Д. т. н. К. И. Логачёв (🖾), к. т. н. О. А. Аверкова, Е. И. Толмачёва, А. К. Логачёв, к. т. н. В. Г. Дмитриенко

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

УДК 533.6:628.5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В СПЕКТРЕ ДЕЙСТВИЯ КРУГЛОГО ОТСОСА-РАСТРУБА НАД НЕПРОНИЦАЕМОЙ ПЛОСКОСТЬЮ. Часть 2. Характеристики отрывной области и эффективность улавливания пылевых частиц^{*1}

Рассмотрено течение вблизи круглого местного вентиляционного отсоса в виде раструба, расположенного над непроницаемой плоскостью. В найденном по разработанной компьютерной программе поле скоростей построены предельные траектории пылевых частиц и определен коэффициент улавливания в зависимости от угла наклона и длины раструба, удаленности от плоскости. Определены зависимости геометрических размеров отрывной области на входе в раструб от удаленности от плоскости и длины раструба.

Ключевые слова: местный вентиляционный отсос, пылевые частицы, предельные траектории, аспирация, метод дискретных вихрей.

под критерием эффективности местного вентиляционного отсоса-раструба для пылевой частицы с заданными геометрическими и физическими свойствами будем понимать коэффициент улавливания

 $k = V_a/V_0,$

где V_a — объем аспирации отсоса с раструбом; V_0 — объем аспирации отсоса без раструба.

Очевидно, что k ≥1. Чем больше величина k, тем эффективней отсос. Предложенный коэффициент улавливания — более содержательный критерий эффективности местного вентиляционного отсоса, чем коэффициент неравномерности, поскольку в нем учитывается не только вертикальная составляющая скорости воздуха, но и горизонтальная, сносящая загрязняющие вещества ближе к оси симметрии отсоса, т. е. в зону более эффективного улавливания.

В расчетах использовали следующие исходные данные и параметры дискретности: плотность пылевой частицы $\rho_p = 2500$ кг/м³; коэффициент динамической формы частицы $\chi = 1$; ускорение

^{*1} Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 12 за 2015 г.



свободного падения g = 9,81 м/с²; плотность воздуха $\rho_a = 1,2$ кг/м³; кинематическая вязкость воздуха $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; шаг интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений (7)*² $\Delta \tau = 0,00005$ с; шаг дискретности $r_h = 0,0025$ м; длина стенок патрубка и радиус непроницаемой плоскости 60*R*; шаг построения линии тока 0,00001 м; циркуляция кольцевых вихрей, составляющих свободную поверхность тока, $\gamma = -0,02$; средняя скорость в отсосе $v_0 = 10$ м/с. Расчеты выполняли при R = 0,1 м и затем результаты приводили к безразмерному виду. Количество итераций по определению свободной поверхности тока было фиксированным и равным 15.

ДИНАМИКА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

На рис. 1-3 изображены линии тока и предельные траектории пылевых частиц при скорости всасывания 10 м/с для раструбов длиной 1, 3 и 5 калибров.

Были построены предельные траектории пылевых частиц диаметром 20, 40, 60 и 80 мкм. Наибольшими длиной траектории и объемом аспирации характеризуются частицы диаметром 20 мкм. При увеличении диаметра пылевой частицы длина траектории и объем аспирации уменьшаются. Чем ближе расположена непроницаемая плоскость, тем меньше объемы аспирации для всех пылевых частиц. На рис. 1-3 заметно уменьшение размеров отрывной об-

^{*2} См. часть 1 статьи.

ласти течения на входе в раструб при его удалении от непроницаемой плоскости. Заметим, что в случае попадания пылевой частицы внутрь отрывной области наблюдается вертикальное осаждение пылевой частицы в этой области (рис. 1, *a*, рис. 3, *a*-*e*).

Наиболее эффективным является раструб с углом полураскрытия $\beta = 90^{\circ}$ (рис. 4), что наблюдалось ранее и для неограниченного пространства [1-6]. Отметим, что при удалении отсоса-раструба от плоскости при фиксированной длине раструба *d* коэффициент улавливания *k* снижается.

Коэффициент улавливания растет при увеличении длины раструба вне зависимости от расстояния до непроницаемой плоскости (рис. 5), однако темп роста падает с увеличением расстояния до плоскости. Чем больше диаметр пылевой частицы, тем выше темп роста *k*, однако наблюдается его замедление при длинных раструбах.

Как видно на рис. 6, наличие плоскости оказывает существенное влияние на объем об-



Рис. 1. Линии тока и предельные траектории пылевых частиц диаметром 20, 40, 60 и 80 мкм (указан на кривых) в спектре действия отсоса-раструба длиной 1*R* при $\beta = 90^{\circ}$ и удалении отсоса-раструба от плоскости на расстояние, калибр: a - 1; b - 2; e - 4; z - 6; d - bes плоскости

ласти аспирации. При удалении плоскости объем аспирации быстрей приближается к величине объема аспирации без плоскости для более крупных частиц. Например, для частиц диаметром 80 мкм объем аспирации V_a приближается к объему аспирации V_a^b без плоскости уже при удалении 6R. А для частиц диаметром 20 мкм наличие плоскости на этом расстоянии оказывает весьма существенное влияние на объем аспирации, и при удалении 6R объем аспирации составляет всего 40 % от объема аспирации для случая отсутствия непроницаемой плоскости. Заметим также, что длина раструба оказывает несущественное влияние на коэффициент V_a/V_a^b : графики, изображенные на рис. 6, а, близки к графикам рис. 6, б.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРЫВНОЙ ОБЛАСТИ

Параметры отрывной области в обозначениях рис. 1, *а* части 1 статьи изображены на рис. 7. Наблюдается рост всех характерных размеров отрывной области с увеличением длины рас-



Рис. 2. Линии тока и предельные траектории пылевых частиц диаметром 20, 40, 60 и 80 мкм (указан на кривых) в спектре действия отсоса-раструба длиной 3*R* при $\beta = 90^{\circ}$ и удалении отсоса-раструба от плоскости на расстояние, калибр: a - 1; b - 2; e - 4; z - 6; d - bез плоскости



Рис. 3. Линии тока и предельные траектории пылевых частиц диаметром 20, 40, 60 и 80 мкм (указан на кривых) в спектре действия отсоса-раструба длиной 5*R* при $\beta = 90^{\circ}$ и удалении отсоса-раструба от плоскости на расстояние, калибр: a - 1; b - 2; b - 4; c - 6; d - 6ез плоскости

труба. Длина отрывной области *а* увеличивается при приближении к плоскости (см. рис. 7, *a*). Вынос струи за раструб (см. рис. 7, *б*) и максимальная толщина отрывной области (см. рис. 7, *в*) вначале возрастают при удалении от плоскости, затем убывают, имеют максимум при $u \approx 5R$.

Вычислительный эксперимент показал, что, как и в безграничном пространстве, максимум радиуса эффективного всасывания наблюдается в диапазоне 60-65° (рис. 8).

В результате обработки данных вычислительных экспериментов получена следующая формула для расчета линии отрыва потока на входе в раструб, установленный перпендикулярно патрубку:

$$\overline{x}(t) = a \frac{1 - e^{\frac{t - 2.5\pi}{3.1t - 4.5\pi}}}{R(t - 1.5\pi)^b} \cos t,$$

$$\overline{y}(t) = a \frac{1 - e^{\frac{t - 2.5\pi}{3.1t - 4.5\pi}}}{R(t - 1.5\pi)^b} \sin t + 1 + \overline{d}, \ 1.5\pi < t \le 2.5\pi,$$
(8)



Рис. 4. Изменение коэффициента улавливания *k* в зависимости от угла полураскрытия раструба при его длине 2 калибра и удалении от непроницаемой плоскости 1 (*a*) и 2 (б) калибра. На кривых указан диаметр пылевых частиц, мкм



Рис. 5. Изменение коэффициента улавливания k при $\beta = 90^{\circ}$ в зависимости от безразмерной длины раструба и удаления от непроницаемой плоскости: a - u = R; b - u = 2R; b - u = 4R; z - u = 6R. На кривых указан диаметр пылевых частиц, мкм

где
$$\overline{x}(t) = x(t) / R; \ \overline{y}(t) = y(t) / R;$$

 $a = (0,03\overline{d} - 0,034) \frac{\beta}{\pi} + 0,01\overline{d} + 0,032, \ \overline{d} = d / R,$
 $b = 0,14(1+1/\overline{u}), \ \overline{u} = u / R.$

Пусть, например: $u=1, \overline{d}=1 \Rightarrow a = (0,03-0,034)\frac{1}{2} + 0,01+0,032 = 0,04; b = 0,28,$ u=2, b=0,21, $\overline{d}=5 \Rightarrow a = (0,15-0,034)\frac{1}{2} + 0,05 + 0,032 = 0,14.$

На рис. 9 представлены примеры расчета линии тока по формуле (изображены сплошной

64



Рис. 6. Изменение величины отношения объема аспирации при наличии непроницаемой плоскости к объему аспирации без нее V_a/V_a^b в зависимости от удаления u до непроницаемой плоскости: a - d = 1R; 6 - d = 5R



Рис. 7. Изменение параметров вихревой области в зависимости от длины раструба и удаленности от плоскости: 1, 2, 4, 6 — удаление от непроницаемой плоскости, калибр

линией). Полученные результаты полезны для проектирования эффективных систем аспирации [3-6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны математическая модель и вычислительный алгоритм для расчета пылевоздушных потоков в спектре действия местного вентиляционного отсоса-раструба, расположенного над непроницаемой плоскостью. Определены за-



Рис. 8. Зависимость радиуса эффективного всасывания от угла наклона раструба при длине раструба и удалении от плоскости, равных 2 калибрам



Рис. 9. Рассчитанная по формуле (8) (—) и полученная в результате компьютерного моделирования (- - -) отрывные линии тока: a - u = 1, d = 1; b - u = 2, d = 5; b - u = 6, d = 5

кономерности изменения коэффициентов улавливания для пылевых частиц разных фракций. Показано, что наиболее эффективный захват пылевых частиц производится местным вентиляционным отсосом-раструбом с углом раскрытия 180°. Для такого отсоса-раструба построены области аспирации при различных длинах раструба и удаленности от непроницаемой плоскости. На основании вычислительных экспериментов, произведенных по разработанной компьютерной программе, определены характерные размеры отрывной области на входе в сток-раструб, расположенный над непроницаемой плоскостью. Предложена аналитическая формула для определения линии отрыва на входе в раструб с углом раскрытия 180°, расположенный над непроницаемой плоскостью, профилирование по которой позволит улучшить акустические и аэродинамические свойства местного вентиляционного отсоса.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-08-00074а).

Библиографический список

1. Логачёв, И. Н. Энергосбережение в аспирации. Теоретические предпосылки и рекомендации / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова. — Москва – Ижевск : РХД, 2013. — 504 с.

2. *Посохин, В. Н.* К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба / В. Н. *Посохин, Н. Б. Салимов, К. И. Логачёв* [и др.] // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — Сообщение 1, № 8. — С. 70–76.

3. **Киреев, В. М.** Разработка аспирационных укрытий и инженерной методики их расчета / *В. М. Киреев, В. А. Минко* // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 2. — С. 42-46.

4. *Шаптала, В. Г.* Численное моделирование движения цементно-воздушной смеси в пневмокамерном

насосе / В. Г. Шаптала, В. В. Шаптала, А. В. Гавриленко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 2. — С. 159–161.

5. Шаптала, В. В. Моделирование и расчет систем очистки запыленных выбросов цементного производства / В. В. Шаптала // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 6. — С. 205–209.

6. Шаптала, В. Г. Метод расчета эффективности центробежных уловителей слипающих пылей в производстве строительных материалов / В. Г. Шаптала, В. В. Шаптала // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2014. — № 3. — С. 58–62.

Получено 24.02.15 © К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, Е. И. Толмачёва, А. К. Логачёв, В. Г. Дмитриенко, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

