



Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm(tạp chất)trong môi trường rối

Bởi:

PGS. TS. NGŨT Phạm Văn Huân

Các chất gây ô nhiễm (tạp chất) từ những nguồn khác nhau lan truyền trong khí quyển dưới ảnh hưởng của: 1) sự vận chuyển bởi các dòng không khí; 2) sự trao đổi rối; 3) sự hấp thụ tạp chất vào các hạt mây và sương mù và sau đó rửa trôi bởi giáng thủy.

Sự xuất hiện và các tiêu chuẩn chuyển động rối của khí quyển

Đặc điểm nổi bật của các chuyển động khí quyển là các phần tử không khí nhỏ (đôi khi gọi là các moli) thực hiện chuyển động không có trật tự, hỗn loạn. Chế độ chuyển động như vậy của khí quyển (cũng như của chất lỏng hay khí bất kỳ khác) được quy ước gọi là *chuyển động rối*. Chế độ chuyển động trong đó các phần tử di chuyển theo các quỹ đạo đều song song hơi uốn cong gọi là *chuyển động phân lớp*.

Những nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đã cho thấy rằng tính chất chuyển động của chất lỏng và chất khí được quy định bởi hai số hay tham số không thứ nguyên:

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường rối

a) Số Reynolds

$$Re = \frac{ul}{\nu} \quad (6.1)$$

(ở đây u – tốc độ chuyển động, l – kích thước đặc trưng của dòng, ν – hệ số nhớt phân tử động học);

b) Số Richardson

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\gamma_* - \gamma}{\beta^2} \quad (6.2)$$

(ở đây $\gamma = -\partial T / \partial z$ – gradient thẳng đứng của nhiệt độ không khí; $\gamma_* = g / c_p \approx 1^\circ \text{C} / 100 \text{ m}$ – gradient đoạn nhiệt khô; g – gia tốc rơi tự do, T – nhiệt độ không khí, K;

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}$$

gradient thẳng đứng của tốc độ gió; u, v – các hình chiếu tốc độ gió trên các trục tọa độ ngang x và y).

Với những giá trị Re nhỏ, chuyển động chất lỏng và chất khí mang tính chất phân lớp. Tại trị số tới hạn Re_{cr} của số này sẽ thấy sự chuyển tiếp từ chuyển động phân lớp sang chuyển động rối, còn với những trị số Re lớn hơn, chuyển động trở nên hoàn toàn rối.

Ước lượng Re đối với các chuyển động khí quyển cho biết rằng phần áp đảo các chuyển động mang tính chất rối. Ngoại trừ các chuyển động trong một lớp không khí rất mỏng (độ dày từ vài mm đến 1-2 cm) ở sát mặt đất, gọi là *phụ lớp nhớt*.

Tuy nhiên, trong khí quyển và thủy quyển, nơi nhiệt độ, mật độ và tốc độ chuyển động biến đổi theo độ cao (độ sâu), tức có sự phân lớp (bất đồng nhất) theo đường thẳng đứng, thì số Re không thể là tiêu chuẩn duy nhất để xuất hiện và phát triển rối trong môi trường phân lớp (phân tầng) như vậy. Phân tích phương trình quyết định sự biến đổi theo thời gian của động năng các phân tử rối cho thấy rằng, trong môi trường phân lớp, bên cạnh số Reynolds, chế độ chuyển động còn phụ thuộc vào số Richardson, Ri đã đưa ra ở trên có tính tới cả ảnh hưởng của các nhân tố nhiệt (γ) lẫn động lực (β) tới sự xuất hiện và phát triển rối trong khí quyển và thủy quyển. Giống như đối với Re , tồn tại trị số tới hạn Ri_{cr} , trị số này theo các ước lượng hiện đại gần bằng đơn vị.

Với những $Ri < Ri_{cr}$ cường độ chuyển động rối, tức động năng của các phân tử rối, tăng lên theo thời gian; ngược lại, với $Ri > Ri_{cr}$, yếu dần và với những trị số lớn hơn, chế độ rối có thể chuyển sang chế độ phân lớp.

Như có thể rút ra từ biểu thức (6.2), sự tăng các gradient thẳng đứng của nhiệt độ γ và vận tốc gió β làm giảm Ri , và do đó, làm tăng cường độ chuyển động rối.

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường ròi

Các giá trị γ lớn (dương) ở trong lớp khí quyển sát mặt đất thường hay quan trắc thấy trong thời tiết ít mây vào các giờ ban ngày của mùa ấm. Trong những điều kiện đó, nhiệt độ của đất và không khí gần nó dưới ảnh hưởng của bức xạ Mặt Trời khá cao, còn khi nâng lên nhiệt độ không khí giảm nhanh theo độ cao: gradient γ dương và thường lớn hơn γ_a : $\gamma > \gamma_a$. Phân tầng như vậy gọi là *phân tầng bất ổn định*. Khi đó số Richardson nhỏ hơn không $R_i < 0$.

Vào các giờ ban đêm của mùa ấm, còn mùa đông thì không hiếm khi trong cả ngày, đặc biệt với thời tiết ít mây giá lạnh, trong lớp sát mặt đất, do ảnh hưởng của mất nhiệt bức xạ của mặt đất, nhiệt độ không khí thấp nhất tại mặt đất, còn khi nâng lên nó tăng theo độ cao. Sự phân bố như vậy của nhiệt độ không khí theo độ cao gọi là *phân bố nghịch*. Khi đó gradient γ âm, số $R_i > 0$, cường độ chuyển động ròi yếu dần theo thời gian cho đến khi triệt tiêu hẳn.

Phân tầng nghịch ($\gamma > 0$) là trường hợp riêng của một loại rộng hơn - *phân tầng ổn định*, trong đó nhiệt độ không khí giảm theo độ cao chậm hơn nhiệt độ của phần tử nâng lên đoạn nhiệt trong khí quyển.

Sự tăng gradient thẳng đứng β của tốc độ gió luôn luôn thúc đẩy tăng cường ròi, bởi vì khi đó R_i giảm. Sự gia tăng β ở lớp sát mặt đất liên quan đơn trị với sự tăng của chính tốc độ gió. Như vậy, ứng với γ (nhân tố nhiệt) cố định, nếu tốc độ gió càng lớn, thì chuyển động ròi (trao đổi) càng mạnh, ngược lại, khi gió rất yếu, trao đổi ròi ở lớp sát mặt đất chấm dứt.

Sự lan truyền khói từ các ống khói nhà máy và lò đốt cho ta khái niệm trực quan về mức độ phát triển ròi trong khí quyển. Với tốc độ gió nhỏ hoặc phân tầng nghịch (nói chung khi các trị số R_i lớn), khói lan dưới dạng tia mỏng tới khoảng cách khá xa. Khi tốc độ gió tăng dần hoặc chuyển từ phân tầng ổn định sang bất ổn định (một cách tổng quát khi R_i giảm), tia khói càng có đặc điểm ngoằn ngoèo hơn và cuối cùng tan thành những đụn khói riêng biệt.

Trong trường hợp xem xét vấn đề ô nhiễm khí quyển ở qui mô toàn cầu, cần có những thông tin ít nhất về các đặc trưng của lớp đối lưu và lớp bình lưu, bởi vì các tạp chất nguồn gốc nhân tạo và tự nhiên xuất hiện và lan truyền trong các lớp này. Đặc biệt khi đó phải chú ý tới ảnh hưởng của tạp chất tới quyển ôzôn (20-55 km) - một lớp trong đó tập trung khối lượng chính ôzôn chứa trong khí quyển; một lượng ôzôn khác chứa trong các lớp khác, chẳng hạn, lớp đối lưu.

Tuy nhiên, thực tế tất cả các tạp chất nguồn gốc nhân sinh (ngoại trừ các tạp chất phóng xạ tạo thành khi nổ hạt nhân) lan truyền lên trên đến độ cao 1,0-1,5 km, ranh giới trên H của *lớp biên hành tinh của khí quyển*. Ranh giới này dao động đáng kể theo thời gian và không gian: từ 300-400 m khi trao đổi ròi kém phát triển (trị số R_i lớn) đến 2,0-2,5 km khi trao đổi ròi phát triển mạnh (trị số R_i nhỏ).

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường rôi

Lớp biên nằm trong sự tương tác đặc biệt mật thiết với bề mặt đất (mặt đệm). Ảnh hưởng lớn tới rôi trong lớp này ngoài γ và β còn có độ gồ ghề của mặt đệm: độ cao và hình dạng của những yếu tố bất đồng đều của mặt đất (thảm thực vật, tòa nhà, đồi núi v.v...). Để đặc trưng định lượng về ảnh hưởng của mặt đệm tới dòng không khí, người ta đưa ra khái niệm tham số gồ ghề z_0 .

Bên trong lớp biên, người ta chia ra lớp khí quyển sát mặt đất (sát mặt nước) với ranh giới trên từ 30-50 m đến 150-250m, trong lớp này gradient thẳng đứng của các đại lượng khí tượng: nhiệt độ, độ ẩm, tốc độ gió, và nồng độ tạp chất, đặc biệt lớn và dao động đặc biệt mạnh theo thời gian và không gian.

Phương trình vận chuyển tạp chất trong khí quyển rôi

Về phương diện định lượng, biến đổi hàm lượng tạp chất theo thời gian và không gian được mô tả bằng phương trình vận chuyển tạp chất. Ta dừng lại ở việc dẫn lập phương trình này, một trong những phương trình cơ bản trong cơ học các tạp chất.

Khi không có rôi (chuyển động phân lớp), khối lượng tạp chất trong một đơn vị khối lượng không khí, tức nồng độ khối q , có thể biến đổi trong thể tích không khí chuyển động chỉ do ảnh hưởng của trao đổi phân tử. Như vậy

$$\frac{dq}{dt} = \varepsilon_M, \quad (6.3)$$

trong đó ε_M – nhập lượng tạp chất phân tử vào 1 kg không khí trong 1 s; dq/dt – đạo hàm toàn phần của q theo thời gian, đặc trưng cho sự biến đổi của q trong thể tích không khí chuyển động cùng với dòng không khí. Sử dụng biểu thức đã biết của đạo hàm toàn phần

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z}. \quad (6.4)$$

Ở đây $\partial q/\partial t$ – đạo hàm địa phương của q theo t , đặc trưng cho biến đổi q theo thời gian tại điểm cố định của không gian; u, v, w – các hình chiếu của tốc độ tức thời của chuyển động phân tử trên các trục x, y, z của hệ tọa độ vuông góc, trong đó các trục x và y ở trên mặt phẳng nằm ngang, trục z hướng lên trên theo đường thẳng đứng thực. Ta dẫn ra phương trình liên tục

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \quad (6.5)$$

trong đó ρ – mật độ không khí

Nếu bây giờ cộng các phương trình (6.3) và (6.5), ta có

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} = \varepsilon_M, \quad (6.6)$$

trong đó $c = \rho q$ – nồng độ khối của tạp chất (khối lượng tạp chất trong 1 m³ không khí).

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường rối

Trong trường hợp chuyển động rối, tốc độ gió, nồng độ tạp chất và các đại lượng khác bị biến đổi thiếu trật tự (hỗn loạn) theo thời gian, hay chúng thăng giáng, như người ta vẫn nói. Nhưng bên cạnh chuyển động hỗn loạn, tất cả các phần tử không khí có một tốc độ di chuyển như nhau (trung bình). Do đó, các thành phần u, v, w tốc độ tức thời của chuyển động phần tử không khí có thể được biểu diễn dưới dạng các tổng

$$u = \bar{u} + u'; \quad v = \bar{v} + v'; \quad w = \bar{w} + w'$$

, (6.7)

trong đó $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ – các hình chiếu *tốc độ chuyển động trung bình*, được các định bằng cách lấy trung bình trong một khoảng thời gian nào đó hoặc trong một thể tích không khí nào đó; u', v', w' – các thành phần *tốc độ chuyển động thăng giáng*.

Nồng độ *tức thời* của tạp chất cũng sẽ được viết dưới dạng như vậy

$$c = \bar{c} + c'. \quad (6.8)$$

Bây giờ, nếu thế các biểu thức (6.7) và (6.8) vào phương trình (6.6) và lấy trung bình nó, đồng thời sử dụng những tính chất đã biết của phép lấy trung bình:

$$\bar{c}' = 0;$$

$$\bar{u}' = 0 \text{ – giá trị trung bình của các thăng giáng bằng không;}$$

$$\bar{\bar{c}} = \bar{c};$$

$$\bar{\bar{u}} = \bar{u} \text{ – trung bình của trung bình bằng giá trị trung bình;}$$

$$\overline{\frac{\partial c}{\partial x}} = \frac{\partial \bar{c}}{\partial x};$$

$$\overline{(\bar{c} + c')} = \bar{c} + \bar{c}',$$

ta có *phương trình vận chuyển (nhập lượng) tạp chất trong khí quyển rối* như sau:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}\bar{c}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{c}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}\bar{c}}{\partial z} = - \left(\overline{\frac{\partial u'c'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial v'c'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial w'c'}{\partial z}} \right) + \bar{\epsilon}_M$$

Những giá trị trung bình của các tích thăng giáng nồng độ khối (c') với các hình chiếu tốc độ chuyển động thăng giáng

$$Q_x = \overline{u'c'}, \quad Q_y = \overline{v'c'}, \quad Q_z = \overline{w'c'} \quad (6.10)$$

có mặt trong (6.9) là các thành phần *thông lượng tạp chất rối* (\mathbf{Q}). Mỗi thành phần trong số đó đặc trưng cho lượng vận chuyển tạp chất bởi các phần tử rối trong một đơn vị thời gian trên hướng tương ứng qua mặt phẳng đơn vị vuông góc với hướng đó. Thứ nguyên và đơn vị của thông lượng tạp chất rối: $[Q] = \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Để dàng chứng minh một định lý, theo đó nhập lượng riêng ε của tạp chất (hơi nước, các dạng năng lượng khác nhau v.v...) liên quan với thông lượng \mathbf{Q} bằng quan hệ

$$\text{hay } \varepsilon = -\frac{1}{\rho} \text{div } \mathbf{Q}$$

$$\rho\varepsilon = -\left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \frac{\partial Q_z}{\partial z}\right), \quad (6.11)$$

trong đó $\rho\varepsilon$ – *nhập lượng tạp chất tuyệt đối*: khối lượng tạp chất đi vào một đơn vị thể tích không khí trong một đơn vị thời gian; thứ nguyên và đơn vị $[\rho\varepsilon] = \text{kg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$, trong khi đó thứ nguyên của nhập lượng riêng $[\varepsilon] = \text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{s}) = \text{s}^{-1}$. Như vậy, số hạng thứ nhất ở vế phải phương trình (6.9) biểu diễn nhập lượng tạp chất rối tuyệt đối

$$\rho\varepsilon_{\mathbf{r}} = -\left(\frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z}\right). \quad (6.12)$$

Các biểu thức (6.10) đã dẫn ở đây cho các thành phần thông lượng tạp chất rối và công thức (6.12) đối với nhập lượng rối dưới dạng như vậy được sử dụng trong lý thuyết thống kê về rối và lan truyền tạp chất. Khi giải các bài toán ứng dụng, người ta thường sử dụng cái gọi là lý thuyết rối bán thực nghiệm, trong đó một đặc trưng cơ bản về cường độ xáo trộn là hệ số rối k , vì vậy, nhiều khi người ta gọi lý thuyết đó là lý thuyết k . Về phương diện vật lý, rõ ràng là trao đổi rối dẫn tới làm san bằng hàm lượng riêng của tạp chất. Giả sử tại mực z nào đó nồng độ riêng trung

khí quyển thực thường hay gặp trường hợp nồng độ tạp chất giảm theo độ cao, tức $\bar{q} + \Delta\bar{q} < \bar{q}$, hay $\Delta\bar{q} < 0$ (mặc dù ở các lớp riêng lẻ cũng có thể \bar{q} tăng theo độ cao, tức $\Delta\bar{q} > 0$). Khi có xáo trộn, các phân tử rôi chuyển động đi lên mang theo một khối lượng tạp chất tỉ lệ với \bar{q} , còn các phân tử chuyển động đi xuống mang theo khối lượng tỉ lệ với $\bar{q} + \Delta\bar{q}$. Vì vậy, nếu các khối lượng phân tử đi lên và đi xuống bằng nhau, đây là một trong những tiên đề trao đổi rôi, thì trong trường hợp \bar{q} giảm theo độ cao ($\Delta\bar{q} < 0$) sẽ quan trắc thấy sự vận chuyển tạp chất hướng lên phía trên.

Từ những quan niệm vật lý, có thể kết luận rằng thông lượng đó tỉ lệ thuận với hiệu các nồng độ riêng $\Delta\bar{q}$ của tạp chất tại các mực z và $z + \Delta z$ và tỉ lệ nghịch với khoảng cách Δz , tức

$$Q_z = -\rho k_z \frac{\Delta\bar{q}}{\Delta z}.$$

Nếu chuyển sang giới hạn khi $\Delta z \rightarrow 0$, ta nhận được biểu thức cho thành phần thẳng đứng của thông lượng tạp chất rôi

$$Q_z = \overline{w'c'} = -\rho k_z \frac{\partial\bar{q}}{\partial z}. \quad (6.13)$$

Nhân tử tỉ lệ k_z trong công thức này được gọi là *hệ số rôi thẳng đứng*, còn tích ρk_z - gọi là *hệ số trao đổi rôi thẳng đứng*. Đơn vị của k_z - $1 \text{ m}^2/\text{s}$, của ρk_z - $1 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$.

Thông lượng Q_z dương (hướng lên trên) khi nồng độ của tạp chất giảm theo độ cao, tức $-\partial\bar{q}/\partial z > 0$, còn đạo hàm $\partial\bar{q}/\partial z < 0$ và âm (hướng xuống dưới) khi \bar{q} tăng theo độ cao, $-\partial\bar{q}/\partial z < 0$ và $\partial\bar{q}/\partial z > 0$.

Bằng những lập luận y như vậy, sẽ dẫn tới kết luận rằng các thành phần thông lượng tạp chất rôi theo các trục x và y sẽ có dạng

$$Q_x = \overline{u'c'} = -\rho k_x \frac{\partial\bar{q}}{\partial x}, \quad Q_y = \overline{v'c'} = -\rho k_y \frac{\partial\bar{q}}{\partial y}, \quad (6.14)$$

trong đó k_x và k_y – các hệ số rối thẳng đứng, thông thường người ta cho $k_x = k_y = k_z$.

Để xác định k_z trong lớp khí quyển sát mặt đất đến nay đã xây dựng những phương pháp khá tin cậy. Được thừa nhận nhất là phương pháp dựa trên những quan niệm của lý thuyết đồng dạng và thứ nguyên. Nhận thấy rằng, trong lớp sát mặt đất k_z luôn luôn tăng theo độ cao và tùy thuộc vào tốc độ gió, độ ổn định nhiệt và độ gồ ghề của bề mặt đất mà nó biến đổi trong phạm vi rộng: tại độ cao vài mét bên trên mặt đất thường bằng 10^{-1} đến 10^0 m²/s. Một lý thuyết còn phát triển kém hơn cho phép xác định k_z ở cao hơn lớp sát mặt đất, ở một lớp được gọi là lớp Ekman trong lớp biên. Còn về các hệ số k_x và k_y phương ngang thì người ta chỉ được biết bậc đại lượng: $10^2 - 10^4$ m²/s đối với các chuyển động qui mô vừa với kích thước theo phương ngang bằng vài chục kilômét.

Bây giờ, nếu đưa nồng độ riêng trung bình của tạp chất \bar{q} , liên hệ với nồng độ thể tích bằng quan hệ $\bar{c} = \rho \bar{q}$, vào phương trình (6.9) và tính đến phương trình liên tục có dạng sau đây trong trường hợp chuyển động được lấy trung bình:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}}{\partial z} = 0, \quad (6.15)$$

dùng các biểu thức (6.13) và (6.14) đối với các thành phần thông lượng tạp chất rối và công thức (6.12) đối với nhập lượng rối của nó, ta sẽ viết phương trình vận chuyển tạp chất trong khí quyển rối dưới dạng

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \rho k_x \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \rho k_y \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \rho k_z \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} - \rho \frac{\bar{q}}{\tau} + \bar{\epsilon}_M, \quad (6.16)$$

trong đó ở vế phải đã đưa vào một số hạng bổ sung tính tới sự hụt mất tạp chất do ảnh hưởng của phân hủy phóng xạ (trong trường hợp tạp chất phóng xạ) hoặc sự rửa trôi tạp chất bởi giáng thủy. Tham số τ có thứ nguyên thời gian, được gọi là *thời gian triết giảm*, hay thời gian sống của các phân tử.

Vì các hệ số rối k_x và k_y , chỉ được biết gần đúng, còn biến thiên của k_z theo độ cao vượt trội đáng kể sự biến thiên của ρ , nên thường trong phương trình (6.16) người ta bỏ qua sự phụ thuộc của ρ không những vào x và y , mà cả vào độ cao z cũng là hoàn toàn hợp lý.

Nếu giả thiết thêm rằng $k_x = k_y = k_z = k$ và kết hợp nhập lượng phân tử vào nhập lượng rối (bằng cách tăng các hệ số rối lên một lượng xấp xỉ bằng hệ số nhớt phân tử), ta sẽ viết lại phương trình vận chuyển (nhập lượng) tạp chất trong khí quyển rối, còn gọi là phương trình khuếch tán tạp chất rối, dưới dạng sau:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} \right) - w \frac{\partial q}{\partial z} + k \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} - \frac{q}{\tau}, \quad (6.17)$$

ở đây dấu lấy trung bình bên trên tất cả các đại lượng đã bị bỏ đi (tiếp sau ta chỉ xem xét các giá trị trung bình của nồng độ, tốc độ chuyển động và các đại lượng khác).

Những nhân tố quyết định sự biến đổi nồng độ tạp chất theo thời gian

Trước hết, chúng ta phân tích định tính phương trình vận chuyển tạp chất, cho phép đánh giá dấu của các số hạng ở vế phải (6.17) và đồng thời đánh giá xu thế biến thiên của nồng độ tạp chất theo thời gian dưới ảnh hưởng của các nhân tố khác nhau. Nhận thấy rằng các thành phần phương ngang của tốc độ vận chuyển tạp chất u, v trùng với các thành phần tốc độ gió. Còn về thành phần thẳng đứng w , thì đối với các tạp chất dạng khí, cũng như những tạp chất lỏng và rắn nhỏ (nhẹ), mà bán kính các hạt thường bé hơn $1 \mu\text{m}$, nó thực tế bằng tốc độ thẳng đứng của chuyển động không khí. Tuy nhiên, trong trường hợp các tạp chất lớn (nặng) (bán kính các hạt lớn hơn $1 \mu\text{m}$) thì thành phần w trong phương trình (6.17) phải hiểu là tổng đại số tốc độ chuyển động không khí thẳng đứng w_a và tốc độ rơi lấy trung bình có tỉ trọng (theo khối lượng) \tilde{v}_g của các hạt tạp chất dưới ảnh hưởng của trọng lực, đương nhiên có tính tới lực ma sát:

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường rôi

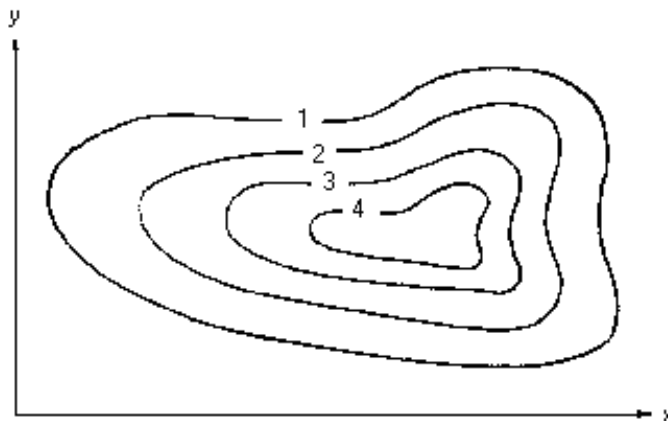
$$w = w_a - \tilde{v}_g, \quad (6.18)$$

trong đó \tilde{v}_g phải hiểu là giá trị tuyệt đối (mô đun) của tốc độ rơi của các hạt, chúng luôn luôn hướng thẳng đứng xuống dưới, vì vậy nó được trừ đi. Còn tốc độ thẳng đứng dương ($w_a > 0$) trong chuyển động thẳng của không khí và âm ($w_a < 0$) trong chuyển động giáng.

Theo phương trình (6.17), nồng độ tạp chất ở một điểm không gian cố định ($\partial q / \partial t$ - đạo hàm địa phương theo thời gian) biến đổi theo thời gian do ảnh hưởng của các nhân tố sau đây.

Nhập lượng bình lưu tạp chất - số hạng thứ nhất ở vế phải (6.17). Để ước lượng nhân tố này phải có số liệu về nồng độ tạp chất ở nhiều điểm của thành phố và tốc độ gió. Sau khi đưa các số liệu đo q lên bản đồ, ta vẽ các đường đẳng trị nồng độ ($q = \text{const}$). Những đường đẳng trị này thường có dạng hình ellipxoit, trong đó cực đại nồng độ (nếu lấy trung bình nồng độ trong khoảng thời gian đủ lớn - mười ngày, tháng, mùa) thường nằm gần trung tâm thành phố (hình 6.1). Ngoài cực đại chính của q , còn quan trắc thấy một số cực đại thứ sinh. Nếu trục x hướng theo tiếp tuyến với đường dòng, cũng cần vẽ đường dòng trên bản đồ, thì theo dữ liệu của hình 6.1, ở phía đón gió của thành phố $u > 0$, $v = 0$ và $\partial q / \partial x > 0$. Như vậy, nhập lượng bình lưu của tạp chất ở đây nhỏ hơn không ($-u \frac{\partial q}{\partial x} < 0$), còn nồng độ tạp chất do ảnh hưởng của nhân tố này

giảm theo thời gian ($\frac{\partial q}{\partial t} < 0$).



Hình 6.1. Trường nồng độ tạp chất trong mặt phẳng nằm ngang

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường rôi

Ở phía khuất gió của thành phố, theo số liệu hình 6.1, $w = w_a - \tilde{v}_g$, $v = 0$ và $\partial q / \partial x < 0$. Như vậy, ở đây nhập lượng bình lưu tạp chất lớn hơn không, còn nồng độ thì tăng theo thời gian.

Nhập lượng tạp chất đối lưu - số hạng thứ hai ở vế phải (6.17). Để đánh giá nhân tố này phải biết phân bố thẳng đứng của nồng độ tạp chất và tốc độ w . Dưới đây (xem mục 6.4) xây dựng nghiệm phương trình (6.17) cho phép đánh giá vai trò nhân tố đối lưu.

Nhập lượng tạp chất do ảnh hưởng của trao đổi rối phương ngang - số hạng thứ ba ở vế phải (6.17). Nhân tố này luôn luôn dẫn tới sự lan truyền (khuếch tán) tạp chất tới một khoảng cách nào đó kể từ nguồn, thí dụ, ở các vùng ngoại ô thành phố. Mặc dù đã xây dựng các nghiệm phương trình (6.17) tính tới ảnh hưởng của khuếch tán phương ngang, tuy nhiên, theo các dữ liệu thí nghiệm, chúng ta nên mô tả sự phân bố tạp chất theo phương ngang do rối nhờ luật chuẩn (công thức Gauss), tức biểu diễn $q(x, y, z, t)$ dưới dạng

$$q(x, y, z, t) = \frac{\text{Sexp}(-R^2/2\sigma_R^2)}{2\pi\sigma_R^2} q^*(z, t), \quad (6.19)$$

trong đó $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ - khoảng cách phân tử rôi tính từ trục z , σ_R - độ lệch bình phương trung bình của khoảng cách này, $q^*(z, t)$ - nồng độ tạp chất được lấy trung bình theo diện tích

ngang S lớn vô hạn về lý thuyết, tại độ cao z trong thời điểm t :

$$q^*(z, t) = \lim_{S \rightarrow \infty} \frac{1}{S} \iint_{(S)} q(x, y, z, t) dS. \quad (6.20)$$

Tương quan (6.19) dễ dàng thiết lập được bằng cách thế biểu thức (6.19) vào vế phải (6.20) và lấy tích phân theo x và y .

Dễ thấy rằng trị số nồng độ cực đại bằng $q^*(z, t) S / (2\pi\sigma_R^2)$ xác định được bằng biểu thức (6.19), sẽ quan trắc thấy tại gốc tọa độ (tại $x = y = 0$). Trường nồng độ đối xứng qua gốc này. Khi tăng khoảng cách R tính từ gốc tọa độ, nồng độ giảm theo qui luật hàm mũ, tiệm cận dần tới không khi $R \rightarrow \infty$.

Ta so sánh phân bố $q(x, y, z, t)$ theo hướng ngang ứng với hai trị số của chuẩn σ_R , thí dụ σ'_R và σ''_R , trong đó $\sigma'_R < \sigma''_R$. Với $R = 0$, nồng độ $q(0, z, t)$ trong trường hợp thứ nhất, khi trao đổi rối yếu hơn (do đó mà σ'_R nhỏ), sẽ lớn hơn so với trường hợp thứ hai (với σ''_R):

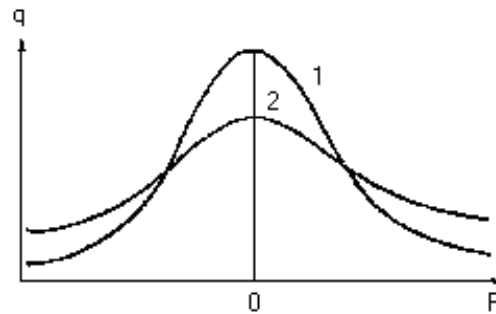
$$q'(0, z, t) > q''(0, z, t).$$

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường rôi

Bất đẳng thức như vậy được bảo tồn với những giá trị R nhỏ. Tuy nhiên, vì khi tăng R nồng độ trong trường hợp thứ hai giảm chậm hơn (σ_R^* lớn) so với trường hợp thứ nhất, nên trên những khoảng cách lớn từ trung tâm thành phố, theo những quan niệm vật lý, tương quan giữa các nồng độ

$$q'(R, z, t) < q''(R, z, t)$$

mâu thuẫn với tương quan quan trắc tại những giá trị R nhỏ (hình 6.2). Ngoài ra, sau khi lập tỉ số $q''(R, z, t)/q'(R, z, t)$, chúng ta sẽ khẳng định được rằng trên khoảng cách lớn từ trung tâm thành phố tỉ số này tăng vô hạn khi tăng R .



Hình 6.2. Phân bố nồng độ tạp chất theo phương ngang

ứng với trao đổi rôi phát triển yếu (1) và mạnh (2)

Nhập lượng tạp chất do ảnh hưởng của trao đổi rôi thẳng đứng - số hạng thứ tư ở vế phải phương trình (6.17). Việc ước lượng nhân tố này sẽ được thực hiện dưới đây dựa trên nghiệm của phương trình (6.17).

Số hạng thứ năm ở vế phải phương trình (6.17) mô tả lượng tạp chất mất (đi khỏi) do hệ quả hấp thụ tạp chất bởi các giọt và tinh thể mây, sương mù và mưa, cũng như quá trình phân rã tạp chất phóng xạ nếu đó là chất phóng xạ. Do ảnh hưởng của nhân tố này, cũng như do các hạt rơi xuống trong trường trọng lực, sẽ diễn ra sự tự làm sạch của khí quyển. Tất cả các nhân tố khác chỉ phân bố lại tạp chất trong khí quyển. Nếu chỉ có nhân tố thứ năm tác động, thì phương trình (6.17) có dạng

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường rôi

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{q}{\tau}$$

Tích phân phương trình này với điều kiện ban đầu

$$q = q_0 \quad \text{tại } t = 0,$$

ta được

$$q(t) = q_0 \exp(-t/\tau).$$

Như vậy, tại $t = \tau$ nồng độ $q(\tau) = \frac{q_0}{e}$, tức sau thời gian bằng τ nồng độ giảm $e = 2,72\dots$ lần.

Những lập luận này làm rõ ý nghĩa vật lý của thời gian triệt giảm τ của tạp chất.

Sự phân bố ổn định các tạp chất theo độ cao

Trong trường hợp tổng quát, nồng độ các chất gây ô nhiễm khí quyển là một hàm phức tạp của tọa độ và tại từng điểm không gian biến đổi theo thời gian do ảnh hưởng của những nhân tố đã xét ở trên. Chỉ có thể khảo sát mối phụ thuộc nồng độ vào tọa độ và thời gian trên cơ sở phương trình (6.17) trong trường hợp tổng quát bằng các phương pháp số trị tính nghiệm trên máy tính. Hơn nữa, để xây dựng nghiệm khép kín, cần bổ sung phương trình (6.17) bằng các phương trình chuyển động (để xác định u và v), phương trình liên tục (để xác định w_z), phương trình cân bằng năng lượng rôi (đối với k_z), phương trình chuyển động của các hạt tạp chất và các giọt mây và giáng thủy (để xác định \tilde{v}_g và τ). Cũng cần sử dụng thêm một loạt quan hệ bán thực nghiệm - hàm phân bố các hạt tạp chất, các giọt mây và giáng thủy theo kích thước; công thức liên hệ hệ số k_z với các đặc trưng trường gió; một loạt các công thức của lý thuyết dòng dạng hoặc các biểu thức thực nghiệm thiết lập những liên hệ giữa các tham số trao đổi thẳng đứng và các đại lượng nhiệt động lực học.

Trong lời phát biểu tổng quát như vậy, việc khảo sát và đánh giá định lượng ô nhiễm khí quyển còn xa mới hoàn chỉnh. Tuy nhiên, đến nay đã có nhiều công trình đánh giá ô nhiễm khí quyển đối với một số trường hợp riêng trên cơ sở những giả thiết khác nhau về các nguồn tạp chất, đặc điểm chuyển động, các hệ số của phương trình v.v...

Chúng ta sẽ xét một trong những trường hợp riêng như vậy. Với mục đích đó, ta lấy trung bình phương trình (6.17) trong một khoảng thời gian đủ dài (mười ngày, tháng, mùa, năm) và theo một diện tích rộng, chẳng hạn theo toàn thành phố. Khi đó có thể xem các thứ sau đây xấp xỉ bằng không: a) vế trái của phương trình - quá trình ô nhiễm bầu không khí thành phố là ổn định

($\overline{\partial q / \partial t} \approx 0$); b) nhập lượng tạp chất do bình lưu ($u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} \approx 0$), bởi vì nhập lượng này mang

dấu khác nhau tại các phần khác nhau của thành phố và đổi dấu theo thời gian tại cùng một điểm trước hết do ảnh hưởng thay đổi hướng gió.

Nếu chú ý rằng quá trình khuếch tán ngang được tính đến nhờ công thức (6.19), ta viết lại phương trình (6.17) cho trường hợp riêng này dưới dạng

$$\frac{d}{dz} k_z \frac{d-q}{dz} - w \frac{d-q}{dz} - \frac{\bar{q}}{\tau} = 0$$

Ở đây, chúng ta cũng giả thiết rằng các hệ số của phương trình k_z , w , τ bằng một số trị số trung bình theo thời gian và diện tích, vì vậy chúng được đưa ra khỏi dấu lấy trung bình. Tuy

nhien, các hệ số k_z , w và τ trong phương trình (6.21) là các hàm của độ cao. Vì vậy, ngay việc giải phương trình đơn giản hóa này mà không cần những giả thiết đặc biệt về dạng của các mối phụ thuộc hàm của các hệ số vào độ cao cũng chỉ có thể thực hiện bằng các phương pháp số. Để nhận được nghiệm của phương trình (6.21) dưới dạng biểu diễn được qua những hàm đã biết, ta giả thiết thêm: c) tốc độ w không phụ thuộc vào độ cao và bằng một giá trị trung bình theo toàn lớp biên: $w = \bar{w} = \text{const}$; d) trong lớp sát mặt đất độ dày $h = 50 - 100$ m, ở đó k_z biến thiên mạnh theo độ cao, thì vai trò của sự rửa trôi tạp chất bởi giáng thủy hoặc phân rã phóng xạ nhỏ, bởi vì độ dày lớp này nhỏ so với toàn lớp biên. Còn về hệ số rôi k_z , theo nhiều nghiên cứu, chẳng hạn nhờ lý thuyết đồng dạng và thứ nguyên, đã xác lập được rằng hệ số này luôn luôn tăng theo độ cao trong lớp sát mặt đất (tăng tuyến tính ở lân cận mặt đất). Ở cao hơn lớp sát mặt đất, k_z thực tế không phụ thuộc vào z . Công thức dạng hàm mũ sau đây tỏ ra khá phù hợp với kết quả khảo sát lý thuyết và số liệu thực nghiệm:

$$k_z = k_\infty [1 + \varepsilon - \exp(-z/L)], \quad (6.22)$$

trong đó L - quy mô độ dài Monhin-Obukhov, $k_\infty(1 + \varepsilon) \approx k_\infty$ - trị số của k_z tại độ cao lớn (thực tế tại $z > h$ - cao hơn lớp sát mặt đất). Ở lân cận mặt đất, nơi $\exp(-z/L) \approx 1 - z/L$, hệ số rôi tăng tuyến tính theo độ cao

$$k_z = k_0 + \frac{k_\infty}{L} z, \quad (6.23)$$

trong đó $k_0 = k_\infty \varepsilon$ - trị số của k_z tại $z = 0$. Từ đây $\varepsilon = k_0 / k_\infty$ luôn luôn bé so với đơn vị. Tỉ số k_∞ / L là trị số của k_z tại độ cao $z = z_1 = 1$ m:

$$k_1 = k_0 + \frac{k_\infty}{L} z_1 \approx \frac{k_\infty}{L} z_1, \quad (6.24)$$

bởi vì k_0 bé so với $\frac{k_\infty z_1}{L}$.

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường rối

Nếu tích phân phương trình (6.21) với $w = \bar{w}$ và $\tau \rightarrow \infty$ theo độ cao, ta được

$$k_x \frac{d\bar{q}}{dz} - \bar{w}\bar{q} = A. \quad (6.25)$$

Ta xác định hằng số tích phân A từ điều kiện tại độ cao lớn - ở bài toán này, tại ranh giới trên H của lớp biên, vì tại độ cao này nồng độ tạp chất và thông lượng tạp chất rối thực tế đã bằng không. Từ điều kiện này, khi $z = H$, rút ra $A = 0$. Cùng với (6.18), phương trình (6.25) chấp nhận dạng

$$-k_x \frac{d\bar{q}}{dz} = (\tilde{v}_g - w_a) \bar{q}, \quad (6.26)$$

trong đó \tilde{v}_g và w_a - tốc độ rơi các hạt tạp chất và tốc độ chuyển động thẳng đứng của không khí, lấy trung bình toàn lớp biên.

Về phương diện vật lý, phương trình (6.26) biểu thị sự bằng nhau giữa thông lượng tạp chất rối và thông lượng tạp chất gây nên bởi trọng lực và chuyển động có trật tự trong phương thẳng đứng của không khí (thăng trong các xoáy thuận và rãnh áp, giáng trong các xoáy nghịch và sóng áp).

Với k_x xác định bằng công thức (6.22), để thu được tích phân của phương trình (6.26) cần phải đưa ra biến độc lập mới η , liên hệ với z bằng

$$\eta = (1 + \varepsilon) \exp\left(\frac{z}{L}\right) - 1.$$

Phương trình (6.26) sau khi chuyển sang biến η có dạng

$$\frac{d\bar{q}}{d\eta} = -\delta \frac{d\eta}{\eta}, \quad (6.27)$$

trong đó

$$\delta = \frac{(\tilde{v}_g - w_a)L}{k_\infty(1 + \varepsilon)} = \frac{(\tilde{v}_g - w_a)z_1}{k_1(1 + \varepsilon)} -$$

Những quy luật lan truyền chất ô nhiễm (tạp chất) trong môi trường rôi

tham số không thứ nguyên; ở đây cũng đã sử dụng quan hệ (6.24).

Ta sẽ xem nồng độ tạp chất ở lân cận mặt đất là đã biết, thí dụ tại độ cao $z = z_1$ ($\eta = \eta_1$). Tích phân (6.27) trong phạm vi từ z_1 đến độ cao z tùy ý, ta được

$$\bar{q}(z) = \bar{q}_1 (\eta / \eta_1)^{-\epsilon}. \quad (6.29)$$

Công thức này có thể gọi là công thức mũ - lũy thừa, bởi vì η - hàm mũ của độ cao, còn $\bar{q}(z)$ - hàm lũy thừa của η .

Để dàng thực hiện tính nồng độ tạp chất theo công thức (6.29) tại tất cả các độ cao, không cần đưa ra một giả định bất kỳ. Tuy nhiên, với mục đích làm cho lập luận và đánh giá định tính được trực quan, chúng ta sẽ xét hai trường hợp riêng.

Các độ cao nhỏ. Ở đây biến η và công thức (6.29) nhận được dạng

$$\begin{aligned} \eta &\approx (1 + \epsilon)(1 + z/L) - 1 \approx z/L, \\ \bar{q}(z) &= \bar{q}_1 (z_1/z)^\epsilon, \end{aligned} \quad (6.30)$$

vì $\exp(z_1/L) \approx 1 + z_1/L$ và $\epsilon \ll 1$. Trong trường hợp tạp chất nặng (bán kính bằng một vài chục μm) ($\tilde{v}_g > 0$) tham số δ trong mọi tình huống khí tượng mang dấu dương, bởi vì \tilde{v}_g đối với các hạt tạp chất như vậy thường lớn hơn mô đun của w_* : $\tilde{v}_g > |w_*|$. Nồng độ các tạp chất như vậy, theo công thức lũy thừa (6.30) luôn luôn giảm theo độ cao.

Tuy nhiên, trong trường hợp những tạp chất dạng khí, cũng như tạp chất rắn và lỏng nhẹ, sao cho $\tilde{v}_g \approx 0$, tham số δ nhỏ hơn không khi $w_* > 0$ và do đó, nồng độ các tạp chất như vậy không giảm, mà tăng theo độ cao. Nói chung, phân bố $\bar{q}(z)$ theo độ cao như vậy ở các xoáy thuận và rãnh áp, nơi $w_* > 0$, có lẽ là khá dĩ ở phần dưới của lớp sát mặt đất. Nhưng trong các hệ thống khí áp như thế phải tính đến sự hấp thụ và rửa trôi tạp chất bởi mây và giáng thủy, vì ở đây chúng luôn được quan sát thấy. Dưới đây, khi phân tích công thức (6.29) đối với các độ cao lớn, chúng ta sẽ đi sâu đánh giá nhân tố này, đồng thời phân tích những qui luật biến thiên khác của $\bar{q}(z)$ theo độ cao.

Các độ cao lớn (phần bên trên, phần Ekman của lớp biên). Ở đó biến η và công thức (6.29) có dạng như sau:

$$\begin{aligned} \eta &\approx (1 + \epsilon)\exp(z/L) \approx \exp(z/L), \\ \bar{q}(z) &= \bar{q}_1 \eta_1^\epsilon \exp(-\delta \frac{z}{L}). \end{aligned} \quad (6.31)$$

Ta sẽ viết công thức này đối với ranh giới trên của lớp sát mặt đất $z=h$

$$\bar{q}(h) = \bar{q}_h = \bar{q}_1 \eta_1^\epsilon \exp(-\delta \frac{h}{L}). \quad (6.32)$$

Nếu bây giờ lập tỉ số $\bar{q}(z)/\bar{q}_h$, dựa trên (6.31) và (6.32) ta có

$$\bar{q}(z) = \bar{q}_h \exp \left[- \frac{\tilde{v}_g - w_a}{k_\infty} (z - h) \right], \quad (6.33)$$

trong đó đã sử dụng quan hệ (6.28).

Theo công thức hàm mũ (6.33), nồng độ tạp chất nặng (khá lớn) ($\tilde{v}_g > 0$), cũng như nồng độ các tạp chất bất kỳ với $w_a < 0$ (các xoáy nghịch và sóng áp) luôn giảm theo độ cao, tiệm cận dần tới không khi $z \rightarrow \infty$. Tốc độ giảm của $\bar{q}(z)$ khi tăng z rất khác nhau tùy thuộc vào giá trị của tham số

$$a = \frac{\tilde{v}_g - w_a}{k_\infty}. \quad (6.34)$$

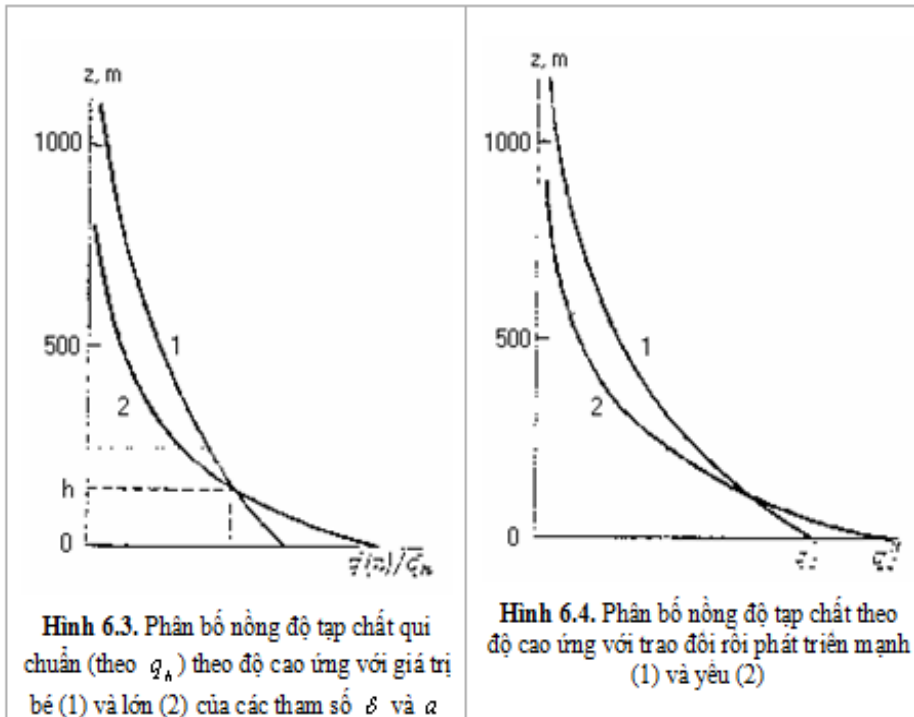
Giá sử tham số này nhận hai giá trị a' và a'' , trong đó $a' < a''$. Từ công thức (6.33), rút ra rằng với giá trị nhỏ (a') của tham số a , nồng độ tạp chất giảm theo độ cao chậm hơn so với khi giá trị a lớn, tức tại tất cả các mực $z > h$ thỏa mãn bất đẳng thức (hình 6.3)

$$\bar{q}'(z)/\bar{q}'_h > \bar{q}''(z)/\bar{q}''_h.$$

Một kết luận như vậy cũng rút ra từ công thức (6.30), nếu trong khi lập luận tham số a thay thế bằng δ , còn tỉ số $\bar{q}(z)/q_*$ bằng $\bar{q}(z)/q_1$. Các giá trị bé (a' và δ') của các tham số a và δ ứng với các trường hợp trao đổi rôi phát triển mạnh (các giá trị k_∞ và k_1 lớn trong các biểu thức (6.34) và (6.28) của các hạt tạp chất kích thước bé (tốc độ rơi \tilde{v}_g bé) hoặc các chuyển động thẳng đứng yếu của không khí (các giá trị mô đun $|w_a|$ nhỏ).

Về phần mình, trao đổi rôi mạnh trong những trường hợp khi chúng ta quan trắc thấy gió mạnh hoặc phân tầng nhiệt của lớp sát mặt đất bất ổn định - gradient thẳng đứng của nhiệt độ $\gamma = -\partial T/\partial z$ lớn hơn gradient đoạn nhiệt khô γ_* , còn trong không khí ẩm - gradient đoạn nhiệt ẩm γ'_* : $\gamma > \gamma_*$ hay $\gamma > \gamma'_*$ - hay khi bề mặt đất rất gồ ghề (các giá trị mực gồ ghề w_x lớn).

Vi trên các độ cao lớn nồng độ tạp chất ứng với các giá trị bé (a') của tham số a tăng cao (xem hình 6.3), nên từ những quan niệm vật lý cũng như từ các kết quả tính, ta suy ra rằng nồng độ tạp chất trên các độ cao nhỏ, chẳng hạn ở ngay gần mặt đất, sẽ giảm, nhưng với điều kiện khối lượng tạp chất nhập vào từ các nguồn phải giữ nguyên không đổi.



Với những giá trị lớn (α' và δ') của các tham số α và δ nồng độ tạp chất giảm nhanh theo độ cao, do đó hàm lượng của nó nhỏ trên các độ cao lớn và lớn trên các độ cao nhỏ, chẳng hạn ở lân cận mặt đất. Các giá trị lớn của α và δ xảy ra trong những trường hợp khi trao đổi ròi phát triển yếu (tốc độ gió nhỏ, phân tầng nhiệt của lớp sát đất ổn định, đặc biệt là phân tầng nghịch: $\gamma < \gamma'_*$ hoặc $\gamma < \gamma''_*$; độ gồ ghề mặt đất nhỏ) hoặc kích thước hạt tạp chất lớn hay chuyển động giáng mạnh (tốc độ $w_* < 0$ và mô đun lớn - trong các xoáy nghịch).

Các đường cong phân bố điển hình của nồng độ chất ô nhiễm bên trên thành phố ứng với những giá trị bé và lớn của các tham số α và δ dẫn trên hình 6.4.

Từ những lập luận trên đây suy ra: so với mức trung bình nào đó quan sát được trong một thành phố, các mức ô nhiễm cao tại những độ cao bé được tạo thành hoặc khi gió yếu, hoặc khi phân tầng ổn định (nghịch), khi hiệu nhiệt độ không khí ở mặt đất (T_0) và ở độ cao nào đó, chẳng hạn độ cao 500 m (T_{500}), mang dấu âm: $\Delta T = T_0 - T_{500} < 0$. Phân tầng như vậy quan trắc thấy vào ban đêm và mùa đông thường xuyên hơn so với ban ngày và mùa hè, hoặc trong tình huống xoáy nghịch. Nhiều khi tất cả các nhân tố này tác động đồng thời, và khi đó xảy ra tình huống nặng nề nhất - hàm lượng chất ô nhiễm tại các độ cao bé sẽ đặc biệt cao, nồng độ chất ô nhiễm có thể nhiều lần vượt trên nồng độ tới hạn cho phép.

Tại các độ cao lớn trong những điều kiện đó hàm lượng tạp chất hạ thấp, độ dày của bầu mây sôn khí z^* bên trên thành phố cực tiểu (nó áp sát xuống mặt đất).