

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

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

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

О ВОЗДУШНОМ ЭКРАНИРОВАНИИ МЕСТНОГО ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ОТСОСА-РАСТРУБА В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ*

olga_19572004@mail.ru

Основной задачей местной вытяжной вентиляции является локализация пылегазовых выбросов. Снижение производительности систем вентиляции при сохранении локализирующих свойств позволяет снизить мощность тягодутьевых средств, что важно с точки зрения энергосбережения. В статье рассматривается возможность повышения дальности всасывающего факела местного вентиляционного отсоса-раструба в неограниченном пространстве за счет воздушно-струйного экранирования. С помощью вычислительного эксперимента, проведенного по разработанной компьютерной программе, показано, что увеличить дальность возможно в несколько десятков раз.

Ключевые слова: местный вентиляционный отсос, воздушно-струйное экранирование, метод дискретных вихревых колец.

Введение. Одним из путей повышения эффективности систем вытяжной вентиляции является повышение дальности действия местных вентиляционных отсосов [1, 2]. Достичь этого можно за счет воздушно-струйного экранирования [3] - использования приточных струй. В работе [4] было использовано воздушно-струйное экранирование местного вентиляционного отсоса - раструба над непроницаемой плоскостью и сделан вывод, что повышения дальности вытяжного устройства можно достичь использованием кольцевой струи натекающей на непроницаемую плоскость.

Целью данной работы является установление возможности воздушно-струйного экранирования для повышения дальности местного вентиляционного отсоса-раструба, расположенного в неограниченном пространстве.

Постановка задачи и основные расчетные соотношения

Рассмотрим круглый местный вентиляционный отсос-раструб в неограниченном пространстве (рис. 1). Из раструба по его периметру истекает кольцевая струя со скоростью v_p . Необходимо выяснить, возможно ли повысить скорость в точке $M(x, y)$ за счет использования кольцевой струи

и при каких значениях v_p/v_0 этого можно достичь.

Будем считать среду идеальной несжимаемой. Вихревые образования, которые неизбежно должны образоваться при истечении струи, учитываются с помощью дискретных вихревых колец [5-10] срывающихся с кромок кольцевого приточного отверстия.

Математическая постановка задачи состоит в решении уравнения Лапласа для потенциальной функции φ : $\Delta\varphi = 0$, при заданных значениях граничной нормальной составляющей скорости

$$\left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_S = v_n(x) - U_n,$$

где x - точка границы S .

Функция U_n выражает влияние свободных вихрей, находящихся на свободной поверхности тока, положение которой заранее неизвестно.

Данное уравнение сводится к граничному сингулярному интегральному уравнению [11,12]:

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

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

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

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

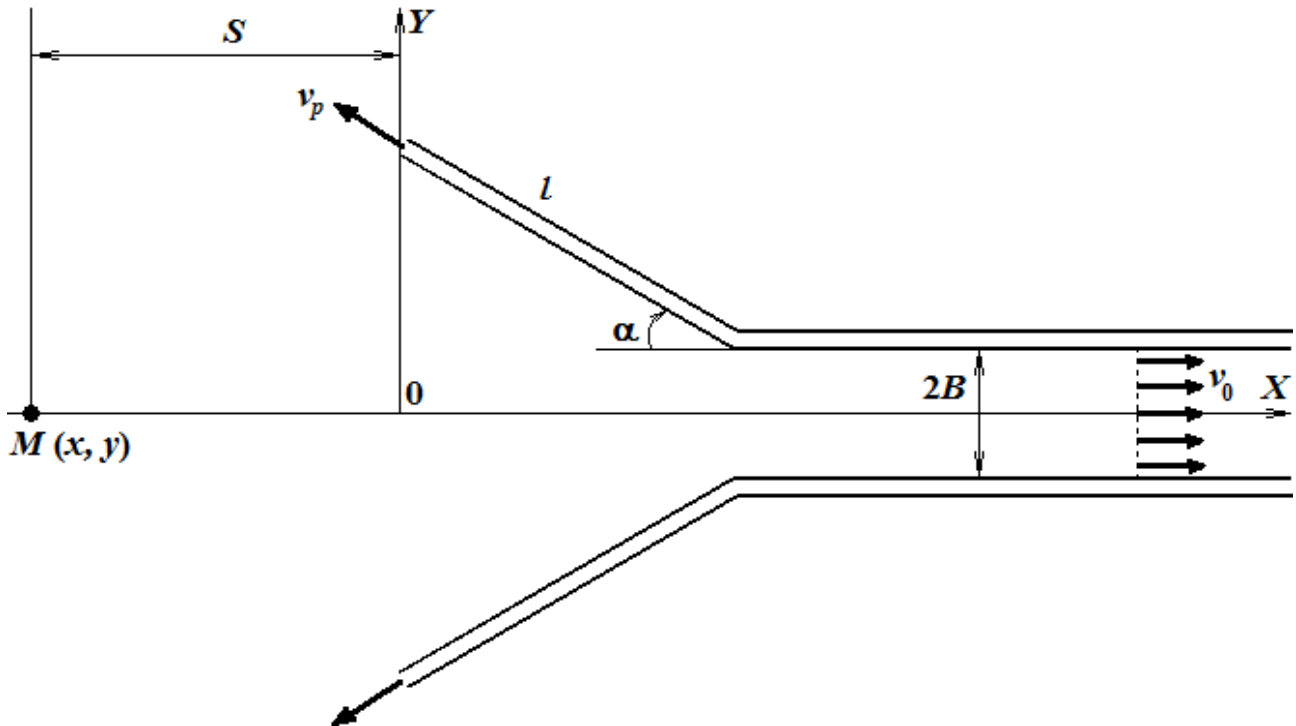


Рис. 1. К постановке задачи

Для осесимметричной задачи в цилиндрической системе координат:

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

$$2x_2 \xi_2 = b > 0, \quad a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2 > 0, \quad A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi}, \quad A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1],$$

$$F(t) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}}, \quad E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta, \quad t = \frac{2b}{a+b}.$$

Вихревой слой, моделирующий поверхность трубы, заменялся бесконечно тонкими вихревыми кольцами постоянной интенсивности $\Gamma(\xi^k)$, $k = \overline{1, N}$. Между присоединенными вихрями располагались контрольные точки. Пусть $\xi^k(\xi_1, \xi_2)$ – точка расположения k -го присоединенного вихря; $x^p(x_1, x_2)$ – p -я контрольная точка. Тогда скорость в точке x^p вдоль единичного направления n , индуцированная вихрем $\Gamma(\xi^k)$, расположенным в точке ξ^k , определится из выражения $v_n(x^p) = G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k)$. В каждый расчет-

ный момент времени с шагом Δt с кромок приточного кольцевого отверстия происходит сход двух вихревых колец.

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

$$\begin{cases} v_n^p = \sum_{k=1}^n \Gamma^k G^{pk} + \sum_{z=1}^2 \sum_{\tau=1}^m G_z^{p\tau} \gamma_z^\tau, \\ \sum_{k=1}^n \Gamma^k + \sum_{z=1}^2 \sum_{\tau=1}^m \gamma_z^\tau = 0, \end{cases}$$

где $v_n^p = v_n(x^p)$; $\Gamma^k = \Gamma(\xi^k)$; $G^{pk} = G(x^p, \xi^k)$; $G^{p\tau} = G(x^p, \xi^\tau)$; γ^τ – циркуляция свободного

вихря, сошедшего с z -й острой кромки в момент времени τ и расположенного в точке ζ_z^τ ; $G_z^{p\tau}$ - функция влияния на p -ю расчетную точку вихря γ_z^τ 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 радиусом и отбрасыванию условия безциркуляционного течения. В каждый расчетный момент времени решается система уравнений для определения неизвестных интенсивностей присоединенных вихрей; определяются новые

положения свободных вихрей с использованием формул $x' = x + v_x \Delta t$, $y' = y + v_y \Delta t$ и производится шаг по времени. При достижении свободными вихрями активного сечения они удаляются из рассмотрения. Поскольку найденное поле скоростей пульсирует во времени (рис.2), то производится усреднение величин скорости на значительном промежутке времени.

Результаты расчета и их обсуждение

Расчеты производились при $B = 0,15\text{м}$; толщина стенок (толщина струи) $0,02\text{м}$; шаг во времени $0,005\text{с}$; шаг дискретности (расстояние между ближайшими присоединенным вихрем и контрольной точкой) $0,01\text{м}$; $v_0 = 1\text{м/с}$. Рассматривались отсосы-раструбы при $\alpha = 0^\circ, 18^\circ, 36^\circ, \dots, 90^\circ$ и $l/B = 1, 2, 3$. Скорость истечения струи v_p / v_0 задавалось $0, 1, 2, \dots, 10$.

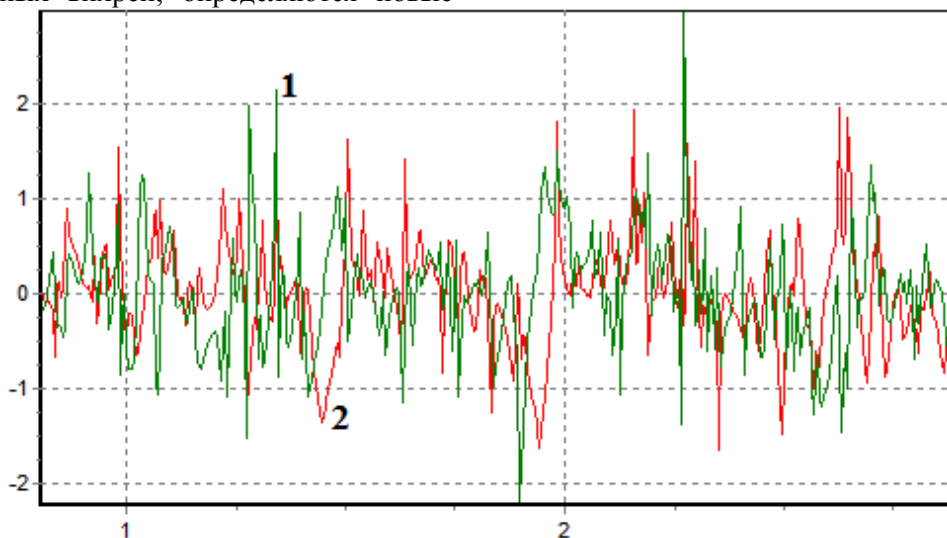


Рис. 2. Пульсации скорости в точке (-0,5; 0,15): 1 - поперечные пульсации; 2 - продольные пульсации

Расчет изменения осевой скорости v/v_0 показывает, что поскольку кольцевая струя смыкается на определенном расстоянии от входа в отсос (рис.3), то важно знать в какой точке происходит выделение загрязняющих веществ.

Определяемые величины скорости при определенных скоростях истечения v_p/v_0 не способствует улавливанию загрязняющих веществ, а напротив выносу в окружающую среду. Рассмотрим, например, точку на удалении 5 калибров от входа в раструбу ($S = 5B$). Как видно (рис.4) при углах наклона раструба $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 18^\circ$ не способствует улавливанию загрязняющих веществ при $v_p/v_0 > 8$. При $\alpha > 36^\circ$ скорость подтекания воздуха будет положительной. Также можем наблюдать и при $l/B = 2$

(рис.5). Максимальное значение осевой скорости при $S/B = 5$ наблюдается в диапазоне $\alpha = 35^\circ - 45^\circ$, а при $S/B = 2,5$ - $\alpha = 20^\circ - 40^\circ$ (рис.6). Длина раструба наиболее оптимальна когда $l/B = 1$ для $S/B = 5$ и $l/B = 2$ для $S/B = 2,5$.

Как демонстрирует рис.7, дальнобойность повышается от 5 до 50 раз в точке $S/B = 5$, в зависимости от угла раскрытия α и длины раструба.

Под дальнобойностью понимается отношение скоростей в данной точке с экранированием и без него. При этом скорость всасывания в отсосе без экранирования должна быть такова, чтобы расход отсасываемого воздуха был равен сумме расходов отсасываемого воздуха и приточного воздуха в случае экранирования, т.е.:

$$v_0^b = \frac{\pi r^2 v_0 + \pi((r+h)^2 - r^2)v_p}{\pi r^2} = \frac{r^2 v_0 + h(2r+h)v_p}{r^2}$$

v_0^b - скорость во всасывающем отверстии без экранирования; v_0 - скорость во всасываю-

щем отверстии при экранировании; v_p - скорость истечения экранирующей кольцевой струи; h - ширина кольцевого отверстия откуда истекает приточная струя; r - радиус всасывающего отверстия.

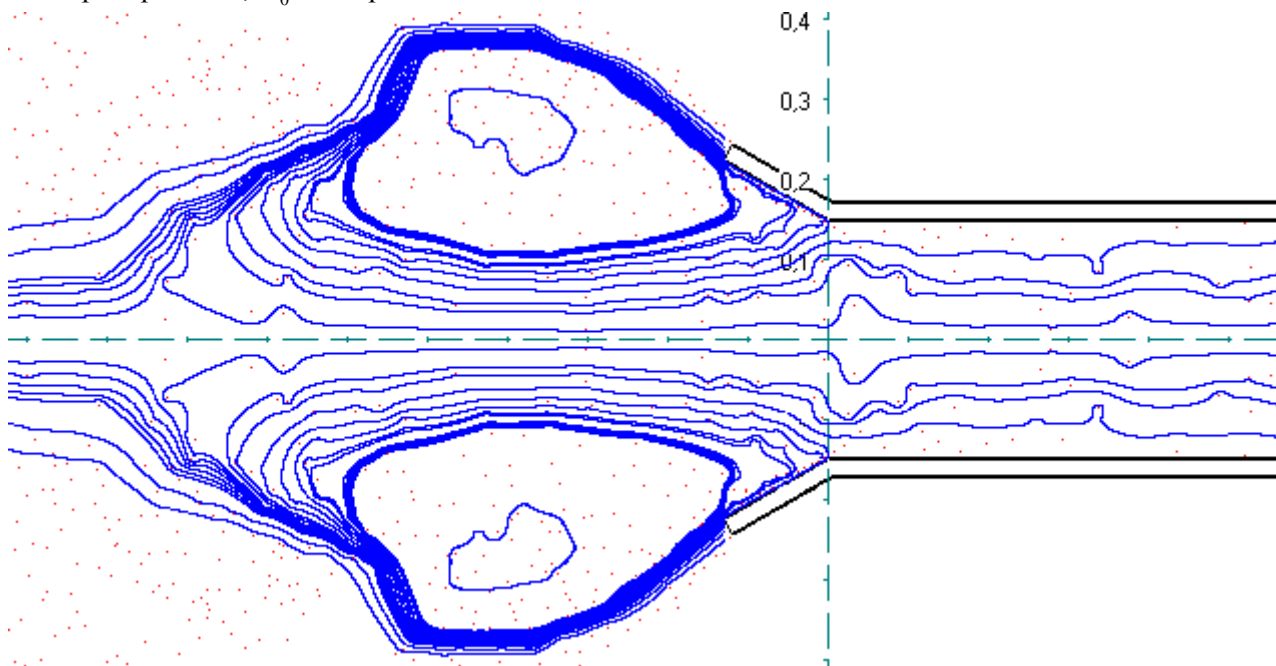


Рис. 3. Линии тока на входе в экранированный отсос раструб при $v_p / v_0 = 10$

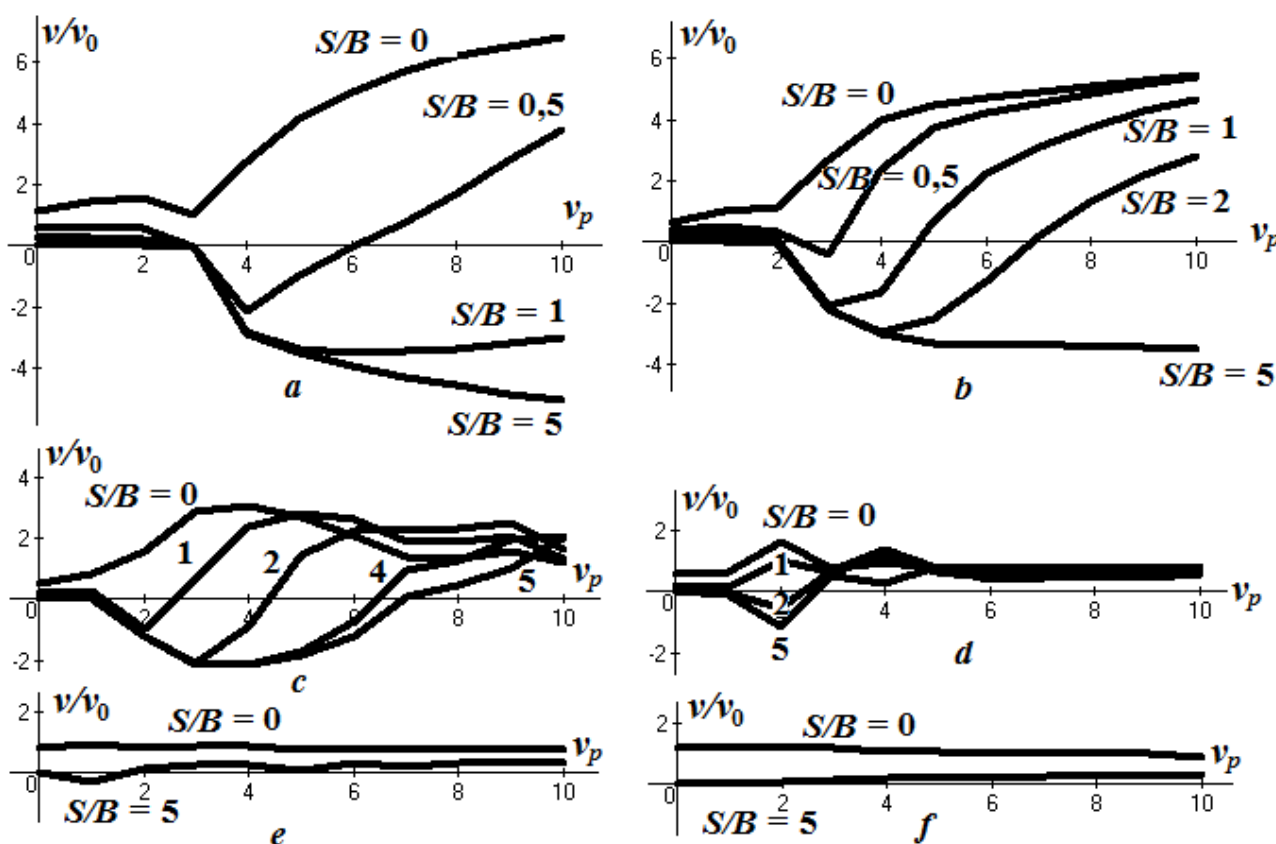


Рис. 4. Изменение осевой скорости воздуха v/v_0 на различном удалении S/B от входа в отсос от скорости v_p приточного воздуха при $l/B=1$: a - $\alpha=0$; b - $\alpha=18^\circ$; c - $\alpha=36^\circ$; d - $\alpha=54^\circ$; e - $\alpha=72^\circ$; f - $\alpha=90^\circ$

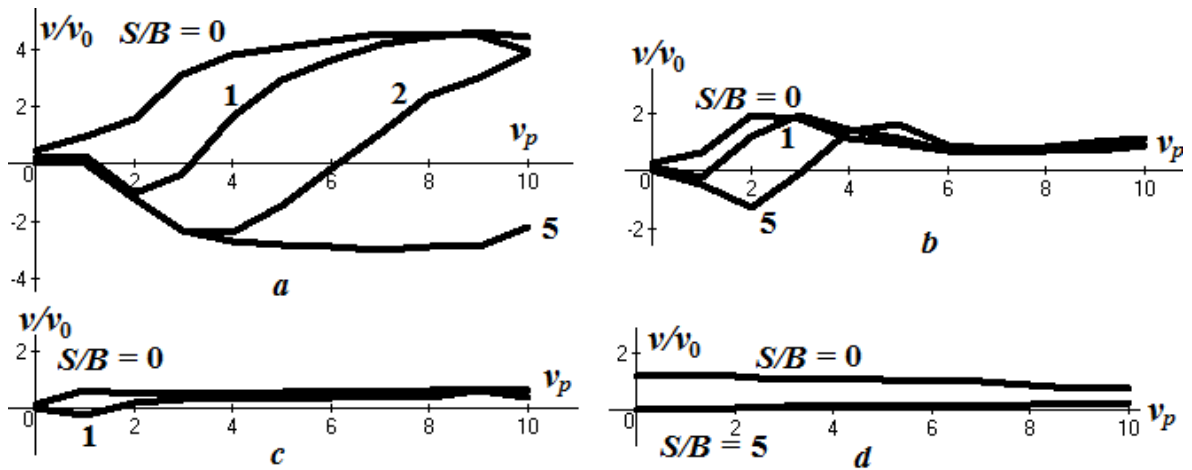


Рис. 5. Изменение осевой скорости воздуха v/v_0 на различном удалении S/B от входа в отсос от скорости v_p приточного воздуха при $l/B=1$: $a - \alpha=18^\circ$; $b - \alpha=36^\circ$; $c - \alpha=54^\circ$; $d - \alpha=90^\circ$

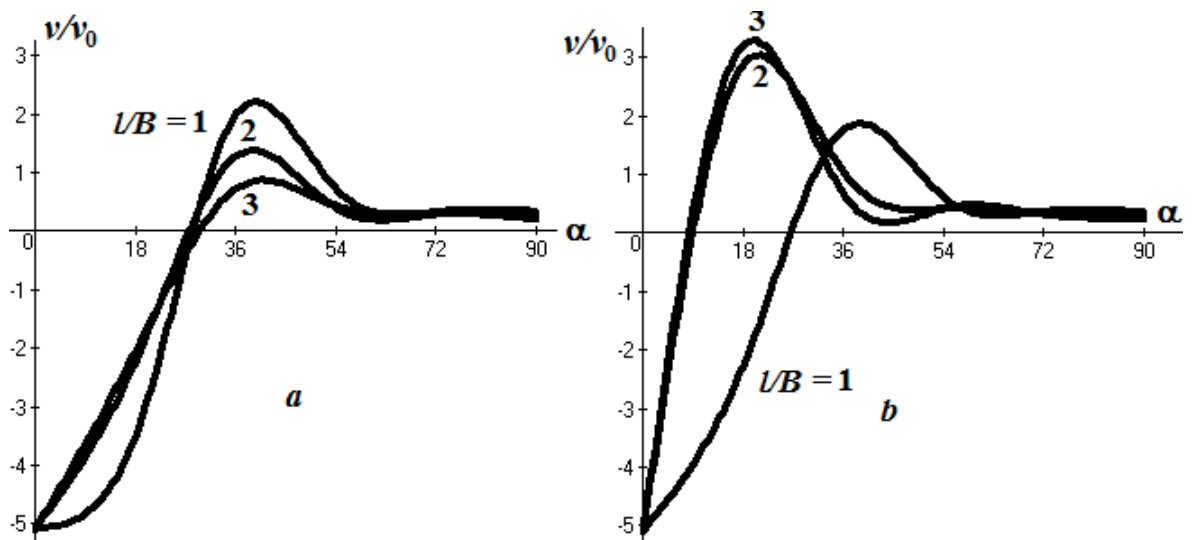


Рис. 6. Изменение осевой скорости воздуха v/v_0 от входа в отсос и угла наклона раструба при разных l/B и $v_p/v_0=10$: $a - S/B=5$; $b - S/B=2,5$

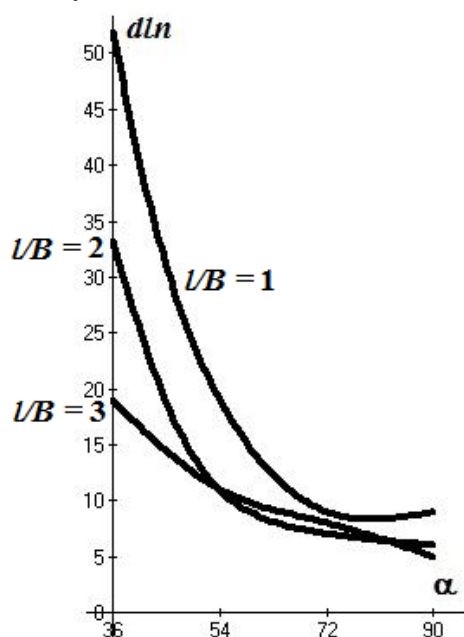


Рис. 7. Изменение дальности в диапазоне углов $\alpha=36^\circ - 90^\circ$ в точке, лежащей на оси отсоса-раструба, на удалении 5 калибров от отсоса-раструба при $v_p/v_0=10$

Заключение

За счет использования воздушно-струйного экранирования местных отсосов-раструбов дальнобойность всасывающего факела можно увеличить в заданной точке в несколько десятков раз. Разработанная вычислительная схема и компьютерная программа позволяет выбрать угол раскрытия раструба, его длину и скорость истечения кольцевой струи для повышения скорости улавливания загрязняющих веществ в месте их образования. Полученные результаты могут использоваться для проектирования эффективных систем локализующей вентиляции.

**Работа выполнена в рамках грантов Президента Российской Федерации МК-103.2014.1 и Российского фонда научных исследований (проекты 14-41-08005р_офи_м, №14-08-31069-мол_а).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Энергосбережение в аспирации. Теоретические предпосылки и рекомендации // Москва-Ижевск: РХД, 2013. 504 с.
2. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. СПб.: Химиздат, 2005. 659 с.
3. Логачев К.И. Экологическая индустрия: Численное моделирование экранированных вытяжных устройств систем вентиляции промышленных предприятий // Инженерная экология. 1999. № 5. С. 30-40.
4. Логачев К.И., Пузанок А.И., Селиванова Е.В. Численный расчет течения вблизи экранированного отсоса-раструба // Известия вузов. Строительство. 2005. №6. С.53-58.
5. 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.
6. Логачев К.И., Посохин В.Н. Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка // Изв. вузов. Авиационная техника. 2004. № 1. С. 29-32.
7. Логачев К.И., Посохин В.Н., Пузанок А.И. Геометрические характеристики течений на входе в отсосы, выполненные в виде зонтов// Инженерные системы. АВОК Северо-Запад. 2005. № 1. С.12-14.
8. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Логачев А.К. Закономерности отрывного течения при входе в выступающий канал с экранами // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т.44. №2. С.33-49.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Логачев К.И., Пузанок А.И. Численное моделирование пылевоздушных течений вблизи вращающегося цилиндра-отсоса// Известия вузов. Строительство. 2005. №2. С.63-70.