

# ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ НАФТОВИХ ЗАБРУДНЕНЬ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ АКВАТОРІЙ

І. В. Тимченко, мол. наук. співроб.

*Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв*

**Анотація.** Наведено результати дослідження моделей розповсюдження нафтових забруднень в умовах обмежених акваторій портів, які застосовуються при формуванні плану ліквідації аварійних розливів нафти в реальному часі.

**Ключові слова:** екологічна безпека, розливи нафти, імітаційна модель, концентрація, верифікація.

**Аннотация.** Представлены результаты исследования моделей распространения нефтяных загрязнений в условиях ограниченных акваторий портов, которые используются при формировании плана ликвидации аварийных разливов нефти в реальном времени.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, разлив нефти, имитационная модель, концентрация, верификация.

**Abstract.** In this paper present the results of research the oil distribution models in the limited ports aquatoriums for forming of liquidations oil plan in the real time.

**Keywords:** ecological safety, oil spills, simulation model concentration, verification.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для підвищення екологічної безпеки портів важливим є забезпечення ефективного екологічного контролю транспортування і технологічних процесів перевантаження рідинних вантажів. При цьому існує ймовірність виникнення розливів нафти, які на довгий час порушують екологічну рівновагу морських екосистем. Розробка нових та вдосконалення існуючих засобів формування ефективних планів ліквідації аварійних розливів нафти (ЛАРН) з метою скорочення часу на ЛАРН дозволить значно зменшити негативний вплив розливів нафти та нафтопродуктів на водне середовище [5].

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Прийняття ефективних рішень щодо ЛАРН потребує використання математичних

моделей розповсюдження забруднень на водній поверхні. Дослідження характеру впливу основних факторів на процеси динаміки нафтових забруднень на водній поверхні [1, 4], а також аналіз відомих математичних моделей, які описують вклад кожного фактора [1, 3, 6, 8], дозволили визначити підхід до корекції існуючих моделей розповсюдження нафти з урахуванням основних задач ЛАРН.

**МЕТОЮ РОБОТИ** є дослідження та верифікація імітаційних моделей розповсюдження нафтових забруднень на водній поверхні в умовах обмежених акваторій.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Формування ефективного плану ЛАРН включає в себе визначення у відповідні моменти часу основних параметрів розливу — координат, радіуса, площі тощо; вибір

раціональної технологічної схеми збору нафти, складу та кількості технічних засобів; а також визначення послідовності збору нафтових плям та можливих джерел забруднення в умовах невідомості точного джерела аварії. Для підвищення ефективності прийняття рішень щодо ЛАРН використовуються імітаційні моделі розповсюдження нафтових забруднень на водній поверхні, які потребують корекції з урахуванням різнотипних джерел розливів та особливостей обмежених акваторій портів.

Для корекції моделей розповсюдження нафти досліджено акваторію порту Бузько-Дніпровського лиманного каналу (БДЛК) як складну природну систему, де відбувається комплекс біо-фізико-хімічних процесів самоочищення. При аналізі існуючих моделей з урахуванням особливостей обмежених акваторій портів визначено розповсюдження розливу на поверхні води як нестационарний процес кон-

вективної дифузії неконсервативних речовин [1, 3, 5] та отримано скореговану модель, яка враховує зміну об'єму плями під дією сил течії і вітру, турбулентної дифузії та випаровування. Прийнято наступні припущення: нафтові забруднення переносяться в поверхневому шарі водного середовища, що дорівнює 1 м; враховується домінуючий вплив вітрових течій, тобто напрямок течії збігається з напрямком вітру; величина приливних коливань рівня води не перевищує 3...5 см і є несуттєвою; потужність джерела викиду не враховується; як переважаючий процес дисипації обрано випаровування з поверхні нафтової плями.

З урахуванням зазначеного, рівняння динаміки забруднень на водній поверхні зведене до двовимірної моделі зміни концентрації нафтового забруднення. Аналітичний розв'язок даного рівняння являє собою складну задачу. За методом різницевої форми отримано рекурентну форму моделі:

$$C_{ij}^{t+\Delta t} = C_{ij}^t S_1 + C_{i+1,j}^t S_2 + C_{i,j+1}^t S_3 + C_{i-1,j}^t S_4 + C_{i,j-1}^t S_5, \quad (1)$$

де

$$S_1 = \Delta t E - 2A_{xy} \Delta t \left( \frac{h^2 + p^2}{h^2 p^2} \right) + \Delta t \left( \frac{V_x h + V_y p}{ph} \right); \quad S_2 = \frac{\Delta t}{p^2} (-V_x p + A_{xy});$$

$$S_3 = \frac{\Delta t}{h^2} (-V_y h + A_{xy}); \quad S_4 = \frac{A_{xy}}{p^2} \Delta t; \quad S_5 = \frac{A_{xy}}{h^2} \Delta t;$$

$C$  — концентрація нафти у поверхневому шарі води, кг/м<sup>3</sup>;  $x, y, z$  — координати області водоймища, на якій розглядається розповсюдження нафтових забруднень, м;  $p, h, \Delta t$  — відповідні кроки по координатах  $x, y$  та часу;  $t, i, j$  — параметри решітки різницевої схеми;  $V = (V_x, V_y)$  — двовимірне поле швидкостей вітрових течій;  $A_{xy}$  — коефіцієнт горизонтальної турбулентної дифузії;  $E$  — коефіцієнт, що характеризує інтенсивність випаровування.

На основі аналізу умов та характеру розповсюдження нафтових забруднень в акваторіях портів БДЛК сформовані наступні початкові і граничні умови: 1. Початкове значення концентрації відповідає максимальному в точці викиду ( $x(0), y(0)$ ) у момент часу  $t = 0$  та дорівнює  $C[x(0), y(0), 0] = C_1$ . Відомі градієнти інтенсивності зменшення концентрації в початкових координатах:

$$\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=x(0)} = -C_{1grad}, \quad \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=y(0)} = -C_{2grad}.$$

Значення  $C_1, C_{1grad}, C_{2grad}$  розраховуються на основі даних лабораторних проб води, автоматичних аналізаторів або розпізнавання фотоматеріалів. 2. Значення  $x(T), y(T)$  відповідають граничним координатам розповсюдження нафтового розливу в момент  $T$  досягнення концентрацією нафти і нафтопродуктів гранично допустимого значення (ГДК). Гранична концентрація задається у вигляді умови  $C[x(T), y(T), T] =$  ГДК, а градієнти концентрації — у вигляді  $\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=x(T)} = -\text{ГДК}, \quad \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=y(T)} = -\text{ГДК}.$

Процес випаровування в загальному вигляді описується як

$$\varepsilon(t) = \sum_{k=1}^n \varepsilon_k(t) = \sum_{k=1}^n \frac{K_a P_{0k} m_k M_0}{RT_c m_0}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_k(t)$  — потік  $k$ -ї фракції нафти;  $P_{0k}$  — парціальний тиск, Па, при даній температурі  $T_c, ^\circ\text{C}$ ;  $M_0$  — молярна маса нафти, г/моль;

**Таблиця 1.** Умови експериментальних досліджень

Ситуація	Маса, т	Швидкість вітру, м/с	Температура, °С	
			води	повітря
1	10 (сира нафта)	7,5	7	3...4
2	10 (сира нафта)	3...5	11	17...20
3	0,5 (сира нафта)	6	11,6	18,4
4	0,1 (дизельне паливо)	5	4	2
5	10000 т (сира нафта)	2	11	10

$R$  — універсальна газова стала, Дж/моль·К;  $m_k$  та  $m_0$  — маса відповідно  $k$ -ї фракції та нафти в цілому, г;  $K_a$  — коефіцієнт масопереносу в атмосфері [3].

При цьому корекція моделі потребує визначення коефіцієнта  $K_a$ , який здебільшого залежить від швидкості вітру, об'єму розливу та виду розлитої нафти. Проведення дослідження скорегованих імітаційних моделей потребує верифікації (1), (2) та дослідження внеску в дисипацію нафти процесу випаровування.

Верифікацію моделей (1), (2) проведено на основі реальних даних розливу дизельного палива в районі БДЛК (ситуація 4 у наведеній таблиці) та літературних відомостей про експериментальні розливи сирої нафти [2, 4] (див. ситуації 1–3, 5 у таблиці).

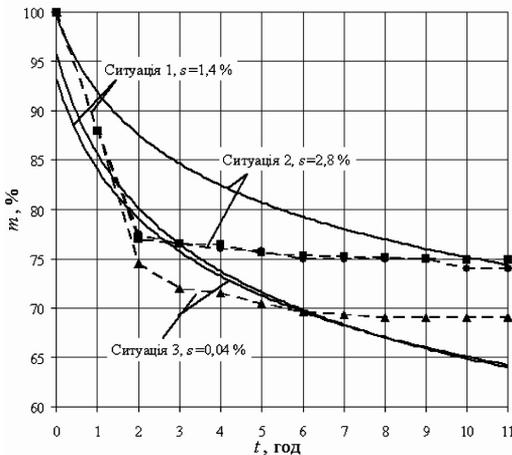
На рис. 1 наведено масові витрати нафти (показано кількість нафти, %, що залишилась на водній поверхні) внаслідок випаровування при ситуації 1–3 та результати розрахунку (рис. 1, суцільна лінія) за рівнянням

(2), а також значення середньої квадратичної відносної похибки результатів моделювання  $s$ , яка не перевищує 2,85 % та свідчить про адекватність моделі (2).

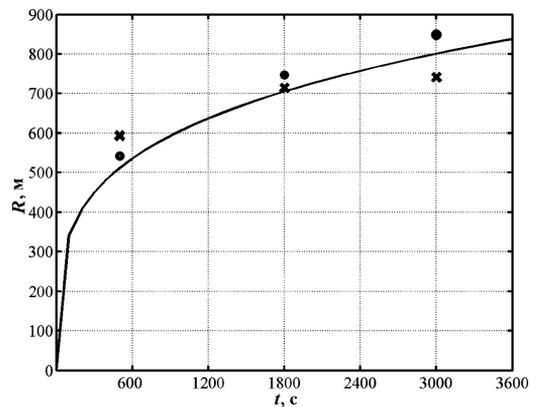
На рис. 2 показано відповідність експериментальних даних про зміну радіуса розливу в ситуації 5 результатам моделювання даної ситуації за рівнянням (1) і позначено: хрестиком — за моделлю (1), кривою — за моделлю Фея [8], точками — документальні дані розливу. Найбільше відхилення теоретичних даних від експериментальних не перевищує 6,2 %, що відповідає точності, необхідній для прийняття рішень щодо ЛАРН.

На рис. 3 наведено результати верифікації моделі (1) на основі результатів моделювання ситуації 4 та експериментальних даних про розлив, а саме зміну концентрації нафти впродовж 4 діб у центрі плями (рис. 3, а) та під кромкою (див. рис. 3, б).

Найбільше відхилення не перевищує 2,03 %, що відповідає необхідній точності.



**Рис. 1.** Масові витрати нафти внаслідок випаровування



**Рис. 2.** Зміна радіуса нафтової плями з часом

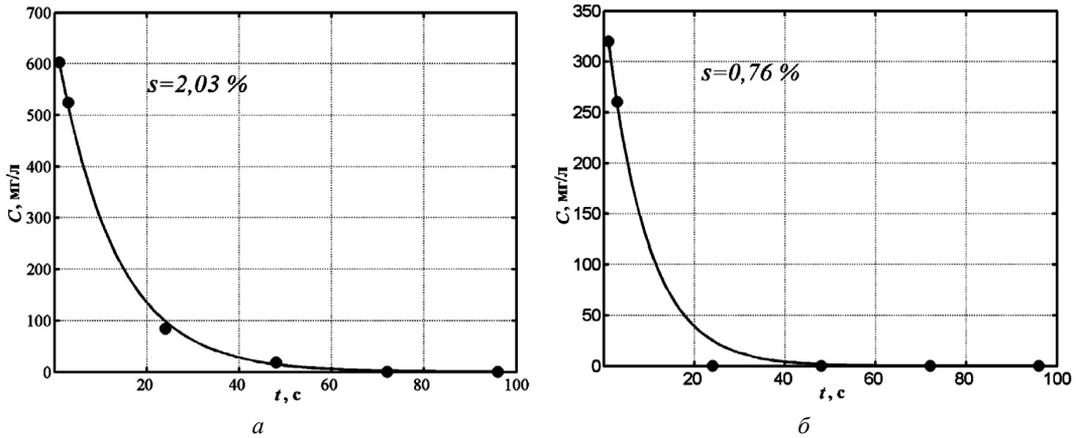


Рис. 3. Зміна концентрації нафтових плям з часом

У результаті дослідження моделей розповсюдження нафтових забруднень та експериментальних даних встановлено наступне:

1. Випаровування — інтенсивний процес дисипації нафтових забруднень з водної поверхні, особливо в перші години розливу. Інтенсивність випаровування в перші години розливу залежить здебільшого від швидкості вітру та типу розлитої нафти, вплив інших факторів складає не більше ніж 0,01 %. Градієнт швидкості масових витрат у період часу до 2 годин дорівнює приблизно  $0,12V_0$  од./год, де  $V_0$  — початковий об’єм розливу; протягом 2–8 годин —  $0,01V_0$  од./год; після 10 годин —  $0,00001V_0$  од./год.

2. Застосування моделі (1) ефективно за умови моделювання невеликих розливів (об’єм до 3 т) легких типів нафтопродуктів (дизельне паливо, бензин) до досягнення гранично допустимої концентрації нафти. При моделюванні розповсюдження розливів мазуту і сирої нафти точність розрахунків

за моделлю (1) після 12–24 годин розливу знижується внаслідок неврахування інтенсивності утворення стійких водо-нафтових емульсій. Однак зазначені похибки не впливають на ефективність прийняття рішень щодо ЛАРН, які приймаються в перші години після надходження початкової інформації про розлив.

## ВИСНОВКИ

Результати дослідження відповідності теоретичних даних експериментальним, а саме розрахунок середньої квадратичної похибки, яка є допустимою, свідчать про адекватність розробленої процедури корекції моделей розповсюдження нафтових забруднень в умовах обмежених акваторій портів. Використання скорегованих імітаційних моделей для визначення раціональних параметрів і схем збору нафти дозволить підвищити ефективність прийняття рішень щодо ЛАРН.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ковальчук П.І. Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища. — К.: Либідь, 2003. — 208 с.
- [2] Кормак Д. Борьба с загрязнением моря нефтью и химическими веществами. — М.: Транспорт, 1989. — 365 с.
- [3] Лонин С.А., Рясинцева Н.И., Туковиченко Ю.С. К вопросу размещения нефтеперерабатывающего комплекса в прибрежной зоне Черного моря в районе г. Одессы // Диагноз состояния среды прибрежных и шельфовых зон Черного моря: Сб. науч. тр. НАН Украины. — Севастополь, 1996. — С. 162–171.

- [4] План ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на целостном имущественном комплексе ООО «Нафтасервис Шиппинг» // План чрезвычайных мер по ЛАРН при перегрузке. — Николаев, 2002. — 32 с.
- [5] Підпригора Д.М., Тимченко І.В., Явішева І.В. Алгоритм управління процесами збору нафти в акваторіях морських терміналів // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2008. — № 3 (408). — С. 167–172.
- [6] Тарнопольский А.Г. Моделирование распространения нефтяной пленки по поверхности моря после аварийного разлива // Метеорология, климатология и гидрология: Сб. науч. тр. — Одесса, 2001. — Вып. 43. — С. 197–210.
- [7] Тимченко І.В. Синтез альтернативних рішень при ліквідації розливів нафти в умовах невизначеності // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2008. — № 4 (421). — С. 109–112.
- [8] Fay J.A. Physical processes in the spread of oil on a water surface // Proc. Joint Conf. Prevention and Control Oil Spills. — Washington, 1971. — P. 463–467.