

А.И. Бородулин, Б.М. Десятков, Н.А. Лаптева, В.В. Марченко

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АСПИРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ
В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Рассмотрен процесс аспирации аэрозольных частиц в реальной атмосфере в случае, когда характерный линейный масштаб турбулентности много больше характерного диаметра трубки пробоотборного устройства. Для условий приземного слоя атмосферы на основании широко известных эмпирических формул, пригодных для ламинарных потоков, произведена оценка эффективности аспирации аэрозольных частиц в турбулентной среде. При проведении расчетов использован метод моделирования рядов мгновенных значений пульсаций скорости ветра и пульсаций концентрации с заданными законами распределения и корреляционными связями. Показано, что поправки на турбулентность атмосферы, как правило, незначительны. Лишь в ряде частных случаев, обычно при больших допустимых значениях числа Стокса и интенсивности пульсаций концентрации, они достигают 20%.

Определение эффективности аспирации аэрозольных частиц в турбулентной среде имеет большое практическое значение. Вместе с тем число работ по данной тематике несоизмеримо мало по сравнению с огромным массивом публикаций, посвященных решению проблемы аспирации в условиях ламинарного потока. Экспериментальные исследования процесса аспирации в турбулентной атмосфере проводились только в лабораторных условиях (см., например [1]). На основании этой в достаточной степени скудной информации сформировалось мнение, что влияние турбулентности на эффективность аспирации в реальной атмосфере мало [2]. Таким образом, данная проблема остается открытой.

Процесс аспирации в атмосфере во многом определяется соотношением характерного линейного масштаба турбулентности и диаметра трубки пробоотборника. Если линейный масштаб турбулентности много меньше диаметра трубки пробоотборника, то турбулентная среда воспринимается им как жидкость, состоящая из мелких вихрей, засасываемых внутрь [3]. Оценка, проведенная с привлечением теории подобия приземного слоя атмосферы, дает для высоты 2 м над подстилающей поверхностью значение характерного линейного размера турбулентных возмущений (пути смещения) примерно 1 м [4]. Характерный диаметр трубки пробоотборника, как правило, 1 см. Таким образом, подход, рассматривавшийся в [3], неприемлем для оценок эффективности аспирации в реальной атмосфере.

В другом предельном случае, когда линейный масштаб турбулентности много больше диаметра трубки пробоотборника, последний воспринимает набегающий поток как хаотическое изменение его вектора скорости [3]. Поэтому коэффициент аспирации [2, 3] сохраняет свой смысл, но только для мгновенного значения вектора скорости потока. Именно этот случай является практически важным для оценки эффективности аспирации в реальной турбулентной атмосфере.

Пусть трубка пробоотборника – круглая, с радиусом R , прямая и имеет заостренные края. Приращение числа аэрозольных частиц dn , пересекающих за время dt входное сечение пробоотборника, будет равно $dn = Q \eta_a C dt$, где Q – объемный расход воздуха; $Q = \pi R^2 U_s$; U_s – среднее значение скорости потока в трубке; η_a – коэффициент аспирации аэрозольных частиц; C – мгновенное значение концентрации примеси.

Коэффициент аспирации зависит от [2, 3]: модуля скорости ветра U , угла между вектором скорости потока и осью трубки пробоотборника θ , среднего значения скорости потока в трубке, радиуса трубки, аэродинамического диаметра аэрозольных частиц D , а также их плотности – ρ_p ; $\eta_a = \eta_a(U, \theta; U_s, R; D, \rho_p)$. Первая пара переменных характеризует поток, вторая – пробоотборник, а последняя – аэрозольные частицы.

Математическое ожидание числа частиц, отобранных за время t , будет равно

$$\bar{n} = Q \int_0^t \overline{\eta_a C} dt_1. \quad (1)$$

Чертой сверху будем обозначать процедуру усреднения по статистическому ансамблю. Введем представление мгновенных значений в виде суммы средних и пульсаций: $\eta_a = \bar{\eta}_a + \hat{\eta}_a$, $C = \bar{C} + \hat{C}$ и т.д. После преобразований, с учетом стационарности процессов изменения концентрации аэрозолей и вектора скорости ветра, получим следующее соотношение для измеренного значения концентрации:

$$\bar{C}_{\text{изм}} = \eta_t \bar{C}; \quad \eta_t = \bar{\eta}_a + \overline{\hat{\eta}_a \frac{\hat{C}}{\bar{C}}}, \quad (2)$$

где $\bar{C}_{\text{изм}}$ – среднее значение измеренной концентрации.

Из (2) следует, что в общем случае η_t можно найти, зная зависимость коэффициента аспирации η_a от мгновенных значений компонент скорости ветра $\eta_a = \eta_a(U_x, U_y, U_z)$ при известной совместной функции распределения мгновенных значений пульсаций компонент скорости ветра и мгновенного значения концентрации аэрозолей. К сожалению, точное определение такой функции не представляется возможным из-за наличия проблемы замыкания усредненных уравнений теории турбулентности [4]. Ниже мы остановимся на методе оценки η_t , использующем моделирование указанных случайных процессов. Такая процедура будет учитывать законы распределения мгновенных значений пульсаций компонент скорости ветра [5] и концентрации [6], а также корреляционные связи между рассматриваемыми случайными величинами. Вычисление η_t будем производить усреднением членов, находящихся в правой части выражения (2), мгновенные значения которых определим на основании смоделированных последовательностей $\hat{U}_x, \hat{U}_y, \hat{U}_z$ и \hat{C}/\bar{C} .

Моделирование таких последовательностей производилось с помощью метода, описанного в [7]. Для его использования необходимо задать: интенсивность пульсаций концентрации $I_c = \sigma_c/\bar{C}$, где σ_c – стандартное отклонение пульсаций концентрации, турбулентные потоки примеси – $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ (они пропорциональны коэффициентам корреляции пульсаций концентрации и пульсаций компонент скорости ветра: r_{xc}, r_{yc}, r_{zc}), а также компоненты тензора вязких напряжений Рейнольдса (они пропорциональны коэффициентам корреляции пульсаций компонент скорости ветра: r_{xy}, r_{xz}, r_{yz}).

Общее число параметров для данной задачи достаточно велико. Поэтому мы остановимся лишь на некоторых примерах, которые типичны для отбора проб в приземном слое атмосферы в условиях ее нейтральной температурной стратификации. Пусть ось x расположена в направлении вектора среднего значения скорости ветра, ось y перпендикулярна оси x в горизонтальной плоскости, а ось z направлена вертикально вверх. Характеристики турбулентности зададим в соответствии с выводами теории приземного слоя атмосферы [4]. Пусть параметр шероховатости подстилающей поверхности равен 0,014 м, а скорость трения 0,2 м/с. Вследствие этого среднее значение скорости ветра на высоте 4 м составляет $\bar{U}_x = 4,24$ м/с, а стандартные отклонения пульсаций скорости равны: $\sigma_x = 0,48$ м/с; $\sigma_y = 0,34$ м/с; $\sigma_z = 0,16$ м/с. Также получим $r_{xy} = 0$; $r_{xz} = -0,52$; $r_{yz} = 0$. Зададим $R = 0,005$ м. Если $Q = 10$; 20 и 40 л/мин, то $\psi = \bar{U}_x/U_s = 2,0$; 1,0 и 0,5.

Размер аэрозольных частиц будем, как это принято в теории аспирации, характеризовать числом Стокса (St). Его мгновенное значение $St = U \tau/(2R)$,

где $U^2 = (\bar{U}_x + \hat{U}_x)^2 + (\hat{U}_y)^2 + (\hat{U}_z)^2$; τ – время релаксации аэрозольных частиц [2, 3]. Ниже будем также использовать параметр $St_0 = \bar{U}_x \tau/(2R)$.

Точных выражений для зависимости коэффициента аспирации от определяющих его параметров не существует. Мы использовали эмпирические соотношения [8], обобщающие результаты исследований [9]. Формула для коэффициента η_a , в диапазоне $0 \leq \theta \leq 60^\circ$, имеет вид

$$\eta_a = 1 + (\xi \cos \theta - 1) \frac{1 - [1 + (2 + 0,617 \xi^{-1}) St_1]^{-1}}{1 - (1 + 2,617 St_1)^{-1}} \times \\ \times \{1 - [1 + 0,55 St_1 \exp(0,25 St_1)]^{-1}\}; \\ \xi = \frac{U}{U_s}; \quad (3)$$

$$St_1 = St \exp(0,022 \theta); \quad 0,02 \leq St \leq 4,0; \quad 0,5 \leq \xi \leq 2,0.$$

Для диапазона углов $45 \leq \theta \leq 90^\circ$ принималось следующее соотношение, справедливое при $0,02 \leq St \leq 0,2$ и $0,5 \leq \xi \leq 2,0$ [8]:

$$\eta_a = 1 + 3 (\xi \cos \theta - 1) (St)^{\xi - 0,5}. \quad (4)$$

При использовании формулы (4) предполагали, что ось трубки пробоотборника расположена в горизонтальной плоскости под углом φ к оси x . Тогда $\cos \theta = [(\bar{U}_x + \hat{U}_x) \cos \varphi + \hat{U}_y \sin \varphi]/U$. Очевидно, для формулы (3) $\varphi = 0^\circ$.

Недостатком соотношений (3), (4) является то, что они не переходят непрерывно друг в друга при изменении угла θ от 45 до 60° при прочих равных условиях. Более того, в ряде случаев отклонения превосходят 10%-й уровень, оценивающий погрешности формул для определения η_a [2]. Например, если $St = 0,2$, $\psi = 2$, $\theta = 45^\circ$, то разница в значениях коэффициентов η_a , вычисленных по формулам (3) и (4), составляет 30%.

Параметром, с которым мы сравнивали рассчитанные значения η_t , был выбран коэффициент аспирации η_{a0} . Он также определялся по формулам (3) и (4), где вместо мгновенных значений St и U в них подставлялись St_0 и \bar{U}_x , а также соответствующие значения угла φ .

Расчеты, сделанные для $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 68^\circ$; $\varphi_y \neq 0$, $\varphi_x = \varphi_z = 0$; $\varphi_x \neq 0$, $\varphi_x = \varphi_y = 0$ во всем заданном диапазоне изменения параметров I_c и ψ , показали, что относительные отклонения η_t от η_{a0} : $\delta_1 = (\eta_t - \eta_{a0})/\eta_{a0}$ меньше, а зачастую много меньше 10%-го уровня, оценивающего погрешности определения коэффициента η_a по (3) и (4).

Расчеты, проведенные для $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 68^\circ$, $\varphi_x \neq 0^\circ$, $\varphi_y = \varphi_z = 0$ во всем диапазоне изменения ψ

при $I_c < 1$, позволяют сделать вывод о том, что относительные отклонения η_t от η_{a0} также меньше 10%-го уровня погрешностей вычисления η_a по формулам (3) и (4). Анализ результатов показывает, что значения δ_1 монотонно увеличиваются от практически нулевого до своего максимального значения при изменении St_0 от минимальной до максимальной величины.

Расчетами установлено, что отклонения δ_1 , имеющие порядок погрешностей формул (3) и (4) или превосходящие их, наблюдаются только при: $\varphi_x \neq 0^\circ$, $\varphi_y = \varphi_z = 0$; $I_c > 1$; $0,5 \leq \psi \leq 2,0$; $\varphi = 0$ и $\varphi = 68^\circ$. Найденные значения δ_1 приведены в таблице. Мы видим, что максимальное значение δ_1 не превосходит 20%. Обращает на себя внимание то, что при $\varphi = 68^\circ$ и при $1,0 < \psi < 2,0$ отклонение δ_1 меняет знак, т.е. в этой области есть значение ψ , где $\delta_1 = 0$.

Практический интерес также представляет анализ вклада каждого из двух членов, слагающих величину η_t (см. (2)). Перепишем выражение для коэффициента аспирации в турбулентной атмосфере в виде $\eta_t = \bar{\eta}_a (1 + \delta_2)$. Полученные значения δ_2 приведены в таблице. Мы видим, что вклад второго члена в η_t мал. Поэтому вторым слагаемым в выражении для η_t можно пренебречь. В этом случае η_t будет по порядку величины равно $\bar{\eta}_a$. Таблица также показывает, что величины δ_1 и δ_2 практически совпадают. Из выражений для δ_1 и δ_2 , следует

$$\bar{\eta}_a = \eta_{a0} [(1 + \delta_1)/(1 + \delta_2)].$$

Поэтому имеет место приближенное равенство $\eta_t = \eta_{a0}$.

Нормированные отклонения δ_1 и δ_2 , находящиеся вне пределов относительных погрешностей формул для вычисления коэффициента аспирации

		$I_c = 1$			$I_c = 2$		
		\bar{U}_x/U_s					
Угол, град.	St_0	2,0	1,0	0,5	2,0	1,0	0,5
$\varphi = 0$	0,99	*	*	*	0,09/0,09	*	*
	1,33	*	*	*	0,10/0,11	*	*
	1,80	*	*	*	0,11/0,11	*	*
	2,42	0,09/0,09	*	*	0,12/0,12	0,09/0,09	*
	3,27	0,09/0,09	*	*	0,13/0,12	0,09/0,10	*
	4,41	0,09/0,09	*	*	0,13/0,12	0,09/0,10	0,09/*
	5,95	0,09/0,09	*	*	0,13/0,12	0,09/0,10	0,10/0,09
$\varphi = 68$	0,19	*	*	*	*	*	-0,09/-0,09
	0,22	*	*	0,09/*	*	-0,10/-0,09	-0,11/-0,11
	0,25	*	-0,09/-0,09	-0,11/-0,09	0,09/*	-0,12/-0,11	-0,15/-0,14
	0,29	*	-0,11/-0,11	-0,14/-0,13	0,10/0,09	-0,15/-0,11	-0,19/-0,18

Примечания: В строках таблицы даны значения δ_1/δ_2 ; звездочка соответствует $|\delta_1| < 0,09$ или $|\delta_2| < 0,09$.

Вследствие вышесказанного мы получаем достаточно простой способ оценки коэффициента аспирации аэрозольных частиц в турбулентной атмосфере. Конечно, такой простой вывод не является тривиальным, поскольку он потребовал привлечения достаточно сложного метода моделирования рядов пульсаций [7].

Таким образом, для случая, когда диаметр трубки пробоотборника много больше характерного линейного масштаба турбулентности, предложена процедура оценки эффективности аспирации частиц в турбулентной атмосфере. На основании широко известных эмпирических формул для эффективности аспирации в ламинарных потоках получены оценки эффективности аспирации частиц в приземном слое атмосферы.

Результаты расчетов для ряда частных случаев показывают, что влияние турбулентности атмосферы на эффективность аспирации слабое. Поэтому для оценки математического ожидания концентрации можно использовать классические формулы для эффективности аспирации в ламинарной атмосфере, куда следует подставить величину среднего значения

модуля вектора скорости ветра и учесть его взаимное расположение с осью трубки пробоотборника.

Однако не следует абсолютизировать приведенные выводы, поскольку они получены для весьма ограниченного массива входных данных и с использованием в достаточной степени грубых эмпирических формул для эффективности аспирации. Тем не менее современные численные методы решения уравнений гидродинамики позволяют с необходимой степенью точности решить строго сформулированную трехмерную задачу аспирации в трубку, произвольно ориентированную к набегающему ламинарному потоку. Такие расчеты позволяют уточнить формулы для оценки эффективности аспирации и расширить диапазоны их применимости. Вот тогда и следует вернуться к предложенному нами методу для получения более достоверных оценок.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект N 98-05-65249.

1. Wiener R.W., Okazaki K., Willeke K. // Atmospheric Environment. 1988. V. 22. N 5. P. 917-928.

2. Brockmann J.E. Sampling and transport of Aerosols // Aerosol measurement. Principles, techniques and applications. (1993) / Ed. by K. Willeke and P. Baron. Van Nostrand Reinhold, New York. P. 79–111.
3. Vincent J.H. Aerosol sampling. Science and practice. 1989. Wiley. New York. 388 p.
4. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. I. М.: Наука, 1965. 640 с.
5. Hennemuth B. // Boundary Layer Meteorology. 1978. V. 8. N 4. P. 489–506.
6. Бородулин А.И., Майстренко Г.М., Чалдин Б.М. Статистическое описание распространения аэрозолей в атмосфере. Метод и приложения. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. 124 с.
7. Бородулин А.И., Десятков Б.М., Лаптева Н.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 6. С. 634–638.
8. Hangal S., Willeke K. // Atmospheric Environment. 1990. V. 24A. N 9. P. 379–386.
9. Durham M.D., Lundgren D.A. // J. of Aerosol Science. 1980. V. 11. P. 179–188.

ГНЦ ВБ «Вектор», НИИ аэриобиологии,
Новосибирская область

Поступила в редакцию
4 февраля 1998 г.

A.I. Borodulin, B.M. Desyatkov, N.A. Lapteva, V.V. Marchenko. **Evaluation of Aspiration Efficiency of Aerosol Particles in Turbulent Atmosphere.**

A process of aerosol particle aspiration in the turbulent atmosphere in the case that the typical linear scale of turbulence is much more than the typical diameter of sampler tube is discussed in this work. On the base of widely known empirical equations applicable to the laminar flows the evaluation of aerosol particle aspiration efficiency in the turbulent medium is made for conditions of the lowest atmospheric layer. In computation the method for modelling of the series of the instantaneous values of wind velocity and concentration pulsations with the given distribution laws and correlations has been used. As a rule, the correction for atmospheric turbulence is demonstrated to be negligible. Only in special cases (under the large values of Stokes number and pulsation intensity of concentrations) it amounts to as much as 20%.