

---

---

**ГЕОФИЗИКА**

---

---

УДК 551.509.616

**Лабораторные и натурные эксперименты по  
вызыванию нисходящих воздушных потоков  
системами грубодисперсных аэрозольных частиц***Калов Х.М. – академик АМАН, Калов Р.Х. – академик АМАН*

**Введение.** Рассматриваются результаты лабораторных [1, 3, 5] и натурных [2, 4, 6] экспериментов по вызыванию нисходящих воздушных потоков искусственно созданными облаками грубодисперсных аэрозольных частиц. Эксперименты показали, что высококонцентрированное облако грубодисперсных частиц в поле силы тяжести падает существенно быстрее, чем любая отдельная изолированная частица из этого облака, имеющая медианный или даже максимальный диаметр. В экспериментах использовались различные порошки (полиметилметакрилат, ликоподий, цемент, песок и др.), интервал дисперсности которых довольно широк и составляет  $10^{-5}$  см  $< r < 10^{-3}$  см.

Частица, движущаяся по отношению к среде, вызывает в ней течение, действующее в свою очередь на другие частицы. Таким образом, возникают силы гидродинамического взаимодействия между движущимися частицами в облаке. В аэрозолях эти силы проявляются, главным образом, при параллельном и одинаково направленном движении частиц [7]. В настоящей статье мы рассматриваем именно этот случай.

Силы гидродинамического взаимодействия между частицами порошка в облаке создают «коллективный» эффект, наблюдающийся при высоких концентрациях частиц в облаке, когда безразмерное расстояние между ними (частицами) не больше  $35 \div 40$  (за масштаб берётся диаметр частиц). В этих случаях скорость нисходящих потоков, вызванных падением искусственно созданных облаков грубодисперсных аэрозольных частиц, близка к скорости падения самих облаков.

Эти результаты подтверждены лабораторными и натурными экспериментами.

**2. Лабораторные эксперименты: скорость оседания системы полидисперсных частиц в неподвижном воздухе в термобарокамере**

Основной характеристикой движения системы полидисперсных частиц под действием силы тяжести является скорость ее движения и отношение этой скорости к скорости падения отдельной изолированной частицы из спектра размеров частиц данной системы. Величина этого отношения определяется при различных числах Рейнольдса и при различных концентраци-

ях частиц в системе. При малых числах Рейнольдса (вязкий режим течения) взаимодействия между двумя одинаковыми частицами, движущимися с постоянной скоростью  $V$  в одном направлении, приводит к уменьшению сопротивления среды  $F$  согласно формуле:

$$V = (F/6\pi r\eta) \left[ 1 + \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta) \frac{r}{2p} + \dots \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус частицы;  $\eta$  – вязкость среды;  $2p$  – расстояние между центрами частиц;  $\theta$  – угол между линией центров частиц и направлениями движения.

При наличии большого количества частиц это явление приводит к существенному увеличению скорости оседания облака частиц по сравнению со скоростью падения одной изолированной частицы.

Как показали опыты [1], скорость падения центра тяжести системы частиц в жидкости превосходит скорость падения одной изолированной частицы, размер которой равен среднеквадратичному диаметру частиц всей системы. При этом увеличение скорости падения при  $N \approx (0,9 \div 1,8) 10^3$  и  $a \approx 17,0 \div 28,5$  составляет  $10 \div 30$  % (табл. 1).

**Таблица 1.** – Отношение скорости падения отдельной частицы  $V$  к скорости падения системы частиц  $V_s$  в жидкости

| №№<br>п/п | $N$  | $n, \text{ см}^{-3}$ | $d_2, \text{ мкм}$ | $d_m, \text{ мкм}$ | $a = d_2^{-1} \cdot n^{-1/3}$ | $V/V_s$ |
|-----------|------|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|---------|
| 1         | 941  | 63                   | 100                | 106                | 24,9                          | 0,87    |
| 2         | 1210 | 50                   | 100                | 107                | 27,0                          | 0,84    |
| 3         | 1288 | 85                   | 100                | 107                | 22,7                          | 0,84    |
| 4         | 1391 | 87                   | 100                | 106                | 22,8                          | 0,78    |
| 5         | 1394 | 58                   | 100                | 106                | 26,0                          | 0,85    |
| 6         | 1415 | 88                   | 100                | 108                | 22,7                          | 0,77    |
| 7         | 1486 | 62                   | 100                | 109                | 25,3                          | 0,78    |
| 8         | 1510 | 60                   | 99                 | 104                | 25,3                          | 0,88    |
| 9         | 1537 | 51                   | 99                 | 104                | <b>17,0</b>                   | 0,86    |
| 10        | 1546 | 77                   | 99                 | 103                | 23,5                          | 0,88    |
| 11        | 1688 | 110                  | 99                 | 104                | <b>28,5</b>                   | 0,87    |
| 12        | 1761 | 55                   | 101                | 105                | 26,4                          | 0,90    |
| 13        | 1800 | 75                   | 101                | 109                | 23,6                          | 0,75    |

**Примечание:**  $N$  – общее число частиц в системе;  $n$  – концентрация частиц;  $d_m$  – максимальный диаметр частиц, содержащихся в системе;  $d_2$  – среднеквадратичный

диаметр частиц;  $a$  – расстояние между частицами, выраженное в диаметрах частиц;  $V_s$  и  $V$  – соответственно скорости падения центра тяжести системы частиц и изолированной частицы диаметром  $d_2$ .

Рассмотрим случай, когда плотность частиц  $\rho = 1,2 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Многочисленные опыты показывают (табл. 2), что скорость движения системы полидисперсных частиц под действием силы тяжести больше скорости движения одной изолированной частицы с диаметром, равным максимальному диаметру частицы из данной системы.

Скорость падения системы частиц, по данным табл. 2 на  $39\div 47\%$  больше скорости падения отдельных изолированных частиц с диаметром, равным максимальному диаметру частиц из данной системы (46 мкм) и в  $3,8\div 4,0$  раза больше для частиц с размером, равным модальному диаметру частицы.

**Таблица 2.** – Величина отношения  $V_s/V_i$  при различных  $V_s$  и  $Re$

| №№<br>п/п | $d$ ,<br>мкм | $Re$  | $V_i$ , $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ | $V_s$ , $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ | $V_s / V_i$ |
|-----------|--------------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| 1         | 28           | 0.059 | 2.8                                   | 10.6                                  | <b>3.80</b> |
| 2         | 39           | 0.158 | 5.4                                   |                                       | 1.96        |
| 3         | 40           | 0.171 | 5.7                                   |                                       | 1.86        |
| 4         | 43           | 0.216 | 6.7                                   |                                       | 1.58        |
| 5         | 46           | 0.262 | 7.6                                   |                                       | 1.39        |
| 6         | 28           | 0.059 | 2.8                                   | 11.2                                  | <b>4.00</b> |
| 7         | 39           | 0.158 | 5.4                                   |                                       | 2.08        |
| 8         | 40           | 0.171 | 5.7                                   |                                       | 1.57        |
| 9         | 43           | 0.216 | 6.7                                   |                                       | 1.67        |
| 10        | 46           | 0.262 | 7.0                                   |                                       | 1.47        |

**Примечание:**  $d$  – диаметр частицы в мкм;  $Re$  – число Рейнольдса частицы;  $V_i$  – скорость падения  $i$ -ой частицы, падающей отдельно;  $V_s$  – скорость падения системы частиц.

В случае движения системы частиц, когда взаимодействие между частицами существенно, скорость и характер падения системы меняются со временем (рис. 1). Время падения  $t$  системы частиц отсчитывается с момента их сброса.

На рис. 1 приводятся результаты экспериментов по исследованию характера и скорости падения системы частиц в неподвижном воздухе.

Кривая  $\ln V$  на рисунке представляет собой ход зависимости падения системы частиц от времени падения  $t$ . Характерной особенностью хода кривой

$\ln bV$  является быстрое убывание скорости падения системы со временем в первые 3÷5 с, после чего скорость меняется слабо (практически остается постоянной). Установление практически стационарной скорости падения для системы частиц с плотностью  $\rho=1,12 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  при прочих равных условиях происходит немного позже, чем указанные 3÷5 с, чем для частиц с меньшей плотностью  $\rho=0,4 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  (до 6 с). Время релаксации  $\tau = \frac{\rho d^2}{18\eta}$  больше для более плотных частиц при условии равенства их размеров.

Уменьшение скорости падения системы является следствием быстрого убывания счетной концентрации частиц (зависимость  $n$  рис. 1). При этом (уменьшении концентрации) увеличивается расстояние между частицами, а следовательно, уменьшается сила взаимодействия между частицами системы. С другой стороны, увеличение площади горизонтального сечения системы частиц способствует возрастанию силы аэродинамического сопротивления среды движению системы (при этом общее количество частиц в системе остается постоянным), что вызывает уменьшение скорости падения.

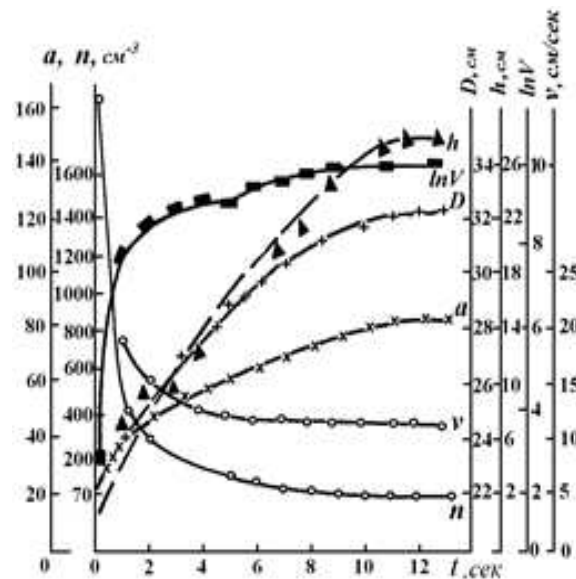


Рис. 1. Изменение характеристик системы частиц со временем падения.  $N = 1,5 \cdot 10^6$  частиц;  $a$  – расстояние между частицами системы в диаметрах частиц;  $n$  – счетная концентрация частиц в системе;  $D$  – диаметр горизонтального сечения системы;  $h$  – высота вертикального растяжения системы;  $V$  – объем системы;  $v$  – скорость падения частиц.

«Коллективный эффект», заключающийся в увеличении скорости падения системы частиц с достаточно высокой счетной концентрацией, вызванной аэродинамическим взаимодействием частиц, может иметь место в облаках (в скоплениях мелких водяных капелек или кристалликов льда, концентрация которых достигает  $400-500 \text{ см}^{-3}$ ), в определенной стадии их существования и естественного развития. Такое облако мелких частичек можно представить (в определенной стадии) как одно целое перемещающееся тело.

Подобное рассмотрение вопроса в микрофизике облаков с целью изучения некоторых динамических характеристик его, как нам представляется, можно считать оправданным.

«Коллективный эффект» способствует обрушению скопления зародышей градин, крупных капель в зонах повышенной водности в облаках. Этот эффект используется для инициирования нисходящих потоков в облаках с целью их разрушения.

### 3. Натурные эксперименты: падение совокупности частиц высокой концентрации в нижнем 100-метровом слое атмосферы

При массах сбрасываемого порошка  $m > 1$  кг влияние стенок лабораторной камеры на результаты экспериментов существенно. Поэтому при больших массах порошка (3-15 кг) опыты необходимо проводить в неограниченном стенками пространстве. В связи с этим, нами были поставлены эксперименты по исследованию падения совокупности частиц высокой концентрации на Куба-Табинском научном полигоне Высокогорного геофизического института. Опыты, в большинстве случаев, проводились в ранние утренние часы, когда в атмосфере турбулентность и скорость ветра минимальны. В экспериментах использовались полиметилметакрилатный порошок, состоящий из сферических частиц размерами 1-100 мкм при среднекубическом диаметре  $d = 50$  мкм, порошок цемента, песок и другие. Для сбрасывания порошка сконструированы специальные сбрасыватели, позволяющие осуществить «точечный» сброс, что необходимо для того, чтобы концентрация частиц сильно не уменьшалась в процессе сброса.

Киносъемка процесса падения порошка производилась с момента сброса до момента оседания основной массы частиц порошка (рис.2).

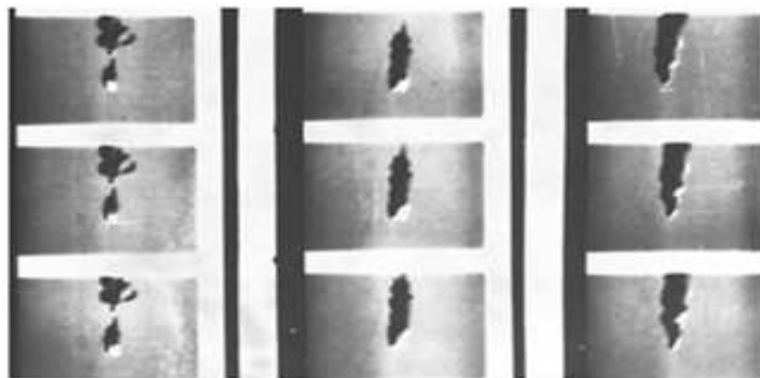


Рис. 2. Последовательные фотографии падения системы частиц цемента в атмосфере.  
 $m = 8,0$  кг; скорость съемки 24 кадр/с

На шнуре лебедки, с помощью которой поднимается сбрасыватель порошка, имеются метки высоты (через каждые 5 м), по которым определяется высота подъема сбрасывателя. Скорость падения определяется как отношение высоты (она определяется по меткам высоты на шнуре лебедки) ко

времени падения порошка (время определялось по киноплёнкам, скорость протяжки которых известна – 24 кадра в секунду).

Приведем результаты этих опытов и некоторые их приложения.

Суммарная сила тяжести  $F_g$ , действующая на систему частиц, выражается соотношением:

$$F_g = \frac{\pi D^3}{6} n f = \frac{\pi D^3}{6} n \frac{\pi d^3}{6} (\rho_r - \rho_{cp.}) g, \quad (2)$$

где  $n$  – концентрация частиц в системе;  $\rho_r, \rho_{cp.}$  – плотности частиц и среды соответственно;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $D, d$  – диаметры системы частиц и отдельной частицы соответственно.

Сила сопротивления в данном случае ( $Re = 10^2 \div 10^4$ ) равна

$$F = \frac{\pi D^2}{4} C_s \frac{\rho_c}{2} V_s^2, \quad (3)$$

где  $C_s$  – коэффициент лобового сопротивления системы частиц.

Из (2) и (3) получим, что

$$V_s = \sqrt{\frac{2\pi n D d^3 (\rho_r - \rho_{cp.}) g}{9 C_s \rho_c}}. \quad (4)$$

Или же, если  $V_s$  выразим через массу сбрасываемых частиц, вместо (4) получим:

$$V_s = \sqrt{\frac{8mg}{\pi D^2 C_s \rho_c}}, \quad (5)$$

где  $C_s = 0,5$ ;  $g = 980 \text{ см} \cdot \text{с}^{-2}$ ;  $\rho_c = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

Таким образом, скорости падения системы аэрозольных частиц должны описываться выражениями (4) и (5). Однако, как будет показано ниже, скорость  $V_s$ , определенная по этим формулам, отличается от экспериментально найденных значений.

Общая картина падения системы частиц зависит от начальной формы сброса, при этом цельная, компактная система частиц получается только при мгновенной шарообразной форме сброса. В этом случае, передний фронт падающей системы частиц имеет четко выраженную границу, за системой появляется хвост из частиц, которые срываются за экваториальной частью системы частиц, напоминая пылящую сферу. Падающая система частиц быстро расширяется (особенно в начальный период времени) по горизонтали и растягивается по вертикали. При этом уменьшается объемная счетная концентрация частиц  $n$  и с какого-то момента времени падение оседание происходит также как оседание отдельных, изолированных частиц. Время

«жизни» системы (время падения системы частиц с момента сброса до момента, когда концентрация частиц  $n \geq 10^2 \text{ см}^{-3}$ ) зависит от начальной массы сбрасываемой системы частиц и турбулентного состояния среды.

В течение какого-то времени  $t_6$ , сброшенный порошок падает как одно цельное тело, масса которого уменьшается со временем падения. Величина  $t_6$ , которую мы назовем временем быстрого падения, зависит от массы порошка (см. табл. 3). За это время  $t_6$  порошок проходит путь  $h_6$ , который также является функцией массы  $m$ .

На рис. 3 крестиками нанесена экспериментально найденная зависимость средней скорости падения системы частиц от массы сбрасываемого порошка. Вообще говоря, мгновенные скорости падения системы частиц отличаются от средних. Масса дисперсной системы частиц (а не концентрация или расстояние между частицами в диаметрах) нами выбрана потому, что практически ею наиболее удобно пользоваться. На рис. 3 видно, что скорость падения системы частиц растет с увеличением массы и равняется нескольким  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ , что на полтора - два порядка больше, чем скорость падения отдельной изолированной частицы из этой системы.

**Таблица 3.** – Падение порошка цемента в атмосфере

| №  | $m$ , кг | $H$ , м | $h_6$ , м | $t_6$ , с | $t_n$ , с | $v_6$ ,<br>$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ | $v_n$ ,<br>$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ |
|----|----------|---------|-----------|-----------|-----------|---|---|
| 1. | 2,5      | 50      | 27        | 2,7       | 75        | 10,0                                      | 0,67                                      |
| 2. | 4,0      | 55      | 36        | 3,4       | 74        | 10,6                                      | 0,74                                      |
| 3. | 6,0      | 60      | 41        | 3,7       | 80        | 11,1                                      | 0,75                                      |
| 4. | 8,0      | 75      | 50        | 4,3       | 98        | 11,5                                      | 0,77                                      |

**Примечание:**  $m$  – масса сбрасываемого порошка;  $H$  – высота сброса;  $h_6$ ,  $t_6$  – путь и время быстрого падения порошка;  $t_n$  – время прохождения порошком пути  $H$ ;  
 $v_6 = h_6/t_6$ ;  $v_n = H/t_n$ .

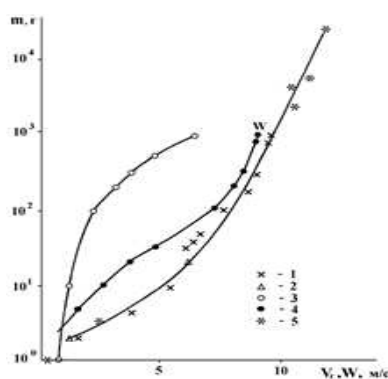


Рис. 3. Зависимость скорости системы частиц  $V_s$  и потока  $W$  от массы  $m$ . 1 – лабораторный эксперимент; 2 –  $V = a(lgm)^b$ ; 3 – формула (5); 4 –  $W = f(m)$ ; 5 – натурный эксперимент.

В табл. 4 помещены вычисленные по формуле (5) скорости. Для экспериментально найденных значений  $n$  и  $D$  в предположении, что  $C_s=0,5$  (такие значения  $C_s$  обычно соответствуют сфере при  $Re = 10^3 \div 10^4$ ) из (4) и (5) получаются заниженные значения  $V_s$  (в  $2 \div 3$  раза).

Результаты лабораторных экспериментов, полученные нами [1], хорошо аппроксимируются эмпирической зависимостью

$$V_s = a(\lg m)^2, \quad (6)$$

где  $m$  – масса сбрасываемого порошка в граммах ( $m > 1$ );  $a = 5,5$ ;  $b = 0,5$ .

**Таблица 4.** – Изменение скорости падения  $V_s$  и концентрации частиц в системе  $n$  при различных массах порошка

| №<br>п/п | $m, \text{ г}$ | $n_0, \text{ см}^{-3}$ | На уровне $z = 1 \text{ м}$ |                      |                        | На уровне $z = 3 \text{ м}$ |                   |                |
|----------|----------------|------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------|
|          |                |                        | $n_1, \text{ см}^{-3}$      | $a = d^{-1}n^{-1/3}$ | $n_3, \text{ см}^{-3}$ | $\alpha_3$                  | $V_{\text{экс.}}$ | По формуле (6) |
| 1        | 5              | $6 \cdot 10^6$         | $3 \cdot 10^3$              | 14                   | $2 \cdot 10^2$         | 35                          | 2,60              | 1,59           |
| 2        | 10             | $6 \cdot 10^6$         | $5 \cdot 10^3$              | 12                   | $4 \cdot 10^2$         | 27                          | 5,30              | 1,75           |
| 3        | 100            | $6 \cdot 10^6$         | $2 \cdot 10^4$              | 7,5                  | $1 \cdot 10^3$         | 20                          | 7,40              | 2,20           |
| 4        | 200            | $6 \cdot 10^6$         | $5 \cdot 10^4$              | 5,5                  | $2 \cdot 10^3$         | 16                          | 9,10              | 3,10           |
| 5        | 300            | $6 \cdot 10^6$         | $5 \cdot 10^4$              | 5,5                  | $3 \cdot 10^3$         | 14                          | 9,10              | 3,80           |
| 6        | 500            | $6 \cdot 10^6$         | $5 \cdot 10^4$              | 5,5                  | $4 \cdot 10^3$         | 12                          | 9,20              | 4,93           |
| 7        | 1000           | $6 \cdot 10^6$         | $8 \cdot 10^4$              | 4,7                  | $6 \cdot 10^3$         | 11                          | 9,50              | 6,64           |

Общую картину падения частиц высокой концентрации можно представить следующим образом: в первый момент после сброса системы нарастает скорость ее падения до максимальной скорости, в последующем, происходит расширение системы (соответственно, уменьшение концентрации частиц в системе) и постепенное уменьшение скорости падения, которое в пределе приближается к скорости падения отдельных изолированных частиц из этой системы.

Изменение линейного размера горизонтального сечения падающей системы частиц на участке пути в 3 м для различных масс сбрасываемого порошка (здесь значения  $l$  при  $z = 0$  соответствуют линейным размерам сбрасывателя порошка) изображено на рис. 4. Линии на этом рисунке показывают, что в начальный момент, после сброса порошка, происходит быстрое расширение (быстрое убывание счетной концентрации частиц в системе) системы для всех масс (на этом рисунке линии соответствуют: 1 – 10 г; 2 – 500

г; 3 – 1000 г), в последующем, расширение системы частиц происходит медленнее. Естественно, что при этом объемная счетная концентрация частиц в системе больше при больших массах сбрасываемого порошка (при одной и той же высоте падения). Выше сказанное хорошо иллюстрирует результаты измерений, приведенные в табл. 4. Таблица показывает, что по сравнению с первоначальной концентрацией  $n_0$  (она соответствует упаковке частиц в сбрасывателе) на начальном пути падения  $z = 1$  м, концентрация частиц в системе убывает на 2-3 порядка, а в последующем, на пути  $z = 3$  м – на порядок.

Для каждого  $z$  приближенно  $l$  может быть определено по формуле  $l = z \operatorname{tg} 2\alpha$ , где, как следует из рис. 4  $2\alpha = 15^\circ$  – угол раствора (расширения) системы частиц. Тогда, изменение концентрации частиц в системе с высотой падения можно выразить соотношением:

$$n_z = \frac{6N}{\pi(z \cdot \operatorname{tg} 2\alpha)^3} = \frac{12m}{\pi \rho_r \bar{d}_3^3 (z \cdot \operatorname{tg} 2\alpha)^3}, \quad (7)$$

где  $N = \frac{6m}{\pi \rho_r \bar{d}_3^3}$  – счетное количество частиц в сбрасываемом порошке;  $\rho_r$  – плотность вещества частиц;  $\bar{d}_3$  – среднекубический диаметр частиц.

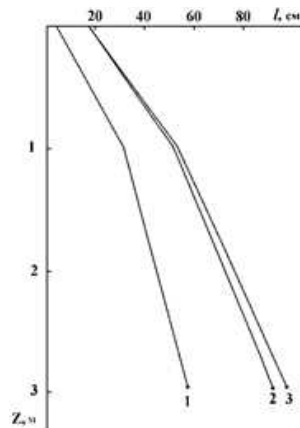


Рис. 4. Измерение горизонтального размера  $l$  облака частиц в процессе падения. 1 – 10 г; 2 – 500 г; 3 – 1000 г.;  $z$  – высота падения системы частиц

Значения безразмерного расстояния между частицами в системе (расстояние между частицами в диаметрах)  $a = \bar{d}_3^{-1} n^{-1/3}$  (здесь линейным масштабом служит  $\bar{d}_3$ ), приведенные в табл. 4, показывают, что «коллективный эффект» падения и вместе с ним существенное вовлечение среды наблюдается при  $a < 35 - 40$ .

Теперь рассмотрим нисходящий поток  $W$ , который может быть инициирован падающей системой частиц. Зависимость скорости нисходящего потока  $W$  ( $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) от массы сбрасываемого порошка  $m$  приведена на рис. 3 (зависимость 4). Как видно из рисунка, при массах порошка  $m > 10^2$  г, система

частиц полностью увлекает окружающую среду (воздух) и скорость нисходящего потока, вызванного ею, практически равняется скорости падения системы частиц. Сопоставляя кривую 4 с данными табл. 4, легко заметить, что вышеуказанное явление реализуется при  $n > 10^3 \text{ см}^{-3}$ . При  $n \approx 10^2 \div 10^3 \text{ см}^{-3}$  имеет место только частичное вовлечение среды; при  $n < 10^2 \text{ см}^{-3}$  нисходящий поток, создаваемый падающей системой частиц, ничтожно мал. Вышеуказанным, объемным счетным концентрациям соответствуют массовые концентрации  $60 \div 6 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Натурные эксперименты (в нижнем, 100-метровом слое атмосферы) с порошками полиметилметакрилата и цемента подтвердили результаты, полученные в лабораторных условиях. Скорость падения в этих экспериментах для обоих порошков, как это видно на рис. 3, хорошо укладывается на аппроксимированной кривой (точки 5). При этом оказалось, что физическая природа порошков практически не играет роли. В этих экспериментах, в отличие от лабораторных, скорость падения системы частиц измерялась на пути 30-100 м. Падение массы порошка, как одной цельной системы, при концентрации  $n_z > 10^3 \text{ см}^{-3}$ , в зависимости от массы происходило на расстоянии 30-50 м. Изменение концентрации частиц в системе и в этом случае хорошо описывается выражением (7). Общий вид падающей системы частиц изображен на рис. 2 (через  $0,5 \div 1,0$  сек. после открытия сбрасывателя). Расстояние от нижнего основания сбрасывателя до первой метки высоты соответствует 5 м. Основная масса сброшенного порошка сосредоточена в объеме шаровидной формы диаметром 0,7 м. Закономерности расширения сброшенного порошка в натурных экспериментах такие же, как и в лабораторных.

В заключение, на основе вышеуказанных экспериментов, оценим величину скорости нисходящего потока, инициированного в экспериментах [1, 2] при воздействиях на конвективные облака различными порошками с целью их разрушения. В своих опытах, авторы [2] сбрасывали от 10 до 60 кг порошка цемента на вершину конвективных облаков с целью их разрушения и предотвращения достижения ими грозо-градовой стадии. Указанные массы сбрасываемого порошка обычно приводили к разрушению облаков средней мощности. Допустим, что у этих порошков все физические характеристики такие же, как и у применяемого нами порошка ( $\bar{d}_3$  - 40-50 мкм, плотность вещества частиц  $\rho_r = 1,12 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ ). Тогда количество частиц  $N = 6m/\pi \bar{d}_3^3 \rho_r$ . Из соотношения (6) и рис. 3 можно найти  $W$  и  $V_s$ . Результаты произведенных расчетов представлены в табл. 5. В этой таблице значения  $W$  взяты из рис. 3. Из таблицы видно, что после падения с высоты 50 м для всех случаев в порошке  $n_z > 10^3 \text{ см}^{-3}$ , поэтому  $W$  практически равняется скорости оседания системы частиц и составляет  $11-12 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  (на этой высоте горизонтальные линейные размеры облака  $l = z \cdot tg 2\alpha = 13 \text{ м}$ ). В конце пути падения

$z = 100$  м,  $n_z > 10^2$  см<sup>-3</sup> можно ожидать частичное вовлечение среды и  $W \approx 3 \div 4$  м·с<sup>-1</sup> (на этой высоте  $l = 27$  м).

**Таблица 5.** – Зависимость скорости нисходящего потока  $W$  от массы сбрасываемого порошка

| №<br>ПП | $m$ ,<br>кг | $n_0$ ,<br>см <sup>-3</sup> | $Z = 50$ м             |                            | $Z = 100$ м            |                            |
|---------|-------------|-----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
|         |             |                             | $n$ , см <sup>-3</sup> | $W$ ,<br>м·с <sup>-1</sup> | $n$ , см <sup>-3</sup> | $W$ ,<br>м·с <sup>-1</sup> |
| 1       | 20          | $1 \cdot 10^{12}$           | $1 \cdot 10^3$         | 11,5                       | $1,2 \cdot 10^2$       | 3                          |
| 2       | 30          | $1,5 \cdot 10^{12}$         | $1,5 \cdot 10^3$       | 11,8                       | $1,9 \cdot 10^2$       | 3                          |
| 3       | 40          | $2 \cdot 10^{12}$           | $2 \cdot 10^3$         | 12,0                       | $2,5 \cdot 10^2$       | 3                          |
| 4       | 50          | $2,5 \cdot 10^{12}$         | $2,5 \cdot 10^3$       | 12,2                       | $3,1 \cdot 10^2$       | 3                          |
| 5       | 60          | $3 \cdot 10^{12}$           | $3 \cdot 10^3$         | 12,5                       | $3,8 \cdot 10^2$       | 3                          |

Таким образом, высококонцентрированная система грубодисперсных аэрозольных частиц весом несколько десятков килограмм при сбросе в слое 100-метровой атмосферы может вызвать нисходящее движение воздуха в несколько м·с<sup>-1</sup> в результате вовлечения среды. Разумно полагать, что практически толщина слоя всегда будет больше, и она будет определяться интенсивностью затухания потока. Совершенно естественно, что если атмосфера будет стратифицирована отрицательно неустойчиво, то, возможно, этот толчок будет достаточным для развития спонтанных нисходящих струй. В дальнейшем эта струя будет ускоряться, и скорость ее будет определяться стратификацией атмосферы.

#### Выводы.

1. Высококонцентрированная система грубодисперсных аэрозольных частиц с массой, большей нескольких килограмм, падает в атмосфере со средней скоростью порядка нескольких метров в 1 с, что на полтора – два порядка больше, чем скорость падения изолированной частицы этой системы. Скорость падения системы частиц увеличивается с увеличением массы по логарифмически-степенному закону (6).

2. Если концентрация грубодисперсных аэрозольных частиц больше  $10^3$  см<sup>-3</sup>, то система частиц полностью увлекает за собой среду, тем самым вызывая в начале следа направленный вниз поток воздуха со скоростью, равной скорости падения системы частиц. При концентрациях частиц  $10^3 \div 10^2$  см<sup>-3</sup> имеет место незначительное вовлечение среды. Если концентрация частиц в системе меньше  $10^2$  см<sup>-3</sup>, то падающая система частиц поток, направленный вниз, не создаёт. В последнем случае силы гидродинамического взаи-

модействия ничтожно малы и падающая система частиц не создает за собой значимой скорости воздушного потока.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Калов Х.М., Калов Р.Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозо-градовые облака и туманы. Нальчик: ООО «Полиграфсервис и Т». 2010. 220 с.
2. Гайворонский И.И., Зацепина Л.П., Зимин Б.И., Серегин Ю.А. Воздействие на конвективные облака порошкообразными реагентами // Труды V Всесоюзного метеорологического съезда. Т. 4. Л.: Гидрометеиздат. 1972. С. 79-86.
3. Калов Х.М. Оседание искусственного облака полидисперсных частиц в атмосфере // Труды ВГИ. 1974. Вып. 28. С. 169-175.
4. Калов Х.М., Хоргуани В.Г. О возможности создания нисходящего потока в атмосфере высококонцентрированной системой грубодисперсных аэрозольных частиц // Материалы Международной конференции по активным воздействиям на метеорологические процессы. М. 1973. С. 51-52.
5. Хоргуани В.Г., Калов Х.М. О падении высококонцентрированной системы грубодисперсных аэрозольных частиц в атмосфере // Изв. АН СССР. ФАО. 1975. Т. 11, № 3. С. 278-283.
6. Khorguani V.G., Kalov Kh.M. On possibility of generating downdrafts by introducing a high concentration of coarse aerosol particles in the atmosphere. Proc. WMO/JAMAP Sci. Conf. On Weath. Modification., Geneva. 1974. P. 301-308.
7. Фукс Н.А. Механика аэрозолей // Изд. АН СССР. М. 1955. С. 351.

### ABSTRACT

The results of an experimental study of the nature of the fall of a highly concentrated system of coarse aerosol particles in the atmosphere are considered. It is shown that a system of coarse aerosol particles weighing several kilograms at concentrations of more than  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  falls at a speed of several meters per 1 s and initiates in the initial part of the trace the velocity of descending air movement of the same order of magnitude. An empirical relationship between the rate of incidence, the concentration of particles in the system and the mass of the discharged powder is obtained. Finally, an attempt is made to estimate the magnitude of the downward velocity in the Wake of a particle system when different powders are applied to convective clouds in experiments [2].

**Keywords:** system of coarse aerosol particles, descending air flow, Reynolds number, concentration of particles in the system, relaxation time, frontal resistance coefficient.

*High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik*

## АННОТАЦИЯ

Рассматриваются результаты экспериментального исследования характера падения высококонцентрированной системы грубодисперсных аэрозольных частиц в атмосфере. Показано, что система грубодисперсных аэрозольных частиц массой несколько килограммов при концентрациях более чем  $10^3 \text{ см}^{-3}$  падает со скоростью несколько метров в 1 с и инициирует в начальной части следа скорости нисходящего движения воздуха того же порядка величины. Получена эмпирическая связь между скоростью падения, концентрацией частиц в системе и массой сбрасываемого порошка. Наконец, делается попытка оценить величины направленной вниз скорости движения в следе системы частиц при воздействиях на конвективные облака различными порошками в экспериментах [2].

**Ключевые слова:** система грубодисперсных аэрозольных частиц, нисходящий воздушный поток, число Рейнольдса, концентрация частиц в системе, время релаксации, коэффициент лобового сопротивления.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик

© Х.М. Калов,  
Р.Х. Калов, 2019