



Mô hình hóa sự lan truyền các chất ô nhiễm trong đại dương

Bởi:

PGS. TS. NGŨT Phạm Văn Huân

Tìm kiếm những phương tiện tích cực đấu tranh chống ô nhiễm môi trường biển là một trong những vấn đề thời sự của khoa học hiện đại. Một trong các hướng của vấn đề này là nghiên cứu các quá trình tự làm sạch khỏi chất ô nhiễm của biển và đại dương. Trong môi trường biển, bên cạnh những quá trình sinh học và lý - hóa học, có tác động làm giảm nồng độ tạp chất, thì các quá trình thủy động lực cũng đóng vai trò quan trọng. Chính là các dòng chảy biển và khuếch tán rối quyết định sự vận chuyển, phân tán và làm loãng tạp chất.

Chương này sẽ trình bày những phương pháp lý thuyết tính lan truyền các chất ô nhiễm trong điều kiện biển, nghiên cứu về ảnh hưởng của hoàn lưu nước và khuếch tán rối tới kết quả tính nồng độ các chất, làm quen với những kết quả chính trong nghiên cứu thực nghiệm về khuếch tán rối trong những điều kiện thực.

Phát biểu toán học bài toán về lan chuyển tạp chất trong môi trường biển

Diễn biến của tạp chất trong môi trường biển tùy thuộc vào nhiều nhân tố: *hóa học* (sự phân rã, liên kết với chất khác, lắng đọng vào trầm tích); *lý học* (chuyển sang trạng thái pha khác, hấp phụ, kết hạch); *thủy động lực học* (vận chuyển bởi các dòng chảy và phát tán trong quá trình khuếch tán rối); *sinh học* (sự tích tụ và vận chuyển bởi sinh vật biển). Sự biến đổi nồng độ tạp chất trong trường hợp tổng quát được mô tả bằng phương trình khuếch tán rối ba chiều, có tính đến sự tương tác lý - hóa của tạp chất với môi trường và sự hiện diện các nguồn tạp chất:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w + w_C) \frac{\partial C}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial C}{\partial z} + K_{CL} \nabla^2 C + Q \delta(x - x^*) \delta(y - y^*) \delta(z - z^*) - \frac{C}{\tau_0}. \quad (2.1)$$

Ở đây C – nồng độ tạp chất; u, v, w – các thành phần vận tốc dòng chảy theo các trục tọa độ Đề các x, y, z ; w_C – vận tốc thẳng đứng trọng lực riêng của tạp chất; τ_0 – hằng số phân hủy sinh hóa tạp chất; K_C và K_{CL} – hệ số khuếch tán rối trong phương thẳng đứng và phương ngang; δ – hàm Dirac; Q – công suất của nguồn tạp chất; x^*, y^*, z^* – các tọa độ vị trí nguồn trong không gian ba chiều.

Chúng ta nêu lên một số nhận xét về phương trình (2.1).

1) Vì diễn biến của tất cả các trường trong đại dương có đặc điểm rối, phương trình (2.1) nhận được dựa trên những quan niệm thống kê – xác suất về tính ngẫu nhiên của chuyển động các phần tử phát tán. Phương trình này không mô tả các trường tức thời của tạp chất và dòng chảy, mà là các trường được lấy trung bình trong khoảng thời gian t . Ngoài ra, trong phương trình này, các thông lượng rối của tạp chất $-\rho v_j C' = \Phi_{Cj}^T$ theo truyền thông được tham số hóa tương tự như khuếch tán phân tử, thông qua những hệ số khuếch tán rối và những gradient trung bình nồng độ tạp chất, tức

$$\Phi_{Cj}^T = \rho K_{Cij} \frac{\partial C}{\partial x_j}.$$

2) Tùy thuộc vào những tính chất lý – hóa của tạp chất độc hại, trên cơ sở phương trình (2.1) có thể nghiên cứu sự lan truyền của *tạp chất tích cực động lực* (lắng xuống, $w_C > w$, hoặc nổi lên, $w_C < w$), hoặc của *tạp chất thụ động động lực*, không có vận tốc trọng lực riêng ($w_C = 0$) và bị mang đi với vận tốc của các dòng chảy.

3) Do những quá trình sinh hóa, nồng độ tạp chất liên tục biến đổi. Để đặc trưng các tính chất *không bảo thủ* của tạp chất, trong phương trình (2.1) có thể sử dụng thời gian phân hủy sinh – hóa τ_0 , hoặc hệ số không bảo thủ p .

Hệ số không bảo thủ được đưa vào như sau: $p = \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt}$ và có thứ nguyên $[T^{-1}]$. Khi $p < 0$ diễn ra sự phân hủy hợp chất, khi $p > 0$ diễn ra sự tích tụ, còn khi $p = 0$ tạp chất bảo thủ.

4) Số hạng thứ ba ở vế phải của phương trình (2.1) xác định sự hiện diện nguồn tạp chất ô nhiễm với công suất Q tại điểm có tọa độ (x^*, y^*, z^*) . Do kích thước nguồn ô nhiễm tương đối bé so với những khoảng cách mà tạp chất bị mang đi, ta có thể coi đó là nguồn điểm, hay nguồn khối. Để miêu tả nguồn điểm, hàm δ (hàm số Dirac) được đưa vào phương trình (2.1).

Ta phát biểu những điều kiện biên. Đó là điều kiện tại tất cả các mặt bao quanh vùng nước đang xét, cần phải biết hoặc thông lượng tạp chất (thông lượng khuếch tán và thông lượng bình lưu), hoặc nồng độ của tạp chất. Trường hợp chung nhất, những điều kiện đó được thể hiện như sau:

$$a\left[K_C \frac{\partial C}{\partial z} - (\beta_i + w_C)C + Q_i\right] + b(C - C_i) = 0, \quad (2.2)$$

trong đó a và b – hệ số được cho, có các giá trị hoặc bằng 0, hoặc bằng 1; β_i – các tham số tương tác tạp chất với bề mặt tương ứng. Q_i – công suất của nguồn tại mặt tương ứng. Những điều kiện biên này của (2.2) cho phép đặt ra những dạng bài toán khác nhau (với điều kiện biên loại 1 hay loại 2) và tính đến tác động của một số nguồn tạp chất khác nhau. Thí dụ, Q_1 – phát thải tạp chất tại mặt đại dương (từ khí quyển, từ tàu thủy, các chất thải công nghiệp, sinh hoạt v.v...); Q_2 – các nguồn tạp chất tại đáy (phát thải từ các ống đặt dưới đáy, từ các máy thăm dò); Q_3 – phát thải các tạp chất từ các nguồn nằm tại ranh giới của thủy vực; C_i – những nhiễu động trong trường nồng độ tạp chất, gây nên bởi các nhân tố bên ngoài.

Ta sẽ xét một dạng cụ thể của các điều kiện biên (2.2) ở mặt biên, tại $z = 0$. Với giả thiết không có tương tác của tạp chất với khí quyển, $\beta_1 = 0$, các điều kiện biên như sau:

a) đối với tạp chất tích cực động lực có khả năng nổi lên

$$K_C \frac{\partial C}{\partial z} + w_C + Q_1 = 0; \quad (2.3)$$

b) đối với tạp chất tích cực động lực có khả năng lắng xuống

$$K_C \frac{\partial C}{\partial z} - w_C + Q_1 = 0; \quad (2.4)$$

c) đối với tạp chất động lực trung tính (thụ động)

$$K_C \frac{\partial C}{\partial z} + Q_1 = 0. \quad (2.5)$$

Các điều kiện biên ở đáy biển tại $z = H(x,y)$ cần phải bao gồm những điều kiện tương tác của tạp chất với đáy:

a) đối với tạp chất nổi lên

$$K_C \frac{\partial C}{\partial n} - (\beta_2 + w_C)C + Q_2 = 0; \quad (2.6)$$

b) đối với tạp chất lắng xuống

$$K_C \frac{\partial C}{\partial n} - (\beta_2 - w_C)C + Q_2 = 0; \quad (2.7)$$

c) đối với tạp chất thụ động

$$K_C \frac{\partial C}{\partial n} - \beta_2 C + Q_2 = 0. \quad (2.8)$$

Ở đây n – pháp tuyến với đáy; β_2 – tham số, xác định đặc điểm tương tác tạp chất ô nhiễm với đáy biển. Có rất nhiều nhân tố khác nhau ảnh hưởng đến sự tương tác này (thí dụ, thành phần bùn đáy, khả năng lọc và hấp phụ của chúng, độ gồ ghề thủy động lực của đáy, sự tương tác của tạp chất với sinh vật đáy...). Tham số β_2 được cho bằng hai giá trị tới hạn:

a) $\beta_2 = 0$ ứng với trường hợp tạp chất phản xạ toàn phần từ đáy biển;

b) $\beta_2 \rightarrow \infty$ ứng với trường hợp tạp chất bị hấp phụ hoàn toàn bởi đáy biển.

Toàn bộ sự đa dạng của các điều kiện trên các biên lỏng và cứng của thủy vực có thể biểu diễn dưới dạng

$$a\left[K_C \frac{\partial C}{\partial n} - (\beta_3 + u_n)C + Q_3\right] + b(C - C_3) +$$

$$\chi\left[\left(1 - \frac{u_n}{|u_n|}\right)C + \left(1 + \frac{u_u}{|u_n|}K_C \frac{\partial C}{\partial n}\right)\right] = 0. \quad (2.9)$$

Ở đây n – hướng của pháp tuyến trong tới đường bao vành bờ; u_n – thành phần tốc độ dòng chảy pháp tuyến với ranh giới bên; Q_3 – lượng tạp chất đã biết đi tới trong một đơn vị thời gian; $K_C \frac{\partial C}{\partial n}$ – thành phần pháp tuyến của thông lượng tạp chất rớt qua đường bao bên.

Ta sẽ xét dạng cụ thể của các điều kiện biên (2.9) đối với nguồn tạp chất nằm tại bờ (điểm gom chất thải sinh hoạt hoặc công nghiệp) với giả thuyết $\beta_3 = 0$. Nếu biết lượng phát thải tạp chất trong một đơn vị thời gian, $a = 1$ và $b = 0$, khi đó tại đường bao lỏng L''

$$K_C \frac{\partial C}{\partial n} - u_n C + Q_3 + \left(1 - \frac{u_n}{|u_n|}\right)C + \left(1 + \frac{u_u}{|u_n|}K_C \frac{\partial C}{\partial n}\right) = 0, \quad (2.10a)$$

tại đường bao cứng L'

$$K_C \frac{\partial C}{\partial u} + Q_3 = 0.$$

Nếu biết nồng độ tạp chất ở vùng nguồn, $a = 0$, $b = 1$, khi đó tại đường bao lỏng L''

$$C - C_3 + \left(1 - \frac{u_n}{|u_n|}\right)C + \left(1 + \frac{u_u}{|u_n|}K_C \frac{\partial C}{\partial n}\right) = 0, \quad (2.10b)$$

tại đường bao cứng L'

$$C - C_3 = 0.$$

Về phương diện vật lý, các điều kiện biên (2.10a) có nghĩa rằng đường bao cứng (bờ) được cho dưới dạng tường thẳng đứng, tại đó hoặc tạp chất phản xạ toàn phần, hoặc nó tích tụ, tại đường bao lỏng lưu lượng tạp chất được biết. Các điều kiện biên (2.10b) cho biết rằng tại đường bao cứng, tạp chất bị bờ hấp thụ hoàn toàn, còn tại đường bao lỏng nồng độ tạp chất được biết. Việc đặt ra dạng cụ thể của các điều kiện biên tùy thuộc vào những tính chất vật lý của tạp chất ô nhiễm cũng như vào các đá trầm tích tạo nên bờ biển.

Đối với nguồn ô nhiễm nằm ở phần khơi thủy vực, người ta chấp nhận điều kiện đương nhiên nồng độ tạp chất giảm tới đến 0 ở khoảng cách đủ xa nguồn

$$\text{khi } x,y,z \rightarrow \infty C = 0. \quad (2.10c)$$

Ta phát biểu các điều kiện đầu. Giả thiết rằng ở thời điểm ban đầu

a) không có tạp chất

$$\text{khi } t = 0 C(x,y,z,0) = 0, \quad (2.11a)$$

b) biết nền của các chất ô nhiễm

$$\text{khi } t = 0 C(x,y,z,0) = C_0. \quad (2.11b)$$

Giải bài toán biên (2.1)–(2.11) rất phức tạp. Những khó khăn rất lớn xuất hiện do phải biết cấu trúc ba chiều của các dòng chảy và những hệ số khuếch tán rối. Tốc độ dòng chảy trong thủy vực có thể có được hoặc theo số liệu quan trắc, hoặc theo kết quả tính toán thủy động lực học học. Hiện nay, dữ liệu thực nghiệm hiện có về cấu trúc dòng chảy trong biển và đại dương vẫn còn ít và rời rạc trong không gian và thời gian. Vì vậy, ta nên nhận thông tin về chúng trên cơ sở giải bài toán động lực với điều kiện biết trước trường gió và phân bố mật độ nước biển, có tính đến địa hình đáy và hình dạng thủy vực thực, tức phân tích chẩn đoán.

Cho đến nay, việc xác định các hệ số khuếch tán rối vẫn còn là bài toán khó. Tuy nhiên, các nghiên cứu của Ozmidov và Okubo đã cho phép xác định được hệ số khuếch tán rối ngang K_{CL} . Những thí nghiệm của Ozmidov và Okubo với sự khuếch tán của các chất nhuộm màu đã cho biết rằng đối với một dải rộng kích thước không gian của các xoáy (từ 100 m đến 100 km) thỏa mãn mỗi phụ thuộc $K_{CL}(l) \sim l^{1.1}$. Đối với những dải hẹp hơn thỏa mãn định luật “bốn phần ba”, $K_{CL}(l) \sim l^{4/3}$. Như đã biết, các kết luận này đã được rút ra đối với khoảng quán tính đối lưu của chuyển động rối đẳng hướng địa phương quy mô nhỏ.

Trong điều kiện nếu biết tất cả các thành phần tốc độ dòng chảy và các hệ số khuếch tán rối, thì nghiệm của bài toán biên (2.1)–(2.11) sẽ cho chúng ta bức tranh phân bố nồng độ tạp chất do hệ quả nó tương tác thủy động lực học với môi trường biển.

Sự lan truyền các tạp chất ô nhiễm trong biển dưới tác động của dòng chảy và khuếch tán rối còn phụ thuộc vào kiểu và kích thước của nguồn ô nhiễm.

Theo đặc điểm tác động của nguồn và quy mô lan truyền ô nhiễm, người ta chia ra hai kiểu quá trình:

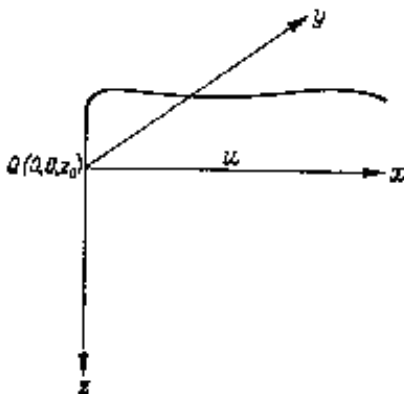
1) Quá trình địa phương – với nguồn kích thước không lớn, thời gian tác động không lớn và lưu lượng không lớn. Có thể xem nguồn là nguồn tức thời, nguồn điểm, tạp chất thụ động và bảo thủ, còn các thành phần tốc độ dòng chảy không đổi;

2) Quá trình quy mô vừa và lớn – với nguồn các chất ô nhiễm mạnh, tác động thường trực. Dòng chảy trong trường hợp này được xác định bằng trường gió và cấu trúc nhiệt muối của nước không đồng nhất, tính tới địa hình đáy và hình thái thủy vực biển.

Các bài toán liên quan tới những quá trình kiểu 1, thường có nghiệm giải tích. Các quá trình kiểu 2 phức tạp hơn, và các bài toán loại này không giải được bằng giải tích, phải áp dụng các phương pháp số.

Những nghiệm giải tích của bài toán về biến đổi nồng độ tạp chất trong môi trường biển khi các hệ số khuếch tán rối không đổi và biến thiên

Chúng ta sẽ xét bài toán về phân bố nồng độ tạp chất nổi lên từ nguồn điểm nằm ở một độ sâu xác định. Thí dụ về một nguồn như vậy có thể là trường hợp phát thải nước công nghiệp hoặc sinh hoạt ở sâu trong nước. Các quy mô không lớn cho phép xem dòng chảy không đổi ở mọi nơi (quá trình địa phương). Bài toán quy về xác định nồng độ tạp chất tại những khoảng cách khác nhau trong phương thẳng đứng kể từ nguồn.



Hình 2.1. Hệ tọa độ của bài toán về sự lan truyền tạp chất nổi lên từ nguồn điểm ở sâu trong nước

Đặt nguồn ô nhiễm công suất Q tại điểm có tọa độ $(0, 0, z^*)$; trục Ox hướng dọc theo dòng chảy u (hình 2.1). Nếu xem khuếch tán rối trên hướng dòng chảy nhỏ so với vận chuyển bình lưu, từ phương trình (2.1) ta có

$$u \frac{\partial C}{\partial x} - w_C \frac{\partial C}{\partial z} - K_C \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - K_{Cy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{C}{\tau_o} = Q \delta(x) \delta(y) \delta(z - z^*) .$$

(2.12)

Bằng phép thế trực tiếp, có thể tin chắc rằng trong trường hợp nồng độ tạp chất giảm tới 0 khi đi ra xa nguồn

$$C = 0 \text{ khi } x, y \rightarrow \infty$$

phương trình (2.12) có nghiệm như sau:

$$C = \frac{\sqrt{u}}{2\sqrt{\pi K_{Cy} x}} \exp\left(-\frac{uy^2}{4K_{Cy} x} - \frac{x}{u\tau_o}\right) S(x, z), \quad (2.13)$$

trong đó $S(x, y)$ – ẩn số mới.

Thế (2.13) vào (2.12) và tích phân theo y từ $-\infty$ đến $+\infty$, sử dụng các điều kiện biên trên mặt (2.3) và ở đáy biển (2.6). Cuối cùng, ta được phương trình khuếch tán rối đối với ẩn số mới

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - w_C \frac{\partial S}{\partial z} - K_C \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = Q \delta(x) \delta(z - z^*) \quad (2.14)$$

với các điều kiện biên:

$$\text{tại } z = 0: K_C \frac{\partial S}{\partial z} + w_C S = 0,$$

$$\text{tại } z = H(x, y): \frac{\partial S}{\partial n} = 0,$$

$$\text{tại } x, y \rightarrow \infty: S = 0. \quad (2.15)$$

Đối với các khoảng cách bé theo trục Ox kể từ nguồn, có thể cho rằng gradient thẳng đứng của nồng độ trên mặt biển bằng không. Khi đó, trong hệ tọa độ mới cùng nổi lên với tốc độ của tạp chất

$$\bar{z} = z + w_C \frac{x}{u},$$

Mô hình hóa sự lan truyền các chất ô nhiễm trong đại dương

từ (2.14), ta có phương trình đơn giản

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - K_C \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = Q \delta(x) \delta(z - z^*), \quad (2.16)$$

$$z^* + w_C \frac{x}{u}$$

với các điều kiện biên:

$$K_C \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \text{ tại } z = w_C \frac{x}{u},$$

$$S = 0 \text{ tại } z = \infty. \quad (2.17)$$

Nghiệm bài toán (2.16)–(2.17) khi chuyển sang hệ tọa độ cũ có dạng

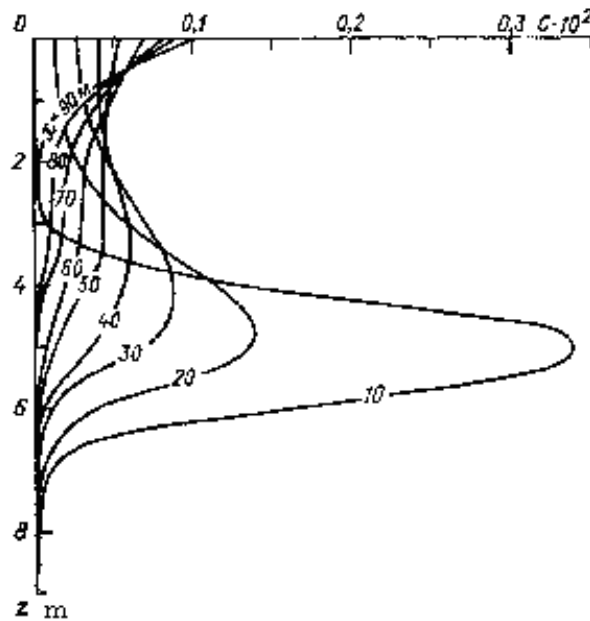
$$\begin{aligned} & z + w_C \frac{x}{u} - z^* \\ & - \left(\frac{u}{4K_C x} \right) + \\ (x, z) = & Q \sqrt{\frac{u}{4\pi K_C x}} \left[\exp \right. \\ & C \\ & z - w_C \frac{x}{u} + z^* \\ & \left. - \left(\frac{u}{4K_C x} \right) \right] \cdot \exp \\ & \exp \end{aligned} \quad (2.18)$$

Hình (2.2) minh họa phân bố nồng độ tạp chất ô nhiễm theo phương thẳng đứng tại các khoảng cách khác nhau cách nguồn nằm ở độ sâu 5 m. Thấy rằng, vì tạp chất có tốc độ thẳng đứng, nên cực đại nồng độ nâng lên khi càng xa nguồn và, bắt đầu từ một khoảng cách nhất định, nó nằm ở lân cận mặt. Ở càng xa nguồn, thì nồng độ tạp chất chỉ giảm rất nhanh vào lúc đầu.

Ta xét một bài toán khác. Tính nồng độ trung bình trên phương thẳng đứng của tạp chất lơ lửng (thụ động), lan truyền trong biển ở lân cận bờ. Dòng chảy trong biển xem là không đổi theo phương ngang và phân thành hai lớp theo phương thẳng đứng, tương ứng với tình huống nước dâng (ở lớp trên dòng chảy hướng vuông góc vào bờ, ở lớp

dưới – hướng ra khơi). Vận chuyển bình lưu, tương ứng với dòng chảy dọc bờ, chúng ta sẽ cho là áp đảo so với khuếch tán rối cùng hướng. Các hệ số khuếch tán rối không đổi.

Bài toán này xuất hiện, thí dụ, khi đặt điểm đổ nước thải sinh hoạt thành phố ra vùng ven bờ. Tình huống xấu nhất trong trường hợp này là khi có dòng chảy (trong gió dông) hướng vào thành phố, cộng với nguồn nằm ở lớp bên trên.



Hình 2.2. Phân bố nồng độ ô nhiễm theo hướng dòng

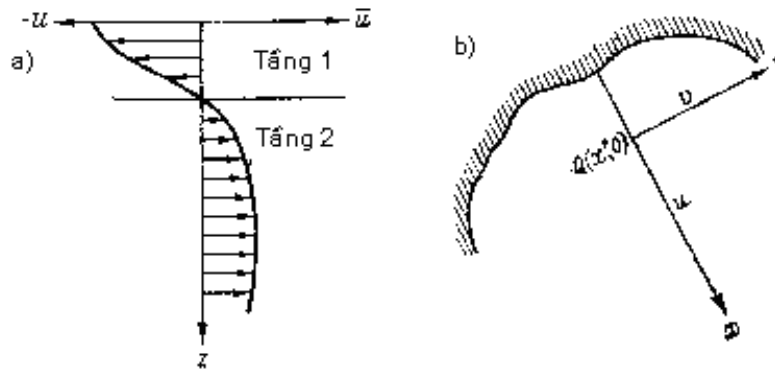
Các số trên các đường cong chỉ khoảng cách theo trục Ox .

Nguồn nằm tại độ sâu 5 m, $\kappa_C = \text{const}$.

Hướng trục Oy dọc theo bờ, trục Ox – vuông góc với bờ, hướng ra khơi (hình 2.3 b); nguồn tạp chất đặt tại điểm có tọa độ $(x^*, 0)$. Lấy trung bình phương trình khuếch tán rối riêng cho lớp trên và lớp dưới, với những giả định nêu trên, ta có phương trình cho lớp trên

$$u \frac{\partial C_1}{\partial x} + v \frac{\partial C_1}{\partial y} - K_{Cx} \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} - \frac{C_1}{\tau_o} = Q \delta(x - x^*) \delta(y). \quad (2.19)$$

Ở đây C_1 – nồng độ trung bình của tạp chất trong lớp trên.



Hình 2.3. Với bài toán về sự lan truyền tạp chất thụ động trong biển hai lớp theo mức độ xa dần nguồn ô nhiễm

Vì ở bờ không tích tụ tạp chất và nước, nghiệm tại $x < 0$ đối với lớp trên có thể xác định như phản xạ gương của nghiệm đối với lớp dưới. Ta đưa ra hệ tọa độ mới $\bar{x} = x + \frac{u}{v}y$; $\bar{y} = y$. Khi đó, từ (2.19) ta có phương trình chuyển đổi

$$v \frac{\partial C_1}{\partial \bar{y}} - K_{Cx} \frac{\partial^2 C_1}{\partial \bar{x}^2} - \frac{C_1}{\tau_0} = Q \delta(\bar{x} - \bar{x}^*) \delta(\bar{y}) \quad (2.20)$$

và các điều kiện biên giảm nồng độ tạp chất tại vô cùng $\bar{x}, \bar{y} \rightarrow \infty$; nghiệm có dạng

$$x + \frac{u}{v}y - x^*$$

$$v \left(\frac{v}{4K_{Cx}y^2} \right) \quad (2.21)$$

$$C_1 = Q \sqrt{\frac{v}{4\pi K_{Cx}y}} \exp$$

Lời giải đối với lớp dưới được xác định hoàn toàn tương tự. Nồng độ trung bình theo phương thẳng đứng tại điểm bất kỳ trong biển bằng nửa tổng của hai nghiệm:

$$C = \frac{1}{2}(C_1 + C_2) = \frac{Q}{4} \sqrt{\frac{v}{\pi K_{Cx}y}} \times$$

Mô hình hóa sự lan truyền các chất ô nhiễm trong đại dương

$$x + \frac{u}{v}y - x *$$

$$x - \frac{u}{v}y + x *$$

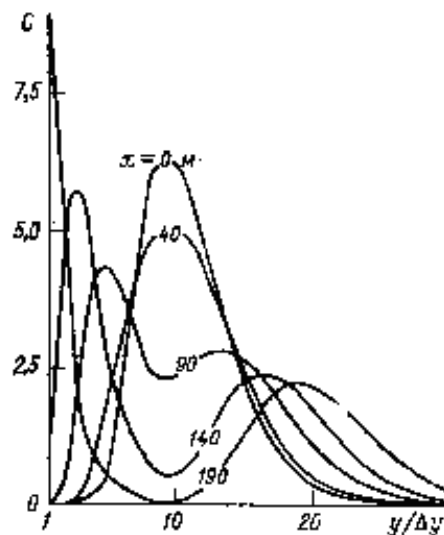
$$v \left(\frac{4K_C x y^2}{x} \right)$$

— (2.22)

$$v \left(\frac{4K_C x y^2}{x} \right) + \exp$$

—

exp



Hình 2.4. Nồng độ trung bình tại các khoảng cách khác nhau kể từ bờ

Điểm đổ chất thải được đưa ra khoảng cách 200 m, $K_C = \text{const}$

Với tư cách là thí dụ, trên hình 2.4 biểu diễn phân bố nồng độ các chất ô nhiễm tại các khoảng cách khác nhau kể từ nguồn và từ bờ. Nồng độ lớn nhất dọc theo bờ được thấy tại khoảng cách cách nguồn bằng $10\Delta y$. Theo mức độ xa dần ra khơi, tổng nồng độ giảm, nhưng nhận thấy hai cực đại nồng độ gây nên bởi các dòng thuận và ngược. Ở lân cận nguồn, đặc điểm của đường cong không thay đổi, còn nồng độ thì đương nhiên là tăng lên.

Những nghiệm đã xét nhận được trong điều kiện các hệ số khuếch tán rối không đổi. Được biết, chúng phụ thuộc mạnh vào các đặc trưng của dòng chảy rối trong biển, quy mô các xoáy, khoảng cách từ nguồn... Đương nhiên, ngoài các nhân tố đã liệt kê ở trên (công suất và kiểu nguồn, các tính chất của tạp chất, khoảng cách từ nguồn), phân bố nồng độ tạp chất sẽ phụ thuộc vào dạng phụ thuộc hàm của các hệ số khuếch tán rối vào khoảng cách tới nguồn (hoặc vào thời gian). Thí dụ, đối với trường hợp khuếch tán rối hai chiều tạp chất thụ động bảo thủ từ nguồn điểm liên tục, khi chấp nhận định luật “bốn phần ba”, đúng cho trường hợp rối đẳng hướng địa phương, phương trình cơ bản được viết thành

$$u \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial C}{\partial y} n_1 \varepsilon^{1/3} x^{4/3} \right) = Q \delta(x - x^*) \delta(y - y^*), \quad (2.23)$$

trong đó ε – tốc độ tản mát năng lượng rối, n_1 – hệ số không thứ nguyên, bằng 0,1. Nghiệm của phương trình này với giả thiết rằng nồng độ tạp chất khi $x, y \rightarrow \infty$ giảm đến 0, có dạng sau:

$$C(x, y) = \frac{4Q}{6u\sqrt{\pi} \left(\frac{4n_1 \varepsilon^{1/3} x^{4/3}}{9} \frac{x}{u} \right)^{3/2}} \exp \left(- \frac{y^{2/3}}{\frac{4n_1 \varepsilon^{4/3} x^{4/3}}{9} \frac{x}{u}} \right). \quad (2.24)$$

Sự khác biệt đáng kể của biểu thức (2.24) so với các nghiệm của phương trình khuếch tán rối với hệ số không đổi, thí dụ so với (2.21), đó là nồng độ tạp chất giảm chậm hơn khi xa dần khỏi nguồn. Chỉ số của hàm mũ tỷ lệ với $y^{-2/3}$, còn theo (2.21) nó tỷ lệ với y^{-2} .

Ảnh hưởng đồng thời của các quá trình khuếch tán rối phương thẳng đứng và phương ngang tới biến đổi nồng độ tạp chất từ nguồn điểm tức thời đặt tại gốc tọa độ trong dòng biển di chuyển với tốc độ không đổi v , sẽ được mô tả tuần tự bằng các biểu thức:

a) khi $K_C = 0$, $K_{CL} \sim \varepsilon^{1/3} t^{4/3}$

$$z - z^*$$

$$\varepsilon t^3 \quad ; \quad (2.25)$$

$$Q \delta$$

$$C(x, y, t) =$$

b) khi $K_C = \text{const}$, $K_{CL} \sim \varepsilon^{1/3} t^{4/3}$

Mô hình hóa sự lan truyền các chất ô nhiễm trong đại dương

$$C(x,y,z,t) = \frac{Q}{\varepsilon t^3} f_0 \left[\frac{(x-vt)^2 + y^2}{\varepsilon t^3} \right] \frac{1}{\sqrt{\pi K_C t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4K_C t} \right); \quad (2.26)$$

c) khi $K_C = \chi uz$, $K_{CL} \sim \varepsilon^{1/3} t^{4/3}$ (trong đó u – tốc độ dòng lực, χ – hằng số Karman)

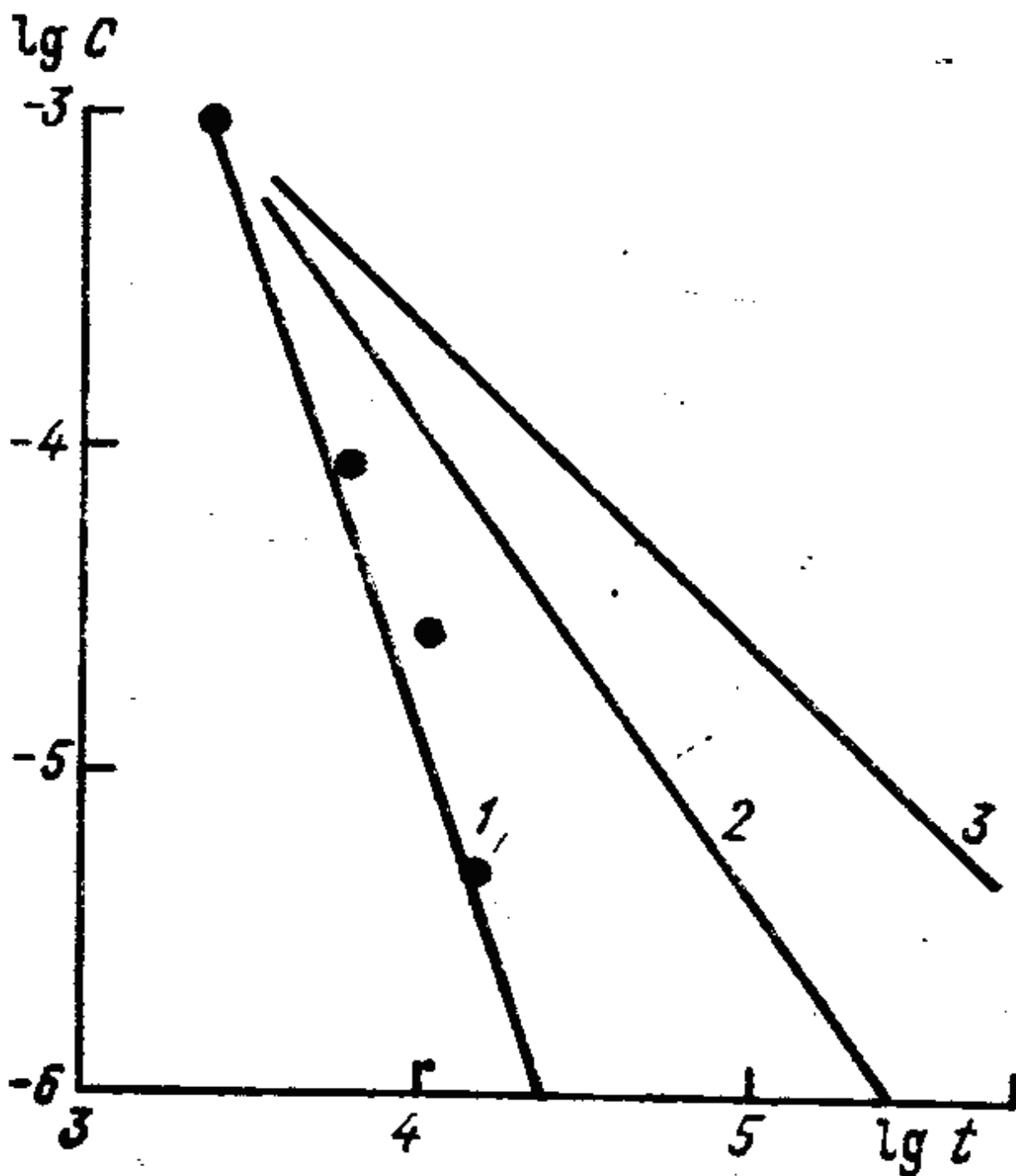
$$C(x,y,z,t) = \frac{Q}{\varepsilon t^3} f_0 \left[\frac{(x-vt)^2 + y^2}{\varepsilon t^3} \right] \frac{1}{\chi ut} \exp\left(-\frac{z}{\chi ut} \right); \quad (2.27)$$

d) khi $K_C \sim \varepsilon^{1/3} t^{4/3}$, $K_{CL} = 0$

$$C(x,y,z,t) = \frac{Q}{(\varepsilon t^3)^{3/2}} f_1 \left[\frac{(x-vt)^2 + y^2}{\varepsilon t^3} \right], \quad (2.28)$$

ở đây f_0 và f_1 – một số hàm vạm năng.

Các trường hợp vừa xét tương ứng với rất nhiều tình huống tương tác của các quá trình khuếch tán rối thẳng đứng và phương ngang. Hai chế độ đầu có thể xảy ra trong điều kiện nước biển phân tầng thẳng đứng mạnh, khi đó trao đổi thẳng đứng hoặc bị trấn áp hoàn toàn ($K_C = 0$), hoặc yếu và chỉ phát triển trong các lớp tựa đồng nhất ($K_C = \text{const}$). Trường hợp thứ ba ($K_C = \chi ut$) quan sát được trong điều kiện rối “gần tường” và nước phân tầng phiếm định. Trường hợp thứ tư ($K_C \sim \varepsilon^{1/3} t^{4/3}$) ? trong điều kiện rối phát triển.



Hình 2.5. Biến đổi nồng độ

sai phân một cạnh ngược dòng, khi đó xấp xỉ sai phân hữu hạn của phương trình (2.29) dạng hiện được viết như sau:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{\Delta C_{ij}}{\Delta t} = \frac{C_{ij}^{t+\Delta t} - C_{ij}^t}{\Delta t}, \quad (2.30)$$

$$C_{ij}^{t+\Delta t} = C_{ij}^t + v_{CL}\Delta t(\Delta_{xx} + \Delta_{yy})C_{ij}^t - \\ - \frac{u_{ij}^t \Delta t}{2} \left[(1 - \varepsilon_u) \Delta_x^+ C_{ij}^t + (1 + \varepsilon_u) \Delta_x^- C_{ij}^t \right] -$$

$$\frac{v_{ij}^t \Delta t}{2} \left[(1 - \varepsilon_v) \Delta_y^+ C_{ij}^t + (1 + \varepsilon_v) \Delta_y^- C_{ij}^t \right] - p C_{ij}^t \Delta t, \quad (2.31)$$

trong đó u_{ij} , v_{ij} , C_{ij} – các thành phần tốc độ dòng chảy và nồng độ tạp chất tại nút lưới với chỉ số i,j ; $\varepsilon_u, \varepsilon_v$ – dấu của các thành phần u và v tương ứng; Δ_{xx} , Δ_{yy} – xấp xỉ của các đạo hàm bậc hai; Δ_x^+ , Δ_y^- – sai phân ngược tuần tự theo x và y ; Δ_x^+, Δ_y^+ – sai phân xuôi tuần tự theo x và y ; v_{CL} – hệ số nhớt tính toán;

$$\Delta_{xx} C_{ij} = \frac{C_{i+1,j} - 2C_{ij} + C_{i-1,j}}{\Delta x^2},$$

$$\Delta_{yy} C_{ij} = \frac{C_{i,j+1} - 2C_{ij} + C_{i,j-1}}{\Delta y^2},$$

$$\Delta_x^+ C_{ij} = \frac{C_{i+1,j} - C_{ij}}{\Delta x},$$

$$\Delta_y^+ C_{ij} = \frac{C_{i,j+1} - C_{ij}}{\Delta y}$$

$$\Delta_x^- C_{ij} = \frac{C_{ij} - C_{i-1,j}}{\Delta x}$$

$$\Delta_y^- C_{ij} = \frac{C_{ij} - C_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Sơ đồ số (2.31) đảm bảo độ chính xác bậc một theo thời gian và bậc hai – theo không gian.

Tuy nhiên, sơ đồ hiện (2.31) không phải là sơ đồ ổn định tuyệt đối. Với nó cần thỏa mãn chỉ tiêu ổn định Curant–Levi (với trường hợp $\Delta x = \Delta y$):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{4v_{CL} + (|u| + |v|)\Delta x}. \quad (2.32)$$

Chọn các bước không gian Δx , Δy như thế nào là thích thước, hình dạng biển và quy mô của các quá trình thủy động lực diễn ra trong nó. Còn bước thời gian Δt được chọn theo điều kiện hội tụ của sơ đồ sai phân (2.32).

Mô hình số đã xây dựng cho phép xét sự hình thành trường chất ô nhiễm bất kỳ trong vùng biển, sự biến thiên theo thời gian và không gian của nó bởi với rất nhiều loại nguồn ô nhiễm. Mô hình này cho phép theo dõi tạp chất đi vào biển nông và tìm hiểu những tình huống bất lợi tùy theo kiểu gió trên biển và hình thái thủy vực biển.

Với tư cách thí dụ, trong bảng 2.1 dẫn kết quả thực hiện thuật toán (2.31) trên máy tính đối với nhiều kiểu nguồn ô nhiễm phân bố ở vùng nước nông phía bắc biển Caspi. Tính toán thực hiện cho trường hợp gió tây bắc thống trị, tốc độ 15–20 m/s. Bước tính không gian chọn bằng 20 km, vì bước tính này nắm bắt được những xoáy dòng chảy ngang chính của vùng. Với bước không gian Δx đã chọn, theo điều kiện (2.32), bước thời gian phải không lớn hơn 30 phút. Hệ số khuếch tán rối phương ngang lấy bằng $K_{Cx} = K_{Cy} = 1,5 \cdot 10^2 \text{m}^2/\text{s}$. Các nguồn ô nhiễm phân bố ở cửa sông Vonga và sông Ural. Đã nhận được các trường nồng độ tạp chất ứng với nhiều chế độ nguồn khác nhau (tác động tức thời, liên tục, nguồn điểm, nguồn khối v.v...). Thấy rằng, sự vận chuyển chất ô nhiễm trong biển diễn ra chủ yếu do tác động của các nhân tố bình lưu (dòng chảy). Tuy nhiên, nếu nguồn điểm phân bố trong vùng cấu trúc xoáy của trường dòng chảy, thì các tỷ phần đóng góp của các quá trình bình lưu và khuếch tán trong lan truyền ô nhiễm có cùng bậc.

Thời gian gần đây, sơ đồ hiện xấp xỉ phương trình kiểu (2.29) được giải số bằng phương pháp tách nhánh hiệu quả. Tại mỗi bước thời gian, hai bài toán độc lập được xét:

a) biến đổi nồng độ tạp chất do khuếch tán rối cho thời gian $t + \frac{\Delta t}{2}$;

b) biến đổi nồng độ tạp chất do bình lưu và thích ứng qua lại cho thời gian $t + \Delta t$.

Còn tương tự sai phân hữu hạn của phương trình tách nhánh (2.29) là tổng của hai phương trình sai phân hữu hạn:

$$C_{ij}^{t+\frac{\Delta t}{2}} = C_{ij}^t + v_{CL}\Delta t(\Delta_{xx} + \Delta_{yy})C_{ij}^t, \quad (2.33)$$

$$C_{ij}^{t+\Delta t} = C_{ij}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \frac{u_{ij}\Delta t}{2} \left[(1 - \varepsilon_u)\Delta_x^+ C_{ij}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + (1 + \varepsilon_u)\Delta_x^- C_{ij}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right] -$$

$$\frac{v_{ij}\Delta t}{2} \left[(1 - \varepsilon_v)\Delta_y^+ C_{ij}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + (1 + \varepsilon_v)\Delta_y^- C_{ij}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right] - p C_{ij}^{t+\frac{\Delta t}{2}}.$$

Bảng 2.1. Ảnh hưởng của kiểu nguồn tới nghiệm bài toán lan truyền tập chất ở biển nông (Shkudova, 1967)				
	Nguồn	Đặc trưng của tập chất ô nhiễm	Đặc trưng của các điều kiện biên	Kết quả
<p>Kết quả giải</p> <p>Phát hiện vết dầu do các lực fính học diễn ra với tốc độ 2,3 cm/s; sau một ngày dầu lan 2 km. Sự trôi vãng dầu do tác động của gió tây bắc 1,5-2,0 cm/s diễn ra với tốc độ 22 cm/s; sau một ngày vãng dầu tới 20 km về hướng đông. Do các dòng chảy vết dầu lan về phía đông với tốc độ 23 cm/s. Trong hướng vuông góc diễn ra sự ăn mất dầu do khuếch tán. Tốc độ của quá trình này không lớn</p>	<p>Tuyến tủy, tác động ổn định, phân bố ở trên bờ (các chất ô nhiễm được mang ra biển cùng với nước các con sông)</p>	<p>Nước thải. Cần tính đến hoạt tính động học của tập chất (w_c) và những tính chất không bảo thủ (τ_0)</p>	<p>Tại thời điểm đầu biển không có các chất ô nhiễm $t = 0, C(x_0, y_0, t_0) = 0$. Bắt đầu từ thời điểm t_0 sông Vônga và Ural mang tập chất sinh hoạt và công nghiệp. Nông độ ở nguồn được biết. Các điều kiện biên ở biển lỏng (trong chất lỏng các sóng) $C(x_1, y_1, t_1) = C(x_2, y_2, t_2) = \dots = C$. Biên lỏng. Thuật giải số có tính tới w_c và τ_0 của tập chất</p>	<p>Với gió tây bắc, lan truyền tập chất yếu do bình lưu của chảy, các đường đẳng nồng độ % dầu trôi theo hướng đông một ngày tập chất mang đi 20 km. Vai trò bình lưu trong truyền tập chất rất lớn. Nó bằng hơn khuếch tán tới 40-50 lần ở kỳ đầu. Với thời gian, chênh lệch giảm xuống còn 3-</p>
<p>Sau 4 ngày tập chất phenoI lan tới khoảng cách 30 km kể từ nguồn với tốc độ 1,5 cm/s. Trong vùng này nồng độ của nó giảm đi hai bậc so với nồng độ ở nguồn</p>	<p>Tuyến tủy, tác động nhất thời, nằm trên bờ (phát thải nước công nghiệp một lần)</p>	<p>Nước nguồn gốc công nghiệp. Cần tính đến tốc độ trọng lực riêng có w_c và chu kỳ phân hủy τ_0</p>	<p>Tại thời điểm đầu biển không ô nhiễm. Nhưng ở biển lỏng, lân cận bờ đã có nước thải công nghiệp. Các điều kiện biên ở biển lỏng tại $t = t_0, C(x_1, y_1, t_1) = C(x_2, y_2, t_2) = \dots = C(x_0, y_0, t_0)$; tại $t > t_0, C(x_1, y_1, t_1) = C(x_2, y_2, t_2) = \dots = C(x_0, y_0, t_0) = 0$. Thuật giải thuật giải số có tính đến w_c và τ_0 của các chất ô nhiễm</p>	<p>Tập chất với nồng độ 0,1 % lúc giờ sau đó thất đã lan đi 2,5 km 6-9 giờ chỉ còn các vết tập Nồng độ cực đại quan sát ở nguồn ngay sau phát thải, sẽ giảm và khoảng sau hai ngày vùng nguồn còn thấy rõ các vết khoảng cách 20 km cách nguồn vết tập chất biểu hiện sau 3-6 còn cực đại nồng độ - sau 13 Sau một ngày lại vùng này k còn tập</p>

Nguồn	Đặc trưng của tạp chất ô nhiễm	Đặc trưng của các điều kiện biên
<p>Nguồn điểm tác động nhiệt thời, nằm trong biển (phát thải dầu do sự cố)</p>	<p>Dầu; về tính chất gần giống các tạp chất trung hòa động lực. Cần tính đến các tính chất không bảo thủ (chu kỳ phân hủy) cũng như phát tán vết dầu do các lực fính học và sự trôi vãng dầu (sai phát tán) dưới tác động của gió</p>	<p>Tại thời điểm đầu biển không có các chất ô nhiễm. Tại $t = 4$, $C(x_0, y_0, 4_0) = 0$. Ở mọi điểm nào đó trên biển xảy ra phát thải dầu sự cố liên tục thành dòng di chuyển $(C(x_0, y_0, t) = M(t)$ tại $t > 4$. Khi xa dần khỏi nguồn nóng độ dầu giảm tới không $C(x_0, y_0 \rightarrow \infty) = 0$. Thực hiện thuật giải số tính đến các tính chất trung hòa động lực của dầu và chu kỳ phân hủy λ</p>
<p>Nguồn điểm tác động ổn định, phân bố lân cận bờ (phenol gia nhập từ nguồn điểm trong châu thổ sông Vonga)</p>	<p>Phenol; gắn với các tạp chất trung hòa động lực. Cần tính đến thuộc tính không bảo thủ của phenol (4)</p>	<p>Tại thời điểm đầu biển không có phenol. Tại $t = 4$, $C(x_0, y_0, 4_0) = 0$. Bất đầu từ thời điểm t phenol được mang vào biển qua nguồn điểm, nằm trong châu thổ sông Vonga. Nồng độ ở nguồn được biết. Các điều kiện biên ở biển lỏng tại $t > 4$, $C(x_0, y_0, t) = C_{\text{đóng}}$. Thực hiện thuật giải số có tính đến các đặc tính trung hòa động lực của phenol và chu kỳ phân hủy của nó</p>