

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 1. Математическая модель и алгоритм ее компьютерной реализации

При помощи стационарных дискретных вихревых колец разработаны математическая модель и компьютерная программа для расчета отрывной области на входе в раструб, расположенном над непроницаемой плоскостью. Приводятся основные расчетные соотношения, алгоритмы расчета характеристик области отрывного течения, предельных траекторий пылевых частиц и области аспирации.

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

ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой аспирации является эффективная локализация пылегазовых выбросов при минимальных энергозатратах [1, 2]. Разработке методов снижения энергоемкости закрытых местных вентиляционных отсосов — аспирационных укрытий посвящены работы [3–9]. Один из путей снижения энергоемкости открытых местных вентиляционных отсосов — их профилирование по найденным очертаниям отрывной области [10–14]. Круглый местный вентиляционный отсос, выполненный в виде раструба, наиболее простое и распространенное устройство для улавливания пылегазовых выделений. Ранее рассматривались отсосы-раструбы в неограниченном пространстве. Целью данной работы является определение влияния непроницаемой плоскости на характеристики отрывной области, образующейся на входе в раструб, на динамику пылевых частиц и коэффициенты их улавливания.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

Отсос-раструб (рис. 1, а) представляет собой круглый всасывающий патрубок с расширяющейся на входе частью, т. е. по сути это конфузор. Чаще всего на практике отсос-раструб расположен над непроницаемой плоскостью,

что ранее в расчетах учтено не было. С острой кромки раструба происходит срыв потока, и образуется вихревая область, прилегающая к стенкам раструба. Необходимо определить поле скоростей в спектре действия отсоса-раструба с учетом отрыва потока и исследовать динамику пылевых частиц.

Для разработки математической модели отрывного течения на входе в круглый отсос-раструб воспользуемся дискретными бесконечно тонкими вихревыми кольцами. Границу отсоса раструба дискретизируем набором присоединенных вихревых колец и контрольных

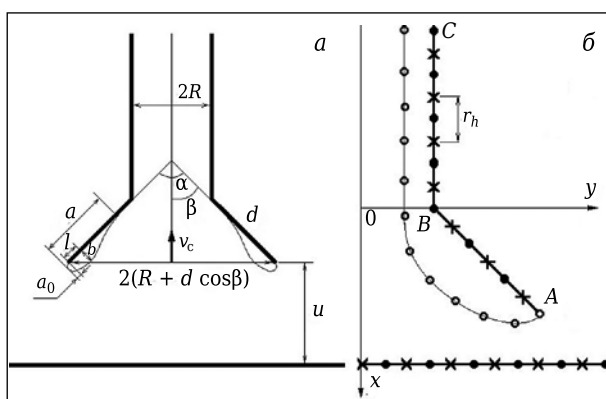


Рис. 1. Отсос-раструб над непроницаемой плоскостью: а — область течения; б — дискретизация границы области; α — угол раскрытия раструба; β — угол, равный $\alpha/2$; R — радиус всасывающего патрубка; d — длина раструба; v_c — скорость в центре раструба; a — длина вихревой области; b — максимальная толщина вихревой области; a_0 — длина выступающей за раструб вихревой области; l — расстояние от конца раструба до сечения с максимальной толщиной вихревой области; r_h — шаг дискретности; u — расстояние от непроницаемой плоскости до входа в раструб



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

точек (произвольных точек на окружности, охватывающей отсос-раструб). Свободная поверхность тока начинается на острой кромке раструба, для нее задается начальное приближение. Дискретная модель в меридиональной полуплоскости изображена на рис. 1, б. Крестиками показаны контрольные точки, в них выполняется условие непроницаемости: скорость вдоль направления нормали равна нулю. Закрашенные кружки — это присоединенные кольцевые вихри. Полые кружки — свободные вихревые кольца.

Обозначим: N — количество присоединенных вихревых колец; N_s — количество свободных вихревых колец; x^p — контрольная точка, $p = 1, 2, K, \dots, N$.

Скорость v_n в произвольной точке x вдоль направления n вычисляется с помощью формулы

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x, \zeta^q), \quad (1)$$

где ξ^q — точка расположения q -го присоединенного вихревого кольца с циркуляцией $\Gamma(\xi^q)$, $\gamma = \text{const}$ — заданная циркуляция свободного вихревого кольца; ζ^q — точка расположения q -го свободного вихревого кольца.

Функция $G(x, \xi)$ выражает собой влияние на точку x вихревого кольца с единичной циркуляцией, расположенного в точке ξ :

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

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

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

$E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta$ — полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода;

$$t = \frac{2b}{a+b}; F(t) = \sum_{i=0}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=0}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t},$$

$$E(t) = 1 + \sum_{i=1}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=1}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t},$$

c_i, d_i взяты из таблиц [15].

Если расстояние от точки x до точки ξ меньше шага дискретности r_h , то данная функция вычисляется по формуле

$$G(x, \xi) = \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{2\pi r_h^2},$$

где r_h — шаг дискретности (расстояние между соседними вихревыми кольцами).

В случае $x = \xi$ функция $G(x, \xi) = 0$.

Вычислительный алгоритм строится следующим образом. После задания точек располо-

жения присоединенных вихрей и начального приближения для свободных вихрей формируется матрица

$$G^{pq} = G(x^p, \xi^q); p = 1, 2, K, \dots, N; q = 1, 2, K, \dots, N.$$

Далее начинается первая итерация.

Формируется столбец свободных членов:

$$v^p = -\gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x^p, \zeta^q), p = 1, 2, \dots, N.$$

Решается система линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{q=1}^N \Gamma^q G^{pq} = v^p, p = 1, 2, 3, \dots, N,$$

откуда определяются неизвестные $\Gamma^q = \Gamma(\xi^q)$.

Строится свободная линия тока, начиная с острой кромки А. С использованием формулы (1) при $\vec{n} = \{1, 0\}$ вычисляется составляющая скорости v_x , при $\vec{n} = \{0, 1\}$ вычисляется составляющая скорости v_y . Последующая точка (x', y') определяется из предыдущей (x, y) с использованием формул:

$$x' = x + \Delta t v_x / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, y' = y + \Delta t v_y / \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

где Δt — шаг, который выбирается достаточно малым.

В случае приближения свободной поверхности тока к раструбу на величину, меньшую шага дискретности, считается, что первая отрывная область замыкается (поверхность тока налипает на стенки раструба) и начинает строиться вторая отрывная область, начиная с точки $(-r_h \cos \beta, R - r_h \sin \beta)$.

Свободная поверхность тока будет состоять из свободных вихревых колец, удаленных друг от друга на расстояние шага дискретности r_h , т. е. в процессе вычислений на каждом этапе проверяется расстояние до предыдущего свободного вихревого кольца. Как только в некоторой точке это расстояние становится равным с точностью до малой погрешности шагу дискретности, в эту точку помещается следующее вихревое кольцо. Построение продолжается до сечения, в котором дискретная модель стенок патрубка прерывается.

На этом первая итерация заканчивается. Заметим, что N_s при этом может измениться. Также задаются новые значения элементов массива расположения свободных вихревых колец, который будет использоваться на следующей итерации.

Итерационный процесс заканчивается, если положение свободной поверхности тока в заданной внутри патрубка точке перестает изменяться с точностью до заданной погрешности. Либо можно задать фиксированное количество итераций, уточняющее положение свободной поверхности тока.

Затем находят параметры отрывной области течения.

Параметр b определялся с использованием формулы расстояния от точки (x, y) до прямой $x \sin \beta - y \cos \beta + R \cos \beta = 0$, на которой расположен раструб. Задавалась начальная точка построения $(d \cos \beta, R + d \sin \beta)$, начиная с которой строится линия тока. На каждом шаге построения линии тока вычислялось расстояние

$$b = |x \sin \beta - y \cos \beta + R \cos \beta|. \quad (2)$$

Как только получалось, что $|x \sin \beta - y \cos \beta + R \cos \beta| > b$, вычисленного на предыдущем этапе, производилось переприсвоение этой величины по формуле (2) и запоминались координаты данной точки $(x_{\max}, y_{\max})$. Расчет велся до тех пор, пока линия тока не достигала сечения патрубков. Параметр l определяли из формулы

$$l = \sqrt{(x_{\max} - d \cos \beta)^2 + (y_{\max} - d \sin \beta - R)^2}.$$

Параметр a_0 также определяется путем построения линии тока, начиная с точки $(d \cos \beta, R + d \sin \beta)$. Здесь на каждом шаге построения линии тока используется формула

$$a_0 = |x \cos \beta + y \sin \beta - d - R \sin \beta|, \quad (3)$$

выражающая расстояние от точки до прямой $x \cos \beta + y \sin \beta - d - R \sin \beta = 0$, проходящей перпендикулярно раструбу через его острую кромку А. Как только получалось, что $|x \cos \beta + y \sin \beta - d - R \sin \beta| > a_0$, найденного на предыдущем шаге, происходит переприсвоение этой величины с использованием формулы (3).

Радиус эффективного всасывания R_e определяется путем построения линии тока, начиная с точки $(d \cos \beta, R + d \sin \beta)$. Цикл выполняется до тех пор, пока $x > d \cos \beta$. При выходе из цикла определяется $R_e = y$, где y — это ордината последней вычисленной точки линии тока.

Длина a первой вихревой области определяется также при построении линии тока, начиная с острой кромки раструба. На каждом шаге вычисляется расстояние $|x \sin \beta - y \cos \beta + R \cos \beta|$ до раструба. Как только оно становится меньше шага дискретности, расчет прекращается и вычисляется значение искомого параметра с помощью формулы (3), в которой вместо a_0 следует использовать $a - a_0$.

Средняя скорость внутри трубы v_0 определялась из выражения

$$v_0 = \frac{\pi \sum_{i=1}^N v_{xi} (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{\pi R^2}, \quad (4)$$

где v_{xi} — скорость в точке $x = -5R$; $y_i = y_{i-1} + h$, где $y_0 = 0$; $y_N = R$, $h = 0,0001$. Суммирование в числителе (4) производилось до тех пор, пока $|y_i - R| > 0,0001$.

Траектории пылевых частиц строили с использованием дифференциального уравнения их динамики [16]:

$$\frac{\pi d_e^3}{6} \rho_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{\pi d_e^3}{6} \rho_p g - \psi \chi S_m \rho_a \frac{|\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_a| \cdot (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_a)}{2}, \quad (5)$$

где d_e — эквивалентный диаметр частицы; ρ_p — плотность частицы; $\mathbf{v}_p$ — вектор скорости частицы; $\mathbf{g}$ — ускорение свободного падения; ψ — коэффициент сопротивления воздуха; χ — коэффициент динамической формы частицы; $S_m = \pi d_e^2/4$ — площадь миделевого сечения частицы; ρ_a — плотность воздуха; $\mathbf{v}_a$ — вектор скорости воздуха. Коэффициент вычисляется по формулам Стокса, Клячко, Адамова:

$$\psi = \begin{cases} 24 / Re, & \text{если } Re < 1, \\ 24(1 + 1/6 \cdot Re^{2/3}) / Re, & \text{если } 1 \leq Re < 10^3, \\ 24 / Re \cdot (1 + 0,065 Re^{2/3})^{1,5}, & \text{если } Re \geq 10^3, \end{cases} \quad (6)$$

где $Re = \frac{\rho_a |\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_a| d_e}{\mu}$, μ — коэффициент динамической вязкости воздуха.

Уравнение (5) преобразуем к системе обыкновенных дифференциальных уравнений следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dv_{px}}{dt} = -\frac{3\psi \rho_a \chi}{4d_e \rho_p} |\mathbf{v}_{px} - \mathbf{v}_{ax}| (v_{px} - v_{ax}), \\ \frac{dx}{dt} = v_{px}, \\ \frac{dv_{py}}{dt} = -g - \frac{3\psi \rho_a \chi}{4d_e \rho_p} |\mathbf{v}_{py} - \mathbf{v}_{ay}| (v_{py} - v_{ay}), \\ \frac{dy}{dt} = v_{py}. \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) решается методом Рунге – Кутты четвертого порядка точности.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} y_1 &= x, \quad y_2 = y, \quad y_3 = v_{px}, \quad y_4 = v_{py}, \\ f_1 &= y_3, \quad f_2 = y_4, \quad f_3 = -\frac{3\psi \rho_a \chi}{4d_e \rho_p} |y_3 - v_{ax}| (y_3 - v_{ax}), \\ f_4 &= -g - \frac{3\psi \rho_a \chi}{4d_e \rho_p} |y_4 - v_{ay}| (y_4 - v_{ay}). \end{aligned}$$

Таким образом, алгоритм решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (7) состоит из следующих шагов:

1. По заданным начальным условиям (при $t = 0$ $y_j = y_{j0}$, $j = 1, 2, 3, 4$) и шагу по времени Δt вычисляются массивы коэффициентов по формулам:

$$\begin{aligned} k_{1j} &= \Delta t \cdot f_1; \\ y_j &= y_{j0} + 0,5 \cdot k_{1j}; \\ k_{2j} &= \Delta t \cdot f_2; \\ y_j &= y_{j0} + 0,5 \cdot k_{2j}; \\ k_{3j} &= \Delta t \cdot f_3; \\ y_j &= y_{j0} + 0,5 \cdot k_{3j}; \\ k_{4j} &= \Delta t \cdot f_4. \end{aligned}$$

Заметим, что необходимо произвести вычисления по каждой из формул при изменении параметра $j = 1, 2, 3, 4$.

2. Определяются элементы массива y_1, y_2, y_3, y_4 в момент времени $t = t + \Delta t$:

$$y_j = y_{j0} + (k_{1j} + 2k_{2j} + 2k_{3j} + k_{4j})/6, \quad j = 1, 2, 3, 4.$$

3. Запоминаются значения полученных координат пылевой частицы и составляющих скорости:

$$y_{j0} = y_j, \quad j = 1, 2, 3, 4,$$

и осуществляется переход к пункту 1.

Построение траектории производится до тех пор, пока пылевая частица не попадет во всасывающий патрубок либо не осядет.

Определение предельной траектории осуществлялось следующим образом. Задавался диаметр пылевой частицы, начальное ее положение $y_1 = d \cos \beta$, $y_2 = R$. Начальные скорости полагались равными нулю. В переменную U_l помещалась ордината частицы, которая улавливается патрубком, а в переменную U_p — частицы, которая осаждается. В начальном приближении полагалось $U_l = R$, $U_p = 30R$. Переменная $S_r = (U_l + U_p)/2$. Далее организовывался цикл, который выполнялся пока $|U_p - U_l| > 0,00000001$. Внутри организовывался цикл, в котором строились траектории частиц. Он выполнялся до тех пор, пока $y_1 > -R/2$ и $y_1 < u$. При выходе из внутреннего цикла проверялось условие $y_3 < 0$. Если оно истинно, то переменная $U_l = S_r$, в противном случае $U_p = S_r$. Далее происходит переприсвоение $S_r = (U_p + U_l)/2$, $y_1 = d \cos \beta$, $y_2 = S_r$, $y_3 = 0$, $y_4 = 0$. На этом внешний цикл заканчивается.

На каждом шаге интегрирования системы (7) определяли составляющие скорости воздушного потока по формуле

$$v_n(x) = \frac{10 \left(\sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x, \zeta^q) \right)}{|v_0|},$$

где для определения v_x используется $\vec{n} = \{1, 0\}$, а для v_y используется $\vec{n} = \{0, 1\}$. Величина v_0 определялась по формуле (4) и изменялась в зависимости от угла и длины раскрытия раструба. Поэтому для корректного сравнения расчетов при разных углах и длинах раскрытия раструба найденную величину скорости необходимо было разделить на $|v_0|$ и умножить на заданную среднюю скорость в патрубке. Число 10 в числителе означает, что расчеты выполнялись при средней скорости 10 м/с во всасывающем патрубке.

Библиографический список

1. **Logachev, I. N.** Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev. — Boca Raton : CRC Press, 2014. — P. 417.
2. **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.

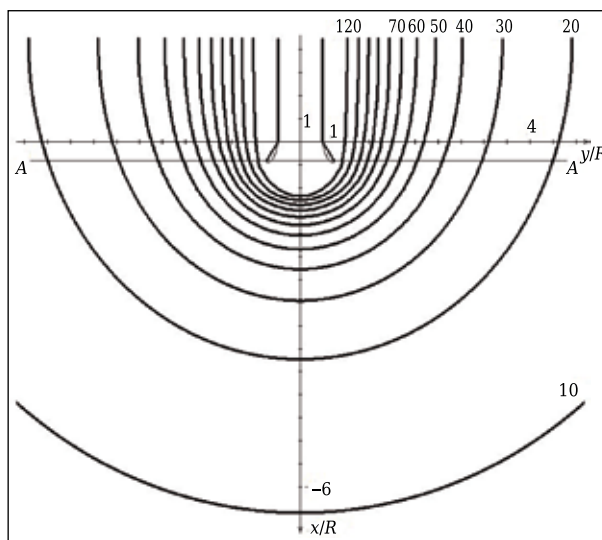


Рис. 2. Предельные траектории пылевых частиц для круглого отсоса-раструба в неограниченном пространстве. Цифры над кривыми 10, 20, 30, ..., 120 — диаметры пылевых частиц, мкм

Предельные траектории пылевых частиц в спектре действия круглого отсоса-раструба, расположенного в неограниченном пространстве, имеют параболическую форму (рис. 2). Объем аспирации — это объем между плоскостью А-А, проходящей через вход в раструб, и соответствующей поверхностью предельных траекторий пылевых частиц.

Объем аспирации V_a для данной пылевой частицы определялся путем построения траектории, которая являлась предельной. В процессе ее построения в переменную V_a , начальное значение которой равно 0, накапливались значения с использованием формулы объема усеченного конуса:

$$V_a = V_a + \pi(y_1 - y'_1)(y_2^2 + y_2 y'_2 + y_2'^2)/3,$$

где y'_1, y'_2 — координаты пылевой частицы в предыдущий момент времени. Данная циклическая структура выполнялась, пока $y_1 > y'_1$ и $y_2 > 0,001$.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-41-08005p_офи_м, № 16-08-00074).

3. **Логачёв, И. Н.** Методы снижения энергоемкости систем аспирации. Часть 1. Вывод гидродинамических уравнений эжекции воздуха потоком сыпучего материала в перфорированном желобе с байпасной камерой / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 51–56.
- Logachev, I. N.** Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 1. Derivation

of hydrodynamic equations of air ejection by a stream of free-flowing material in a perforated trough with bypass chamber / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics* — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 70–76.

4. **Логачёв, И. Н.** Методы снижения энергоёмкости систем аспирации. Часть 2. Определение эффективности использования рециркуляционных течений / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // *Новые огнеупоры*. — 2014. — № 4. — С. 60–64.

Logachev, I. N. Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 2. Determining the efficiency of recirculating flows / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2014. — Vol. 55, № 2. — P. 164–168.

5. **Логачёв, И. Н.** Методы снижения энергоёмкости систем аспирации. Часть 3. Расчет погрузочного устройства и предложения по его совершенствованию / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // *Новые огнеупоры*. — 2014. — № 6. — С. 57–61.

Logachev, I. N. Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 3. Design of loading device and suggestions for its improvement / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2014. — Vol. 55, № 3. — P. 255–260.

6. **Логачёв, И. Н.** Методы снижения энергоёмкости систем аспирации. Часть 4. Теоретические предпосылки создания пыле локализирующих устройств с закрученными воздушными потоками / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2014. — № 8. — С. 53–58.

Logachev, I. N. Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 4. Theoretical prerequisites for the creation of dust localizing devices with swirling air flows / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 365–370.

7. **Аверкова, О. А.** Численное моделирование воздушных течений на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / *О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, К. И. Логачёв* [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2010. — № 5. — С. 31–36.

Averkova, O. A. Numerical simulation of air currents at the inlet to slot leaks of ventilation shelters / *O. A. Averkova, V. Yu. Zorya, K. I. Logachev* [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2010. — Vol. 51, № 3. — P. 177–182.

8. **Аверкова, О. А.** Моделирование отрыва потока на входе в щелевые неплотности аспирационных укры-

тий / *О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв* // *Новые огнеупоры*. — 2012. — № 10. — С. 56–60.

9. **Аверкова, О. А.** Моделирование отрывных потоков на входе в круглые всасывающие каналы с кольцевыми экранами / *О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв* [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2013. — № 10. — С. 57–61.

Averkova, O. A. Modeling detached flows at the inlet to round suction flues with annular screens / *O. A. Averkova, I. N. Logachev, K. I. Logachev* [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 425–429.

10. **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.

11. **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 2. — № 9. — С. 80–85.

12. **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 3. — № 10. — С. 81–85.

13. **Логачёв, К. И.** Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей / *К. И. Логачёв, А. И. Пузанок, В. Н. Посохин* // *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. — 2004. — № 7/8. — С. 61–69.

14. **Логачёв, К. И.** Геометрические характеристики течений на входе в отсосы, выполненные в виде зонтов / *К. И. Логачёв, В. Н. Посохин, А. И. Пузанок* // *Инженерные системы. АВОК Северо-Запад*. — 2005. — № 1. — С. 12–14.

15. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. — М.: Наука, 1979. — 832 с.

16. **Логачёв, И. Н.** Способы и средства снижения энергоёмкости аспирационных систем при перегрузках сыпучих материалов / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // *Новые огнеупоры*. — 2013. — № 6. — С. 66–70.

Logachev, I. N. Methods and means of reducing the power requirements of ventilation systems in the transfer of free-flowing materials / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2013. — Vol. 54, № 3. — P. 258–262. ■

Получено 24.02.15

© К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, Е. И. Толмачёва, А. К. Логачёв, В. Г. Дмитриенко, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Ceramics Expo — выставка по керамике 2016

26–28 апреля 2016 г.
г. Кливленд, США

www.ceramicsexpousa.com

