

ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ НАФТИ У МОРІ ПРИ ЇЇ АВАРІЙНИХ РОЗЛИВАХ

*С. М. Юрасов, к.техн.н., доц.
кафедра екології та охорони довкілля
urasen54@gmail.com*

Процес поширення нафти при аварійних розливах починається з її гравітаційного розтікання. При наявності течії одночасно відбувається адвективний перенос нафтової плями. Гравітаційне розтікання з часом швидко убуває внаслідок зменшення товщини нафтової плівки і зростання в'язкості нафти за рахунок випаровування її легких фракцій. Через деякий проміжок часу гравітаційне розтікання припиняється, і подальше збільшення плями – це результат дії сил в'язкості і поверхневого натягу, а також турбулентної дифузії. При цьому одночасно відбувається випаровування й розбавлення легких фракцій нафти, а також її диспергування з утворенням емульсій «вода у нафті» і «нафта у воді», осадження та біодеградація.

У разі аварійного розливу нафти пляму, що утворилася на поверхні води, можна уявити у вигляді кола. Процес поширення такої плями в морі після закінчення гравітаційного розтікання можна описати нестационарним рівнянням турбулентної дифузії плаваючої неконсервативної речовини в полярній системі координат, яке з початковими і граничними умовами можливо записати у вигляді [1, 2]:

$$\partial C / \partial t = D_T (\partial^2 C / \partial r^2) + D_T (\partial C / \partial r) / r - C k_H, \quad (1)$$

$$C(t, r) = C_0, \text{ при } t=0 \text{ і } 0 < r \leq R_0;$$

$$C(t, r) = 0, \text{ при } t=0 \text{ і } r > R_0,$$

де C – концентрація нафти на поверхні, г/м^2 ; t – час, с ; D_T – коефіцієнт горизонтальної турбулентної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; r – радіус вектор, м ; k_H – константа втрат нафти (розкладання, розчинення, випаровування і диспергування), с^{-1} ; C_0 – концентрація нафти у плямі в початковий момент часу, г/м^2 ; R_0 – радіус плями в початковий момент часу, м .

Третій доданок у правій частині рівняння (1) характеризує втрати нафти на поверхні води за рахунок процесів розпаду, випаровування, диспергування і розчинення. Оскільки різні фракції нафти мають різну інтенсивність перелічених процесів, то при моделюванні доцільно використовувати метод суперпозиції: розглядати поширення фракцій нафти окремо, з визначенням сумарної концентрації поліфракційної нафти в потрібні моменти часу.

Рівняння (1) можна вирішити з використанням метода кінцевих різниць за явною, неявною і змішаною схемами [1, 2].

За явною схемою (рис. 1) рішення матиме вигляд [1, 2]:

$$\text{при } n=1 - C_{k+1,1}=(1-2a-f)C_{k,1}+2aC_{k,2}, \quad (2)$$

$$\text{при } n>1 - C_{k+1,n}=(1-2a-f)C_{k,n}+a(b_nC_{k,n+1}+d_nC_{k,n-1}), \quad (3)$$

$$\text{де } a=D_T\Delta t/\Delta r^2; f=k_H\Delta t; b_n=2n/(2n-1); d_n=(2n-2)/(2n-1). \quad (4)$$

Рішення стійко при $(2a+f)\leq 1$.

	0	1	...	k	k+1	...
1	$C_{0,1}=C_0$			$C_{k,1}$	$C_{k+1,1}$	
2	$C_{0,2}$			$C_{k,2}$		
...	...	...		...	...	...
n-1	$\updownarrow \Delta r$	...		$C_{k,n-1}$		
n	$\leftarrow \Delta t \rightarrow$	...		$C_{k,n}$	$C_{k+1,n}$	
n+1		...		$C_{k,n+1}$		
...	...	...		...	...	...

Рисунок 1 – Явна кінцево-різницева схема

На рис. 1 у моменти часу k з кроком Δt розглядаються зрізи плями від центра до периферії. З кроком Δr на плямі проведені окружності, центр яких збігається з початком системи координат. Нумерація кілець від центру плями до її периферії – $n=1,2,3...$ Середнє значення концентрації нафти в кожному кільці розташовується в його середині. Таким чином, на k -му зрізі плями концентрація нафти в кільці з номером n матиме позначення $C_{k,n}$. Значення вище і нижче нього (рис. 1) у момент k будуть мати позначення $C_{k,n-1}$ і $C_{k,n+1}$.

На наступному часовому зрізі $k+1$ середнє значення концентрації нафти в кільці n матиме позначення $C_{k+1,n}$.

Отримані рівняння (2) і (3) дають змогу за значеннями концентрації нафти в плямі на k -му часовому зрізі розрахувати значення концентрації нафти на наступному $(k+1)$ -у зрізі. Розрахунок виконується, починаючи зі зрізу $k=1$. На попередньому для нього зрізі ($k=0$) розподіл значень концентрації нафти в плямі задається [1, 2].

Для кінцево-різницевої моделі початковий момент часу має збігатися з моментом закінчення гравітаційного розтікання нафти. Але межа періоду часу, коли процес розтікання нафти під дією сил тяжіння переважає над дифузійним процесом, може бути визначена дуже умовно. Оцінімо цей період часу з моменту розливу нафти.

Збільшення радіуса нафтової плями в часі характеризує залежність Блоккера (5) [3]

$$R_t = [R_{II}^3 + 3t K_B W_{II} \Delta / \pi]^{1/3}, \quad (5)$$

де R_t – радіус плями нафти в момент часу t , м; R_{II} – початковий радіус плями, м; t – час, с; $K_B=216$ – константа Блоккера, с^{-1} ; W_{II} – об'єм розливу, м^3 ; $\Delta=(\rho_B-\rho_H)/\rho_B$; ρ_B і ρ_H – щільність води і нафти, кг/м^3 .

Феєм [3–5] були запропоновані залежності розрахунку радіусу плями нафти у різні фази її поширення (перша – переважання гравітаційних сил

(6), друга – сил в'язкості (7) і третя – сил поверхневого натягу (8)):

$$R_t = K_{1F} [\Delta g W_{II} t^2]^{1/4}, \quad (6)$$

$$R_t = K_{2F} [\Delta g W_{II}^2 t^{3/2} / \nu_B^{1/2}]^{1/6}, \quad (7)$$

$$R_t = K_{3F} [\sigma^2 t^3 / (\rho_B^2 \nu_B)]^{1/4}, \quad (8)$$

де $K_{1F}=1,14$ – константа Фейя для першої фази; g – прискорення вільного падіння, м/с²; $K_{2F}=1,45$ – константа Фейя для другої фази; ν_B – кінематичний коефіцієнт в'язкості води, при 20°C дорівнює $1,006 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $K_{3F}=2,30$ – константа Фейя для третьої фази; σ – поверхневий натяг (при 20°C: нафти – $26,0 \cdot 10^{-3}$ н/м, води – $72,86 \cdot 10^{-3}$ н/м).

На другій і третій фазах поширення нафти, коли пляма стає тонкою, за наявності течії не малу роль починає відігравати турбулентна дифузія.

Залежність Блоккера (5) є універсальною, вона узагальнено описує поширення нафти у морі в різні фази. Процес зростання радіусу плями нафти за цією залежністю краще співпадає з залежністю (7) (рис. 2).

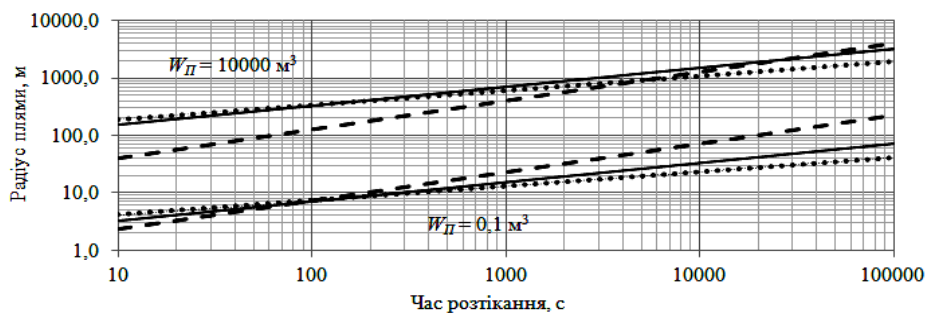


Рисунок 2 – Залежність радіусу плями нафти від часу і об'єму розливу: суцільна лінія – формула (5) при $R_{II}=0$, пунктирна – (6), точкова – (7)

Якщо порівняти (5) і (6), а також (6) і (7), то в залежності від об'єму розливу можна отримати моменти часу, коли за різними фазами поширення нафти радіуси плями будуть рівними.

$$t_{1B} = (9K_B^2 / K_{1F}^6 / g^{3/2} / \pi^2) (W_{II} \Delta)^{1/2} = 631,8 (W_{II} \Delta)^{1/2} \quad (9)$$

$$t_{12} = (K_{2F}^4 / K_{1F}^4 / g^{1/3}) [W_{II} / \nu_B / \Delta]^{1/3} = 1,223 [W_{II} / \nu_B / \Delta]^{1/3}. \quad (10)$$

Моменти часу перетину залежностей (5) і (6) (рис. 3а) та (6) і (7) (рис. 3б) можна вважати моментами переходу від фази гравітаційного розтікання до фази сил в'язкості з турбулентною дифузією. У зв'язку з тим, що залежність Блоккера (5) узагальнено відображає поширення нафти під дією всіх сил, то момент часу її перетину із залежністю (6) (на думку автора) більшою мірою підходить для моменту початку відліку часу для кінцево-різницевої моделі.

При виконанні попередніх розрахунків доцільно: спочатку за формулою (9) за об'ємом розливу нафти (W_{II}) визначити час закінчення гравітаційного розтікання (t_{GP}), далі за формулою (6) визначити радіус плями (R_0) та концентрацію нафти на поверхні (C_0^*), потім визначити початкові концентрації фракцій нафти C_{0i}^* , і далі за t_{GP} й C_{0i}^* визначити початкові концентрації фракцій нафти в експерименті C_{0i} з урахуванням

констант їх випаровування (k_{Bi}), диспергування (k_{Di}) та розпаду (k_{Hi}). Тобто внести поправку на втрати нафти за час гравітаційного розтікання $t_{ГР}$.

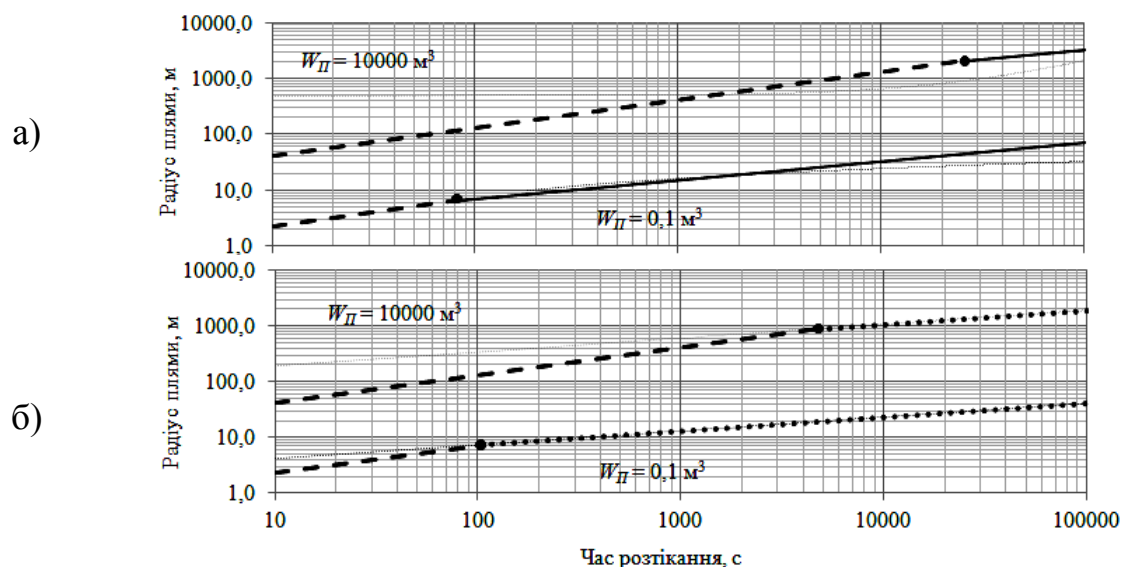


Рисунок 3 – Моменти часу переходу від фази гравітаційного розтікання до фази в'язкості: суцільна лінія – формула (5); пунктирна лінія – (6), точкова – (7)

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Юрасов С.М. Глава 10. Числове моделювання розповсюдження аварійних розливів нафти в морі при її транспортуванні / *Розвиток методів проектування, будівництва та реконструкції гідротехнічних споруд. Частина 2: серія монографій* / [авт. кол.: Дубровський М.П., Рогачко С.І., Бугаєва С.В. та ін.] за ред. М.П. Дубровського. Одеса: Купрієнко СВ, 2020. С. 168-185.
2. Юрасов С.М., Горун В.В., Берлінський М.А. Верифікація моделі розповсюдження зависі при дампінгу ґрунту на морський підводний відвал. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. № 16. С. 30-39.
3. Алишанов Г.Н. Аналіз математичних моделей динаміки метричних параметрів нафтової плями при аварії танкера на морській акваторії. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2014. Вип. 20. С. 11-15.
4. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea. *Massachusetts institute of technology*. 1969. 11 p.
5. Fay J.A., Hoult D.P. Physical processes in the spread of oil on a water surface. *National technical information service*. 1971. 16 p.