

Д. т. н. **О. А. Аверкова**¹, д. т. н. **К. И. Логачёв**¹ (✉), к. ф.-м. н. **М. С. Грицкевич**²,
А. К. Логачёв¹

¹ ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия

² ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

УДК 533.6:628.5

АСПИРАЦИЯ АЭРОЗОЛЯ В ТОНКОСТЕННЫЙ ОТСОС-РАСТРУБ ПРИ НАБЕГАЮЩЕМ ПОТОКЕ. Часть 2. Динамика пылевых частиц*

Рассмотрен пылевоздушный поток, набегающий на местный вентиляционный отсос-раструб. Построены предельные траектории пылевых частиц для разных чисел Стокса и скорости набегающего потока. Обсуждено влияние на коэффициент аспирации угла наклона отсоса-раструба и его длины.

Ключевые слова: местный вентиляционный отсос-раструб, отрывные течения, метод дискретных вихрей, коэффициент аспирации.

В статье продолжено рассмотрение результатов исследования поведения пылевых частиц в спектре действия круглого отсоса-раструба при наличии восходящего воздушного потока. Нумерация рисунков начинается в первой части статьи.

На рис. 5–7 показаны траектории пылевых частиц. Предельные траектории пылевых частиц при фиксированной скорости в отсосе и скорости набегающего потока при увеличении длины раструба с углом раскрытия $\alpha = 90^\circ$ приближаются к оси отсоса вплоть до того, что при числах Стокса 0,2 и 0,25 предельных траекторий не существует (см. рис. 7). Соответственно, коэффициент аспирации для таких частиц будет равен нулю.

Коэффициент аспирации определяли по формуле

$$A = (R_c / R)^2 \bar{u},$$

где R_c — начальное расстояние до оси симметрии найденной предельной траектории пылевой частицы, $\bar{u} = u_\infty / u_0$.

Удаление от входа во всасывающий канал при этом равнялось $30R$. Зависимость коэффициента аспирации от длины раструба, расположенного под углом 90° к оси отсоса, представлена на рис. 8. При числах Стокса, стремящихся к нулю, коэффициент аспирации практически

* Продолжение. Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 4 за 2017 г.

✉
К. И. Логачёв
E-mail: kilogachev@mail.ru

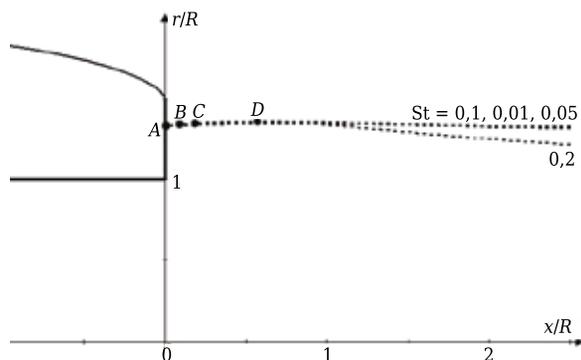


Рис. 5. Траектории пылевых частиц при $l/R = 0,5$, $\bar{u} = 0,6$; St: A (точка окончания (разветвления) предельной траектории пылевой частицы) — 0,01; B — 0,05; C — 0,1; D — 0,2

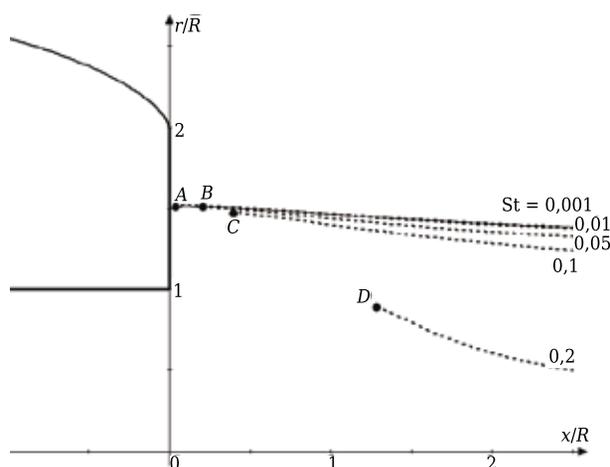


Рис. 6. Траектории пылевых частиц при $l/R = 1$, $\bar{u} = 0,6$; St: A (точка окончания (разветвления) предельной траектории пылевой частицы) — 0,01; B — 0,05; C — 0,1; D — 0,2. Сплошная тонкая линия — разделительная линия тока, которая практически совпадает с предельной траекторией пылевой частицы при $St = 0,001$

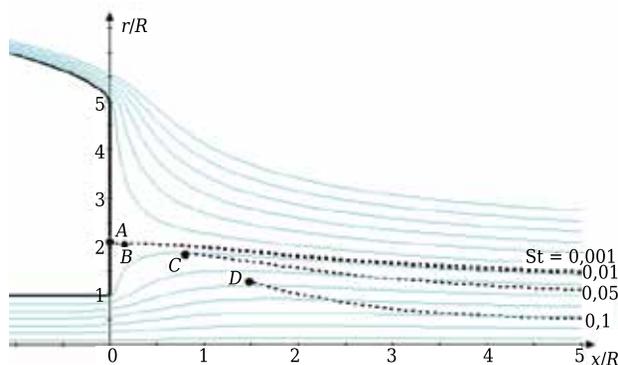


Рис. 7. Линии тока (—) и траектории пылевых частиц (---) при $l/R = 4$, $\bar{u} = 0,6$; St: A — (точка окончания (разветвления) предельной траектории пылевой частицы) — 0,001; B — 0,01; C — 0,05; D — 0,1

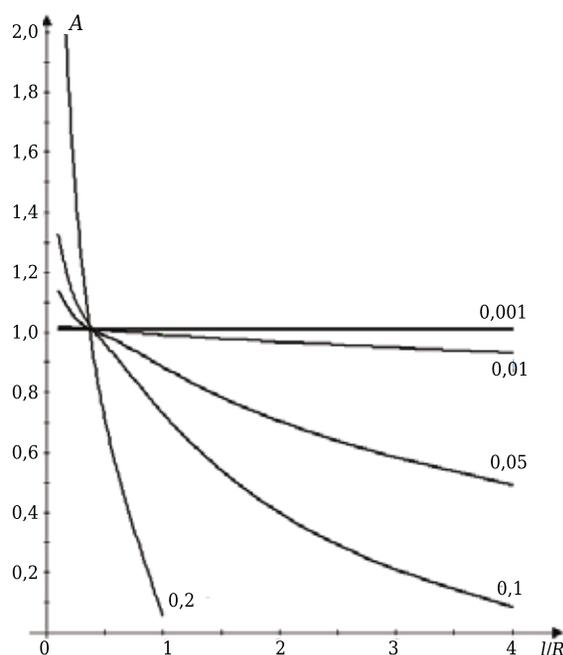


Рис. 8. Изменение коэффициента аспирации A в зависимости от длины раструба при $\alpha = 90^\circ$, $\bar{u} = 0,6$; St указано на кривых

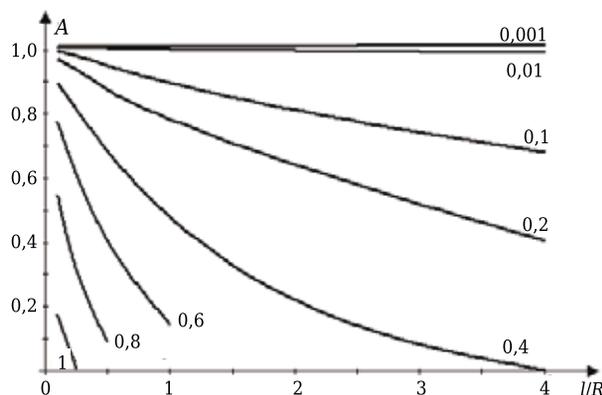


Рис. 9. Изменение коэффициента аспирации A в зависимости от длины раструба при $\alpha = 90^\circ$, $\bar{u} = 1,2$; St указано на кривых

не изменяется и стремится к 1 при всех длинах раструба. Действительно, в предположении о равномерности концентрации и скоростей пылевых частиц в воздушном потоке на значительном удалении от всасывающего канала коэффициент аспирации равен отношению площади поперечного сечения трубки предельных траекторий пылевых частиц к площади поперечного сечения трубки тока аспирируемого воздуха в том же сечении. В случае стремления числа Стокса к нулю предельные траектории пылевых частиц совпадают с критическими линиями тока. Поэтому указанные ранее площади совпадают. Этому случаю соответствует $St = 0,001$. Здесь наблюдается прямая $A \approx 1$. При увеличении числа Стокса коэффициент аспирации уменьшается при росте длины раструба. При $St = 0,2$ наблюдается резкое падение коэффициента аспирации в диапазоне изменения длины раструба от 0 до 1 калибра (калибр — это радиус R трубы). Любопытно, что все кривые пересекаются в одной точке, соответствующей длине раструба, равной 0,5 калибра.

При увеличении скорости набегающего потока в 2 раза зависимость коэффициента аспирации от безразмерной длины раструба значительно изменяется (рис. 9). При числах Стокса меньше 0,1 коэффициент аспирации близок к 1 во всем диапазоне изменения длин раструба. Характер изменения коэффициента аспирации остается прежним — он снижается при росте длины раструба, но его величина не превышает 1. Так как скорость набегающего потока стала выше, то удалось построить графики изменений коэффициентов аспирации при увеличении числа Стокса до 1. В последнем случае это удалось в узком диапазоне изменения длин раструба.

Представляет интерес выявление закономерности изменения коэффициента аспирации от угла наклона раструба к его оси при фиксированной длине раструба (рис. 10, 11).

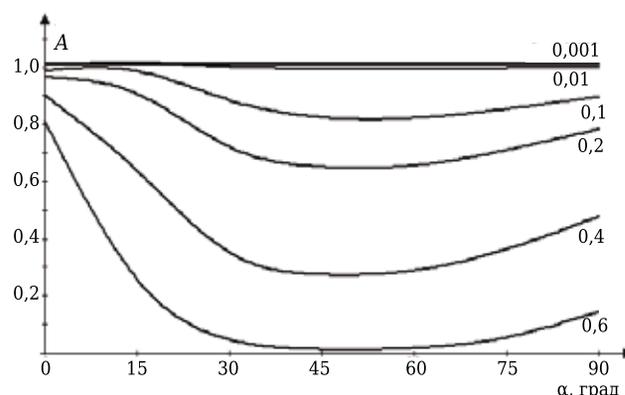


Рис. 10. Изменение коэффициента аспирации A в зависимости от длины раструба при $l/R = 1$, $\bar{u} = 1,2$ и угла его наклона α ; St указано на кривых

По-прежнему при малых числах Стокса (менее 0,01) коэффициент аспирации близок к 1. Графики изменения не монотонны, имеется минимум в диапазоне 45–60°.

В случае снижения величины безразмерной скорости набегающего потока в 6 раз зависимость коэффициента аспирации от угла наклона раструба к оси отсоса существенно изменяется (см. рис. 11). При увеличении указанного угла величина A падает. Данный случай характерен тем, что изменяется режим отрыва потока. Линии тока и предельные траектории пылевых частиц представлены на рис. 12.

Здесь наблюдается смена режима отрыва потока. При углах наклона раструба до 30° отрыв потока происходит внутрь раструба (см. рис. 12, а–б), при больших углах отрыв потока происходит вне раструба (см. рис. 12, в–е). Отметим также, что пылевые частицы, улавливаемые раструбом, могут находиться не только во внешнем набегающем потоке. Это частицы с St менее 0,2. Существуют пылевые частицы, которые не уносятся внешним набегающим потоком, они осаждаются, но улавливаются отсосом-раструбом. На рис. 12 это частицы, характеризующиеся числами Стокса более 0,025. В этом случае коэффициент аспирации рассчитывается по формуле

$$A = \frac{R_c^2 - R^2 u_\infty}{R^2 u_0}$$

Заметим, что пылевые частицы с $St = 0,05$ улавливаются только при угле наклона раструба

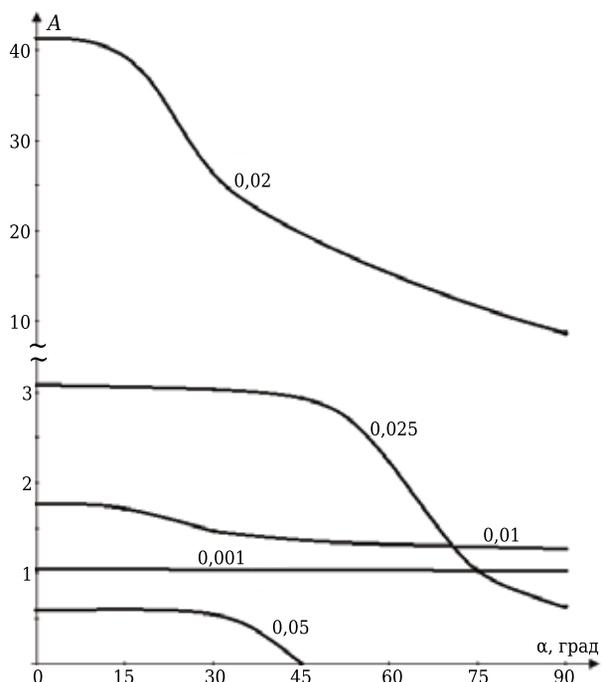


Рис. 11. Изменение коэффициента аспирации A от длины раструба при $l = R$, $\bar{u} = 0,2$ и угла его наклона α ; St указано на кривых

до 30° (см. рис. 12, а–б). При дальнейшем увеличении угла они осаждаются. Осаждаются и пылевые частицы с большими числами Стокса.

Дифференциальное уравнение (4) динамики пылевых частиц из первой части статьи не явля-

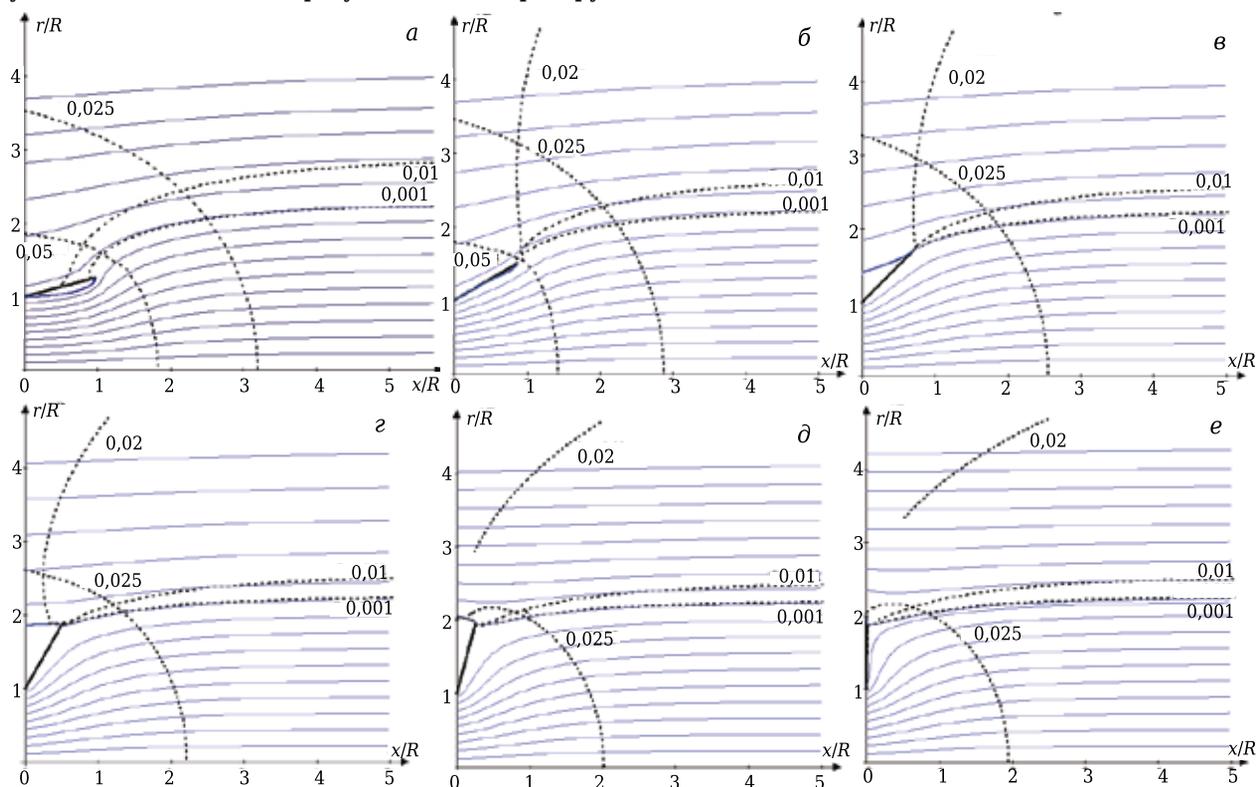


Рис. 12. Линии тока (—) и траектории пылевых частиц (- - -) при $l = R$, $\bar{u} = 0,2$ при разных углах наклона раструба α , град: а — 15; б — 30; в — 45; г — 60; д — 75; е — 90. На кривых траектории пылевых частиц указано St

ется безразмерным, что осложняет анализ движения пылевых частиц, поскольку существует много параметров, от которых зависит их поведение. Поэтому его можно свести к безразмерному виду [8], объединив указанные параметры в безразмерные комплексы. В качестве масштаба скорости используем скорость в отсосе u_0 , в качестве масштаба длины $2R$. В этом случае скорость частицы пыли $v_p = \bar{v}_p u_0$, скорость воздушного потока $v_a = \bar{v}_a u_0$, $u_\infty = \bar{u}_\infty u_0$, $t = \bar{t} \frac{2R}{u_0}$.

Тогда $\frac{d\bar{v}_p}{d\bar{t}} \frac{u_0^2}{2R} = e_g g - \frac{\bar{\Psi}\bar{\chi}\bar{u}_\infty u_0^2}{2 \cdot \text{St} \cdot R} (\bar{v}_p - \bar{v}_a)$. Разделив на $\frac{u_0^2}{2R}$, получим

$$\frac{d\bar{v}_p}{d\bar{t}} = e_g \frac{2Rg}{u_0^2} - \frac{\bar{\Psi}\bar{\chi}\bar{u}_\infty}{\text{St}} (\bar{v}_p - \bar{v}_a).$$

Критерий Фруда $\text{Fr} = \frac{u_0}{\sqrt{2gR}}$; число Стокса, записанное относительно скорости в отсосе, $\text{St}_0 = \frac{\rho_p d_e^2 u_0}{36\mu R} = \frac{\text{St}}{u_\infty} u_0 = \frac{\text{St}}{u_\infty}$. Тогда получим следующее безразмерное уравнение динамики пылевых частиц:

$$\frac{d\bar{v}_p}{d\bar{t}} = e_g \frac{1}{\text{Fr}^2} - \frac{\bar{\Psi}\bar{\chi}}{\text{St}_0} (\bar{v}_p - \bar{v}_a),$$

где черточки над безразмерными величинами опущены.

Начальные значения для скорости частицы в размерном виде имеют вид:

$$v_{px} = -u_\infty + g\tau, v_{pr} = 0. \quad \text{Время релаксации}$$

$$\tau = \frac{\rho_p d_e^2}{18\mu} = \frac{2R\text{St}_0}{u_0}. \quad \text{Тогда } v_{px} = -u_\infty + g \frac{2R\text{St}_0}{u_0}. \text{ Перейдя к}$$

Библиографический список

1. **Logachev, I. N.** Local exhaust ventilation: aerodynamic processes and calculations of dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova. — Boca Raton : CRC Press, 2015. — 576 p.
2. **Шафран, Ю. В.** Моделирование промышленных вентиляционных систем: проблема создания 3D-модели расчетной области / Ю. В. Шафран, А. В. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1. Математика. Физика. — 2016. — № 2 (33). — С. 52–62.
3. **Хоперсков, А. В.** Численное моделирование вентиляционных течений в промышленных помещениях / А. В. Хоперсков, Ю. В. Шафран, М. А. Бутенко // Южно-Сибирский научный вестник. — 2014. — № 2 (6). — С. 98–102.
4. **Ходаков, И. В.** Численное и экспериментальное исследование отрыва потока на входе во всасывающие каналы с механическими экранами / И. В. Ходаков // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 3. — С. 6–12.
5. **Ходаков, И. В.** Моделирование отрывного течения на входе в многоугольное всасывающее отверстие / И. В. Ходаков // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 2. — С. 11–15.

безразмерному виду $\bar{v}_{px} u_0 = -\bar{u}_\infty u_0 + g \frac{2R\text{St}_0}{u_0}$ и разделив последнее выражение на u_0 и учитывая число Фруда, получим следующее безразмерное выражение для начальной составляющей скорости:

$$v_{px} = -u_\infty + \frac{\text{St}_0}{\text{Fr}^2}, v_{pr} = 0.$$

Здесь черточки над безразмерными величинами опущены.

Таким образом, поведение пылевых частиц будет зависеть от следующих величин: чисел Фруда, Стокса, Рейнольдса, угла наклона раструба, его длины, соотношения набегающего и отсасываемого воздушного потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны математическая модель, вычислительный алгоритм ее реализации и компьютерная программа для расчета отрывного течения на входе в отсос-раструб при набегающем параллельно его оси симметрии внешнем потоке для построения траекторий пылевых частиц и определения их коэффициента аспирации. Построены линии тока, предельные траектории пылевых частиц, определены коэффициенты аспирации для разных чисел Стокса пылевых частиц, скорости набегающего потока, длины и угла наклона раструба. Полученные результаты могут быть полезны не только для проектирования эффективных систем местной обеспыливающей вентиляции [1–6], но и для задач отбора проб [7, 8].

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МД-95.2017.8).

6. **Логачёв, К. И.** Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого отсоса-раструба над непроницаемой плоскостью. Часть 1. Математическая модель и алгоритм ее компьютерной реализации / К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, А. К. Логачёв [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 56–60.

7. **Logachev, K. I.** Modeling of air and dust flows in the range of action of a round suction funnel above an impermeable plane. Part 1. A mathematical model and algorithm for its computer implementation / K. I. Logachev, O. A. Averkova, A. K. Logachev [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 679–683.

7. **Гильфанов, А. К.** Математические модели аспирации аэрозолей в тонкостенные пробоотборники / А. К. Гильфанов, Ш. Х. Зарипов. — Казань : Казан. ун-т, 2012. — 120 с.

8. **Гильфанов, А. К.** Расчет концентраций частиц в задаче аспирации аэрозоля в тонкостенную трубку / А. К. Гильфанов, Ш. Х. Зарипов, Д. В. Маклаков // Известия РАН. Механика жидкости и газа. — 2009. — № 6. — С. 89–99. ■

Получено 09.12.16

© О. А. Аверкова, К. И. Логачёв, М. С. Грицкевич, А. К. Логачёв, 2017 г.