

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Ходаков И.В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРЫВА ПОТОКА НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ\*

ivh89@bk.ru

На основе стационарных дискретных вихрей осуществлено моделирование отрывного течения на входе в круглый всасывающий канал, в спектре действия которого находится тонкий кольцевой экран, снабженный выступом. Расчетные показатели сравниваются с полученными экспериментальными данными. Предлагается формула связи между к.м.с. всасывающего круглого патрубка и коэффициентом сжатия струи. Приводятся результаты экспериментального исследования отрывных течений на входе в щелевидные всасывающие каналы, снабженные различными механическими экранами. Определены параметры экранов, способствующие наибольшему снижению расхода воздуха.

**Ключевые слова:** отрывные течения, дискретные вихри, механический экран, щелевая неплотность.

**Введение.** С отрывными течениями приходится сталкиваться во всех технических отраслях, имеющих дело с течением жидкости или газа [1–3]. В промышленной вентиляции отрыв потока изучают на входе во всасывающие отверстия местных вентиляционных установок [4–14]. Профилирование по границам отрывных областей на входе во всасывающие каналы открытых местных вентиляционных отсосов позволяет снизить их аэродинамическое сопротивление, что приводит к снижению энергоемкости систем вентиляции [4, 5]. Для снижения расхода воздуха, поступающего через неплотности аспирационных укрытий, имеет смысл напротив повысить аэродинамическое сопротивление входа во всасывающие каналы. Данный подход продемонстрирован в работах [9–13]. Целью данной

статьи является выявление путем вычислительного и натурного экспериментов закономерностей отрыва потока на входе во всасывающие каналы круглой и щелевидной формы, а также определение параметров механических экранов, способствующих наибольшему снижению расхода воздуха, поступающего через неплотности аспирационных укрытий.

### Численное и экспериментальное исследование отрыва потока на входе во всасывающие каналы с механическими экранами

Рассматривается область течения на входе в круглый всасывающий канал, в спектре действия которого находится тонкий кольцевой экран, снабженный выступом (рис. 1). Моделирование отрыва потока осуществляется на основе стационарных дискретных вихрей.

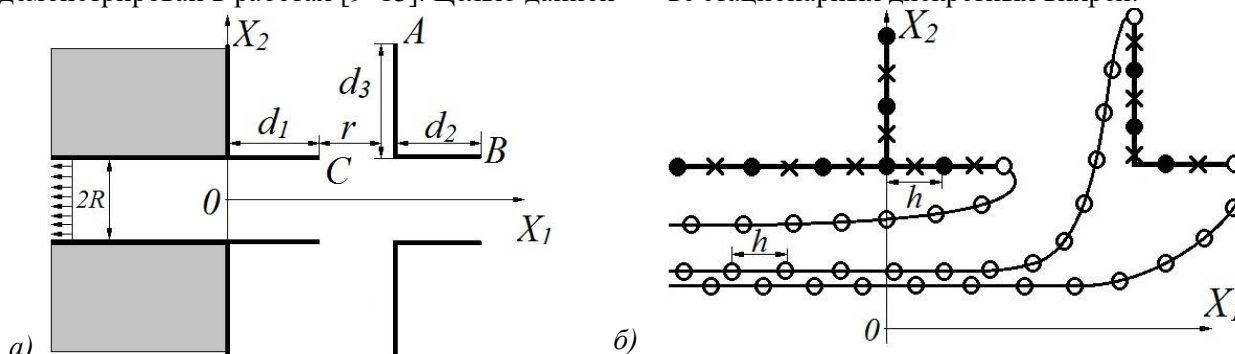


Рис. 1. Область отрывного течения: а) граница области; б) дискретизация границы области

С острых кромок  $A$ ,  $B$ ,  $C$  происходит срыв потока и образуются свободные поверхности тока. Необходимо определить их положение, скорость потока в любой заданной точке и коэффициент местного сопротивления при входе во всасывающее отверстие. Математическая постановка задачи состоит в решении двумерного уравнения Лапласа для потенциальной функции

$\varphi$ :  $\Delta\varphi = 0$ , 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 свободных поверхностях тока, положение которых заранее неизвестно.

Данное уравнение сводится к граничному сингулярному интегральному уравнению:

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

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;  $\xi$

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

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

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

Вихревой слой, моделирующий поверхность трубы и экрана, заменяется бесконечно тонкими вихревыми кольцами постоянной интенсивности  $\Gamma(\xi^k)$ ,  $k = \overline{1, N}$  (рис. 1, б). Вихри лежащие на острых кромках  $A, B, C$  считаются свободными [15]. Между присоединенными вихрями располагались контрольные точки. Введем обозначения:  $\xi^k(\xi_1, \xi_2)$  – 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  $\xi^k$ , определится из выражения  $v_n(x^p) = G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k)$ .

Полагалось, что на свободной поверхности тока, стекающей с кромки  $C$ , интенсивность вихрей постоянна и равна  $\gamma$ . Расстояние между свободными вихрями есть величина постоянная и равная  $h$ . Первое приближение для свободной линии тока выбиралось следующим образом: первые 3 вихря располагались параллельно  $OX_2$  и ниже точки срыва, начиная с острой кромки, остальные – параллельно –  $OX_1$  и левее этой точки.

$$\begin{aligned} & \sum_{\substack{q=1, \\ q \neq N_1}}^{N-1} G(x^p, \xi^q) \Gamma(\xi^q) + (G(x^p, \xi^{N_1}) - G(x^p, \xi^N)) \gamma_1 = \\ & = -\gamma \sum_{k=1}^{N_{S1}} G(x^p, \zeta^k) - \gamma'_1 \sum_{k=N_{S1}+1}^{N_{S2}} G(x^p, \zeta^k) + \gamma'_1 \sum_{k=N_{S2}+1}^{N_S} G(x^p, \zeta^k), \end{aligned} \tag{1}$$

где  $p = 1, 2, \dots, N-1$ , на первой итерации  $\gamma'_1 = 0$ .

– 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, расположенной в точке  $\xi(\xi_1, \xi_2)$ .

Для осесимметричной задачи в цилиндрической системе координат:

Для свободных поверхностей тока, сходящихся с кромок  $A$  и  $B$ , начального приближения не задавалось. Циркуляции на этих линиях тока заранее неизвестны, но они равны по абсолютной величине и противоположны по знаку, поскольку вращение частиц жидкости, сорвавшихся с этих кромок, осуществляется в противоположных направлениях.

Обозначим  $N$  – количество присоединенных вихрей, включая два свободных на кромках  $A$  и  $B$ ; номер вихря в точке  $A$  обозначим  $N_1$ ; номер вихря в точке  $B$  –  $N$ ;  $\zeta^k$  – точка расположения свободного вихря;  $\gamma_1$  – интенсивность вихрей на свободных поверхностях тока, срывающихся с острых кромок  $A$  и  $B$ ;  $\gamma'_1$  – эти же интенсивности найденные на предыдущей итерации;  $N_{S1}$  – количество свободных вихрей, расположенных на свободной поверхности тока, срывающейся с острой кромки  $C$ ;  $N_{S2}$  – тоже, но с кромки  $A$ ;  $N_S$  – количество свободных вихрей на всех линиях тока, на первой итерации  $N_{S1} = N_S$ .

Система линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных интенсивностей  $\Gamma(\xi^q)$  присоединенных вихрей имеет вид:

После определяются неизвестные циркуляции  $\Gamma(\xi^q)$ , где  $q = 1, \dots, N_1 - 1, N_1 + 1, \dots, N - 1$

присоединенных вихрей и величина интенсивности свободных вихрей  $\gamma_1$ . Скорость в любой

$$v_n(x) = \sum_{\substack{q=1, \\ q \neq N_1}}^{N-1} G(x, \xi^q) \Gamma(\xi^q) + (G(x, \xi^{N_1}) - G(x, \xi^N)) \gamma_1 + \\ + \gamma \sum_{k=1}^{N_{S1}} G(x, \zeta^k) + \gamma_1 \sum_{k=N_{S1}+1}^{N_{S2}} G(x, \zeta^k) - \gamma_1 \sum_{k=N_{S2}+1}^{N_S} G(x, \zeta^k).$$

На первой итерации, после определения неизвестных циркуляций вихрей, строятся все три поверхности тока, стекающие с острых кромок. После того как они удалятся от всасывающего проема трубы на расстояние больше 10 калибров, их построение прекращается. При построении поверхностей тока шаг во времени  $\Delta t$  выбирается достаточно малым. Построение поверхности тока начинается с острой кромки.

После определения второго приближения для свободных поверхностей тока необходимо снова решить систему уравнений (1) и определить циркуляции присоединенных вихрей. Затем строится третье приближение свободных поверхностей тока и т.д.

Если расстояние от точки до вихря меньше радиуса дискретности  $h/2$ , то скорость, вызываемая этим вихрем, определяется из следующего выражения:

точке  $x(x_1, x_2)$  области вдоль любого заданного направления вычисляется по формуле:

$$v_n(x) = 8\pi \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{h^2}.$$

С использованием разработанной компьютерной программы решена задача о моделировании отрыва потока на входе в круглый всасывающий канал с кольцевым механическим экраном, снабженным выступом с целью определения оптимальных геометрических размеров и удаления этого экрана, способствующих наибольшему аэродинамическому сопротивлению входа среды в этот канал.

Из расчетов линий тока (рис. 2) видно, что снабжение кольцевого экрана выступом значительно изменяет структуру течения. Отрывная зона на входе в трубу расширяется, образуется дополнительная область отрыва потока под выступом.

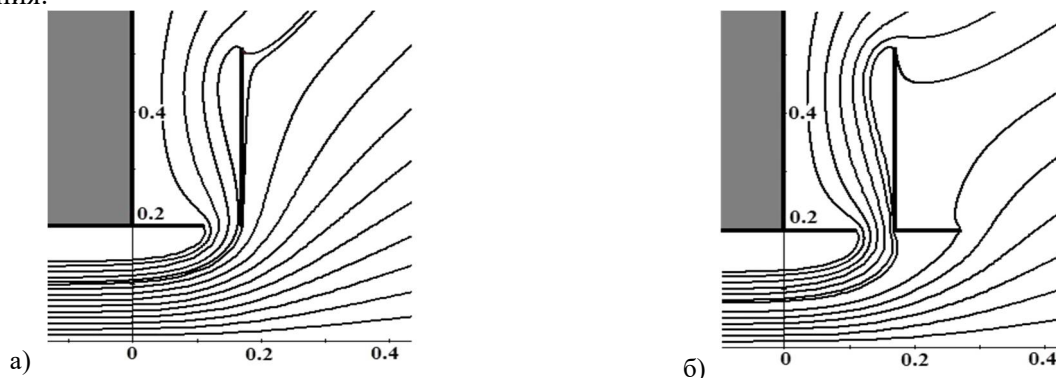


Рис. 2. Линии тока при обтекании тонкого экрана с центральным круглым отверстием при  $d_1 = 0.5R$ ;  $d_3 = 1.55R$ ;  $R = 0.2\text{м}$ ;  $r = 0.3R$ ; а) без выступа; б) с выступом  $d_2 = 0.59R$

Предложена следующая формула связи между к.м.с.  $\zeta$  всасывающего круглого патрубка и коэффициентом сжатия струи  $\delta$ :

$$\zeta = \left( 1 - \frac{1}{(3.115\delta^2 - 3.788\delta + 1.834)^2} \right)^2, \quad (2)$$

расчеты по которой дают приемлемые для практики результаты (рис. 3).

Как видно из данных, представленных на рис. 3, снабжение кольцевого экрана выступом заметно повышает аэродинамическое сопротивление всасывающего канала. Максимальное значение к.м.с.  $\zeta_m \approx 1.317$  достигается при коэффициенте сжатия струи  $\delta / B = \delta_m \approx 0,608$ ,

что следует из анализа функции (2) с помощью дифференциального исчисления.

Вычислительный эксперимент позволил найти оптимальные геометрические размеры экрана  $d_2, d_3$  и его удаление  $r$ , способствующие наибольшему росту к.м.с. Для круглых всасывающих отверстий, выступающих из плоской стенки на расстояние полурадуса, предлагается устанавливать на расстоянии 0.1 – 0.2 радиуса диск с центральным отверстием такого же диаметра, что и всасывающий канал, и шириной кольца равной 0.7 – 1 радиуса, что позволяет увеличить к.м.с. на 20% относительно случая отсутствия этого экрана.

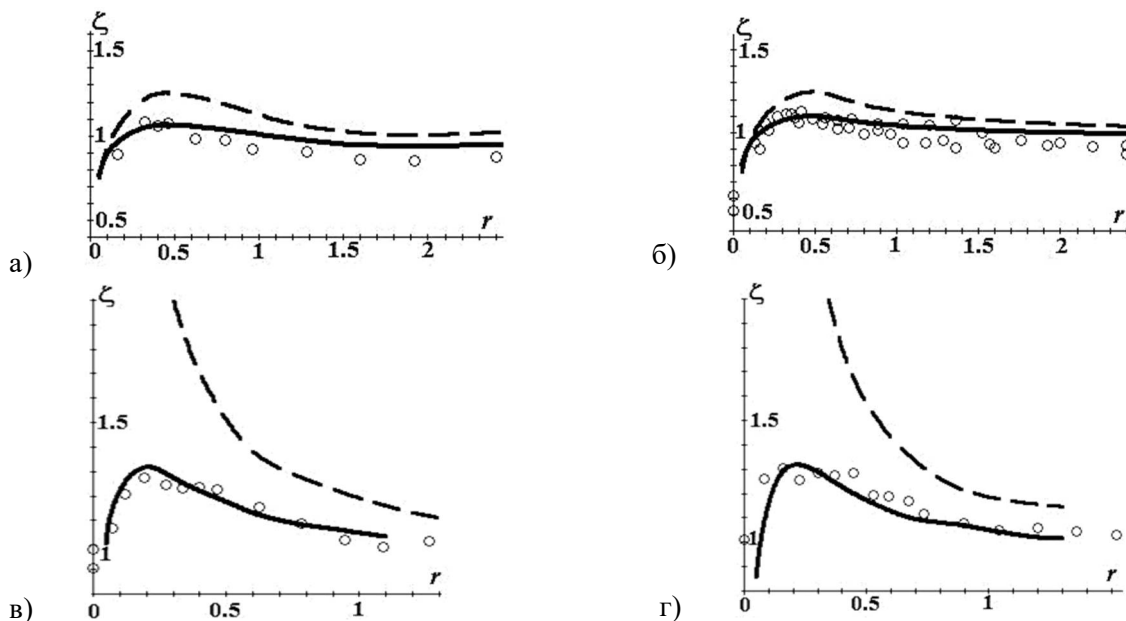


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных величин к.м.с.  $\zeta$  при удалении экрана от всасывающего проема (пунктирная линия – расчет по формуле, предложенной И.Е. Идельчик; сплошная линия – расчет по формуле (2); кружочки – данные эксперимента, полученные нами на экспериментальной установке):

- а)  $d_1 = 0.5R$ ;  $d_3 = 1.55R$ ; б)  $d_1 = 0.55R$ ;  $d_3 = 1.55R$ ; в)  $d_1 = 0.5R$ ;  $d_2 = 0.59R$   $d_3 = 1.55R$ ; г)  $d_1 = 0.5R$ ;  $d_2 = 0.96R$   $d_3 = 1.55R$

Сравнение результатов расчетных значений к.м.с. (рис. 3) и натурного эксперимента, выполненного на лабораторной установке (рис. 4) по-

казывают достоверность расчетов по формуле (2).

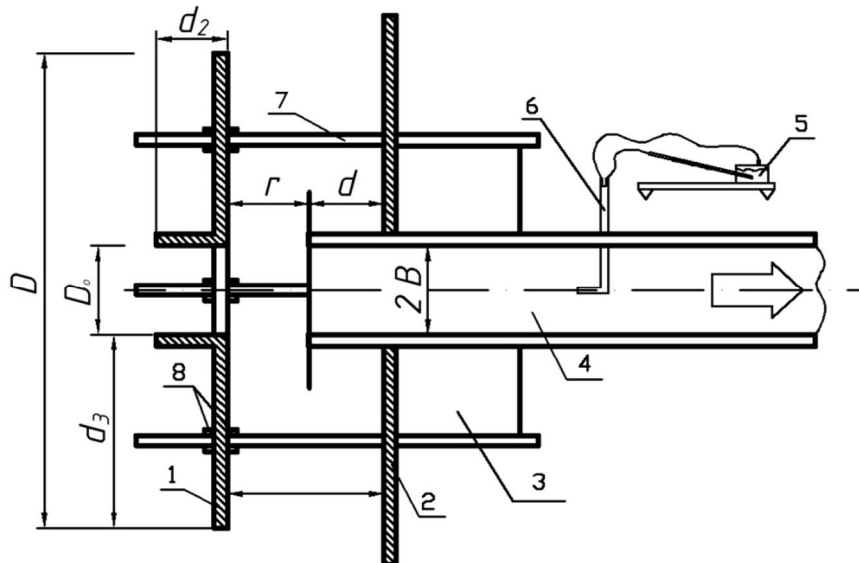


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для определения сопротивления при входе воздуха в экранированное круглое отверстие: 1 – экран с центральным отверстием и выступом; 2 – щит;

3 – направляющая трехгранная призма; 4 – труба; 5 – микроманометр с наклонной трубкой; 6 – пневмометрическая трубка Пито-Прандтля; 7 – стальные стержни-шпильки; 8 – гайки для фиксации экрана

Экспериментальное значение к.м.с. при входе воздуха в экранированный воздуховод определяется в соответствии с общепринятым соотношением  $\zeta = 2\Delta P / (\rho u^2)$ , представляющим собой отношение разности полных давлений к динамическому (скоростному) давлению. Средняя скорость  $u$  воздуха в трубе определялась с помощью измерения скоростного давления по

оси трубы и внесения поправочного коэффициента на неравномерность поля скоростей, величина которого была определена измерениями скорости в четырех точках равновеликих колец. Средняя скорость воздуха в трубе составляла 7 – 9 м/с.

Проведено также экспериментальное исследование отрывных течений на входе в щелевид-

ные всасывающие каналы. Экспериментальная установка (рис. 5) – модель аспирационного укрытия представляет собой короб с подведенной к нему вытяжкой. С торцевой стороны короба находится неплотность, высота которой фиксирована. Для измерения давлений внутри укрытия выведены два штуцера: один для замера статического давления, второй, находящийся

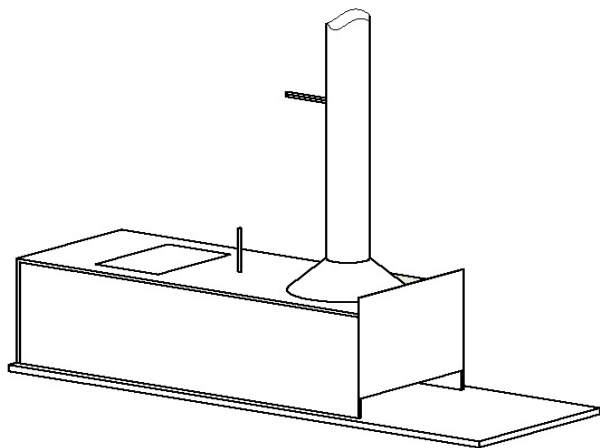


Рис. 5. Модель аспирационного укрытия

Были определены параметры механического экрана в виде прямого двугранного уголка (рис. 6), позволяющие добиться наибольшего повышения кмс на входе в неплотность.

в трубе вытяжного устройства, – для замера статического и динамического давлений. Стенки укрытия выполнены из прозрачного материала.

Исследовалось влияние механических экранов в виде козырька, пластины и прямого двугранного уголка (рис. 6) на коэффициент местного сопротивления неплотности аспирационного укрытия.

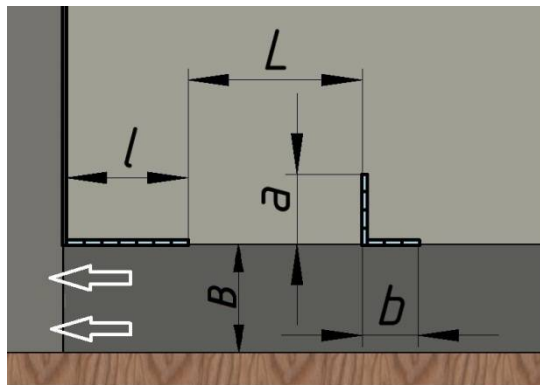


Рис. 6. Схема расположения козырька и экрана в виде уголка

При помощи шлирен-метода были получены снимки эффекта срыва потока воздуха с края козырька (рис. 7).

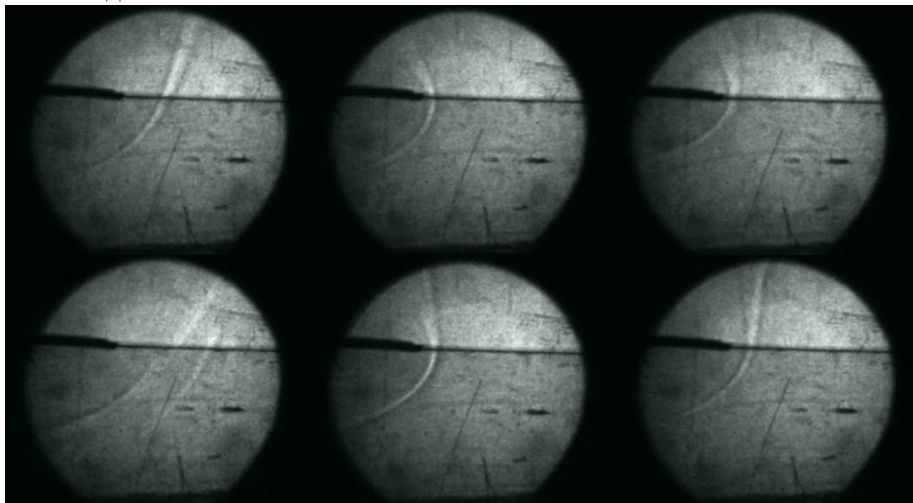


Рис. 7. Срыв потока воздуха с края козырька, установленного над щелевой неплотностью укрытия, вид сбоку

Для оценки эффективности того или иного приспособления, влияющего на аэродинамику потока на входе в укрытие использовался коэффициент местного сопротивления. Коэффициент сопротивления  $\zeta$ , приведенный к скорости потока  $w_1$  в сечении неплотности аспирационного укрытия ( $F_1$ ) рассчитывался при помощи формулы:  $\zeta_1 = F_1^2 (P_{атм} - P_{укр}) / (F_0^2 P_{\partial_0})$ , скорость в том же сечении  $w_1 = F_0 \sqrt{2P_{\partial_0} / \rho} / F_1$ , где  $P_{атм}$  –

атмосферное давление, Па;  $P_{укр}$  – среднее значение полного статического давления в укрытии, Па;  $P_{\partial_0}$  – динамический напор потока воздуха в сечении трубы, Па,  $F_0$  – площадь потока воздуха в сечении трубы, м<sup>2</sup>;  $F_1$  – площадь потока воздуха в сечении неплотности, м<sup>2</sup>,  $w_0$  – скорость воздушного потока в сечении трубы, м/с,  $\rho$  – плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>, при температуре  $t_{изм}$ , °С [16, 17].



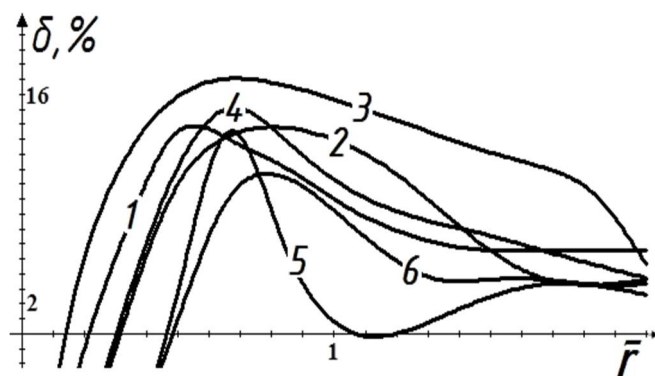
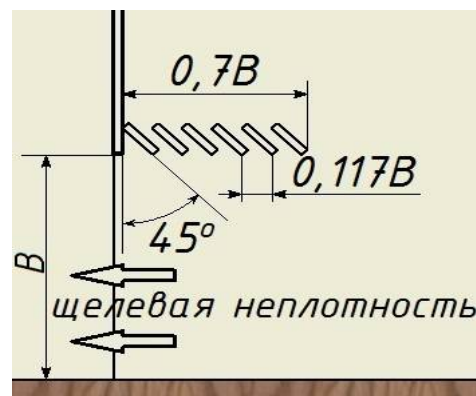
Рис. 8. Изменение величины  $\delta$  от  $\bar{r} = L / B$  при  $a/B = 1$ 

Рис. 9. Решетка козырьков

В результате экспериментов было выяснено, что при снабжении щелевой неплотности с горизонтальным козырьком длиной  $0,5 - 0,7$  калибра [11, 13] экраном в виде уголка высотой в 1 калибр и шириной  $0,5$  калибра на расстоянии до козырька в диапазоне  $0,5 - 1$  калибра к.м.с. увеличивается на величину более  $16,6\%$ . Максимальная величина отклонения к.м.с.  $\delta \approx 45\%$  при оборудовании неплотности горизонтальным козырьком и экраном в виде уголка, при этом расход воздуха через неплотность снижается на  $\approx 17\%$  (рис. 8). Кривые 1 – 6 соответствуют величинам длины горизонтальной части уголка  $b/B = 1/6; 1/3; 1/2; 2/3; 5/6; 1$ .

Обнаружено также, что использование решетки козырьков из металлических пластин размером  $1 \times 10 \times 435$  мм общей длиной  $0,7$  калибра, наклоненных под углом  $45^\circ$ , расстояние между которыми  $0,117$  калибра (рис. 9) приводит к увеличению к.м.с. на  $\delta \approx 47\%$  и снижению расхода воздуха на  $\delta_G \approx 18\%$  (к.м.с. входа в неплотность  $\zeta_1 = 1,82, \zeta_0 = 1,24$ ).

**Выводы.** На основании стационарных дискретных вихревых колец разработана математическая модель, вычислительный алгоритм и компьютерная программа расчета отрыва потока на входе во всасывающий круглый канал, снабженный механическим кольцевым экраном с выступом. Вычислительный и натурный эксперимент позволили установить размеры и расположение экранов, способствующих наибольшему сопротивлению входа во всасывающий канал за счет эффекта отрыва струи. Предложена эмпирическая формула связи коэффициента местного сопротивления и коэффициента сжатия струи.

На разработанном лабораторном стенде аспирационного укрытия с неплотностью прямоугольной формы проведены экспериментальные исследования влияния горизонтальных, вертикальных, наклонных и двухгранных непроницаемых механических экранов на коэффициент местного сопротивления входа в неплотность.

Показано, что оборудование щелевой неплотности горизонтальным козырьком и экраном в виде уголка при определенных параметрах расположения позволяет снизить расход воздуха, поступающего в аспирационное укрытие, на  $17\%$ .

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-41-08005р офи м) и Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 гг. (проект №Б-14/14 и проект №Б-7/15)*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир. Т.1. 1972. 300с.
2. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир. Т.2. 1973. 280с.
3. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир. Т.3. 1973. 334с.
4. Посохин В.Н. Аэродинамика вентиляции. М: АВОК-ПРЕСС. 2008. 209с.
5. Логачев К.И., Посохин В.Н. Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка // Изв. вузов. Авиационная техника. 2004. №1. С. 29–32.
6. Посохин В.Н., Катков М.В. Экспериментальное изучение вихревых зон в потоках вблизи всасывающих щелевых отверстий // Известия вузов. Авиационная техника. 2001. №1. С. 61–63.
7. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И.. Отрывные течения в спектрах вытяжных каналов. Москва-Ижевск: ИКИ. 2012. 288с.
8. 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.
9. Аверкова О.А., Логачев А.К., Логачев И.Н., Логачев К.И. Закономерности отрывного течения при входе в выступающий канал с экранами // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т.44 №2. С. 33–49.

10. Аверкова О.А. Экспериментальное исследование отрывных течений на входе во всасывающие отверстия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 158–160.

11. 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.

12. 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.

13. Аверкова О.А., Зоря В.Ю., Логачев К.И., Логачев И.Н. Численное моделирование воздушных течений на входе в щелевые неплотно-

сти аспирационных укрытий// Новые огнеупоры. 2010. №5. С. 31–36.

14. Аверкова О.А. Моделирование отрывных течений на входе во всасывающие каналы с использованием метода дискретных вихрей в нестационарной постановке // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №2. С. 133–135

15. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. М.: Янус. 1995. 520с.

16. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. III издание. М.: «Машиностроение». 1992. 672с.

17. Велецкий Р.К., Григина Н.Н. Измерение параметров пылегазовых потоков в черной металлургии. М.: «Металлургия». 1979 г. 77с.

---

**Khodakov I.V.**

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF DETACHED FLOW AT THE INLET IN THE SUCTION DUCT WITH THE MECHANICAL SCREENS**

*Based on fixed discrete vortex modeling of detached flow at the entry in the round suction duct in the range of action is realized. Fine circular screen, drop supplied is found in the action range of suction duct. Calculated coefficients are compared with received experimental dates. Bond formula between localized resistance's coefficient of round inlet duct and coefficient of flow's compression is proposed. Results of experimental research of detached flows at the entry of slit-like suction duct, different mechanical screen s supplied are applied. Screens axes which are promoting maximal air cost reduction are determinate.*

**Key words:** *detached flow, discrete vortex, mechanical screen, slit thinness*

---

**Ходаков Илья Владимирович**, аспирант, ассистент кафедры высшей математики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: ivh89@bk.ru