

О вертикальном движении фракталоподобных частиц в атмосфере

В.И. Грязин, С.А. Береснев*

Уральский государственный университет им. А.М. Горького
620083, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51

Поступила в редакцию 4.02.2011 г.

Представлена методика сопоставления характеристик вертикального движения сферических и фракталоподобных аэрозольных частиц в стационарной атмосфере и в атмосфере с учетом действия усредненного вертикального ветра. Она заключается во введении подходящего эквивалентного радиуса (седиментационного радиуса) для фракталоподобной частицы и в сопоставлении скоростей оседания одинаковых по массе получаемой сферической частицы и реального агрегата. Показано, что скорости оседания компактных сферических и фракталоподобных частиц в этом случае могут существенно различаться.

Ключевые слова: аэрозоль, фракталоподобные частицы, вертикальный ветер; aerosol, fractal-like particles, vertical wind.

Введение

Методика расчета характеристик оседания сферических частиц в атмосфере широко применяется на практике: при использовании эмпирической формулы Милликена для силы сопротивления сферической частицы возможно рассчитать скорости квазистационарного движения частиц произвольных размеров в стационарной («спокойной») атмосфере [1, 2]. В работах [3, 4] была использована более строгая газокинетическая формула для силы сопротивления и проведен учет усредненного вертикального ветра в атмосфере, но частицы по-прежнему трактовались как сферические и однородные. Большой интерес для физики атмосферы представляют характеристики движения фракталоподобных аэрозольных частиц (ФПЧ), хорошим примером которых являются частицы сажи и, отчасти, вулканического аэрозоля (см., например, [5, 6]).

В настоящей статье представлена попытка сопоставления характеристик вертикального движения сферических и фракталоподобных аэрозольных частиц (в первую очередь частиц сажи) в стационарной атмосфере и в атмосфере с учетом действия усредненного вертикального ветра.

Физико-математическая модель

Рассмотрим движение аэрозольной частицы, находящейся на высоте z , под действием силы тяжести и силы сопротивления газовой среды. Вследствие малости времени механической релаксации движение

частиц можно считать практически безынерционным, что позволяет воспользоваться квазистационарным приближением: в любой момент времени в тонком слое вблизи z частица движется прямолинейно и равномерно под действием мгновенных значений сил [1]. Полная скорость вертикального перемещения частицы $U_p(z)$ определится как

$$U_p(z) = U_{mg}(z) + U_W(z), \quad (1)$$

где U_{mg} — скорость гравитационного оседания частицы; U_W — скорость усредненного вертикального ветра в атмосфере. Закон сопротивления газовой среды требует спецификации формы частицы. Для сферы воспользуемся результатами газокинетической теории [7], которая описывает задачу о силе сопротивления в широком диапазоне чисел Кнудсена ($Kn = l/R_p$, где l — средняя длина свободного пробега молекул воздуха; R_p — радиус частицы) и обобщает эмпирическую формулу Милликена, использованную ранее в модели Кастана [2]. Скорость гравитационного оседания частицы в случае полной accommodation импульса и энергии молекул газа на ее поверхности (что является обоснованным для атмосферных приложений) равна

$$U_{mg}(z) = \frac{2\pi^{1/2} R_p \rho_p g (2RT(z)/M)^{1/2}}{(8 + \pi) p(z) \frac{Kn}{Kn + 0,619} \left[1 + \frac{0,310Kn}{Kn^2 + 1,152Kn + 0,785} \right]}, \quad (2)$$

где ρ_p — плотность сферической частицы; g — ускорение свободного падения; $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль — молярная масса воздуха. Причем температура T и давление газа p на высоте z задаются как параметры

* Виктор Иванович Грязин (Gryazin.Victor@mail.ru); Сергей Анатольевич Береснев (Sergey.Beresnev@usu.ru).

при использовании стандартных и справочных моделей атмосферы. Отметим, что при выводе уравнения (2) предполагалась малость чисел Рейнольдса и Маха, а это также соответствует физической постановке задачи.

Методика определения скорости усредненного вертикального ветра в атмосфере U_W подробно описана в [3, 4, 8], где, в частности, была показана высокая эффективность ветрового переноса для стратосферных аэрозолей. Необходимые данные для скорости усредненного ветра были извлечены из стратосферного блока модели ОЦА УКМО [8].

Известно, что многие частицы атмосферного аэрозоля представляют собой фракталоподобные агломераты, образованные из первичных сферических частиц — сферул. Для их описания используются такие характеристики, как радиус сферулы R_0 и ее плотность ρ_0 , количество сферул в агломерате N и его фрактальная размерность D_f . Например, в [9, 10] показано, что частицы сажи необходимо трактовать как фракталоподобные агломераты, причем конкретные значения параметров их структуры зависят от механизма образования частиц и условий сжигания топлива. В [9, 10] рекомендуются следующие значения параметров структуры для типичных ФПЧ сажи, полученных при горении углеводородных топлив: $R_0 = 0,01 \div 0,05$ мкм, $\rho_0 = 2$ г/см³, $N = 3 \cdot 10^2 \div 10^4$, $D_f = 1,78 \div 1,80$.

Одним из вариантов сопоставления характеристик сферических и ФПЧ является введение подходящего эквивалентного радиуса для агрегата, зависящего от специфики решаемой задачи [11]. Анализ показывает, что оптимальным выбором, полностью отвечающим постановке задачи, является седиментационный радиус R_S (радиус сферы, скорость оседания и плотность которой равны соответственно радиусу, скорости оседания и плотности исходной ФПЧ) [12]. Тогда для расчета скорости гравитационного оседания ФПЧ в уравнении (2) необходимо перейти от радиуса сферы R_p к эквивалентному седиментационному радиусу R_S для ФПЧ. В частности, для широкого класса частиц сажи фрактальной размерности $D_f = 1,79 \pm 0,1$ в [13] рекомендуется эмпирическое соотношение

$$R_S = \alpha R_0 N^\beta, \quad (3)$$

где $\alpha = 0,99 \pm 0,02$ и $\beta = 0,43 \pm 0,03$.

В совокупности такой подход позволяет рассчитать скорость гравитационного оседания ФПЧ заданной структуры и свойств [для этого, возможно, потребуются модификация уравнения (3)]. Для количественного сопоставления скоростей оседания сферических и ФПЧ целесообразно условиться об их одинаковой массе. Таким образом, для сравнения будет взята сфера из того же вещества с плотностью сферул ρ_0 и с такой же массой m_p , что и рассматриваемая ФПЧ. Радиус условной сферической частицы может быть рассчитан из данных по ее массе и плотности. В результате можно будет единообразно сопоставить скорости оседания реальной ФПЧ и равной ей по массе условной сферы. Заме-

тим, что эффективная плотность ФПЧ с фиксированным значением D_f отнюдь не равна плотности сферулы ρ_0 и существенно уменьшается с увеличением числа первичных частиц в агрегате.

Оседание сферических частиц и ФПЧ в стационарной атмосфере и в поле усредненного вертикального ветра

На рис. 1 приведены скорости гравитационного оседания ФПЧ и эквивалентных им по массе сферических частиц в стационарной атмосфере при конкретном выборе определяющих параметров.

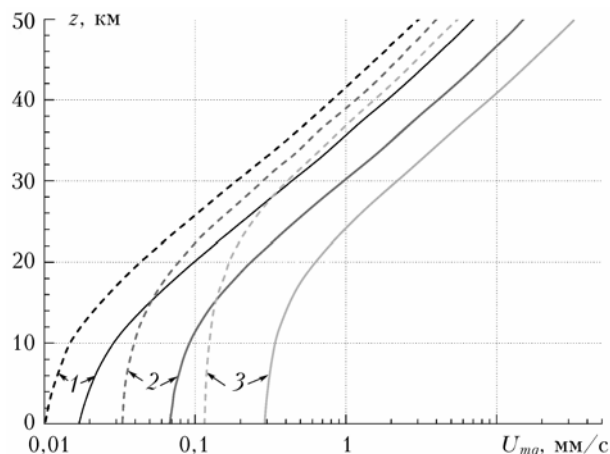


Рис. 1. Скорости гравитационной седиментации в стационарной атмосфере сферических (сплошные линии) и фракталоподобных (штриховые) частиц $R_0 = 50$ нм, $\rho_0 = 2$ г/см³, $D_f = 1,8$ одинаковой массы: 1 — $m_p = 0,1 \cdot 10^{-12}$ г; 2 — $1 \cdot 10^{-12}$ г; 3 — $10 \cdot 10^{-12}$ г. Обозначения относятся к каждой паре кривых

Очевидно заметное различие в скоростях оседания двух типов частиц, причем оно увеличивается с понижением высоты, и в тропосфере скорости различаются в 1,5–2 раза. Процесс гравитационной седиментации для частиц сажи с рыхлой структурой действительно становится менее эффективным [5].

Различие в скоростях должно быть выражено еще отчетливее в поле действия вертикального ветра. С использованием данных для усредненного вертикального ветра [4, 8] можно рассчитать сезонно-широтные зависимости для скоростей частиц на различных высотах. Как пример на рис. 2 представлены данные за период с 1993 по 2005 г. для трех наиболее характерных географических районов.

Видно, что в тропосфере и нижней стратосфере вертикальное движение как ФПЧ, так и сферических частиц полностью определяется интенсивностью ветра — различия в скоростях заметны, но не принципиальны. На высотах более 20 км для всех трех районов видны как качественные, так и количественные различия в характеристиках движения. Для ФПЧ начинает преобладать их восходящее движение против силы тяжести, причем для экватора и Северного полюса области нисходящего движения вообще не отмечаются. Количественные различия

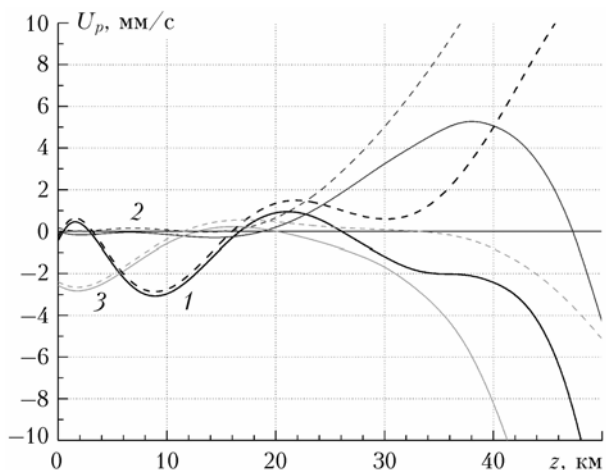


Рис. 2. Сравнение скоростей движения сферических (сплошные линии) и фракталоподобных (штриховые) частиц $R_0 = 50$ нм, $\rho_0 = 2$ г/см³, $D_f = 1,8$ массой $m_p = 10 \cdot 10^{-12}$ г под действием вертикального ветра и силы тяжести для: 1 – экватора; 2 – Северного полюса; 3 – Южного полюса. Обозначения относятся к каждой паре кривых

в скоростях в стратосфере гораздо существеннее, чем в тропосфере.

Как отмечалось в [4], усредненный вертикальный ветер потенциально может являться причиной образования динамически устойчивых аэрозольных слоев в средней атмосфере на высотах, соответствующих смене знака скорости усредненного ветра с положительного на отрицательный (при этом действие силы тяжести не сможет вывести частицы из этой зоны). Для ФПЧ на рис. 2 мы не обнаруживаем такой устойчивой закономерности, причем для экватора и Северного полюса вообще нет областей смены направления ветра с восходящего на нисходящий. По всей видимости, ФПЧ не проявляют склонности к образованию стратифицированных слоев, для них характерно увлечение вверх, в среднюю и верхнюю стратосферу. Отметим, что такое поведение свойственно ФПЧ с большим числом сферул в агрегате (порядка 10^3), большим седиментационным радиусом R_S (около 1 мкм) и очень малой эффективной плотностью (5–10 кг/м³). Для более компактных ФПЧ наблюдаются характеристики, приближающиеся к характеристикам для сферических частиц.

Наличие сажевых ФПЧ в верхней тропосфере, нижней и средней стратосфере на сегодняшний день достаточно хорошо подтверждено инструментально [14–17]. Источниками таких частиц являются как процессы сжигания биомассы и органических топлив на поверхности Земли, так и эмиссия сажевых частиц от авиадвигателей. Вследствие особенностей стратосферной циркуляции сажевые частицы могут вовлекаться в долговременные и крупномасштабные процессы переноса, оказывая заметное радиационное возмущающее воздействие. Одним из неясных и дискутируемых вопросов является вопрос о механизмах вертикального переноса таких частиц на достаточно большие высоты. Авторы полагают, что одним из самых эффективных механизмов такого рода может

являться действие вертикального ветра с его характерными высотными особенностями.

Для оценки характеристик высотного распределения ФПЧ сажи в стратосфере возможно предложить следующую методику: отталкиваясь от достоверных данных о структурных и теплофизических характеристиках ФПЧ сажи требуемых типов, ввести в рассмотрение эквивалентные сферические частицы с седиментационным радиусом R_S по вышеописанной схеме и оценить высоты, на которых сила ветрового увлечения частиц будет уравновешиваться действием силы тяжести (т.е. рассмотреть высоты возможной левитации частиц сажи). Отсутствие высот левитации в подобных расчетах может свидетельствовать об объемном распределении частиц сажи в стратосфере без образования сколь угодно выраженных аэрозольных слоев.

Авторы выражают благодарность British Atmospheric Data Centre за предоставление доступа к базе данных УКМО.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-01-00649) и Минобрнауки РФ (программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)», рег. № 2.1.1/6019 и госконтракты № П1151 и П1571).

1. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
2. Kasten F. Falling speed of aerosol particles // J. Appl. Meteorol. 1968. V. 7, N 10. P. 944–947.
3. Береснев С.А., Грязин В.И. Вертикальный ветровой перенос аэрозолей в стратосфере // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 537–543.
4. Береснев С.А., Грязин В.И., Грибанов К.Г. Анализ характеристик вертикального ветра в стратосфере // Метеорол. и гидрол. 2009. № 11. С. 37–47.
5. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.
6. Bushell G.C., Yan Y.D., Woodfield D., Raper J., Amal R. On techniques for the measurement of the mass fractal dimension of aggregates // Adv. Colloid Interface Sci. 2002. V. 95. P. 1–50.
7. Beresnev S.A., Chernyak V.G., Fomyagin G.A. Motion of a spherical particle in a rarefied gas. Part 2. Drag and thermal polarization // J. Fluid Mech. 1990. V. 219. P. 405–421.
8. Береснев С.А., Грязин В.И., Грибанов К.Г. Климатология вертикального ветра в средней атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 516–522.
9. Karasev V.V., Ivanova N.A., Sadykova A.R., Kukhareva N., Baklanov A.M., Onischuk A.A., Kovalev F.D., Beresnev S.A. Formation of charged soot aggregates by combustion and pyrolysis: charge distribution and photophoresis // J. Aerosol Sci. 2004. V. 35, N 3. P. 363–381.
10. Colbeck I., Hardman E.J., Harrison R.M. Optical and dynamical properties of fractal clusters of carbonaceous smoke // J. Aerosol Sci. 1989. V. 20, N 5. P. 765–774.
11. Wang G.M., Sorensen C.M. Diffusive mobility of fractal aggregates over the entire Knudsen number range // J. Phys. Rev. E. 1999. V. 60, N 30. P. 3036–3044.
12. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. Л.: Химия, 1987. 264 с.

13. *Cai J., Sorensen C.M.* Diffusion of fractal aggregates in the free molecular regime // *J. Phys. Rev. E.* 1994. V. 50, N 5. P. 3397–3400.
14. *Blake D.F., Kato K.* Latitudinal distribution of black carbon soot in the upper troposphere and lower stratosphere // *J. Geophys. Res. D.* 1995. V. 100, N 4. P. 7195–7202.
15. *Pueshel R.F., Boering K.A., Verma S., Howard S.D., Ferry G.V., Goodman J., Allen D.A., Hamill P.* Soot aerosol in the lower stratosphere: pole-to-pole variability and contribution by aircraft // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 11. P. 13,113–13,118.
16. *Baumgardner D., Kok G., Raga G.* Warming of the Arctic lower stratosphere by light absorbing particles // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L06117, doi: 10.1029/2003GL018883.
17. *Renard J.-B., Brogniez C., Berthet G., Bourgeois Q., Gaubicher B., Chartier M., Balois J.-Y., Verwaerde C., Aurioi F., Francois P., Daugeron D., Engrand C.* Vertical distribution of the different types of aerosols in the stratosphere: Detection of solid particles and analysis of their spatial variability // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D21303, doi: 10.1029/2008JD010150.

V.I. Gryazin, S.A. Beresnev. **About vertical motion of fractal-like particles in the atmosphere.**

The method of comparison of vertical motion characteristics for spherical and fractal-like aerosol particles in the stationary atmosphere and in the atmosphere under action of the averaged vertical wind is presented. It consists in introduction of a suitable equivalent radius (sedimentation radius) for fractal-like particles and in comparison of subsidence velocities of introduced spherical particle and the real aggregate identical by mass. It is shown, that subsidence velocities of compact spherical and fractal-like particles can differ essentially in this case.