

Аверкова О.А., канд. техн. наук, доц.,  
Канар А.Э., аспирант,  
Толмачева Е.И., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ВХОДЕ В МЕСТНЫЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ ОТСОСЫ В ВИДЕ РАСТРУБОВ\*

olga\_19572004@mail.ru

Для определения эффективности улавливания пылевых выбросов местными вентиляционными отсосами-раструбами строятся равновесные линии, выше которых происходит улавливание пылевых частиц данного диаметра, а ниже - осаждение. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании эффективных местных вентиляционных отсосов-раструбов.

**Ключевые слова:** местный вентиляционный отсос, пылевые частицы, аспирация

**Введение.** Местные вентиляционные отсосы в виде раструбов (зонтов) нашли наиболее широкое применение в промышленной вентиляции [1-6]. В работах [4-6] на основе метода дискретных вихрей определялись параметры отрыва потока на входе в круглые и щелевидные отсосы-раструбы. Был сделан вывод, что наиболее дальнобойными являются местные вентиляционные отсосы в виде раструба, установленные перпендикулярно к его оси, т.е. при  $\alpha = 90^\circ$  (рис.1). Однако, исследовалось только изменение осевой скорости (на оси ОХ рис.1). Целью данной статьи является исследование эффективности местного вентиляционного отсоса-раструба для улавливания пылевой аэрозоли.

Представляет интерес найти линию (поверхность), где сила тяжести пылевой частицы заданного диаметра равна силе увлекающей пылевую частицу в отсос. На этой линии скорость воздушного потока равна скорости витания пылевой частицы. При Стоксовском режиме обтекания пылевой частицы воздушным потоком скорость ее витания  $v = \rho d_e^2 g / (18\mu\chi)$ , где  $\rho$  - плотность пылевой частицы,  $d_e$  - эквивалентный диаметр пылевой частицы,  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости воздуха,  $\chi$  - коэффициент формы,  $g$  - ускорение свободного падения. Направим ось ОХ противоположно силе тяжести (рис.1) по оси симметрии круглого отсоса-раструба, ось ОУ - перпендикулярно так, чтобы она проходила через конец раструба, т.е. находилась на входе в отсос-раструб. Необходимо найти линию (поверхность), в каждой точке которой вертикальная составляющая скорости воздушного потока  $v_x = v = \rho d_e^2 g / (18\mu\chi)$ .

### 1. Вычислительный алгоритм расчета поля скоростей воздушного потока

Для решения поставленной задачи необходимо разработать вычислительный алгоритм

нахождения составляющих скорости  $(v_x, v_y)$  в произвольной точке  $M(x,y)$  при изменении угла наклона  $\alpha$  и длины раструба  $l$ .

В данном случае имеем осесимметричную задачу. Для расчета отрыва потока на входе во всасывающие каналы хорошо себя зарекомендовала модель потенциальных течений [1-11]. В рамках теории идеальной несжимаемой жидкости алгоритм расчета будем строить с использованием метода дискретных вихревых колец [7,8,12-14]. Границу дискретизируем системой бесконечно тонких вихревых колец и расчетных точек, как показано на рис.2. В каждый момент времени с острых кромок А и В сходят два бесконечно тонких кольцевых вихря. Заметим, что для моделирования вихревой пелены будем использовать систему «урезанных» бесконечно тонких вихревых колец без самоиндукции, корректное использование которых доказано в [15]. Это означает, что при подходе к некоторой точке вихревого кольца на расстояние меньшее шага дискретности, величина скорости в этой точке будет равна нулю.

Математическая постановка задачи состоит в решении двумерного уравнения Лапласа для потенциальной функции  $\varphi$ :  $\Delta\varphi = 0$ , при заданных значениях граничной нормальной составляющей скорости  $\partial\varphi/\partial n|_S = v_n(x) - U_n$ , где  $x$  - точка границы  $S$ . Функция  $U_n$  выражает влияние свободных вихрей, сходящих с острых кромок.

Данное уравнение сводится к граничному сингулярному интегральному уравнению:

$$\int_S G(x, \xi) \omega(\xi) ds(\xi) = v_n(x) - \mu \int_\sigma G(x, \xi) d\sigma(\xi),$$

где  $\omega(\xi)$  - плотность циркуляции присоединенного вихревого слоя;  $\mu = const$  - плотность циркуляции свободного вихревого слоя, непрерывно размещенного на поверхности  $\sigma$ , образующейся при срыве потока с острой кромки;  $\xi$

– произвольная точка границы  $S$ . Функция  $G(x, \xi)$  численно равна величине скорости в точке  $x(x_1, x_2)$  вдоль направления единичного

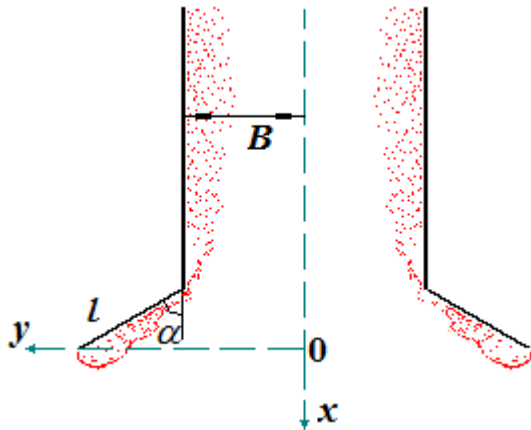


Рис.1. К постановке задачи

вектора  $n = \{n_1, n_2\}$ , вызываемой вихрем единичной циркуляции, расположенного в точке  $\xi(\xi_1, \xi_2)$ .

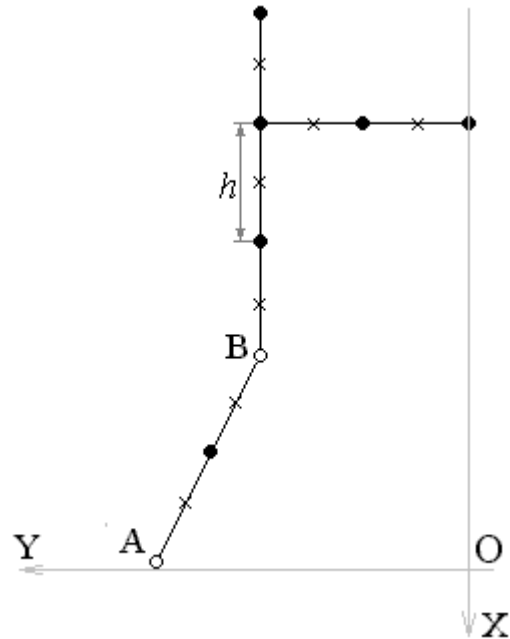


Рис.2. Дискретизация границы области течения: X – расчетные точки; ● – присоединенные вихри; o – свободные вихри

Для осесимметричной задачи в цилиндрической системе координат:

$$\begin{cases} G(x, \xi) = \frac{(A_1 b + A_2 a)}{b} \cdot \frac{4}{(a-b)\sqrt{a+b}} E(t) - \frac{A_2}{b} \cdot \frac{4}{\sqrt{a+b}} F(t) & \text{при } b \neq 0, \\ G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 \cdot n_1}{2a\sqrt{a}} & \text{при } b = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$2x_2 \xi_2 = b > 0, \quad a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2 > 0, \quad A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi},$$

$$A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1], \quad F(t) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}}, \quad E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta, \quad t = \frac{2b}{a+b}.$$

Вихревой слой, моделирующий поверхность трубы, заменяется бесконечно тонкими вихревыми кольцами постоянной интенсивности  $\Gamma(\xi^k)$ ,  $k = \overline{1, N}$ .

Система уравнений для расчета неизвестных циркуляций присоединенных вихрей в момент времени  $t = m\Delta t$  с использованием условия безциркуляционного течения имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n \Gamma^k G^{pk} + \sum_{l=1}^2 \sum_{\tau=1}^m G^{p\tau} \gamma^{l\tau} = v_n^p, \\ \sum_{k=1}^n \Gamma^k + \sum_{l=1}^2 \sum_{\tau=1}^m \gamma^{l\tau} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $v_n^p = v_n(x^p)$ ;  $\Gamma^k = \Gamma(\xi^k)$ ;  $G^{pk} = G(x^p, \xi^k)$ ;  $G^{p\tau} = G(x^p, \zeta^\tau)$ ;  $\gamma^{l\tau}$  - циркуляция свободного

вихря, сошедшего с  $l$ -й острой кромки в момент времени  $\tau$  и расположенного в точке  $\zeta^\tau$ ;  $G^{p\tau}$  - функция влияния на  $p$ -ю расчетную точку вихря  $\gamma^\tau$  и  $G^{pk}$  определяется по формуле (1). Система получается разрешимой из-за условия безциркуляционного течения. В начальный момент она имеет вид:

$$\begin{cases} \Gamma^1 G^{11} + \dots + \Gamma^{n-1} G^{1, n-1} + \Gamma^n \cdot 0 = v_n^1, \\ \dots \\ \Gamma^{N-1} G^{N-1, 1} + \dots + \Gamma^{N-1} G^{N-1, N-1} + \Gamma^{N-1} \cdot 0 = v_n^{N-1}, \\ \Gamma^1 + \Gamma^2 + \dots + \Gamma^{N-1} + \Gamma^N = 0. \end{cases}$$

Таким образом, данная система эквивалентна отбрасыванию вихря с нулевым радиу-

сом и отбрасыванию условия безциркуляционного течения.

Искомая скорость определяется из первого уравнения системы (2), где вместо расчетной точки подставляется точка внутри области.

По приведенному вычислительному алгоритму разработана компьютерная программа. В данной программе задавались параметры угла

наклона и длины раструба. Расчет производился до тех пор, пока свободные вихри полностью заполняют область (см. рис.1, где точками показаны свободные вихри). Заметим, что во времени наблюдаются пульсации скорости (рис.3). Поэтому производился расчет усредненных по времени составляющих скорости.

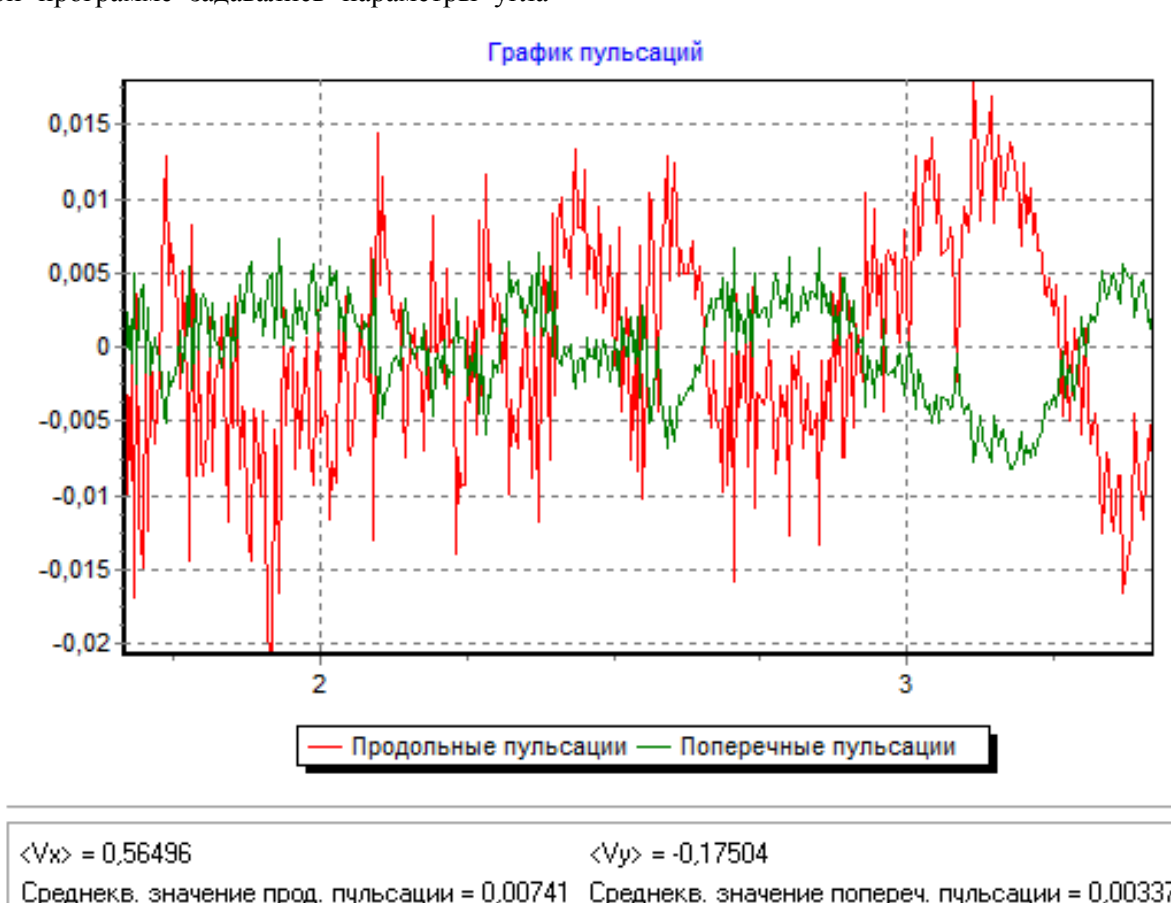


Рис.3. Пульсации составляющих скорости во времени

## 2. Результаты расчета и их обсуждение

Скорость во всасывающем отверстии принята равной 1 м/с, равновесные линии строились для частиц плотности 3200 кг/м<sup>3</sup> с эквивалентными диаметрами 10, 20, 30 и 40 мкм и коэффициентом формы  $\chi = 1$ . Динамическая вязкость воздуха  $\mu = 1,78 \cdot 10^{-5}$  Па·с. В этом случае скорости витания для частиц указанных диаметров будут равны 0,0099 м/с; 0,0392 м/с; 0,0881 м/с 0,1566 м/с.

Поле скоростей воздуха определялось в узлах сетки  $x = 0,1; 0,2; \dots 0,9; 1,05$  [м];  $y = 0; 0,05; 0,1; \dots 0,9$  [м] при  $\alpha = 0^\circ, 18^\circ, 36^\circ, 54^\circ, 72^\circ, 90^\circ$ ,  $l/B = 1; 2; 3; 4; 5$ ;  $B = 0,15$  м. По найденному полю скоростей равновесные линии строились следующим образом. Строились графики изменения составляющей скорости  $v_x$  при заданной длине раструба  $l = B$ , удаления от оси отсоса ( $y/B$ )

и удаления от входа в отсос ( $x/B$ ). Пример такого построения показан на рис.4.

Затем в программе Advanced Grapher построенные по десяти точкам графики аппроксимировались полиномами 9-й степени и определялись точки пересечения графиков этих полиномов с прямыми  $v_x = 0,0099$  м/с; 0,0392 м/с; 0,0881 м/с 0,1566 м/с с точностью до пяти знаков после запятой. Таким образом, в данном сечении  $y/B$  при  $l/B$  и  $\alpha$  определялось значение  $x/B$ , при которой скорость  $v_x$  достигала значения скорости витания для заданного диаметра пылевой частицы.

Картина изменения величины  $x/B$  при  $l/B = 1$  (рис.5) показывает, что случай  $\alpha = 90^\circ$  является наиболее предпочтительным для улавливания частиц, поскольку  $x/B$  принимает наибольшее значение.

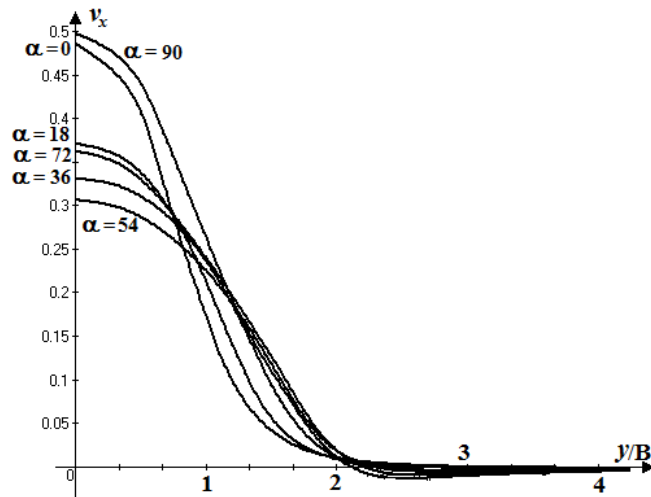


Рис.4. Зависимость вертикальной составляющей скорости при длине раструба  $l = B$  от удаления оси отсоса ( $y / B$ ), при удалении от входа в отсос на расстоянии  $x = 2/3B$

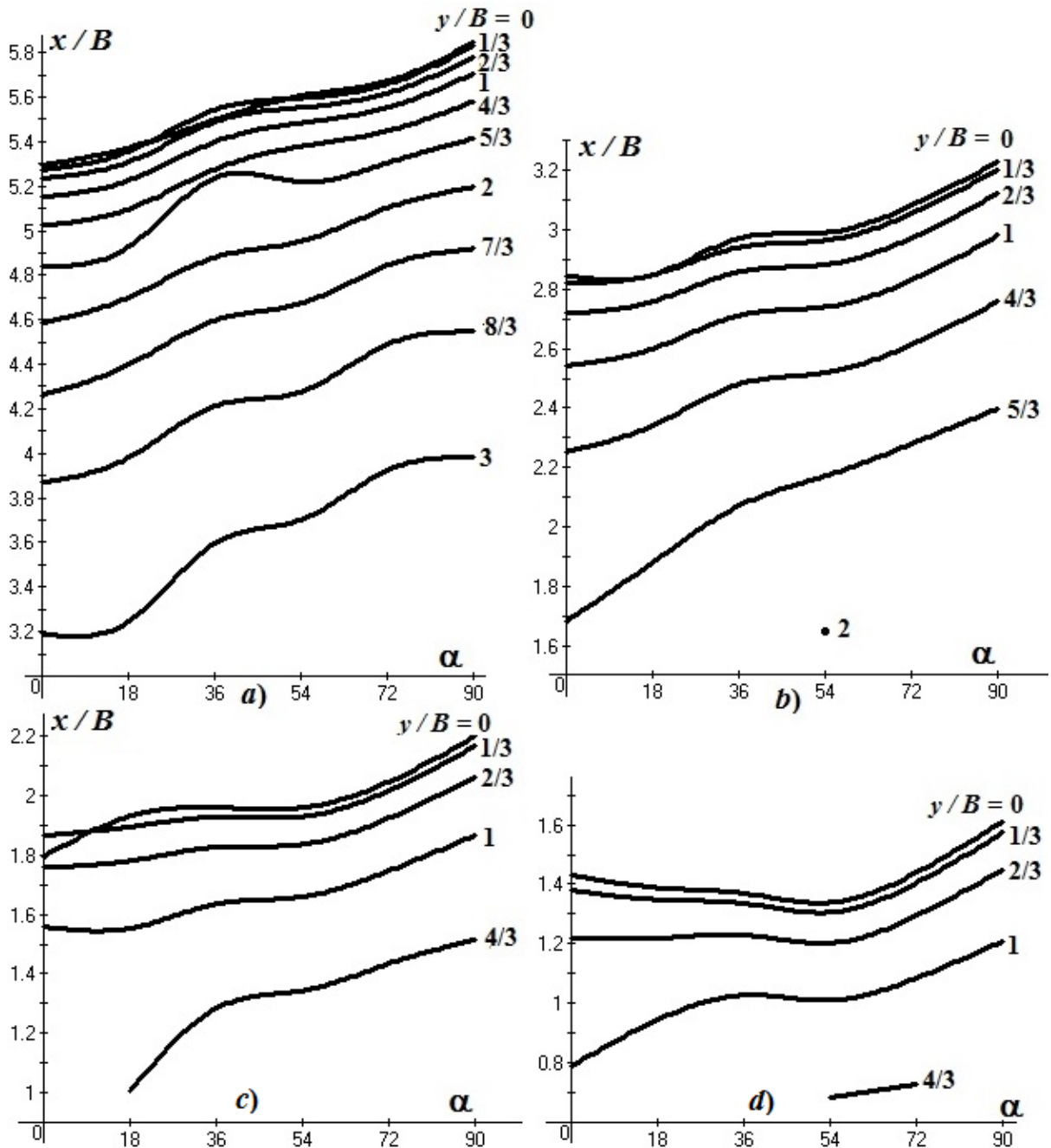


Рис.5. Зависимость удаления ( $x/B$ ) равновесной линии от входа во всасывающий канал при разных значениях расстояния ( $y/B$ ) от оси симметрии при длине раструба  $l/B=1$ : а)  $d = 10\text{мкм}$ ; б)  $d = 20\text{мкм}$ ; в)  $d = 30\text{мкм}$ ; д)  $d = 40\text{мкм}$

Однако, наблюдается исключения. Так, при  $\alpha = 54^\circ$ ,  $d = 20\text{ мкм}$ ,  $y/B = 2$  (рис. 5б) имеется единственный случай (точка на координатной плоскости), где сила тяжести уравнивается силой увлекающей частицу в отсос. Также, в

случае  $\alpha = 54^\circ \div 72^\circ$ ,  $d = 40\text{мкм}$  (рис.5 д) равновесная линия является отрезком, т.е. для улавливания пыли в этих точках предпочтительнее отсос-раструб  $\alpha = 72^\circ$ . При  $l/B = 2$  (рис.6) таких исключений больше.

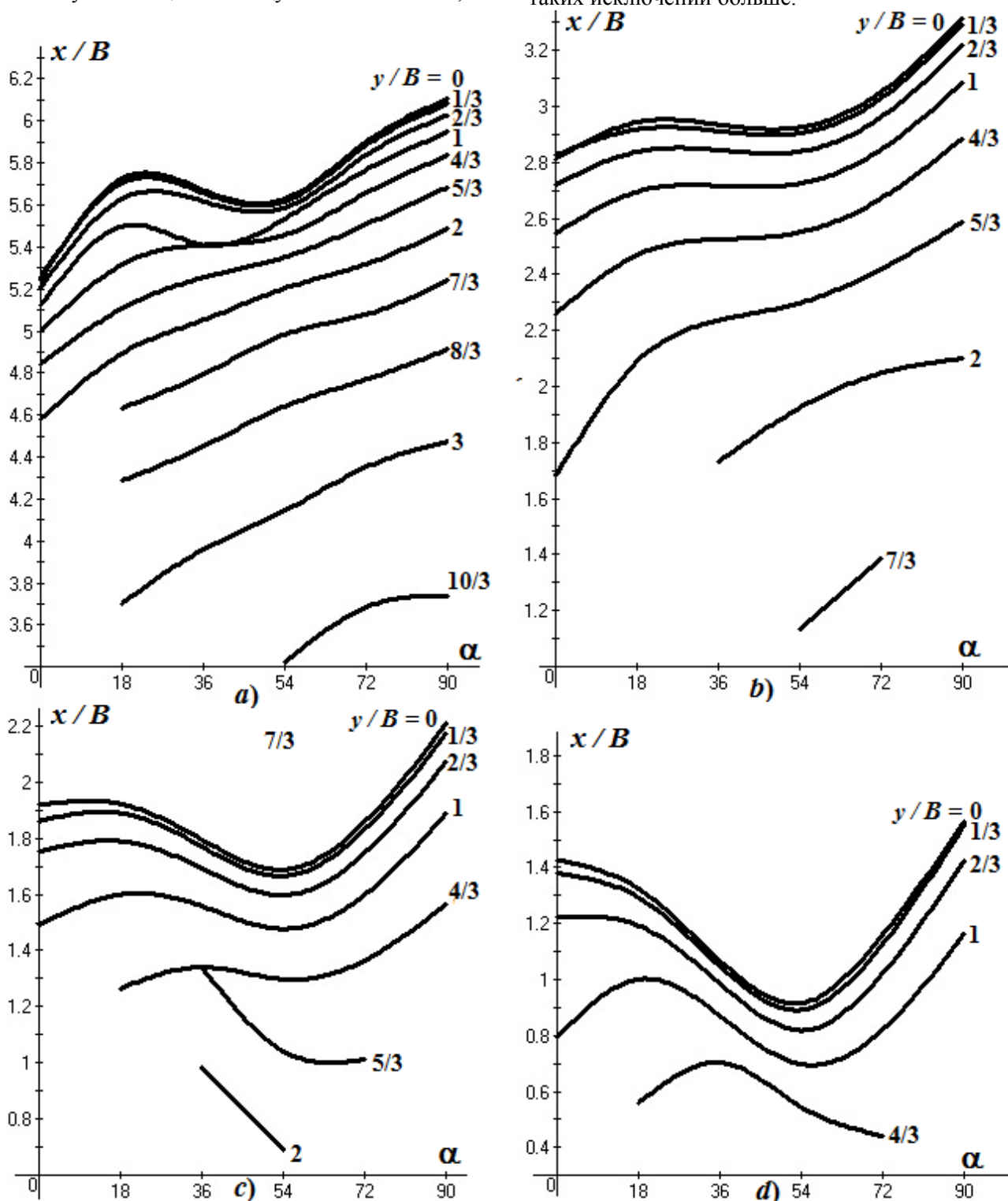


Рис.6. Зависимость удаления ( $x/B$ ) равновесной линии от входа во всасывающий канал и разных значениях расстояния ( $y/B$ ) от оси симметрии при длине раструба  $l/B = 2$ : а)  $d = 10\text{мкм}$ ; б)  $d = 20\text{мкм}$ ; в)  $d = 30\text{мкм}$ ; д)  $d = 40\text{мкм}$

На рис.6а) видно присутствие максимума при  $d=10$  мкм,  $\alpha \approx 20^\circ$ ,  $y/B=0 \div 1$ , но наибольшее значение удаления  $x/B$  равновесной линии достигается при  $\alpha=90^\circ$ . Не изменяется ситуация при  $d=20$  мкм (рис. 6b), но при  $\alpha=90^\circ$ ,  $y/B=7/3$  уже нет соответствующего значения  $x/B$ , т.е. на этой линии частицы  $d=20$  мкм не улавливаются отсосом-раструбом. В случае  $d=30$  мкм нет улавливания

при  $y/B=5/3$ ,  $\alpha=90^\circ$ , а при  $y/B=2$ ,  $\alpha=90^\circ$  и  $\alpha=72^\circ$ . Это значит, что в данных точках эффективнее отсос-раструб с углом  $\alpha=72^\circ$  в первом случае и  $\alpha=54^\circ$  - во-втором. А для частиц с  $d=40$  мкм и  $y/B=4/3$  эффективней оказывается отсос-раструб с углом  $\alpha=36^\circ$ .

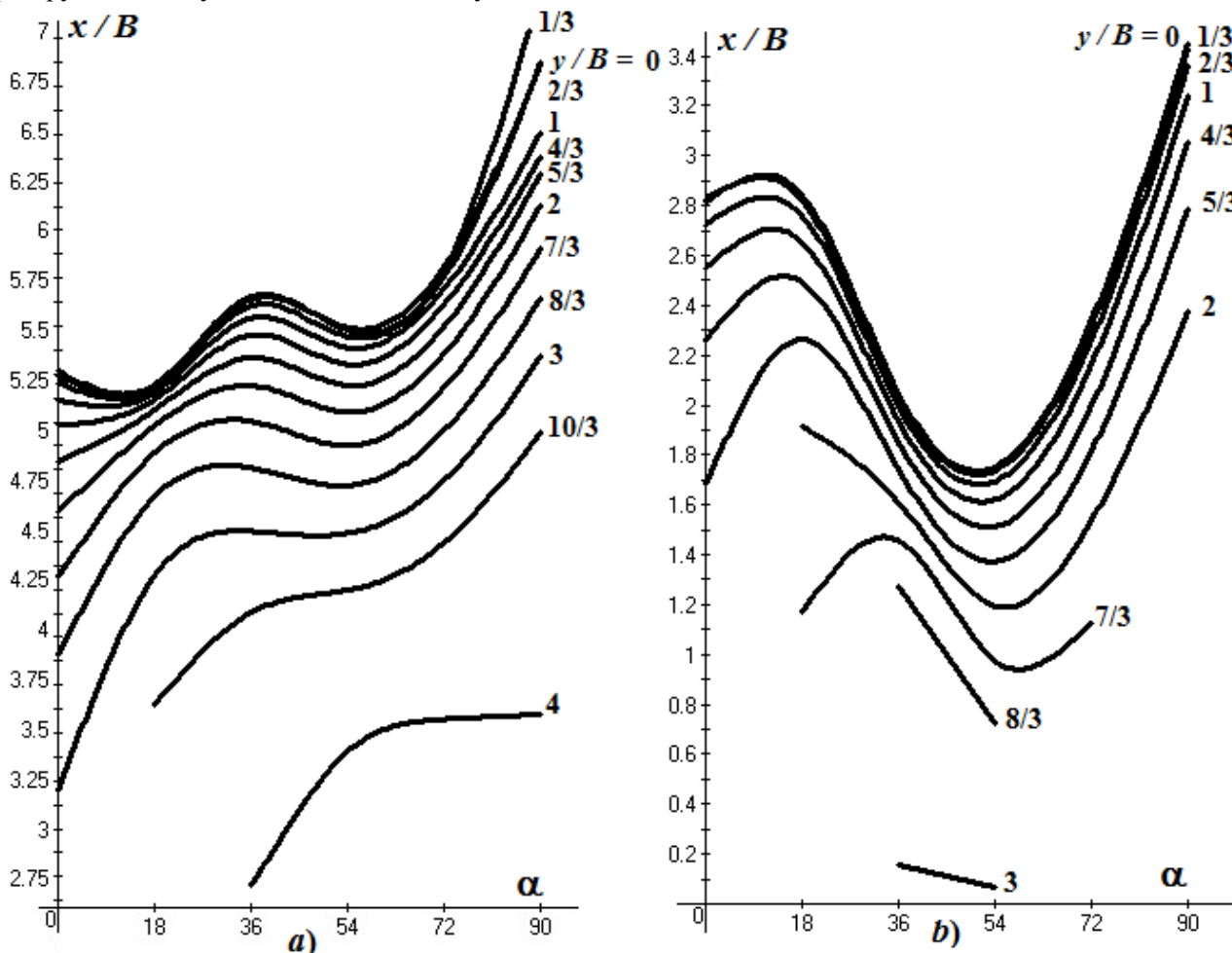


Рис. 7. Зависимость удаления ( $x/B$ ) равновесной линии от входа во всасывающий канал при разных значениях расстояния ( $y/B$ ) от оси симметрии и длине раструба  $l/B=5$ : а)  $d=10$  мкм; б)  $d=20$  мкм

При  $l/B=5$  (рис.7) удаление  $y/B$  от оси отсоса, на котором происходит улавливание пылевых частиц диаметрами 10 и 20 мкм увеличивается. Наблюдается минимум  $x/B$ , особенно для пылевых части диаметра 20 мкм (рис.7b). Для частиц 30 мкм и 40 мкм при  $\alpha=18^\circ$  улавливание частиц происходит в диапазоне  $y/B=0 \div 2$  на соответствующих расстояниях  $x/B=1,56 \div 0,7$ . В случае  $\alpha=36^\circ \div 54^\circ$  такие частицы вовсе не улавливаются. Что касается влияния угла раскрытия на эффективность улавливания, то здесь даже для частиц с диаметром 20 мкм наблюдаются случаи,

когда более эффективен отсос при  $\alpha \neq 90^\circ$ . При  $y/B=7/3 \div 3$  более дальнебоен отсос при  $\alpha \approx 30^\circ$ .

Заметим, что дальнейшее направление исследований по повышению эффективности местных вентиляционных отсосов-раструбов от пылевыделяющего оборудования состоит, по нашему мнению, в построении предельных траекторий [16,17], определении области аспирации в зависимости от угла раскрытия, длины раструба и использовании метода дискретных вихрей в стационарной постановке [18,19].



### Выводы

На основе метода дискретных вихрей в нестационарной постановке и разработанной компьютерной программе произведены расчеты равновесной линии для улавливания пылевых частиц разных диаметров. В результате серии вычислительных экспериментов показано, что угол раскрытия раструба и его длина существенно влияют на эффективность местного вентиляционного отсоса, точка образования пылевых частиц влияет на выбор наиболее эффективного угла раскрытия раструба. Таким образом, для проектирования наиболее эффективно отсоса-раструба от пылевыделяющего оборудования необходима информация о точках образования пылевых частиц, их плотности, форме, диаметре, начальной скорости образования.

*\*Работа выполнена в рамках грантов Президента Российской Федерации МК-103.2014.1 и Российского фонда научных исследований (проект №14-08-31069-мол\_а).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Логачев К.И., Живов А.М. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба. Сообщение 1 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2002. №8. С.70-76.
2. Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Логачев К.И., Живов А.М. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба. Сообщение 2 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2002. №9. С.80-85.
3. Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Логачев К.И., Живов А.М. К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба. Сообщение 3 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2002. №10. С.81-85.
4. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. СПб: Химиздат, 2005. – 659с.
5. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И. Отрывные течения в спектрах вытяжных каналов. Москва-Ижевск: ИКИ, 2012 - 288с.
6. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Энергосбережение в аспирации. Теоретические предпосылки и рекомендации. М.–Ижевск: РХД, 2013. - 504 с.
7. Логачев К.И., Посохин В.Н. Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка Известия высших учебных заведений. - 2004. - №1.-С. 29-32.
8. Логачев К.И., Пузанок А.И., Посохин В.Н. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей// Известия вузов. Проблемы энергетики. 2004. №7-8. С.61-69.
9. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Математическое моделирование отрывных течений при входе в экранированный плоский канал // Вычислительные методы и программирование. 2010.т. 11. №1. 68-77.
10. Логачев И.Н., Логачев К.И., Зоря В.Ю., Аверкова О.А. Моделирование отрывных течений вблизи всасывающей щели // Вычислительные методы и программирование. 2010. т.11, №1. 43-52.
11. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Математическое моделирование отрывных течений при входе в экранированный плоский канал // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11, №1, С. 72-81.
12. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Пузанок А.И., Ходаков И.В. Моделирование отрывного течения на входе в квадратный всасывающий канал// Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 6. С. 97-104.
13. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Ходаков И.В. Моделирование отрывных потоков на входе в круглые всасывающие каналы с кольцевыми экранами// Новые огнеупоры, 2013. №10. С. 57-61.
14. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Пузанок А.И., Ходаков И.В. Моделирование отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал// Вычислительные методы и программирование, 2013. – Т.14, С. 246-253.
15. Гоман О.Г., Карплюк В.И., Ништ М.И. и др.Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости. М.: Машиностроение, 1993. - 288 с.
16. Гильфанов А.К. Математические модели аспирации аэрозолей в тонкостенные пробоотборники / А.К. Гильфанов, Ш.Х. Зарипов. – Казань: Казан. ун-т, 2012. – 120 с.
17. Логачев И.Н., Логачев К.И. О прогнозировании дисперсного состава и концентрации грубодисперсных аэрозолей в местных отсосах систем аспирации// Изв. вузов. Строительство. - 2002. - №9. - С.85-90.
18. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И. Моделирование отрыва потока на входе во всасывающие каналы в областях с разрезами // Вычислительные методы и программирование, 2012. - Т.13, №2. - С. 298-306.
19. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И. Моделирование потенциальных течений с неизвестными границами на основе стационарных дискретных вихрей // Вычислительные методы и программирование. – 2011. – Т.12, №2. – С. 213-219.