичними для ґрунтової мезофауни завдяки ліпофільності та здатності порушувати клітинні мембрани, але в умовах аерованого ґрунту відносно легко піддаються випаровуванню та мікробній деградації – характерний час напіврозкладу порядку 1–3 тижнів. Навпаки, важкі ароматичні фракції та ПАВ ($C_{16} +$) є практично нелетучими, міцно адсорбуються на поверхні ґрунтових частинок завдяки $\log K_{ow} > 5$ і зберігаються у ґрунті роками і навіть десятиріччями, формуючи хронічне залишкове забруднення навіть після зовнішньо успішної ремедіації. Саме ця двошвидкісна динаміка – швидке зникнення легких фракцій і повільна деградація важких – пояснює, чому функції відгуку підсистем агроєкосистеми мають різні параметри крутизни k_i : реакція мезофауни (висока чутливість до легких фракцій) проявляється швидко й гостро, тоді як реакція вищих рослин (домінує хронічний вплив важких ПАВ) є плавнішою і зміщена до вищих

концентрацій [91]. Концептуальна структура впливу подана на рис. 4.2 і охоплює п'ять послідовних рівнів: джерело впливу – первинне середовище ураження (ґрунтовий покрив) – реакція трьох біотичних підсистем (мікробіота, флора, мезофауна) – системна деградація агроєкосистеми – заходи ремедіації.

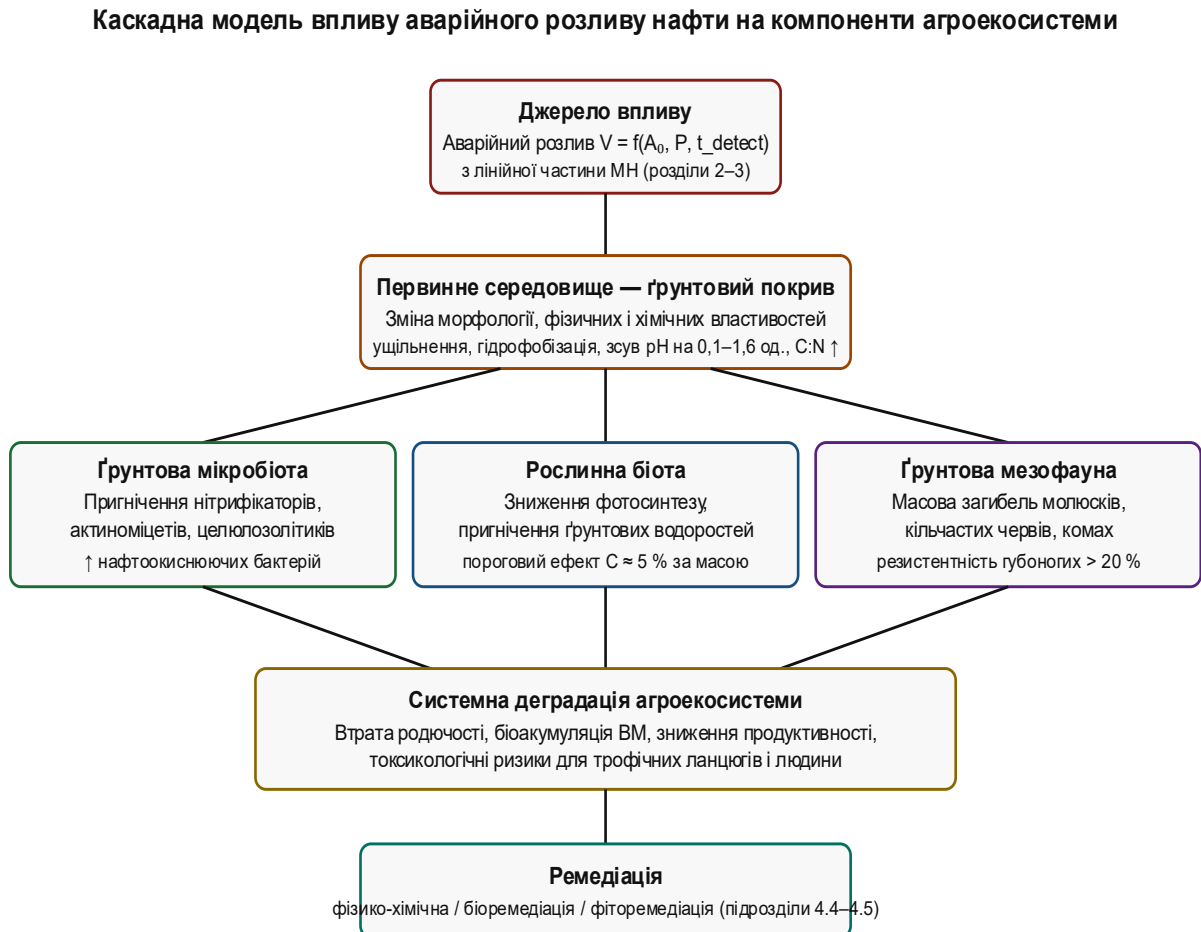


Рисунок 4.2 – Каскадна модель впливу аварійного розливу нафти на компоненти агроєкосистеми.

4.2.1 Первинне середовище ураження – ґрунтовий покрив

Морфологічно нафтозабруднені ґрунти характеризуються темнішим відтінком порівняно з незабрудненими, підвищеною щільністю, наявністю плівок та утворенням стовпчастих структур у нижній частині профілю; колір змінюється від чорного й сіро-бурого у верхній частині профілю до буровохристого у нижніх горизонтах. Зниження спектральної відбивної здатності

внаслідок плівкоутворення формує основу для дистанційного зондування забруднених територій у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах.

Найбільш чутливими індикаторами фізико-хімічних змін є: гігроскопічна вологість, водопроникність, вологоємність (усі знижуються при надходженні нафти); насипна щільність та проникність (теж знижуються); кут внутрішнього тертя (поведінка немонотонна за вмістом глинистої фракції – у піщано-каолінових сумішах знижується, у високоглинистих зразках зростає); рН ґрунтового розчину. Зміна рН є особливо чутливим індикатором: початково кислі та слабокислі ґрунти зсуваються в бік підлуження, тоді як близькі до нейтральних – навпаки, зазнають підкислення; для початково нейтрального лучно-алювіального ґрунту експериментально зафіксовано зниження рН ґрунтового розчину на 0,8–1,6 одиниці внаслідок нафтового забруднення [92].

Через сорбцію вуглеводнів на ґрунтових частинках блокується переведення рухомих форм поживних елементів (нітроген, фосфор, калій) у розчинний стан; співвідношення C:N зростає за рахунок появи нафтового вуглецю, що порушує азотний баланс. Усі ці зміни є найбільш виразними у ядрі ареалу забруднення (зоні $C_{oil} > 5 C_{ГДК}$) і складають перший рівень каскаду.

Особливу роль у деградації ґрунтової структури відіграє взаємодія нафтових вуглеводнів з гумусовими речовинами. Фульвокислоти та гумінові кислоти мають амфіфільну структуру – гідрофільні карбоксильні та фенольні групи поєднані з гідрофобними вуглецевими ланцюгами – що робить їх ефективними природними сорбентами для аполярних компонентів нафти. Внаслідок цього сорбованих вуглеводнів у горизонтах з підвищеним вмістом органічної речовини більше, ніж прогнозує лінійна рівновагова модель Генрі. Для польових умов Прикарпатської зони (дерново-підзолисті та буроземні ґрунти з вмістом гумусу 2–4 %) це означає, що ефективний коефіцієнт сорбції α у рівнянні конвекції-дифузії зростає у 1,5–2,5 рази порівняно з мінеральними ґрунтами, суттєво уповільнюючи міграцію забруднення у горизонтальному напрямку, але одночасно ускладнюючи подальше видалення вуглеводнів при ремедіації, оскільки десорбція з гумусового комплексу є кінетично обмеженою і

потребує значно більше часу, ніж адсорбція. Ця асиметрія кінетики сорбції/десорбції обумовлює феномен «гістерезису ремедіації» – ситуацію, коли концентрація у поровому розчині після закінчення активного втручання виявляється вищою, ніж передбачала рівноважна модель, що може стати причиною передчасного завершення ремедіаційних робіт і подальших рецидивів забруднення.

Таким чином, ґрунтовий покрив є першим і найбільш уразливим компонентом агроєкосистеми, який сприймає основне навантаження під час аварійного витоку нафти. Саме фізико-хімічні властивості ґрунту визначають інтенсивність міграції вуглеводнів, ступінь їх сорбції та тривалість збереження забруднення. Отримані закономірності підтверджують необхідність врахування типу ґрунту під час прогнозування масштабів екологічних наслідків аварій і вибору подальших заходів ремедіації.

4.2.2 Реакція біотичних підсистем

Реакція ґрунтової мікробіоти має двофазний характер. Безпосередньо після надходження нафти спостерігається пригнічення чутливих груп: актиноміцети, нітрифікатори та целюлозолітичні мікроорганізми є найбільш уразливими; ароматичні вуглеводні інгібують ензиматичну активність ґрунту, тоді як парафінові – можуть її стимулювати. Через короткий період пригнічення формується «спеціалізована» мікробіотна спільнота, у якій домінують нафтоокиснюючі бактерії, що використовують вуглеводні як трофічний субстрат. Загальна чисельність повертається до фонових значень упродовж другої стадії природної деградації нафти, але кількість нафтоокиснювачів залишається підвищеною впродовж тривалого часу. Паралельно фіксується зростання чисельності фітопатогенних і фітотоксичних ґрунтових грибів – це створює відстрочений ризик для аграрного виробництва навіть після завершення активної фази забруднення.

З кількісного погляду зміна ферментативної активності є зручним оперативним індикатором стану мікробіоти: активність дегідрогенази (фермент, що відображає загальну окисдаційно-відновну активність мікрофлори) та уреази (фермент азотного циклу) знижуються у 2–5 разів при $C_{oil} \sim 3 - 5$ % мас. порівняно з контрольними ділянками, відновлюючись до 60–80 % від вихідного рівня лише через 18–36 місяців навіть за умов природного самоочищення. Ключовим параметром для кількісного опису другої (адаптаційної) фази є чисельність нафтоокиснюючих бактерій (N_{oxid} , КУО/г ґрунту): за відсутності активних ремедіаційних заходів N_{oxid} зростає на 2–4 порядки від фонових $10^3 - 10^4$ КУО/г до $10^6 - 10^7$ КУО/г протягом 2–8 тижнів після початку аварії, після чого поступово стабілізується у міру вичерпання доступних вуглеводневих субстратів. Саме значення N_{oxid} слугує критерієм готовності до переходу від механічних методів ремедіації до біостимуляції (підрозділ 4.4): якщо адаптаційна популяція вже сформована, додаткова інокуляція (біоаугментація) є економічно невиправданою, а додавання мінеральних нітроген- і фосфоровмісних добрив для оптимізації співвідношення C:N:P $\sim 100:10:1$ у поровому розчині виявляється достатнім для прискорення природного біорозкладу.

Реакція ґрунтової альгофлори є дзеркальним відображенням реакції мікрофлори: низькі концентрації нафти (0,01 % за масою) стимулюють зростання зелених водоростей (*Chlorella homosphaera*, *Chlorella vulgaris* – приріст 15–16 % відносно контролю), концентрації 0,3 % спричиняють зниження чисельності на 15–20 %. Найвищу резистентність демонструють синьо-зелені водорості родів *Nostoc*, *Anabaena*, *Phormidium*, *Plectonema*, що домінують у забруднених ґрунтах [93]. Цей факт має подвійне значення. По-перше, синьо-зелені водорості є азотфіксаторами, і їх домінування у забрудненому ґрунті формує часткову компенсацію втрат фіксованого азоту через пригнічення нітрифікаторів у мікрофлорному відсіку. По-друге, надмірний розвиток синьозелених водоростей у верхньому шарі ґрунту створює щільний мат, що посилює водовідштовхувальні властивості поверхні – явище, відоме як ґрунтова

гідрофобність, – і тим самим зменшує інфільтрацію атмосферних опадів. Цей механізм є позитивним зворотним зв'язком у системі: гідрофобізація поверхні → зниження вертикальної інфільтрації → підвищення бокового стоку → розповсюдження забруднення за межі первинного ареалу. Таким чином, реакція альгофлори є не лише індикатором стану, але й активним чинником, що впливає на просторову динаміку поля $C_{oil}(x, y, t)$, – аспект, який, строго кажучи, виходить за межі лінійної моделі фільтрації розділу 3, але повинен прийматися до уваги при польовій валідації моделі.

Реакція вищих рослин має пороговий характер. Низькі концентрації нафти в ґрунті (за різними літературними оцінками – до 5 % за масою) не справляють істотного впливу або навіть стимулюють ріст; при подальшому зростанні вмісту нафти виявляється виражений інгібуючий ефект, який часто завершується загибеллю рослин. Дві принципово різні механізми впливу: безпосередній (проникнення компонентів нафти через корінь або листові продири з подальшою інтеграцією в метаболізм, що може спричиняти мутагенні реакції) та опосередкований (зміна фізико-хімічних властивостей ґрунту з порушенням водно-повітряного і поживного режимів).

На рівні клітинної і тканинної фізіології вплив нафтових вуглеводнів реалізується через кілька механізмів, що діють паралельно. Блокування продихів восковими вуглеводнями порушує газообмін і транспірацію, що при тривалій дії призводить до теплового стресу листового апарату. Конкуренція аполярних молекул вуглеводнів з фітогормонами (ауксинами, цитокінінами) за гідрофобні рецептори клітинної мембрани пригнічує синтез хлорофілу і порушує регуляцію росту коренів. Вміст пероксиду водню (H_2O_2) у клітинах зростає при підвищенні концентрації ароматичних вуглеводнів – цей показник є ранньою ознакою окиснювального стресу, придатною для лабораторного скринінгу фіторемедіантів. Ряд видів демонструє адаптивні стратегії, що мають практичне значення для підрозділу 4.4: надмірне поглинання забруднювача з накопиченням у вакуолях (стратегія гіперакумуляції, характерна для *Festuca arundinacea* та окремих ліній *Brassica*) та ферментативна детоксикація (монооксигенази

системи цитохрому P450, активованої саме у відповідь на ароматичні вуглеводні). Останній механізм є біологічним аналогом мікробного нафтоокиснення і вказує на можливість синергетичного ефекту при сумісному застосуванні фіторе mediaції і біостимуляції.

Реакція ґрунтової мезофауни. Найуразливіші компоненти – кільчасті черви, молюски, дорослі комахи та їх личинки; найбільш токсичними є легкі фракції нафти. Через три доби після аварії більшість видів зникає або становить не більш як 1 % від рівня контролю. Молюски демонструють найвищу чутливість, тоді як губоногі багатоніжки (*Chilopoda*) витримують вміст нафти понад 20 %.

Таким чином, рослинний покрив виступає одним із найбільш чутливих індикаторів нафтового забруднення агроєкосистем. Встановлено, що негативний вплив визначається не лише концентрацією вуглеводнів, а й тривалістю їх перебування у ґрунті, що обумовлює необхідність урахування просторово-часової динаміки забруднення. Отримані результати є основою для подальшого виділення зон екологічного ризику та вибору ефективних технологій відновлення.

4.2.3 Гармонізація змінної концентрації

Перед формалізацією узагальненого індикатора шкоди слід чітко розрізнити дві просторово-часові величини, що фігурують у дисертації.

Поле надлишкового тиску $P(x, y, t)$ [Па] є розв'язком нестационарного рівняння фільтрації (формула (3.4)) і описує пружне збурення порового тиску, що поширюється у ґрунтовому масиві зі швидкістю, визначеною коефіцієнтом п'єзопровідності $\chi = k/(\mu\beta^*)$. Це збурення не є саме по собі концентрацією забруднювача – воно лише задає термодинамічну рушійну силу фільтрації.

Поле масової концентрації нафти $C_{oil}(x, y, t)$ [% мас. або кг/м³] характеризує фактичне забруднення ґрунту вуглеводнями і обчислюється через насиченість пор нафтою S_{oil} (безрозмірна, $0 \leq S_{oil} \leq 1$):

$$v(x, y, t) = -\frac{k}{\mu} \nabla P(x, y, t), \quad (4.1a)$$

$$n \frac{\partial S_{oil}}{\partial t} + \operatorname{div} v = Q_v(x, y, t), \quad (4.1b)$$

$$C_{oil}(x, y, t) [\% \text{ мас.}] = \frac{S_{oil}(x, y, t) \cdot n \cdot \rho_n}{\rho_{bulk}} \cdot 100. \quad (4.1c)$$

Тут v – поле об'ємних швидкостей Дарсі [м/с]; k – проникність ґрунту [м²]; μ – динамічна в'язкість нафти [Па·с]; n – пористість; Q_v – відносна об'ємна інтенсивність джерела (м³ нафти на м³ порового простору за секунду, тобто м³/(м³·с) $\equiv$ с⁻¹), що узгоджується з балансом насиченості (4.1b): обидва доданки мають розмірність [с⁻¹]. Величина Q_v збігається з функцією $Q_v(x, y, t)$ рівняння (3.5) розділу 3, де вона введена як точкове джерело, приведене до одиниці об'єму пор. $\rho_n \approx 850$ кг/м³ – густина нафти; ρ_{bulk} – насипна щільність ґрунту (для типових супісків Прикарпаття 1600 кг/м³, для суглинків 1750 кг/м³) [94]. Розмірнісна перевірка (4.1c): $[S_{oil}]$ – безрозмірна, $[n \cdot \rho_n / \rho_{bulk}]$ – безрозмірне відношення $\rightarrow C_{oil}$ безрозмірне (відсотки). У подальших підрозділах аргументом функцій екологічного впливу та граничних умов виступає саме C_{oil} , а не P .

Отримані закономірності узгоджуються з результатами математичного моделювання, наведеними у розділі 3, де показано істотний вплив проникності ґрунту на швидкість міграції фронту забруднення. Це підтверджує доцільність використання параметрів фільтраційної моделі під час прогнозування ризику забруднення підземних вод.

Таким чином, забруднення підземних вод є одним із найбільш довготривалих екологічних наслідків аварійних витоків нафти. Встановлено, що масштаби його розвитку визначаються фільтраційними властивостями ґрунту, глибиною залягання водоносного горизонту та тривалістю існування джерела забруднення. Це підтверджує необхідність використання математичних моделей фільтрації для прогнозування екологічних ризиків і планування заходів локалізації аварій.

4.2.4 Узагальнений індикатор екологічної шкоди

Розгляд окремих компонентів агроєкосистеми показує, що екологічні наслідки аварійного витоку нафти мають комплексний характер. Тому оцінювання рівня екологічної небезпеки доцільно проводити з урахуванням взаємозв'язку між забрудненням ґрунту, рослинності та підземних вод. Для формалізованого опису ступеня екологічної шкоди введемо просторово-розподілений безрозмірний індикатор:

$$D(C_{\text{oil}}) = \sum_i w_i f_i(C_{\text{oil}}), \quad \sum_i w_i = 1, \quad (4.2)$$

де підсумовування ведеться по чотирьох підсистемах агроєкосистеми ($i \in \{\text{soil, micro, flora, fauna}\}$), w_i – вагові коефіцієнти, $f_i \in [0,1]$ – нормалізовані функції відгуку підсистем.

Емпірично відомо, що відгук кожної підсистеми на концентрацію вуглеводнів має пороговий характер з відносно вузькою областю переходу, тому функції f_i зручно апроксимувати логістичною залежністю:

$$f_i(C_{\text{oil}}) = \frac{1}{1 + \exp[-k_i (C_{\text{oil}} - C_{i,0,5})]}, \quad (4.3)$$

де $C_{i,0,5}$ [% мас.] – концентрація напівефекту; k_i – крутизна переходу. Значення параметрів, прийняті за результатами огляду літературних даних наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри функції екологічної шкоди $D(C_{\text{oil}})$

Підсистема i	$C_{i,0,5}$, % мас.	k_i , (% мас.) ⁻¹	w_i	Обґрунтування $C_{i,0,5}$
Ґрунтова матриця	1,0	3,0	0,20	граничне порушення водно-фізичних характеристик
Мікробіота	0,3	8,0	0,30	пригнічення нітрифікаторів і целюлозолітиків
Флора (вищі рослини)	5,0	1,5	0,30	пороговий перехід від стимуляції до інгібування
Мезофауна	0,5	6,0	0,20	загибель уразливих груп упродовж 3 діб

Контрольні значення D для кількох характерних рівнів концентрації:

C_{oil} , % мас.	f_{soil}	f_{micro}	f_{flora}	f_{fauna}	D	Характеристика стану
0,0	0,05	0,08	0,00	0,05	0,04	Фоновий стан
0,3	0,11	0,50	0,00	0,23	0,22	Початок пригнічення мікробіоти (межа зони III)
0,5	0,18	0,83	0,00	0,50	0,39	Напівефект мезофауни
1,0	0,50	1,00	0,00	0,95	0,59	Напівефект ґрунтової матриці
3,0	1,00	1,00	0,05	1,00	0,71	Наближення до порогу флори
5,0	1,00	1,00	0,50	1,00	0,85	Напівефект флори (межа зони 0)
7,0	1,00	1,00	0,95	1,00	0,99	Глибока деградація всіх підсистем

Поведінка кривої $D(C)$ та індивідуальних функцій відгуку $f_i(C)$ ілюструється на рис. 4.3.

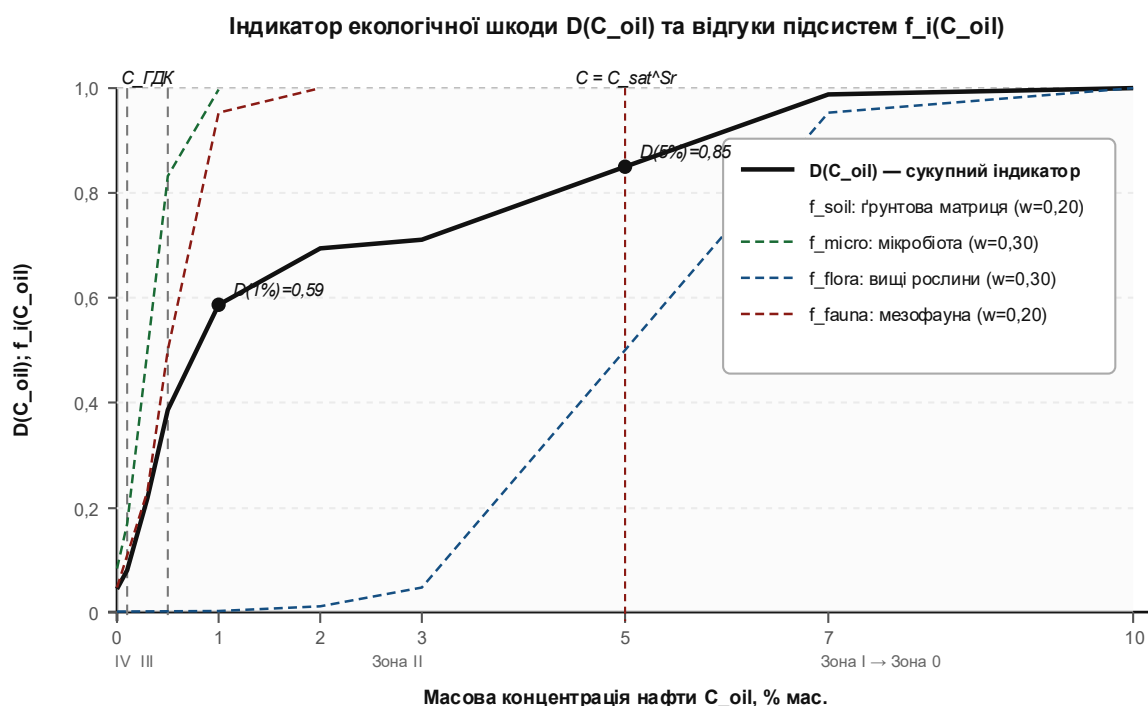


Рисунок 4.3 – Індикатор екологічної шкоди $D(C_{oil})$ та функції відгуку підсистем $f_i(C_{oil})$ з параметрами табл. 4.1. Вертикальна штрихова лінія – межа зони 0 ($C_{sat}^{Sr} \approx 5$ % мас.); контрольні точки $D(1\%) = 0,59$ та $D(5\%) = 0,85$ позначені маркерами.

Аналіз рис. 4.3 показує, що найбільш різке зростання інтегрального показника екологічної шкоди спостерігається в області концентрацій, близьких до нормативних значень. Це підтверджує доцільність використання запропонованого індикатора для раннього виявлення критичних змін стану агроєкосистем.

Підстановка поля $C_{oil}(x, y, t)$ у формулу (4.2) дає просторово-часовий розподіл інтегральної шкоди $D(x, y, t)$, а інтегрування його по площі забрудненої ділянки в фіксований момент часу – кумулятивну оцінку, яка слугує об'єктивним критерієм для прийняття рішень про межі та пріоритет ремедіаційних заходів. Важлива прикладна роль формули (4.2): вона не замінює нормативні значення ГДК, а доповнює їх безперервним індикатором, чутливим до композиції впливу на різні підсистеми – чого нормативи у вигляді кускових порогових функцій не передають [95].

Для коректного застосування індикатора D у прийнятті рішень важливо усвідомлювати природу обраної параметричної форми. Логістична функція (4.3) є мінімально-параметричною апроксимацією довільної сигмоїдної функції відгуку і не претендує на точний опис механістичного процесу: вона лише кількісно фіксує два спостережуваних факти – наявність нижнього «нечутливого» порогу та відносно різкий перехід до зони повного пригнічення. Теоретичне обґрунтування сигмоїдної форми в токсикології вищих рослин і тварин дає логарифмічно-нормальний розподіл індивідуальних чутливостей особин у популяції: якщо логарифм летальної концентрації $\ln(LC_{50})$ розподілений нормально, то сигмоїда у логарифмічній шкалі концентрацій є природним наслідком. У прийнятому параметричному записі (4.3) вісь концентрацій лінійна, а не логарифмічна, що забезпечує коректне поведіння функції при $C_{oil} \rightarrow 0$ (де $f_i \rightarrow (1 + e^{k_i C_{i,0.5}})^{-1} \approx 0$ для достатньо великих $k_i C_{i,0.5}$, що й виконується для всіх підсистем за табл. 4.1).

Чутливість індикатора D до вибору вагових коефіцієнтів w_i слід також оцінити. Якщо замість прийнятих значень (0,20; 0,30; 0,30; 0,20) використати рівноважні ваги $w_i = 0,25$ для всіх підсистем, контрольні значення змінюються

незначно: $D(1,0\%) = 0,60$ проти $0,59$, $D(5,0\%) = 0,86$ проти $0,85$. Ця мала чутливість є ознакою структурної стійкості індикатора: його поведінка визначається переважно параметрами $C_{i,0.5}$ і k_i , а не конкретними вагами. Висока вага мікробіоти та флори (по $0,30$) відображає їх функціональну роль у ґрунтоутворенні та агрономічній продуктивності і є аргументованою з агроекологічних позицій; проте для ситуацій, де критично важливе збереження ґрунтової мезофауни (наприклад, зони природно-заповідного фонду), ваговий вектор може бути переглянутий на основі регіональних пріоритетів без зміни структури формул (4.2)–(4.3) [96].

Таким чином, комплексне оцінювання екологічних наслідків аварійного витоку забезпечує врахування взаємопов'язаного впливу нафтового забруднення на основні компоненти агроєкосистеми. Отримані результати створюють методичну основу для просторово-часового зонування території, яке наведено у підрозділі 4.3, та подальшого вибору оптимальних технологій ремедіації залежно від рівня екологічного ризику.

4.3 Просторово-часове зонування забрудненої території

Аналітичний розв'язок задачі фільтрації розділу 3 разом з пороговими параметрами підрозділу 4.2.4 дає достатньо матеріалу для побудови інженерної методики просторового зонування забрудненої території. Зонування виступає мостом між неперервним полем $C_{oil}(x, y, t)$ і конкретним планом виконання ремедіаційних робіт: для кожної точки (x, y) методика однозначно вказує, до якої зони втручання вона належить, і яка група технологій є обґрунтованою.

Ідея ризик-орієнтованого просторового зонування не є новою: у міжнародній практиці схожий підхід використовується у методологіях Tier-1 / Tier-2 / Tier-3 ризик-оцінки нафтозабруднених ділянок (ASTM E1739, ISO/TR 11046). Принципова відмінність запропонованої методики від цих стандартів полягає у тому, що межі зон тут не є фіксованими нормативними константами, прийнятими консервативно для найгіршого випадку, а обчислюються динамічно

з аналітичного поля $C_{oil}(x, y, t)$ і тому залежать від конкретних параметрів ділянки, реального об'єму витоку та часу після аварії. Завдяки цьому зонування є часово-адаптивним: межі зон звужуються у міру природного і стимульованого зниження концентрацій, що дозволяє поетапно знімати режим активного втручання і знижувати витрати на ремедіацію без втрати рівня захисту екосистеми.

Запропонована методика виділяє п'ять зон, межі яких визначаються критерієм перевищення ГДК вуглеводнів у ґрунті $C_{ГДК}$:

- *Зона 0 – ядро NAPL (non-aqueous phase liquid)*. Зона, в якій нафта присутня як вільна мобільна фаза. Умова існування мобільної NAPL – $S_{oil} > S_r$, де S_r – залишкова насиченість нафтою (при $S_{oil} \leq S_r$ нафта капілярно утримана і нерухома). Це поняття детально розкрито у підрозділі 2.3.1 у зв'язку з декомпозицією $V = V_{eff} + V_{immob}$. Критерій належності в масових концентраціях: $C_{oil} \geq C_{sat}^{S_r}$, де

$$C_{sat}^{S_r} = \frac{S_r \cdot n \cdot \rho_H}{\rho_{bulk}} \cdot 100 \%. \quad (4.4)$$

Для типового супіску Прикарпатської зони ($n = 0,38$; $S_r = 0,25$ за результатами підрозділу 2.3.1; $\rho_{bulk} = 1600$ кг/м³): $C_{sat}^{S_r} \approx 5,0$ % мас. Це ж значення у абсолютних одиницях – $S_r \cdot n \cdot \rho_H = 0,25 \cdot 0,38 \cdot 850 \approx 80$ кг/м³, тобто *маса нафти на 1 м³ ґрунту* за умови $S_{oil} = S_r$; при нижчому S_{oil} нафта є нерухомою.

- *Зона I – інтенсивної ремедіації*: $5 C_{ГДК} < C_{oil} < C_{sat}^{S_r}$. Ґрунт насичений розчиненими та сорбованими вуглеводнями, але вільної мобільної фази немає.
- *Зона II – фіторемедіації*: $C_{ГДК} < C_{oil} \leq 5 C_{ГДК}$. Периферійна частина ареалу; концентрація сумісна з функціонуванням фіторемедіантів (підрозділ 4.4).
- *Зона III – моніторингу*: $0,1 C_{ГДК} < C_{oil} \leq C_{ГДК}$. Перевищення фону без перевищення ГДК; виправдано систематичне спостереження.

- Зона IV – фонові: $C_{oil} \leq 0,1 C_{ГДК}$.

Слід зазначити, що наведена послідовність зон є коректною за умови $C_{ГДК} \ll C_{sat}^{Sr}$. Для нормативу вмісту нафтопродуктів у ґрунті (в Україні орієнтовно $C_{ГДК} \approx 0,05-0,1$ % мас. залежно від типу ґрунту) виконується $5 \cdot C_{ГДК} \approx 0,25-0,5$ % мас. $\ll C_{sat}^{Sr} \approx 5,0$ % мас., тож інтервали зон I та 0 не перетинаються.

Площі зон визначаються інтегруванням індикаторної функції по проєкції ареалу на земну поверхню:

$$S_k(t) = \iint_{\Omega} \mathbb{1}[C_k^- < C_{oil}(x, y, t) \leq C_k^+] dx dy, \quad k = 0, I, II, III, \quad (4.5)$$

де C_k^-, C_k^+ – нижня та верхня межі k -ї зони відповідно; $\mathbb{1}[\cdot]$ – індикаторна функція; Ω – повна область моделювання.

Орієнтовні просторові масштаби. Радіус повного фронту забруднення (зовнішня межа зони III, де C_{oil} спадає до $0,1 C_{ГДК}$) визначається з рівняння просування фронту в одновимірному наближенні. Для ізотропного радіального розтікання від точки розгерметизації під дією повного гідростатичного напору ΔH закон Дарсі сумісно з рівнянням балансу маси дає самоузгоджену квазістатичну оцінку:

$$r_{III}(t) = \sqrt{\frac{k_f \cdot \Delta H \cdot t}{n}}, \quad (4.6)$$

де k_f – коефіцієнт фільтрації нафти у ґрунті [м/с], ΔH – повний ефективний напір [м.вод.ст.], n – пористість. Розмірнісна перевірка: $[м/с \cdot м \cdot с/1]^{1/2} = м$, що відповідає радіусу.

Радіуси внутрішніх зон (r_0, r_I, r_{II}) задаються радіальним профілем концентрації всередині шлейфу. У наближенні монотонно-спадного від центру шлейфу профілю (підтверджене аналітичним розв'язком розділу 3) внутрішні зони складають характерні частки повного фронту: $r_0/r_{III} \sim 0,10$, $r_I/r_{III} \sim 0,25$, $r_{II}/r_{III} \sim 0,50$. Ці частки отримані апроксимацією ізоліній $C_{oil}/C_{max} \approx \{C_{sat}^{Sr}/C_{max}; 5C_{ГДК}/C_{max}; C_{ГДК}/C_{max}\}$ аналітичного розв'язку розділу 3 для типових

параметрів Прикарпатської зони. Радіус ядра NAPL r_0 додатково обмежений знизу через об'ємний баланс: $r_0 \geq \sqrt{V_{\text{eff}}/(\pi h_{\text{шару}} S_r n)}$, де V_{eff} – мобільна фракція об'єму витоку, $h_{\text{шару}}$ – характерна вертикальна потужність ураженого шару.

Для типових умов ділянок Прикарпаття (супісок, $k_f \approx 10^{-4}$ м/с, $\Delta H = 40$ м, $n = 0,38$, $h_{\text{шару}} = 2$ м) та медіанного об'єму витоку $V_{50} = 16,6$ м³ для ділянки «Долина – Дрогобич» (з табл. 2.4 розділу 2) при $t = 3\text{--}5$ діб після виявлення:

- зона 0 (NAPL): $r_0 \approx 4\text{--}6$ м (об'ємно-обмежено), $S_0 = \pi r_0^2 \approx 50\text{--}110$ м²;
- зона I: $r_I \approx 13\text{--}17$ м, $S_I = \pi(r_I^2 - r_0^2) \approx 400\text{--}800$ м²;
- зона II: $r_{II} \approx 26\text{--}34$ м, $S_{II} = \pi(r_{II}^2 - r_I^2) \approx 1\,600\text{--}2\,700$ м²;
- зона III: $r_{III} \approx 52\text{--}67$ м, $S_{III} = \pi(r_{III}^2 - r_{II}^2) \approx 6\,400\text{--}10\,400$ м².

Сумарна площа зон, що потребують активного втручання (зони 0, I, II), становить 0,21–0,36 га на медіанному сценарії. На «хвостовому» сценарії V_{95} ці значення зростають приблизно у 1,8–2,2 рази, що дає верхню оцінку обсягу робіт для планування бюджету.

Сумісність зі стохастичною моделлю джерела. Оскільки V і $Q(t)$ є випадковими величинами з відомими розподілами (розділ 2), поле $C_{\text{oil}}(x, y, t)$ також виявляється стохастичним.

Зонування виконується не для єдиної реалізації, а для трьох сценаріїв: оптимістичний – $V = P_{25}$; медіанний (робочий) – $V = P_{50}$; консервативний – $V = P_{95}$. Тривимірна структура оцінки (площа $\times$ квантиль $\times$ зона) забезпечує особам, що приймають рішення, повну картину можливих наслідків і дозволяє керувати в умовах ризику з кількісним обґрунтуванням [97].

Оптимізація моніторингу. Густина мережі спостережних свердловин у зоні III раціонально визначається через локальний градієнт концентрації:

$$n_{\text{well}}(x, y) \propto |\nabla C_{\text{oil}}(x, y, t_{\infty})|. \quad (4.7)$$

Така стратегія розміщення мінімізує дисперсію оцінки фактичних меж шлейфу за обмеженого бюджету моніторингу; критерій (4.7) є асимптотично-оптимальним у байєсівському сенсі для випадку гладкого монотонного спадання

концентрації від центру шлейфу. Практична реалізація критерію (4.7) потребує апріорної оцінки поля $|\nabla C_{oil}|$ – саме для неї і служить аналітичний розв'язок розділу 3. Якщо концентраційний профіль у радіальному наближенні описується функцією, похідна якої тісно пов'язана з поточним положенням і крутизною фронту, то максимальний градієнт концентрації зосереджений у перехідній зоні між зонами II та III (рис. 4.3), а у внутрішніх зонах (де концентрація вже «насичена» поблизу C_{max}) і у глибині зони IV (де концентрація близька до нуля) – функція практично постійна і інформаційна цінність додаткових свердловин є мінімальною. Ця нерівномірна інформаційна цінність є вагомим аргументом проти рівномірного розміщення спостережної мережі за регулярною сіткою – стандартного підходу, прийнятого у більшості вітчизняних нормативних документів з екологічного моніторингу. Критерій (4.7) дозволяє формально обґрунтувати «згущення» свердловин на периферійних зонах за рахунок зменшення їх кількості в добре задокументованому ядрі ареалу, що на практиці може дати економію 30–40 % бюджету моніторингу при незмінному рівні інформативності.

Таким чином, запропоноване просторово-часове зонування дозволяє перейти від безперервного розподілу концентрацій до виділення функціональних зон із різним рівнем екологічного ризику. Це створює основу для вибору технологій ремедіації залежно від фактичного масштабу аварії та прогнозованої швидкості поширення забруднення.

4.4 Технологічне відображення зон на методи відновлення

Виділення просторово-часових зон забруднення має практичне значення лише за умови їх безпосереднього використання для вибору технологій ліквідації наслідків аварії. Тому наступним етапом є встановлення відповідності між рівнем забруднення території та найбільш ефективними методами відновлення.

Запропоноване зонування набуває прикладної цінності лише за наявності однозначного відображення кожної зони на сукупність методів відновлення.

Накопичений світовий і вітчизняний досвід ремедіації нафтозабруднених ґрунтів пропонує широкий спектр технологій, які різняться за фізичним механізмом дії, ефективністю, тривалістю та інвазивністю (як у відношенні до самої екосистеми, так і у відношенні до режиму експлуатації території). Хімічні методи (дисперсанти, ПАР, ґрунтові окиснювачі) є технологічно ефективними, але дорогими і самі по собі привносять у ґрунтовий комплекс додаткові порушення, що обмежує їх застосування.

Фізико-механічні методи (екскавація, термодесорбція, спалювання шламу) є енергоємними, проте необхідними для зон з найвищими концентраціями, де біологічні підходи апіорно неефективні.

Біологічні методи (біовентиляція, біостимуляція, біоаугментація) є компромісним рішенням з огляду на вартість та екологічну прийнятність, але вимагають детального контролю параметрів аерації, вологості, температури та правильного підбору консорціуму мікроорганізмів. Для умов Прикарпаття з сезонно підвищеним рівнем опадів (600–800 мм на рік) оптимальний вологісний режим найчастіше порушується у бік перезволоження, тому проектування системи біовентиляції має включати дренажну складову або формування насипного захисного валу для перехоплення поверхневого стоку. Продуктивність одного вентиляційного свердловинного ланцюга при типовому радіусі впливу 5–8 м для супіщаних ґрунтів Прикарпаття становить 0,02–0,08 кг/(м³ · доба) за вуглеводнями, залежно від концентрації і температури, що дає можливість оцінити кількість і тривалість роботи свердловин виходячи з маси LNAPL у зоні I та цільового критерію [98].

Електрокінетична десорбція є доцільною альтернативою біовентиляції у зонах зі значною часткою дрібнодисперсних фракцій (суглинки, глинисті ґрунти), де газопроникність для аерації є недостатньою. Постійний електричний струм між заземленими електродами спричиняє електроосмотичне переміщення порової рідини (разом із розчиненими вуглеводнями) від анода до катода, а також іонофорез і електроміграцію заряджених гідрофільних компонентів нафти. Для типових параметрів (напруженість поля 1–2 В/см, відстань між електродами

2–3 м) характерний час очищення зони І до критерію $C_{oil} < 5 C_{ГДК}$ оцінюється у 8–18 місяців, що є порівнянним з показниками біовентиляції при значно ширшому діапазоні застосовних типів ґрунтів.

Серед біологічних методів окремо виділяється фітореMediaція – використання вищих рослин для абсорбції, трансформації або стабілізації забруднювачів.

Механізм ризосферної стимуляції є ключовим для розуміння фітореMediaційного ефекту: кореневі екsudати (органічні кислоти, амінокислоти, цукри) збільшують чисельність нафтоокиснюючих бактерій у ризосфері у 5–20 разів порівняно з позаризосферним ґрунтом, що по суті перетворює кореневу зону на «біореактор in situ» з постійним надходженням поживних речовин і акцепторів електронів.

Для культур роду *Salix* також відзначається пряма транслокація поліциклічних ароматичних вуглеводнів з ґрунту в деревину через апопластний транспорт, що при щорічному обрізуванні пагонів забезпечує фізичне видалення акумульованих вуглеводнів з ґрунтового профілю. Розрахунковий ефект для типових умов зони ІІ ($C_{oil} = 1–5 C_{ГДК}$, $S_{II} \approx 0,15–0,25$ га) при щорічному врожаї біомаси 10–15 т с.р./га становить 2–8 кг ПАВ/га на рік, що відповідає зниженню загального пулу нафтового забруднення у зоні ІІ на 5–15 % на рік – у поєднанні з природною мікробною деградацією цей темп є достатнім для виходу на критерій $C_{oil} < C_{ГДК}$ за 5–8 років.

В умовах Прикарпаття слід враховувати сезонний чинник: за глибини промерзання ґрунту 0,5–0,8 м процеси мікробної деградації та ризосферної активності фактично призупиняються на 3–4 зимові місяці, що, за інженерною оцінкою, збільшує загальну тривалість фітореMediaційної рекультивації приблизно на чверть.

Відображення зон на технології у двох вимірах – концентрація вуглеводнів та інвазивність/ресурсоємність – наведено на рис. 4.4.

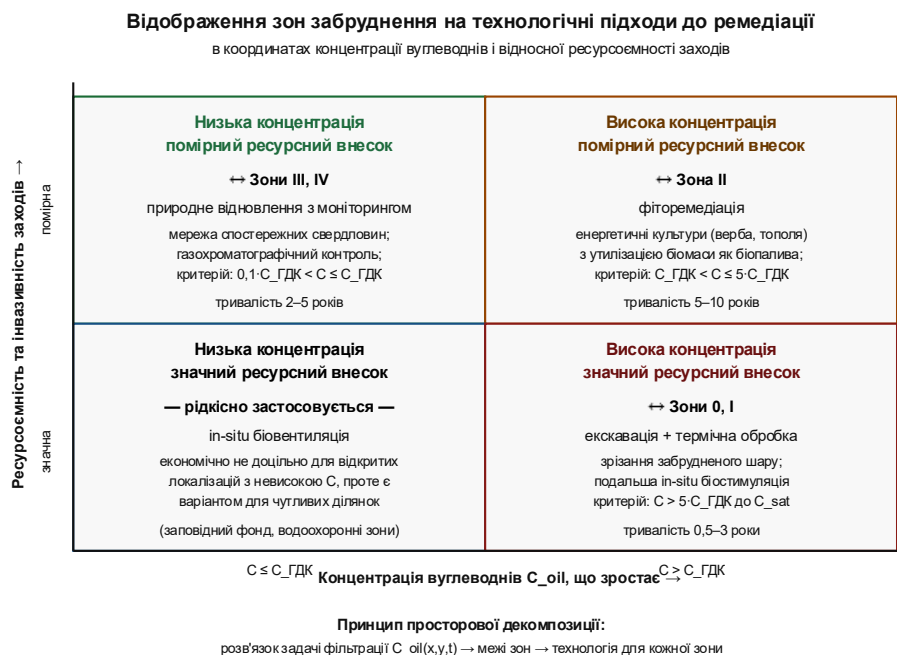


Рисунок 4.4 – Відображення зон забруднення на технологічні підходи до відновлення.

Запропонована методика приводить до такої прикладної рекомендації для умов Прикарпаття:

- *Зона 0 (ядро NAPL)* – екскавація забрудненого шару з подальшою термодесорбцією або керованим спалюванням; характерна тривалість заходу 3–12 місяців; критерій завершення – досягнення $C_{oil} < C_{sat}^{Sr}$ у пробах ґрунту з зони екскавації.
- *Зона I* – in-situ біовентиляція з біостимуляцією або електрокінетична десорбція; тривалість 1–3 роки; завершення – досягнення $C_{oil} < 5 C_{ГДК}$.
- *Зона II* – фіторемедіація з використанням енергетичних культур та їх подальшою утилізацією у вигляді біопалива [Hrytsuliak et al., 2024]; тривалість 5–10 років; завершення – досягнення $C_{oil} < C_{ГДК}$.
- *Зони III, IV* – програма моніторингу з періодичним інструментальним контролем (газохроматографія, біоіндикація, дистанційне зондування у vis-NIR діапазоні); тривалість 2–5 років.

Економічне обґрунтування плану виконується через зіставлення сумарних капітальних і операційних витрат за зонами з очікуваною шкодою:

$$\mathbb{E}[D_{\text{econ}}] = \sum_k S_k \cdot d_k + \sum_j R_j \cdot \mathbb{1}[\text{рецептор}_j \in \text{ареал}], \quad (4.8)$$

де d_k – питомі збитки для зони k (грн/м²), диференційовані за категорією землекористування (с/г угіддя, лісовий фонд, природно-заповідний фонд); R_j – фіксовані додаткові збитки на j -й чутливий рецептор (наприклад, водозабір господарсько-питного значення). У разі врахування кількох стохастичних сценаріїв (P_{25} , P_{50} , P_{95}) вираз (4.8) слід розуміти як математичне сподівання по їхніх ймовірнісних вагах: $\mathbb{E}[D_{\text{econ}}] = \sum_s p_s D_{\text{econ}}^{(s)}$, де p_s – ймовірність сценарію s ; в записі (4.8) для стислості наведено однопотокову форму. Детальне EVPI-зважування виконано у розділі 2; розширення зони активної ремедіації економічно виправдане доти, доки граничні витрати на одиницю площі є меншими за граничну зменшувану шкоду.

Слід підкреслити принципово важливу роль компоненти R_j у формулі (4.8): у випадках, коли у зоні потенційного впливу розташований водозабір господарсько-питного значення або об'єкт природно-заповідного фонду, доданок R_j може кратно перевищувати площинну складову $\sum_k S_k d_k$ і тим самим кардинально зміщувати оптимальний обсяг ремедіаційного втручання в бік більш агресивних технологій. Для умов Прикарпаття, де мережа поверхневих водозаборів є густою, а ухил місцевості спрямовує підземний стік у бік річкових долин Дністра та Прута, цей ефект є систематичним: більшість аварійних ділянок потенційно загрожують об'єктам питного водопостачання і отже ймовірнісна шкода $\mathbb{E}[D_{\text{econ}}]$ для типових умов регіону включає суттєву рецепторну складову, яка не відображається у питомих нормативних показниках збитків, прив'язаних лише до площі забруднення. Урахування цієї складової є конкретним внеском запропонованої методики порівняно зі стандартними підходами нормативної бази України у галузі ліквідації наслідків аварійних розливів нафти [99].

Запропонований підхід дозволяє перейти від результатів математичного моделювання до обґрунтованого вибору технологій ремедіації залежно від просторового розподілу концентрації нафтопродуктів. Це забезпечує поєднання

прогнозування розвитку аварійного забруднення із практичним плануванням відновлювальних заходів. Результати просторово-часового зонування можуть бути безпосередньо використані для вибору технологій ремедіації залежно від фактичних характеристик аварії. Запропонований підхід забезпечує перехід від загальних рекомендацій до ризик-орієнтованого вибору природоохоронних заходів, що підвищує ефективність післяаварійного реагування.

4.5 Загальна схема прийняття інженерно-екологічних рішень

Результати, отримані у попередніх розділах, доцільно розглядати як взаємопов'язані елементи єдиної системи підтримки прийняття рішень під час ліквідації наслідків аварійних витоків нафти. Це дозволяє поєднати результати стохастичного моделювання, моделі фільтрації, екологічного зонування та вибору технологій ремедіації в єдиний алгоритм практичного застосування.

Результати розділів 2 і 3 разом з підрозділами 4.1–4.4 утворюють замкнений цикл – від реєстрації факту аварії до плану її ліквідації та подальшого моніторингу. Узагальнена послідовність дій представлена на рис. 4.5.



Рисунок 4.5 – Схема прийняття інженерно-екологічних рішень за результатами моделювання аварійного розливу нафти.

Розглянемо цю послідовність змістовно, з вказанням на конкретні математичні інструменти, розроблені в попередніх частинах роботи. На етапі оцінки джерела на основі параметрів ділянки (діаметр, робочий тиск, тип ґрунту, профіль траси) та класифікації типу дефекту, отриманої за результатами діагностики або моніторингу, методом LHS (підрозділ 2.4) генерується ансамбль реалізацій вхідних параметрів і формується розподіл $F_V(V)$ сумарного об'єму витоку з характерними квантилями $P_{25}, P_{50}, P_{75}, P_{95}$. Одночасно отримується трифазна функція витрати $Q(t)$, яка виступає вхідним джерелом для аналітичної моделі фільтрації.

Практичний аспект реалізації етапу оцінки джерела полягає у тому, що розрахунки для одного сценарію займають секунди на сучасному персональному комп'ютері, а повна вибірка LHS з $N = 10^4$ реалізацій виконується за хвилини. Це означає, що оперативний диспетчер аварійно-відновлювальної служби може отримати повну квантильну картину масштабів потенційного забруднення ще в перші години після виявлення витоку – до прибуття польових бригад та початку ремедіаційних робіт, що дозволяє завчасно планувати необхідні ресурси. Вимога до вхідних даних є мінімальною: достатньо знати категорію дефекту (табл. 2.2), діаметр і робочий тиск трубопроводу в точці аварії, а також тип поверхневого ґрунту за картою ґрунтового покриття. Усі ці параметри, як правило, наявні у паспорті ділянки і/або відображені у геоінформаційній системі трубопровідної організації.

На етапі поширення в ґрунті використовується розв'язок двовимірної нестационарної задачі фільтрації (розділ 3, формули (3.5), (3.19)): за функцією $Q(t)$ і параметрами ґрунту обчислюється поле $P(x, y, t)$, з нього через формули (4.1a–c) – поле $S_{oil}(x, y, t)$ і далі $C_{oil}(x, y, t)$. Для типових параметрів супіску ($t^* \approx 6$ с) поле виходить на квазістационарний режим у межах хвилин, для важких суглинків ($t^* \approx 5\,640$ с) – за години, що задає вимоги до швидкості реагування при аварії.

На етапі зонування до поля $C_{oil}(x, y, t)$ застосовується методика підрозділу 4.3: для кожної точки простору однозначно визначається зона (0, I, II, III, IV),

формуються площі S_k та просторова конфігурація шлейфу. Зонування доповнюється ідентифікацією рецепторів – чутливих об'єктів у потенційно ураженій зоні (сільгоспугіддя, водозабори господарсько-питного значення, населені пункти, об'єкти природно-заповідного фонду), яка виконується за матеріалами цифрової картографічної основи експлуатаційної організації.

На етапі оцінки шкоди формула (4.2) застосовується до поля $C_{oil}(x, y, t)$ для одержання просторового розподілу інтегральної шкоди $D(x, y, t)$, а формула (4.8) дає економічний еквівалент очікуваних збитків.

На етапі вибору технологій для кожної зони підбирається технологія за матрицею рис. 4.4 з урахуванням наявних бюджетних обмежень, особливостей рельєфу, типу землекористування та чутливості сусідніх рецепторів. Сумарний бюджет ремедіаційного плану зіставляється з $E[D_{econ}]$ у рамках EVPI-аналізу розділу 2 для прийняття остаточного рішення про обсяг втручання.

На етапі моніторингу забезпечується практичне виконання плану та збір даних для калібрування моделі: мережа спостережних свердловин розгортається з густиною (4.7); інструментальний контроль ведеться через газохроматографію з мас-спектрометричним детектуванням, біоіндикацію та дистанційне зондування. Принципово важливою є наявність зворотного зв'язку з блоком оцінки джерела (червоний штриховий цикл на рис. 4.5): фактичні значення концентрацій у спостережних свердловинах, спостережувані темпи зниження C_{oil} у часі та ефективність ремедіаційних заходів використовуються для байєсівського оновлення розподілів параметрів рівня I моделі розділу 2 (зокрема, $A_0, \mu_\infty, k_f, n, \alpha$). На кожному наступному циклі аварійних подій епістемічна невизначеність оцінок знижується. Така архітектура з зворотним зв'язком переводить запропоновану методику з одноразового інструменту у платформу безперервного навчання, що відповідає вимогам ДСТУ ISO 31000:2018 та API RP 1175 до систем менеджменту ризиків нафтотранспортних об'єктів [100].

Реалізація зворотного зв'язку вимагає визначення технічного протоколу байєсівського оновлення. Апостеріорний розподіл параметра θ (де θ може позначати, наприклад, коефіцієнт фільтрації k_f або пористість n) після

отримання нового спостереження $y_t = C_{oil}(x_j, t)$ у свердловині j визначається за теоремою Байєса:

$$\pi(\theta | y_t) \propto \mathcal{L}(y_t | \theta) \cdot \pi_0(\theta), \quad (4.9)$$

де $\pi_0(\theta)$ – апіорний розподіл (визначений на основі лабораторних аналізів ґрунту або значень за замовчуванням з попередніх аварій), $\mathcal{L}(y_t | \theta)$ – функція правдоподібності, що пов'язує спостережувану концентрацію з модельним прогнозом через похибку вимірювання: $y_t = C_{oil}^{(model)}(x_j, t; \theta) + \varepsilon$, $\varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2)$. Оскільки аналітичний розв'язок розділу 3 забезпечує швидке (секунди) обчислення $C_{oil}^{(model)}$ для будь-якого набору параметрів, реалізація оновлення (4.9) методом Монте-Карло (наприклад, Markov Chain Monte Carlo або Sequential Monte Carlo) є обчислювально здійсненою в умовах реального часу, що й дозволяє інтегрувати її в оперативний інструментарій аварійно-відновлювальної служби [101, 102].

4.6 Параметричні дослідження впливу ключових факторів на обсяг втрат та екологічний ареал

Розроблена й верифікована в розділах 2–3 модель дозволяє не лише оцінити наслідки конкретної аварії, а й систематично дослідити, як керуючі параметри джерела та середовища визначають масштаб екологічної шкоди.

Нижче наведено результати серії розрахунків, виконаних для трьох найважливіших з інженерного погляду факторів – діаметра наскрізного дефекту d , робочого тиску P та проникності ґрунту k . Усі залежності одержано перерахунком визначених співвідношень: рівняння витрати (3.25) з фізико-геометричною нелінійністю (2.3), трифазного інтеграла обсягу (2.5)–(2.10), нелінійного зворотного зв'язку (3.26) та методики зонування (підрозділ 4.3). Розрахунки проведено для медіанного сценарію системи «Дружба» (табл. 2.1); змінювався лише досліджуваний параметр за фіксованих інших.

4.6.1 Вплив діаметра наскрізного дефекту

Діаметр дефекту входить у модель через площу отвору $A_0 = \pi d^2/4$ та відносну довжину каналу L/d_h , що визначає гідродинамічний режим (рис. 2.3). Результати розрахунку для діапазону $d = 5 - 30$ мм, характерного для корозійних і механічних пошкоджень магістралей, наведено в табл. 4.6 та на рис. 4.6.1.

Таблиця 4.6 – Вплив діаметра дефекту на показники витoku ($P = 4,0$ МПа, медіанний сценарій)

d , мм	Q_0 , л/с	V , м ³	V_{eff} , м ³	$S_{\text{актив}}$, га	$Q_{\text{уст}}^{\text{суп}}$, л/с	$Q_{\text{уст}}^{\text{сугл}}$, л/с
5	1,1	5,6	3,1	0,14	1,12	0,18
8	3,0	7,9	4,3	0,17	2,64	0,19
10	4,6	9,8	5,4	0,20	3,82	0,19
16	11,4	17,8	9,8	0,30	7,15	0,19
20	17,7	25,4	14,0	0,38	8,68	0,19
25	27,7	37,2	20,5	0,49	9,80	0,19
30	39,9	51,7	28,4	0,61	10,35	0,19

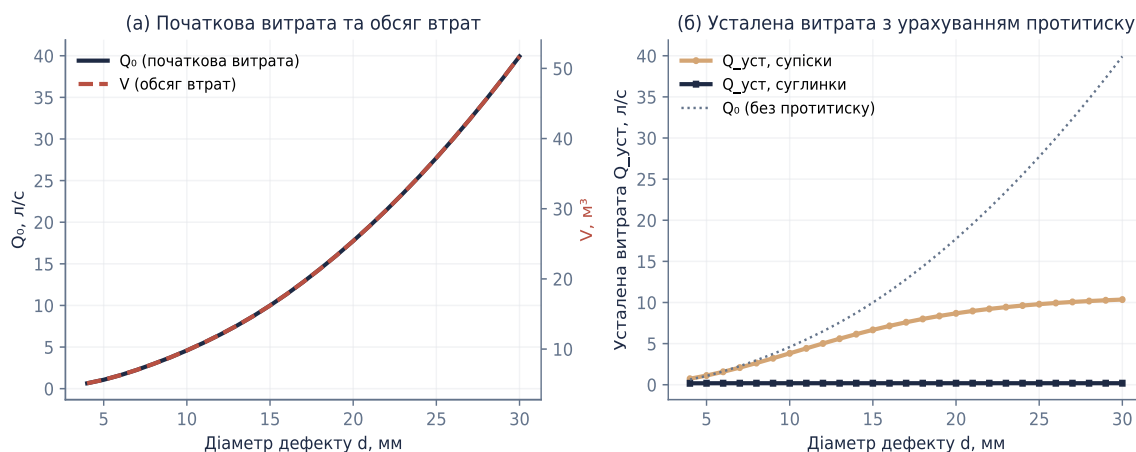


Рисунок 4.6 – Вплив діаметра наскрізного дефекту: (а) початкова витрата Q_0 та обсяг втрат V ; (б) усталена витрата з урахуванням фільтраційного протитиску для супісків і суглинків

Аналіз залежностей виявляє дві принципові закономірності. По-перше, початкова витрата зростає квадратично з діаметром ($Q_0 \propto d^2$): збільшення діаметра вдвічі (з 10 до 20 мм) підвищує Q_0 приблизно вчетверо (з 4,6 до 17,7 л/с), а сумарний обсяг втрат – з 9,8 до 25,4 м³. Відповідно площа активного

втручання зростає з 0,20 до 0,38 га, тобто наближено пропорційно $V^{2/3}$ (підрозділ 4.3).

По-друге, урахування фільтраційного протитиску (рис. 4.6.1, б) розкриває нетривіальний ефект: у суглинках усталена витрата практично не залежить від діаметра дефекту (стабілізується на рівні $\approx 0,19$ л/с для всього діапазону d). Це означає, що в слабопроникних ґрунтах пропускну здатність системи обмежує не отвір, а здатність ґрунту прийняти нафту – «вузьким місцем» стає середовище, а не дефект. Натомість у супісках усталена витрата зростає з діаметром, поступово насичуючись на рівні ≈ 10 л/с через посилення зворотного протитиску за великих витрат. Цей результат має безпосереднє практичне значення: оцінка обсягу втрат виключно за геометрією дефекту (класичний підхід) є коректною лише для високопроникних ґрунтів і суттєво завищує витік у суглинках та глинах [103].

Окремо слід наголосити на діагностичному наслідку: у суглинках усталена витрата ($\approx 0,2$ л/с) швидко опускається нижче порогу чутливості параметричних систем виявлення витоків (СВВ), зокрема типу E-RTTM, які контролюють баланс тиску й витрати на кінцях ділянки. Це перетворює аварію на тривалий прихований витік з накопиченням екологічної шкоди до моменту виявлення на поверхні – що додатково обґрунтовує пріоритет внутрішньотрубно́ї діагностики (підрозділ 2.4.2) та розміщення спостережних свердловин за градієнтним критерієм (підрозділ 4.3).

4.6.2 Вплив робочого тиску середовища

Робочий тиск впливає на витік подвійно: безпосередньо – через рушійний перепад у рівнянні (3.25), де $Q_0 \propto \sqrt{P}$, та опосередковано – через пружно-пластичне розкриття дефекту $A(P)$ за формулою (2.3), яка є власним внеском роботи. Результати для діапазону $P = 2 - 6$ МПа (звичайного для магістральних нафтопроводів) наведено в табл. 4.7 та на рис. 4.6.2.

Таблиця 4.7 – Вплив робочого тиску на показники виток ($d = 10$ мм, медіанний сценарій)

P , МПа	приріст $A(P)/A_0 - 1$, %	Q_0 , л/с	V , м ³
2	4,4	3,1	8,0
3	7,2	3,9	8,9
4	10,2	4,6	9,8
5	13,3	5,3	10,6
6	16,5	5,9	11,4

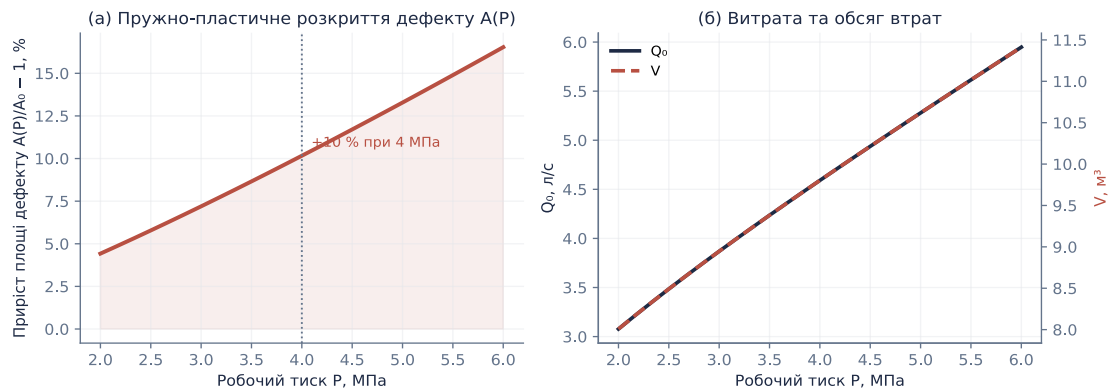


Рисунок 4.7 – Вплив робочого тиску: (а) відносний приріст площі дефекту $A(P)/A_0$ внаслідок пружно-пластичного розкриття; (б) початкова витрата Q_0 та обсяг втрат V

Розкриття дефекту під тиском зростає монотонно й нелінійно: від $+4,4\%$ за $P = 2$ МПа до $+16,5\%$ за $P = 6$ МПа, причому за характерного робочого тиску 4 МПа приріст площі становить $\approx 10\%$, що повністю узгоджується з результатом підрозділу 2.2.2. Саме ця складова відрізняє запропоновану модель від лінеаризованих підходів: без урахування $A(P)$ витрата за високих тисків систематично занижується. Сукупна дія двох механізмів ($\sqrt{P}$ у рівнянні витрати та $A(P)$) робить залежність $Q_0(P)$ помітно надлінійною – за зростання тиску втричі (з 2 до 6 МПа) витрата збільшується майже вдвічі (з 3,1 до 5,9 л/с), а обсяг втрат – з 8,0 до 11,4 м³. Це обґрунтовує зниження робочого тиску для зменшення екологічних наслідків аварій [104].

4.6.3 Вплив проникності ґрунту

Проникність визначає коефіцієнт п'єзопровідності $\chi = k/(\mu\beta^*)$ (3.3), який керує швидкістю формування фільтраційного протитиску й через нього –

усталеною витратою. Розрахунки виконано для діапазону $k \approx 1 - 1000$ мД (від щільних суглинків до супісків і пісків), що охоплює два з половиною порядки величини; дві валідовані точки – супіски та суглинки – позначено окремо. Результати наведено в табл. 4.8 та на рис. 4.6.3.

Таблиця 4.8 – Вплив проникності ($r = 1,5$ м, $d = 10$ мм, $P = 3$ МПа)

k , мД	χ , м ² /с	t^* , с	$Q_{уст}/Q_0$, %	$P_{зовн}^{уст}$, МПа
1,0	$1 \cdot 10^{-4}$	5625	3,4	3,00
3,0	$3 \cdot 10^{-4}$	1875	6,5	2,99
10	$1 \cdot 10^{-3}$	562	13,1	2,95
30	$3 \cdot 10^{-3}$	188	24,1	2,83
100	$1 \cdot 10^{-2}$	56	42,7	2,45
300	$3 \cdot 10^{-2}$	19	61,8	1,85
990	$9,8 \cdot 10^{-2}$	6	78,2	1,16

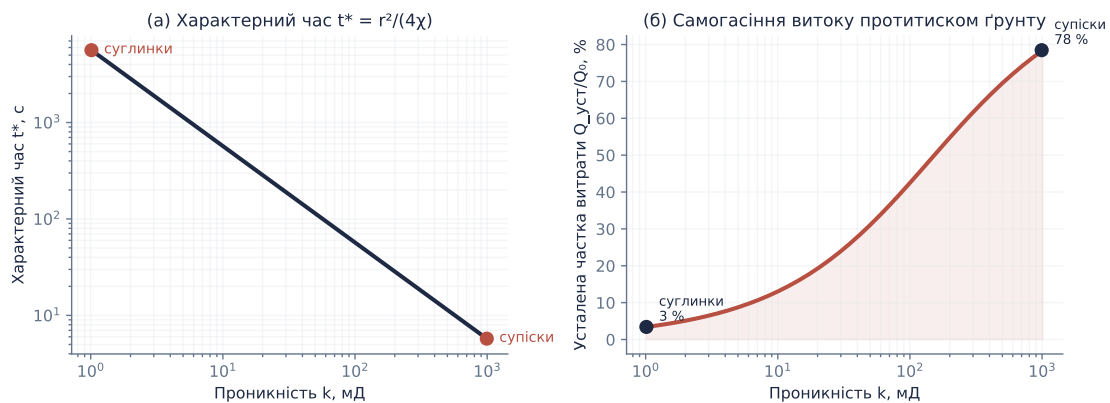


Рисунок 4.8 – Вплив проникності ґрунту: (а) характерний час $t^* = r^2/(4\chi)$ у логарифмічних координатах; (б) усталена частка витрати $Q_{уст}/Q_0$, що ілюструє самогасіння витоку протитиском

Характерний час процесу обернено пропорційний проникності ($t^* \propto 1/k$) і змінюється на три порядки – від ≈ 6 с для супісків до ≈ 5600 с для суглинків, що відтворює ключовий результат підрозділу 3.3. Найважливіша ж закономірність стосується усталеної витрати: зі зниженням проникності частка $Q_{уст}/Q_0$ монотонно спадає з $\approx 78\%$ (супіски) до $\approx 3,4\%$ (суглинки), тоді як рівноважний протитиск $P_{зовн}$ асимптотично наближається до робочого тиску трубопроводу (3,0 МПа). Це кількісно підтверджує нетривіальний фізичний висновок роботи: слабопроникний ґрунт сам виступає ефективним

гідродинамічним демпфером, який за рахунок повільного відтоку нафти нарощує протитиск і «перекриває» витік більш ніж у 20 разів. Отже, за інших рівних умов аварія на ділянці зі щільними суглинистими ґрунтами супроводжується суттєво меншим обсягом вільної нафти, ніж у супісках, – попри однакову геометрію дефекту.

Межі застосовності лінійної моделі. Наведені залежності одержано в межах лінійного закону Дарсі (3.1), який припускає незмінність структури ґрунтового скелета. У безпосередній припоровій зоні, де градієнт тиску максимальний, ця умова може порушуватися: за перевищення критичного градієнта, що визначається міцністю скелета на зсув, розвивається суфозія (флюїдизація) ґрунту з руйнуванням структури, утворенням каверн і локальних каналів. Класичний критерій Терцагі дає для водонасиченого суглинку з нафтою як поровим флюїдом орієнтовний поріг [105].

$$\left(\frac{dP}{dl}\right)_{\text{кр}} = (\rho_s - \rho_f) g (1 - n) \approx 1,1 \cdot 10^4 \text{ Па/м} \quad (i_{\text{кр}} \approx 1,4),$$

перевищення якого локально знижує фільтраційний опір і може стрибкоподібно підвищувати витрату. Оскільки суфозія діє у протилежному до самогасіння напрямі, обчислена усталена витрата у слабкопроникних ґрунтах є консервативною нижньою оцінкою реального витоку; коректне врахування суфозійних процесів потребує зв'язаної гідро-механічної (ерозійної) постановки й окреслює напрям подальших досліджень (узгоджено з переліком обмежень моделі, підрозділ 3.6).

4.6.4 Зв'язок джерела з обсягом ремедіаційних робіт

Об'єднання встановлених залежностей дозволяє побудувати інженерну номограму, що безпосередньо пов'язує параметри джерела (d , P) з обсягом ремедіаційних робіт – площею активного втручання S (зони 0, I, II за підрозділом 4.3). Номограму наведено на рис. 4.6.4.

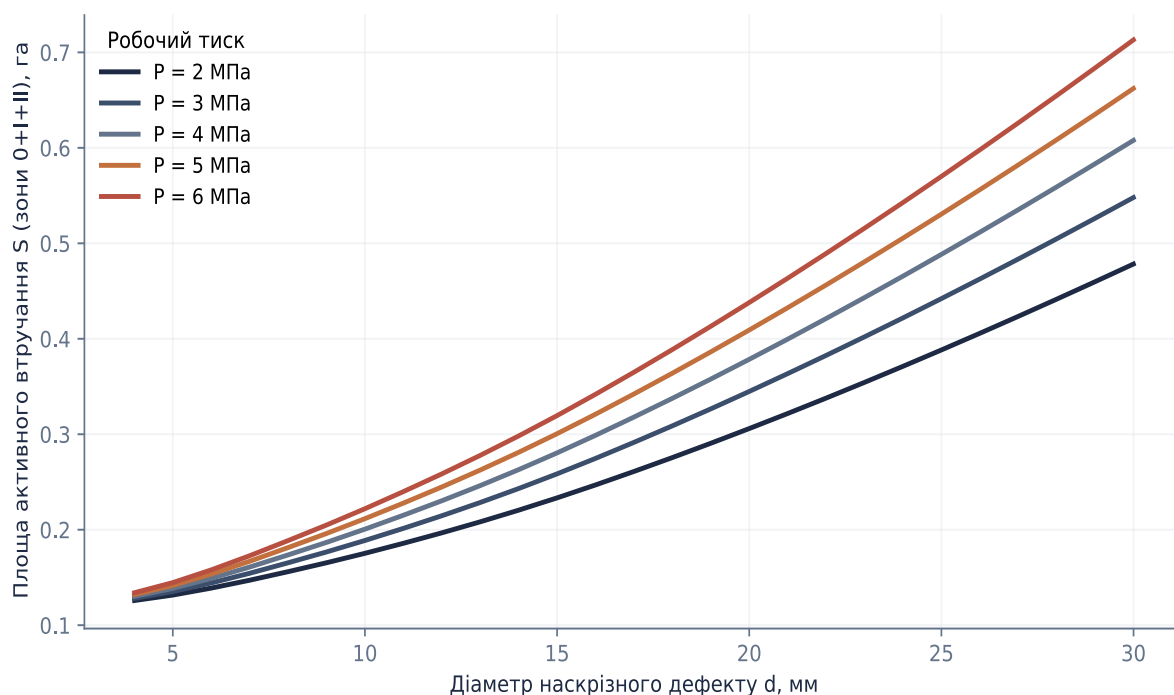


Рисунок 4.9 – Номограма площі активного втручання S як функції діаметра дефекту d за різних робочих тисків P

Номограма є практичним інструментом попередньої оцінки: за відомими діаметром дефекту (з даних внутрішньотрубної діагностики) та робочим тиском ділянки вона дає негайну оцінку очікуваної площі забруднення, що потребує активного відновлення. Наприклад, для дефекту $d = 20$ мм за $P = 4$ МПа площа активного втручання становить $\approx 0,38$ га, а зростання тиску до 6 МПа збільшує її приблизно на 15 %. Домінуючий вплив діаметра (крутіші криві) порівняно з тиском узгоджується з результатами глобального аналізу чутливості (підрозділ 2.4.2), де площа дефекту пояснює 86,4 % дисперсії обсягу втрат.

Проведені параметричні дослідження підтвердили, що найбільший вплив на масштаби аварійного витоку та площу забруднення має діаметр дефекту, оскільки саме він визначає початкову витрату нафти та загальний обсяг її втрат. Робочий тиск трубопроводу також істотно впливає на розвиток аварії, причому цей вплив посилюється за рахунок пружно-пластичного розкриття дефекту. Водночас проникність ґрунту визначає характер взаємодії між витоком і пористим середовищем: у слабопроникних ґрунтах формується значний фільтраційний протитиск, який суттєво обмежує подальше витікання нафти, тоді

як у високопроникних середовищах процес поширення відбувається значно інтенсивніше [106].

Отримані залежності мають не лише теоретичне, а й практичне значення, оскільки дозволяють ще на початковому етапі аварії оцінити можливі масштаби забруднення та обґрунтувати першочергові заходи з локалізації й ліквідації його наслідків. Побудована номограма може використовуватися як інженерний інструмент для оперативної оцінки площі активного втручання за відомими параметрами дефекту та режиму роботи трубопроводу. Результати виконаних багатоваріантних розрахунків підтверджують працездатність розробленої математичної моделі та розширюють можливості її практичного застосування під час прогнозування наслідків аварійних витоків нафти.

Таким чином, результати, отримані у попередніх розділах дисертації, інтегровані в єдину інженерно-екологічну методику підтримки прийняття рішень під час ліквідації наслідків аварійних витоків нафти. На відміну від існуючих підходів, запропонована методика поєднує стохастичне прогнозування параметрів витoku, математичне моделювання поширення нафти у ґрунтовому середовищі, оцінювання екологічних наслідків, просторово-часове зонування території та вибір технологій ремедіації. Це забезпечує послідовний перехід від математичного опису аварії до практичного прийняття інженерних рішень [107].

Висновки до розділу 4

На основі систематизованих автором [стаття 3] даних про порушення герметичності лінійної частини магістральних нафтопроводів виділено п'ять основних категорій причин аварійних розгерметизацій з частотами: зовнішні фізичні впливи (включаючи кримінальні врізки) – 34,7 %; порушення норм будівництва і ремонту – 24,7 %; корозійні пошкодження – 23,5 %; порушення технічних умов виготовлення – 12,4 %; помилкові дії експлуатаційного персоналу – 4,7 % (сума – 100 %). Встановлено, що антропогенно зумовлені чинники сумарно становлять 64,1 %, а деградаційні механізми – 35,9 %.

Отримана структура забезпечує емпіричне підґрунтя для калібрування морфологічної декомпозиції коефіцієнта витрати μ_{∞} у стохастичній моделі розділу 2 та обґрунтовує використання двох режимів розподілу часу виявлення аварії *tdetect*.

Систематизовано механізми негативного впливу нафтового забруднення на чотири основні підсистеми агроєкосистеми – ґрунтову матрицю, мікробіоту, рослинний покрив і мезофауну. Запропоновано безрозмірний індикатор екологічної шкоди $D(\text{Coil})$ як зважену суму логістичних функцій відгуку (формули (4.2), (4.3)) із повним набором параметрів (табл. 4.1). Встановлено контрольні значення індикатора: $D(1,0 \%) = 0,59$ та $D(5,0 \%) = 0,85$. На відміну від нормативних показників ГДК, запропонований індикатор забезпечує безперервне кількісне оцінювання ступеня екологічної небезпеки з урахуванням сумарної реакції різних компонентів агроєкосистеми.

Гармонізовано визначення концентрації нафтопродуктів між математичною моделлю фільтрації (розділ 3) та моделлю екологічної оцінки (розділ 4) шляхом введення узгодженого ланцюга перетворень «надлишковий тиск $P(x,y,t) \rightarrow$ швидкість Дарсі $v \rightarrow$ насиченість пор нафтою $\text{Soil} \rightarrow$ масова концентрація Coil » (формули (4.1a–в)). Запропонований підхід усуває неоднозначність між полем гідродинамічного тиску та фактичним полем забруднення і забезпечує коректне використання концентрації як вхідного параметра функцій оцінювання екологічної шкоди.

Розроблено інженерну методику просторово-часового зонування забрудненої території, яка передбачає виділення п'яти функціональних зон (LNAPL-ядро 0, інтенсивна ремедіація I, фіторемедіація II, моніторинг III, фонові IV). Обґрунтовано граничне значення $C_{\text{sat}}(S_r)$ для ядра забруднення через залишкову насиченість LNAPL. Для медіанного сценарію аварії ($V_{50} = 16,6 \text{ м}^3$) на ділянці «Долина – Дрогобич» через 3–5 діб після виявлення визначено орієнтовні радіуси зон: $r_0 \approx 4\text{--}6 \text{ м}$, $r_I \approx 13\text{--}17 \text{ м}$, $r_{II} \approx 26\text{--}34 \text{ м}$, $r_{III} \approx 52\text{--}67 \text{ м}$. Встановлено, що площа активної ремедіації (зони 0–II) становить 0,21–0,36 га, тоді як для консервативного сценарію V_{95} вона збільшується у 1,8–2,2 рази.

Зонування виконано для всіх квантильних оцінок стохастичної моделі (P_{25} , P_{50} , P_{75} , P_{95}), що забезпечує врахування невизначеності параметрів аварії.

Сформовано відображення зон забруднення на сукупність технологій ремедіації у координатах «концентрація – інвазивність (ресурсоемність)». Для умов Прикарпатського регіону обґрунтовано рекомендовану послідовність природоохоронних заходів: зона 0 – екскавація з термічною обробкою; зона I – *in situ* біовентиляція або електрокінетична десорбція; зона II – фіторемедіація із використанням енергетичних культур з подальшою конверсією біомаси у біопаливо; зони III–IV – довгостроковий екологічний моніторинг. Економічну доцільність запропонованих заходів оцінено через функцію очікуваної шкоди (4.8) із використанням EVPI-аналізу, розробленого у розділі 2.

Узагальнено результати всіх етапів дослідження у вигляді послідовної інженерно-екологічної методики підтримки прийняття рішень, яка забезпечує перехід від реєстрації аварії та стохастичної оцінки параметрів витoku до математичного моделювання поширення забруднення, зонування території, оцінювання екологічної шкоди, вибору технологій ремедіації та організації післяаварійного моніторингу. Передбачений зворотний зв'язок із блоком оцінювання джерела аварії дає можливість уточнювати параметри стохастичної моделі за результатами моніторингових спостережень, що забезпечує її адаптацію до реальних умов експлуатації трубопроводу.

Результати розділу завершують формування науково-прикладної концепції дисертаційної роботи, у межах якої математичні моделі аварійного витoku та поширення нафти, розроблені у розділах 2 і 3, інтегровано із методами екологічного оцінювання та вибору технологій ремедіації в єдину систему підтримки інженерно-екологічних рішень. На відміну від існуючих підходів, запропонована методика забезпечує комплексне врахування невизначеності параметрів аварії, прогнозування просторового розвитку забруднення та обґрунтування післяаварійних природоохоронних заходів, що підвищує достовірність прогнозування екологічних наслідків і ефективність планування аварійно-відновлювальних робіт.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення достовірності прогнозування аварійних витоків нафти з магістральних нафтопроводів та оцінювання їх екологічних наслідків шляхом розроблення стохастичної моделі джерела витоку, математичної моделі поширення нафти у ґрунтовому середовищі та комплексної інженерно-екологічної методики підтримки прийняття рішень щодо локалізації й ліквідації наслідків аварій.

Основні результати дослідження полягають у такому:

– На основі бібліометричного аналізу наукових публікацій бази Scopus із використанням когнітивного картографування (VOSviewer) встановлено, що сучасні дослідження аварійних витоків нафти розвиваються переважно у двох ізольованих напрямках – інженерно-гідравлічному та еколого-геохімічному. Виявлено недостатній рівень інтеграції моделей прогнозування витоку, процесів міграції нафти та оцінювання екологічних наслідків, що обґрунтувало необхідність розроблення комплексної математичної моделі прогнозування аварій.

– Розроблено стохастичну модель прогнозування аварійного витоку нафти, яка враховує невизначеність геометричних параметрів дефекту, коефіцієнта витрати, часу виявлення аварії та інших випадкових чинників. На відміну від детермінованих моделей, запропонований підхід забезпечує визначення квантильних оцінок обсягу витоку (P_{25} , P_{50} , P_{75} , P_{95}), що дозволяє перейти до ризик-орієнтованого прогнозування розвитку аварійних сценаріїв. Для медіанного сценарію отримано $P_{50} = 16,6 \text{ м}^3$, для консервативного – $P_{95} = 52,2 \text{ м}^3$.

– Виконано параметричні дослідження та глобальний аналіз чутливості стохастичної моделі ($R^2 = 0,96$), за результатами яких встановлено, що найбільший вплив на прогнозований обсяг витоку має площа дефекту (86,4 % загальної дисперсії), тоді як час виявлення аварії формує ще 8,1 %. На основі

показника очікуваної цінності досконалої інформації (EVPI) розроблено підхід до економічного обґрунтування впровадження систем виявлення витоків та визначено економічно доцільний діапазон інвестицій 130–380 тис. USD для контрольованої ділянки магістрального нафтопроводу довжиною 200 км.

– Розроблено математичну модель поширення нафти у пористому ґрунтовому середовищі на основі узагальненого закону Дарсі та рівняння нерозривності. Отримано аналітичний розв'язок крайової задачі у вигляді функції Гріна, запропоновано алгоритм урахування нелінійного впливу фільтраційного опору та встановлено закономірності формування фронту забруднення для різних типів ґрунтів. Показано, що у малопроникних суглинках витрата зменшується більш ніж у 20 разів, тоді як у супісках інтенсивність витоку зменшується приблизно на 18 %, але суттєво зростає швидкість міграції нафти.

– Систематизовано статистичні дані щодо причин аварійних розгерметизацій магістральних нафтопроводів та встановлено, що антропогенно зумовлені чинники становлять 64,1 %, а деградаційні механізми – 35,9 % усіх аварій. Отримані результати використано для калібрування стохастичної моделі шляхом уточнення морфології дефектів, коефіцієнта витрати та параметрів часу виявлення аварії.

– Розроблено інженерну методику комплексного оцінювання екологічних наслідків аварійних витоків нафти, яка включає інтегральний безрозмірний показник екологічної шкоди, методику просторово-часового зонування забрудненої території на п'ять функціональних зон, а також систему вибору технологій ремедіації залежно від рівня забруднення. Для медіанного сценарію аварії визначено орієнтовні межі зон забруднення та встановлено, що площа території активної ремедіації становить 0,21–0,36 га, тоді як для консервативного сценарію збільшується у 1,8–2,2 раза.

– Узагальнено результати дослідження у вигляді комплексної інженерно-екологічної методики підтримки прийняття рішень, яка поєднує стохастичне прогнозування параметрів аварійного витоку, математичне

модельовання міграції нафти у ґрунтовому середовищі, оцінювання екологічної шкоди, просторово-часове зонування території, вибір технологій ремедіації та післяаварійний моніторинг. На відміну від існуючих підходів, запропонована методика забезпечує послідовний перехід від прогнозування розвитку аварії до обґрунтування інженерно-екологічних рішень із урахуванням невизначеності параметрів аварії та можливістю подальшого байєсівського уточнення параметрів моделей за результатами моніторингових спостережень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні комплексного науково-методичного забезпечення прогнозування аварійних витоків нафти, оцінювання їх екологічних наслідків та підтримки прийняття інженерних рішень під час експлуатації магістральних нафтопроводів. Запропоновані моделі та методики можуть бути використані операторами трубопровідного транспорту, природоохоронними службами, органами цивільного захисту та проєктними організаціями під час оцінювання ризиків, планування аварійно-відновлювальних заходів і вибору технологій відновлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Чабанов А. М. Транспортна безпека в Україні як складова державної політики у сфері національної безпеки : дис. ... канд. Київ, 2025. 263 с. URL: <https://maup.com.ua/assets/files/dis/chabanov/chabanov-disertaciya.pdf>.
2. GENERAL PRINCIPLES OF FORECASTING THE RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY / Y. Semchuk et al. PRECARPATHIAN BULLETIN OF THE SHEVCHENKO SCIENTIFIC SOCIETY Number. 2023. No. 18(68). P. 146–156. URL: [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2023-18\(68\)-146-156](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2023-18(68)-146-156) (date of access: 28.05.2026).
3. РОЗРОБЛЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ОЧИЩЕННЯ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ, ОБ'ЄКТАМИ НАФТОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ, КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ / О. М. Мандрик та ін. Ecological Safety and Balanced Use of Resources. 2022. № 1(25). С. 31–41. URL: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-1\(25\)-31-41](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-1(25)-31-41) (дата звернення: 28.05.2026).
4. ENVIRONMENTAL SAFETY IN THE OIL AND GAS INDUSTRY / N. Zhuravska et al. Naukovyi visnyk Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. 2023. No. 1. P. 63–68. URL: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-63-68> (date of access: 28.05.2026).
5. Khokhlov A., Khokhlova L. Purification of sandy soils from oil with the use of biosorption complexes. Ecological Sciences. 2020. Vol. 33, no. 6. P. 86–90. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.12> (date of access: 28.05.2026).
6. Mongeon P., Paul-Hus A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. Scientometrics. 2016. Vol. 106, No. 1. P. 213–228. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>
7. Burnham J. F. Scopus database: a review. Biomedical Digital Libraries. 2006. Vol. 3, No. 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1742-5581-3-1>

8. Song Y., Li R., Chen G., Yan B., Zhong L., Wang Y., Li Y., Li J., Zhang Y. Bibliometric Analysis of Current Status on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soils during 2000–2019. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, No. 16. Art. 8859. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18168859>
9. Efficient pipeline for image-based patient-specific analysis of cerebral aneurysm hemodynamics: technique and sensitivity / J. R. Cebral et al. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2005. Vol. 24, no. 4. P. 457–467. URL: <https://doi.org/10.1109/tmi.2005.844159> (date of access: 30.01.2026).
10. Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures – A technical review / J. Bhandari et al. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015. Vol. 37. P. 39–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.06.008> (date of access: 30.01.2026).
11. Giustolisi O., Savic D., Kapelan Z. Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2008. Vol. 134, no. 5. P. 626–635. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2008\)134:5\(626\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:5(626)) (date of access: 30.01.2026).
12. Desai J. D., Banat I. M. Microbial production of surfactants and their commercial potential. *Microbiology and molecular biology reviews : MMBR*. 1997. Vol. 61, no. 1. P. 47–64. URL: <https://doi.org/10.1128/.61.1.47-64.1997> (date of access: 30.01.2026).
13. Impact of Shale Gas Development on Regional Water Quality / R. D. Vidic et al. *Science*. 2013. Vol. 340, no. 6134. P. 1235009. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1235009> (date of access: 30.01.2026).
14. Varjani S. J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 223. P. 277–286. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037> (date of access: 30.01.2026).
15. Van Eck N. J., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*. 2010. Vol. 84, No. 2. P. 523–538. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

16. Van Eck N. J., Waltman L. Visualizing bibliometric networks. *Measuring Scholarly Impact: Methods and Practice*. Cham : Springer, 2014. P. 285–320. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13
17. Kwilinski A., Khaustova V., Trushkina N. Transformation of the Energy Infrastructure in the Context of the Implementation of the European Green Deal : scientific monograph. 2022.
18. Kyzym M. et al. Analysis of Trends in the Development of Scientific Research in the Field of Defining the Determinants of Ensuring the Fuel Energy Security. 2020.
19. Liu S., Qiu M., Zhao G. et al. Numerical Simulation of Oil Pipeline Leakage Diffusion in Dashagou Yellow River Crossing Section. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 2. Art. 974. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020974>
20. Zhang H. G., Mu Z. Numerical investigation on impacts of leakage sizes and pressures of fluid conveying pipes on aerodynamic behaviors. *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19, No. 7. P. 5434–5447. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2017.17389>
21. Shi B., Ngueleu S. K., Rezanezhad F. et al. Sorption and Desorption of the Model Aromatic Hydrocarbons Naphthalene and Benzene: Effects of Temperature and Soil Composition. *Frontiers in Environmental Chemistry*. 2020. Vol. 1. Art. 581103. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvc.2020.581103>
22. Руденко, Т. В. Практикум з гідравліки [Текст] : навч. посіб. / Т. В. Руденко, М. В. Красота, Ю. В. Кулешков ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун- т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 201 с.
23. Moustafa S Darweesh. Predicting the head leakage behaviour of cracks in pipe elbows. *Water SA*. 2022. Vol. 48, no. 1 January. URL: <https://doi.org/10.17159/wsa/2022.v48.i1.3910>
24. Impact of Orifice-to-Pipe Diameter Ratio on Leakage Flow: An Experimental Study / T. Yu et al. *Water*. 2019. Vol. 11, no. 10. P. 2189. URL: <https://doi.org/10.3390/w11102189> (date of access: 28.05.2026).

25. Hussain A., Ghosh S. CFD Simulation of Two Phase Leak Flow Through Circular and Rectangular Circumferential Cracks from High Pressure High Temperature Pipelines. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. 2025. P. 2159–2165. URL: <https://doi.org/10.38124/ijisrt/25jun1623> (date of access: 28.05.2026).
26. CFD Analysis of Flow Characteristics and Diagnostics of Leaks in Water Pipelines / P. F. Mushumbusi et al. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2024. Vol. 14, no. 5. P. 16272–16280. URL: <https://doi.org/10.48084/etasr.8146> (date of access: 28.05.2026).
27. Analysis and nomograph development for a leaky pipeline carrying plug flow based on numerical modeling and experimental validation / H. Ferroudji et al. *Scientific Reports*. 2026. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-36759-w> (date of access: 28.05.2026).
28. Impact of Main Pipe Flow Velocity on Leakage and Intrusion Flow: An Experimental Study / Y. Shao et al. *Water*. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 118. URL: <https://doi.org/10.3390/w11010118> (date of access: 28.05.2026).
29. БІЛАК Ю., ГЕРАЩЕНКОВ Е. БАГАТОРІВНЕВА ДЕКОМПОЗИЦІЯ ДЛЯ АДАПТИВНОГО ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Т. 349, № 2. С. 51–62. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-7> (дата звернення: 28.05.2026).
30. Sharafodin S., Latifi M., Ghodsian M. Experimental Investigation of Leakage Flow Rate and Fluidisation beneath Polyethylene Pipes in Non-Uniform Soils. *Water*. 2024. Vol. 16, no. 8. P. 1156. URL: <https://doi.org/10.3390/w16081156> (date of access: 28.05.2026).
31. Beck, S.B.M., Bagshaw, N.M. and Yates, J.R. (2005) Explicit equations for leak rates through narrow cracks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82 (7). pp. 565-570. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2004.12.005>
32. Mohammed A., Alhamdany A. A., Khenyab A. Y. Effect of the Material of Oil Pipelines with 90° Elbows on the Degree of Erosion Using Computational Fluid

- Dynamics. Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2024. Vol. 11, no. 4. P. 965–975. URL: <https://doi.org/10.18280/mmep.110413> (date of access: 28.05.2026).
33. Twombly E., Brust F. Effect of Crack Face Pressure Distribution on Crack Opening Displacements and Associated Leak Rates. Office of Nuclear Regulatory Research, Engineering Mechanics Corporation of Columbus. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2107/ML21077A051.pdf>.
34. Study of Supercritical CO₂ Pipeline Flow Leaks: Effects of Equation of State, Impurity, and Outlet Diameter / K. Kant et al. Fluids. 2026. Vol. 11, no. 4. P. 96. URL: <https://doi.org/10.3390/fluids11040096> (date of access: 28.05.2026).
35. Investigating Light Hydrocarbon Pipeline Leaks: A Comprehensive Study on Diffusion Patterns and Energy Safety Implications / S. Zhang et al. Energies. 2025. Vol. 18, no. 12. P. 3151. URL: <https://doi.org/10.3390/en18123151> (date of access: 28.05.2026).
36. Khuzhayorov B. K., Burnashev V. F. Modelling the multiphase flow of an oil–gas–condensate system in porous media. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2001. Vol. 29, no. 1. P. 67–82. URL: [https://doi.org/10.1016/s0920-4105\(00\)00091-7](https://doi.org/10.1016/s0920-4105(00)00091-7) (date of access: 28.05.2026).
37. Modeling of the filtration processes in a rectangular area soils using the Darcy / A. Olijnyk et al. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, no. 10 (90). P. 24–30. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.116114> (date of access: 28.05.2026).
38. Burnashev V. F., Viswanathan K. K., Kaytarov Z. D. Mathematical Modeling of Multi-Phase Filtration in a Deformable Porous Medium. Computation. 2023. Vol. 11, no. 6. P. 112. URL: <https://doi.org/10.3390/computation11060112> (date of access: 28.05.2026).
39. Multiphase Fluid Flow through Fractured Porous Media Supported by Innovative Laboratory and Numerical Methods for Estimating Relative Permeability / S. T. Hussain et al. Energy & Fuels. 2021. Vol. 35, no. 21. P.

- 17372–17388. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01313> (date of access: 28.05.2026).
40. The Use of Numerical Flow and Transport Models in Environmental Analyses / M. T. van Genuchten et al. *Application of Soil Physics in Environmental Analyses*. Cham, 2014. P. 349–376. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-06013-2_15 (date of access: 28.05.2026).
41. Upward infiltration–evaporation method to estimate soil hydraulic properties / C. Peña-Sancho et al. *Hydrological Sciences Journal*. 2017. Vol. 62, no. 10. P. 1683–1693. URL: <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1343476> (date of access: 28.05.2026).
42. An experimental and modeling study on the penetration of spilled oil into thawing frozen soil / Z. Qu et al. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1039/d2em00368f> (date of access: 28.05.2026).
43. Optimal parameters for the Green-Ampt infiltration model under rainfall conditions / L. Chen et al. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2015. Vol. 63, no. 2. P. 93–101. URL: <https://doi.org/10.1515/johh-2015-0012> (date of access: 28.05.2026).
44. Qu Z. Infiltration of Spilled Oil in Soil under Various Environmental Conditions. Welcome to Spectrum: Concordia University Research Repository - Spectrum: Concordia University Research Repository. URL: https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/992652/1/QU_MA_F2023.pdf (date of access: 28.05.2026).
45. 4D microvelocimetry reveals multiphase flow field perturbations in porous media / T. Bultreys et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2024. Vol. 121, no. 12. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2316723121> (date of access: 28.05.2026).
46. The Effect of Heterogeneous Backfill Soil on Leakage Behavior of Hydrogen-Blended Natural Gas Pipelines / J. Ban et al. *ACS Omega*. 2026. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c12726> (date of access: 28.05.2026).

47. LEAK DETECTION IN SIMULATED WATER PIPE NETWORKS USING SVM / J. Mashford et al. *Applied Artificial Intelligence*. 2012. Vol. 26, no. 5. P. 429–444. URL: <https://doi.org/10.1080/08839514.2012.670974> (date of access: 28.05.2026).
48. Yan M. Comprehensive Review of Research on Buried Gas Pipeline Leakage. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2025. Vol. 16, no. 4.
49. Ждек А. Я. Оцінка втрат нафти від витоків при транспортуванні і розробка заходів їх скорочення : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.13. Івано-Франківськ, 2016. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/6954>
50. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 16 p. URL: <https://www.iso.org/standard/65694.html>
51. API RP 1175. Pipeline Leak Detection Program Management. 1st ed. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2015. URL: <https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/recommended-practice-1175>
52. Alsaydalani M. O. A. Influence of cavitation phenomenon on the hydraulic behavior of leaks in water distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2017. Vol. 66(5): 327–339. DOI: 10.2166/aqua.2017.013.
53. Belvederesi C., Thompson M.S., Komers P.E. Statistical analysis of environmental consequences of hazardous liquid pipeline accidents. *Heliyon*. 2018. Vol. 4, No. 11. Art. e00901. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00901>
54. Wang D., Dai L., Feng Q., Wang T., Yang X. Analysis and Comparison of Long-Distance Pipeline Failures. *Journal of Engineering*. 2017. Art. 3174636. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/3174636>
55. ISO 5167-2:2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 2: Orifice plates. Geneva: ISO, 2003. URL: <https://www.iso.org/standard/30190.html> **i**

56. Mohtadi-Bonab M.A. Effects of Different Parameters on Initiation and Propagation of Stress Corrosion Cracks in Pipeline Steels: A Review. *Metals*. 2019. Vol. 9, No. 5. Art. 590. DOI: <https://doi.org/10.3390/MET9050590>
57. Sarwar U., Mokhtar A.A., Muhammad M. et al. Enhancing pipeline integrity: a comprehensive review of deep learning-enabled finite element analysis for stress corrosion cracking prediction. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2024. Vol. 18, No. 1. Art. 2302906. DOI: <https://doi.org/10.1080/19942060.2024.2302906>
58. Zhang C., Ran M., Zheng W., Wang Y. Microstructural Effects in the Development of Near-Neutral pH Stress Corrosion Cracks in Pipelines. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 13. Art. 4372. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15134372>
59. Song Q., Peng H., Yao J., Luo M. Elastic–plastic fracture analysis of pressure pipelines with axial cracks based on the interaction integral method. *PLoS ONE*. 2024. Vol. 19(12): e0301015. DOI: 10.1371/journal.pone.0301015.
60. BS 7910:2019. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. London: BSI, 2019.
61. API 579-1 / ASME FFS-1. Fitness-For-Service. Washington, DC: American Petroleum Institute / ASME.
62. Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: American Elsevier, 1972. 764 p. (*Repr.: New York: Dover Publications, 1988*)
63. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of Heat in Solids. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959. 510 p.
64. Landage A. B., Keshari A. K. Groundwater Contaminant Transport FDM Modelling for Non-linear Freundlich and Langmuir Sorption with an Instantaneous Spill. 2016.
65. Yuan F., Zeng Y., Luo R., Khoo B. Numerical and experimental study on the generation and propagation of negative wave in high-pressure gas pipeline leakage. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 65. Art. 104129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104129>

66. Helton J.C., Davis F.J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2003. Vol. 81, No. 1. P. 23–69. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(03\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00058-9)
67. API Specification 5L: Specification for Line Pipe. 46th ed. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2018. URL: <https://www.api.org/products-and-services/standards/overview-of-2016-editions/specification-5l>
68. Sharifi A., Ranjbar S. F., Mousavi Alamdardehi S. A., Aslani N., Zarezadeh R., Majidi H., Asadi F. Genetic algorithm optimization of negative pressure wave method for robust real-time leak detection in long-distance pipelines. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15: 36429. DOI: 10.1038/s41598-025-20525-5.
69. Asselin E., Maguire M., Shoesmith D.W. Predicting the External Corrosion Rate of X60 Pipeline Steel. *Metals*. 2021. Vol. 11, No. 4. Art. 583. DOI: <https://doi.org/10.3390/MET11040583>
70. McKay M.D., Beckman R.J., Conover W.J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*. 1979. Vol. 21, No. 2. P. 239–245. DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1979.10489755>
71. Shu J. J. Modelling vaporous cavitation on fluid transients. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2003. Vol. 80(3): 187–195. DOI: 10.1016/S0308-0161(03)00025-5.
72. Saltelli A., Ratto M., Andres T. et al. Global Sensitivity Analysis: The Primer. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. 292 p. ISBN 978-0-470-05997-5. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470725184>
73. Sobol' I.M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments*. 1993. Vol. 1, No. 4. P. 407–414.
74. Howard R.A. Information Value Theory. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1966. Vol. 2, No. 1. P. 22–26. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSSC.1966.300074>

75. Rothery C., Strong M., Koffijberg H. et al. Value of Information Analytical Methods: Report 2 of the ISPOR Value of Information Analysis Emerging Good Practices Task Force. *Value in Health*. 2020. Vol. 23, No. 3. P. 277–286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jval.2020.01.004>
76. Geng B., Gu L., Liu J. Novel Methods for Modeling and Online Measurement of Effective Bulk Modulus of Flowing Oil. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 18924–18937. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968086>
77. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1943. 510 p. (Repr.: New York: Courier Corporation, 2015)
78. Polyanin A.D., Nazaikinskii V.E. Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press / Chapman and Hall, 2016. 1632 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/B19056>
79. van Genuchten M.Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980. Vol. 44, No. 5. P. 892–898. DOI: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1980.03615995004400050002X>
80. Seki K., Toride N., van Genuchten M.Th. Evaluation of a General Model for Multimodal Unsaturated Soil Hydraulic Properties. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2022. Vol. 70, No. 2. P. 179–194. DOI: <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0039>
81. Kargas G., Soulis K.X., Kerkides P. Implications of Hysteresis on the Horizontal Soil Water Redistribution after Infiltration. *Water*. 2021. Vol. 13, No. 19. Art. 2773. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13192773>
82. Jougnot D., Guarracino L., Soldi M. A Simple Hysteretic Constitutive Model for Unsaturated Flow. *Transport in Porous Media*. 2018. Vol. 121, No. 1. P. 253–268. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0920-2>
83. Ukalska-Jaruga A., Smreczak B. The Impact of Organic Matter on Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Availability and Persistence in Soils. *Molecules*. 2020. Vol. 25, No. 11. Art. 2470. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25112470>

- 84.Chen S., Liu Z., Hou S. et al. Glomalin-related soil protein reduces the sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by soils. *Chemosphere*. 2020. Vol. 261. Art. 127603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127603>
- 85.Bekele D.N., Bahar M., Naidu R., Samarasinghe S.V.A.C. Residual hydrocarbons in long-term contaminated soils: implications to risk-based management. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31, No. 15. P. 22759–22773. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32593-7>
- 86.Smith J.W.N., Davis G.B., DeVauil G.E. et al. Natural Source Zone Depletion (NSZD): from process understanding to effective implementation at LNAPL-impacted sites. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2022. Vol. 55, No. 4. Art. qjagh2021-166. DOI: <https://doi.org/10.1144/qjagh2021-166>
- 87.Wu B., Liu H., Shao M. et al. Novel Insights into the Influence of Soil Microstructure Characteristics on the Migration and Residue of Light Non-Aqueous Phase Liquid. *Toxics*. 2023. Vol. 11, No. 1. Art. 16. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics11010016>
- 88.Ashraf M., Abbasi N., Gupta P. K., Chakma S., Ahammad S. Z. Effect of soil-pH, temperature and moisture content on sorption dynamics of metformin and erythromycin. *Environmental Research*. 2024. Vol. 263(Pt 3): 120270. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120270.
- 89.CONCAWE. Performance of European cross-country oil pipelines – Statistical summary of reported spillages in 2023 and since 1971. Report No. 8/25. Brussels: Concawe, 2025. URL: <https://www.concawe.eu/publication/performance-of-european-cross-country-oil-pipelines-statistical-summary-of-reported-spillages-in-2023-and-since-1971/>
- 90.EGIG. Gas Pipeline Incidents. 12th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (1970–2022). Report No. EGIG 23.R.0403. Brussels: EGIG, 2024. URL: <https://www.egig.eu/reports>

91. Cravo-Laureau C., Duran R. The hydrocarbon pollution crisis: Harnessing the earth hydrocarbon-degrading microbiome. *Microbial Biotechnology*. 2024. Vol. 17, No. 7. Art. e14526. DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14526>
92. Ding A., Zhu R., Hu J. et al. Response of the soil microbial community to petroleum hydrocarbon stress shows a threshold effect. *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 14. Art. 1188229. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1188229>
93. Luo C., Jiang T., Ren P., Suo Z., Chen K. Physiological Responses of *Populus cathayana* and *Salix babylonica* to Combined Stress of Diesel Fuel and Sr^{2+} Stress in Soil. *Plants*. 2024. Vol. 13, No. 24. Art. 3598. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13243598>
94. Fortin Faubert M., Hijri M., Labrecque M. Short Rotation Intensive Culture of Willows for the Phytoremediation of a Contaminated Site and Subsequent Bioenergy Production. *Plants*. 2021. Vol. 10, No. 3. Art. 520. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10030520>
95. Ławniczak Ł., Woźniak-Karczewska M., Loibner A.P., Heipieper H.J., Chrzanowski Ł. Microbial Degradation of Hydrocarbons – Basic Principles for Bioremediation: A Review. *Molecules*. 2020. Vol. 25, No. 4. Art. 856. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>
96. Yaman C. Performance and Kinetics of Bioaugmentation, Biostimulation, and Natural Attenuation Processes for Bioremediation of Crude Oil-Contaminated Soils. *Processes*. 2020. Vol. 8, No. 8. Art. 883. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8080883>
97. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку цих речовин: Постанова Кабінету Міністрів України від 15.12.2021 р. № 1325. *Офіційний вісник України*. 2022. № 3. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-п>
98. Про затвердження Гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у ґрунті: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 14.07.2020 р. № 1595. Зареєстровано в Міністерстві юстиції

України 31.07.2020 р. за № 722/35005. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20>

99. Lemaire J., Henner P., Lollier M., Armand R., Faure P., Laperche V., Romé C., Lorgeoux C., Ponsin V., Pernin C., Höhener P. In-Situ Chemical Oxidation of Crude Oil Contaminated Soils and Aquifer. *Water*. 2019. Vol. 11, No. 11. Art. 2272. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11112272>
100. Douglas R.K., Nawar S., Cipullo S. et al. Evaluation of vis-NIR reflectance spectroscopy sensitivity to weathering for enhanced assessment of oil contaminated soils. *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 626. P. 1108–1120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.122>
101. Olatunde K.A., Gondal M.A., Popoola M.A., Popoola O.L. Determination of petroleum hydrocarbon contamination in soil using VNIR diffuse reflectance spectroscopy and partial least squares regression modeling. *Heliyon*. 2021. Vol. 7, No. 4. Art. e06794. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06794>
102. Gill P., Sharples J., Budden P. Leakage Rates Through Complex Crack Paths Using an ODE Method. ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, Boston, Massachusetts, USA, 19–23 July 2015. 2015. URL: <https://doi.org/10.1115/pvp2015-45468> (date of access: 28.05.2026).
103. Tajalli S. A. M., Moattari M., Naghavi S. V., Salehizadeh M. R. A Novel Hybrid Internal Pipeline Leak Detection and Location System Based on Modified Real-Time Transient Modelling. *Modelling*. 2024. Vol. 5, No. 3. P. 1135–1157. DOI: <https://doi.org/10.3390/modelling5030059>
104. Sobol I. M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2001. Vol. 55, No. 1. P. 271–280. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6)
105. Wang B., Chen L.-W., Niu Z. Critical hydraulic gradient and fine particle migration of sand under upward seepage flow. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Art. 14371. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18720-9>

106. Ming P., Lu J., Cai X., Liu M., Chen X. Multi-Particle Model of the Critical Hydraulic Gradient for Dike Piping. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020. Vol. 57, No. 3. P. 200–210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09656-1>
107. Adeniran M. A., Oladunjoye M. A., Doro K. O. Soil and groundwater contamination by crude oil spillage: A review and implications for remediation projects in Nigeria. *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. Art. 1137496. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1137496>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації

4. **Herasymenko, B. V., & Doroshenko Y. I.** (2026). Mathematical modeling of oil leakage dynamics from a pipeline into a po-rous medium considering soil filtration resistance. *PRECARPATHIAN BULLETIN OF THE SHEVCHENKO SCIENTIFIC SOCIETY. Number, (22(83), 222–233.* [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2026-22\(83\)-222-233](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2026-22(83)-222-233) **(Фахова стаття).**
(Особистий внесок – розроблено математичну модель динаміки витоку нафти з трубопроводу в пористе середовище з урахуванням опору фільтрації ґрунту).
5. **Herasymenko, B.** (2026). Prediction of hydrocarbon pollution dispersion in soil environment and environmental risk assessment based on mathematical modeling. *Collection of Research Papers of the National Mining University, (84), 24–35.* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/84.024> **(Фахова стаття).**
(Особистий внесок – одноосібна публікація)
6. Revitalization of Oil-Polluted Soils by Growing Phytoremediation Plants / Н. Hrytsuliak, A. Kotsyubynsky, V. Zaritskyu [et al.]. *Systems, Decision and Control in Energy VII.* Springer, Cham, 2024. P. 467–482. **(Стаття Scopus / Розділ монографії)** (Особистий внесок – проведено польові дослідження та проаналізовано отримані результати, що стали основою для публікації).

Тези наукових конференцій

8. **Gerasimenko B. V.** Study of damage to the soil cover on the linear part of oil pipelines... *Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2022. С. 24–26.* (Особистий внесок – одноосібна публікація)

9. **Herasymenko B.** Impact of hydrocarbon pollution on ecosystems. *Лісівнича освіта і наука: стан, проблеми та перспективи розвитку*: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. Ломжа–Малин, 2024. (Особистий внесок – одноосібна публікація)
10. **Marych T., Herasymenko B., Zaritskiy V.** Assessment of the chemical composition of contaminated soils... *Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів і молодих вчених*. Івано-Франківськ, 2024. (Особистий внесок – зібрав інформацію та обробив її, сформулював висновки)
11. **Kotsyubynsky O., Herasymenko B.** Industry 4.0 in the transformation of the energy sector... *IV Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів і молодих вчених*. Івано-Франківськ, 2025. (Особистий внесок – зібрав інформацію та обробив її, сформулював висновки)

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ
Операційний менеджер
НГВУ «Полтаванафтогаз»
Гнатюк О.В.
«11» *Березня* 2026 р.

АКТ № 459

промислового впровадження (апробації) методики прогнозування аварійних витоків нафти і розповсюдження забруднень у ґрунті в умовах НГВУ «Полтаванафтогаз»

Робоча група в складі:

голови: Головного технолога НГВУ «Полтаванафтогаз» Семанюк Н.М.

та членів робочої групи:

1. Інженер ТВ НГВУ «ПНГ» Васюта А.Ю.
2. Доцента, к.т.н. Дорошенко Ю.І. (ІФНТУНГ)
3. Здобувача Герасименка Б.В. (ІФНТУНГ)

склала цей акт про таке:

1. У період з 02.02.2026 р. по 10.03.2026 р. робоча група здійснила апробацію інженерної методики та алгоритму розрахунку обсягів аварійних витоків нафти і прогнозування просторового розповсюдження забруднень у ґрунті, які були розроблені у рамках дисертаційної роботи Герасименка Б.В.
2. Робочій групі надано деталізований опис удосконаленої двовимірної математичної моделі нестационарної фільтрації нафти в насиченому та ненасиченому пористому ґрунтовому середовищі.
3. Робоча група розглянула надані матеріали і підтверджує, що:
 - Розроблена методика узгоджується з вимогами Методики визначення розміру шкоди, завданої землі, ґрунтам внаслідок надзвичайних ситуацій (наказ Міндовкілля №167 від 04.04.2022), яка може бути використана для подальшого розрахунку розміру шкоди на основі результатів моделювання.
 - Розрахункова частина щодо визначення обсягів витоків не суперечить галузевим методикам та інструкціям, у яких для розрахунку витрат через отвори та дефекти застосовуються класичні формули на основі рівняння Бернуллі.
 - Оцінка екологічних наслідків забруднення ґрунтів може проводитись у відповідності до ДСТУ 7875:2015 та нормативів гранично допустимого забруднення ґрунтів, при цьому результати моделі служать вихідними даними для таких розрахунків.
4. Робоча група провела апробацію розробленого алгоритму. НГВУ «Полтаванафтогаз» надала вхідні дані для тестових розрахунків та моделювання

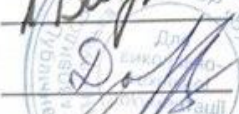
сценаріїв витоків лінійної частини трубопроводів в умовах підприємства. Відповідно до методики, в програмному середовищі було здійснено розрахунок обсягів витоків та змодельовано геометрію нафтового ореолу. Як результат - таблиця 1, у якій наведено порівняння отриманих даних із традиційними галузевими розрахунками.

Таблиця 1

Номер аварійної ділянки (сценарію)	Розрахунковий обсяг (за традиційними галузевими формулами), м ³	Розрахунковий обсяг (за новою методикою ІФНТУНГ), м ³	Відхилення нової методики від факту, %
1 (Дефект: корозійний отвір)	16.8	13.6	8,8 %
2 (Дефект: поздовжня тріщина)	64.3	49.5	10,0 %
3 (Пересічений профіль)	41.1	32.3	13,7 %

5. Приведена похибка визначення обсягів витоків нафти за розробленою методикою склала 8–14%, що підтверджує її спроможність визначати показники із задовільною для інженерних розрахунків точністю.
6. Робочою групою відмічено наступні недоліки:
 - відсутність повної автоматизації інтеграції розрахункового алгоритму з існуючими на підприємстві системами виявлення витоків;
 - необхідність проведення додаткових лабораторних досліджень ґрунтів для максимально точного визначення їх сорбційної ємності вздовж нових ділянок.
7. Робоча група встановила, що опис математичної моделі та алгоритми розрахунку успішно пройшли промислову апробацію та можуть бути використані підприємством як вихідні дані для розрахунку розміру екологічної шкоди та планування рекультивації.
8. Робоча група пропонує: а) виявлені в процесі промислової апробації недоліки врахувати при подальшій модернізації; б) рекомендувати використання розробленої методики для планування аварійно-відновлювальних робіт на об'єктах НГБУ «Полтаванафтогаз».

Підписи членів робочої групи:

 / Васюта А.І.О./
 / Дорошенко Ю.І. /
 / Герасименко Б.В. /

BRIT

Громадська організація
«Бюро розвитку, інновацій та технологій»
 (zareestrovano 20.02.2012)
 вул.Микитинецька, 5а (офіс 213)
 м.Івано-Франківськ, Україна 76002
 +38 0342 50 47 08
ira.darvai@hotmail.com

23 березня 2026 року

№ 003/26

Громадська організація «Бюро Розвитку, Інновацій та Технологій» підтверджує, що Герасименко Богдан Валерійович, аспірант, з 1 березня 2024 року бере участь у діяльності організації в межах виконання міжнародного проекту

Project U_CAN – TOWARDS CARBON NEUTRALITY OF UKRAINIAN CITIES (код №101148374, програма HORIZON Coordination and Support Actions).

Тривалість проекту: березень 2024 р. – вересень 2027 р.

Проект U_CAN спрямований на впровадження практичного підходу «знизу вгору» для досягнення кліматичної нейтральності українських міст відповідно до європейських стандартів і положень Європейського зеленого курсу (EGD). Ініціатива об'єднує 8 українських міст, місто Дрезден (як CNSC Mission City), а також низку неурядових і науково-дослідних організацій.

Довідка видана для підтвердження участі Герасименка Б.В. у зазначеному проекті.

З повагою,

Керівник ГО «Бюро Розвитку, Інновацій та Технологій»

Голова правління



/ Ірина ДАРВАЙ

ДОДАТОК Г



Рисунок Г 1 – Верефікація досліджень Ждека, А. Я.,