

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ЗАДАЧИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

nvt84@ya.ru

Аверкова О.А., канд. техн. наук, доц.,

Крюков И.В., аспирант,

Логачев И.Н., д-р техн. наук, проф.,

Логачев К.И., д-р техн. наук, проф.

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

Аннотация. Проблема локализации пылегазовых выбросов имеет сложный мультидисциплинарный характер и содержит задачи аэродинамики, теплообмена, теории машин и механизмов, математического моделирования и численных методов. Устройства для локализации выбросов пыли должны обеспечить надлежащие санитарно-гигиенические условия труда на рабочем месте с минимальным потреблением энергии. В статье излагаются разработанные математические модели и вычислительные алгоритмы для расчета пылегазовых потоков в спектре действия местных вентиляционных устройств закрытого типа. Использовались комбинация методов граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей, методы теории функций комплексного переменного, методы теории струй идеальной несжимаемой жидкости и гетерогенных сред. Для уменьшения энергоемкости аспирационных укрытий предлагается использовать свойства отрывных, закрученных и рециркулируемых потоков.

Ключевые слова: вентиляция, аспирация, метод граничных интегральных уравнений, метод дискретных вихрей.

Введение. Наиболее надежным способом локализации и улавливания пылегазовых выбросов в производственных помещениях промышленных предприятий является применение систем обеспыливающей вентиляции [1-6], главным элементом которой является местный вентиляционный отсос (МВО). Производительность системы обеспыливающей вентиляции должна обеспечить снижение запыленности воздуха до уровня предельно допустимой концентрации при минимальном расходе воздуха, поступающего в МВО.

Целью работы является разработка методов расчета поля скоростей в спектрах действия МВО, которые позволяют учесть: влияние вращающихся элементов технологического оборудования на распределение скоростей воздушного потока; вихревые структуры, распространяющиеся в закрытых МВО - аспирационных укрытиях; отрывные потоки, образующиеся на входе в неплотности аспирационных укрытий и всасывающие проемы; распространение пылевых аэрозолей в найденном поле скоростей воздушных потоков.

1. Метод снижения объема эжектируемого воздуха

Для определения влияния потока сыпучего материала на воздушную среду и эффективности аспирационного укрытия была разработана математическая модель эжекции воздуха в круглой перфорированной трубе, снабженной байпасной камерой.

Рассматривался осесимметричный поток частиц в круглой трубе с площадью поперечного сечения \tilde{s}_r , м² (рис.3-4). Вокруг трубы предусмотрена цилиндрическая байпасная камера (с площадью поперечного сечения \tilde{s}_b , м²), аэродинамически связанная с трубой перфорированной стенкой. В результате перетекания воздуха из трубы в байпасную камеру скорость эжектируемого воздуха в трубе (\tilde{u} , м/с) и скорость восходящего потока в байпасной камере ($\tilde{\omega}$, м/с) изменяются по длине канала. Для определения этих скоростей воспользуемся уравнением сохранения количества движения воздуха в неподвижном объеме \tilde{V} (м³), ограниченного поверхностью \tilde{S} (м²):

$$\int_S \tilde{\rho} \tilde{u} \tilde{u}_n d\tilde{S} = \int_{\tilde{V}} \tilde{M} d\tilde{V} + \int_{\tilde{S}} \tilde{p}_n d\tilde{S}, \text{ где } \tilde{u}_n - \text{ проекция вектора скорости}$$

воздуха на внешнюю нормаль \tilde{n} поверхности \tilde{S} , м/с; \tilde{u} - вектор скорости воздуха, м/с; $\tilde{\rho}$ - плотность воздуха кг/м³; \tilde{M} - вектор массовых сил, Н/м³; \tilde{p}_n - вектор напряжения поверхностной силы, приложенной к элементарной площади $d\tilde{S}$ с внешней нормалью \tilde{n} , Па.

Откуда, пренебрегая малыми величинами более высокого порядка, следует основное уравнение одномерной задачи динамики эжектируемого воздуха в трубе в безразмерном виде:

$$dp + 4udu = \text{Le}(v-u)|v-u|/v \cdot dx, \quad (1)$$

где $\text{Le} = \psi\beta_k \tilde{I}\tilde{F}_m / \tilde{V}_q$; $\beta_k = \tilde{G}_q / (\tilde{\rho}_q \tilde{v}_k \tilde{s}_r)$;
 $p = 2\tilde{p} / (\tilde{\rho}\tilde{v}_k^2)$; $u = \tilde{u} / \tilde{v}_k$; $v = \tilde{v} / \tilde{v}_k$; $x = \tilde{x} / \tilde{l}$; \tilde{p} - статическое давление в трубе, Па (здесь и далее речь идет об избыточном статическом давлении); \tilde{v}_k - скорость частиц в конце трубы, м/с; \tilde{l} - общая длина трубы, м; безразмерное число Le («параметр эжекции») представляет собой отношение максимальных сил эжекционного давления (при $\tilde{v} - \tilde{u} = \tilde{v}_k$) и динамического давления эжектируемого воздуха.

Аналогично получено уравнение динамики для восходящего потока воздуха в байпасном канале площадью поперечного сечения \tilde{S}_b (при отсутствии сил аэродинамического сопротивления стенок канала):

$$dp_\omega + 4\omega d\omega = 0; \quad p_\omega = 2\tilde{p}_\omega / (\tilde{\rho}\tilde{v}_k^2); \quad \omega = \tilde{\omega} / \tilde{v}_k, \quad (2)$$

где p_ω - безразмерное статическое давление в поперечных сечениях байпасного канала.

После ряда преобразований имеем систему дифференциальных уравнений:

$$du/dx = E \cdot \gamma \sqrt{|\Delta p|}; \quad dp/dx = -4uE\gamma \sqrt{|\Delta p|} + \text{Le}(v-u)|v-u|/v,$$

где параметры рассчитываются по формулам

$$\Delta p = p_\omega - p = p_a - 2 \left(\frac{u - u_0}{r} \right)^2 - p; \quad E = S_i / \sqrt{\zeta_0} = \tilde{I}\tilde{\epsilon} / (\tilde{s}_i \sqrt{\zeta_0});$$

$v = \sqrt{(1-n^2)x + n^2}$; $n = \tilde{v}_0 / \tilde{v}_k$; γ - знак разности давлений ($p_\omega - p$); \tilde{v}_0 - скорость потока частиц при входе в трубу; \tilde{S}_i - отношение общей площади перфорационных отверстий в стенках трубы к площади ее поперечного сечения; \tilde{I} - периметр трубы; ϵ - степень перфорации стенок трубы ($\epsilon = 0$ при отсутствии перфорации, $\epsilon = 1$ при отсутствии стенок трубы); ζ_0 - коэффициент местного сопротивления (к.м.с.) отверстия перфорации.

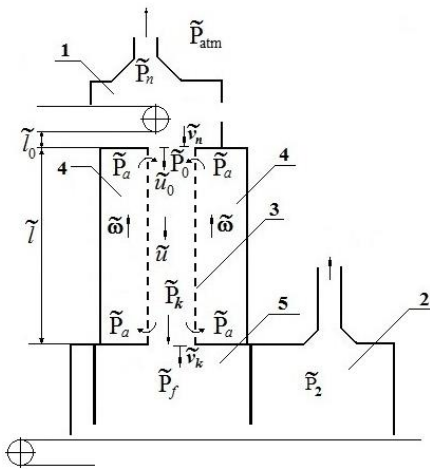


Рисунок 3 – Схема аспирации перегрузочного узла, оснащенного верхним (1) и нижним (2) аспирируемыми укрытиями, перфорированным желобом (3) с байпасной камерой (4) и формкамерой (5) в нижнем укрытии

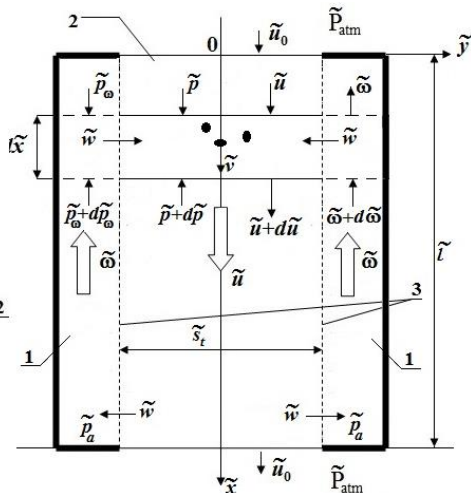


Рисунок 4 – Расчетная схема перфорированного желоба с байпасной камерой: 1 – байпасная камера; 2 – труба; 3 – перфорированные стенки желоба

Используем следующие граничные условия:

$$u(0) = u_0; \quad p(0) = -\zeta_n u_0^2; \quad (3) \qquad u(1) = u_0; \quad p(1) = \zeta_k u_0^2, \quad (4)$$

где ζ_n, ζ_k - коэффициенты местных сопротивлений движению воздуха при входе в трубу и при выходе из трубы. Некоторые трудности возникают в связи с тем, что искомыми как раз и являются скорость воздуха при входе в трубу (при выходе из трубы) - u_0 и избыточное давление в начале (в конце) байпасного канала - p_a .

Поэтому решение краевой задачи осуществляется методом пристрелки: задавшись u_0 , решается задача Коши с начальными условиями (3), при этом задаемся величиной p_a из условия $p(1) > p_a > p(0)$, $p_a \approx (\zeta_k - \zeta_n) u_0^2 / 2$ и затем проверяется условие (4). Для облегчения поиска величин u_0 и p_a можно использовать метод бисекции (метода половинного деления).

Увеличение числа эжекции Le , как и в случае потока частиц в трубе с непроницаемыми стенками, способствует росту u_0 . Заметна асимптотика этого роста (рис.5) и снижение объемов эжекции по сравнению с потоком частиц в неперфорированной трубе ($u_0 < u_2$ - штрихпунктирная кривая) в исследуемом диапазоне чисел Le . Еще больший эффект минимизации u_0 наблюдается при увеличении степени перфорации и здесь имеется асимптотика - при $E \geq 2.5$ снижение величины U_0 практически прекращается.

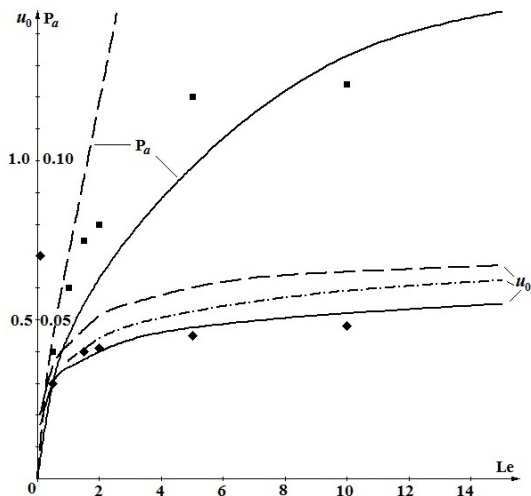


Рисунок 5 – Зависимость скорости эжектируемого воздуха U_0 и давления в байпасной камере p_a от числа Le (при $E = 1$; $r = 1$; $n = 0.4319$; $\zeta_n = 0.5$; $\zeta_k = 1$; $\zeta_0 = 1.5$) сплошные кривые построены по формулам линеаризованной задачи; пунктирная - при максимальных силах $k = 1$, $Le(v-u)$; штрихпунктирная линия - для случая трубы с непроницаемыми стенками ($E = 0$); ромбики \blacklozenge - для u_0 и квадратики \blacksquare - для p_a по результатам численного решения "точного" уравнения

Снижение объемов (скорости u_0) эжектируемого воздуха за счет его рециркуляции в байпасном канале тем выше, чем больше число Le и чем меньше n . Еще более заметно снижение объемов эжекции при увеличении аэродинамического сопротивления на выходе и входе

воздуха в перфорированную трубу. Этот факт подтверждает заметную стимулирующую роль на объемы рециркулируемого воздуха в обычном (неперфорированном) байпасном канале герметизации верхнего укрытия и наличие буферной емкости (формкамеры) в нижнем укрытии, которые создают большее разрежение в верхней части трубы и подпор - в нижней части. Этим создаются условия для более интенсивного протекания воздуха через перфорационные отверстия.

Объемы эжектируемого воздуха могут быть уменьшены в 1.3-1.5 раза при увеличении ζ_k до 8-32 и в 1.45-1.55 раза при увеличении ζ_n до 4-16 (при $Le \geq 10$; $r = 2$; $E = 2.5$).

2. Снижение объема воздуха, поступающего через неплотности

Вначале рассмотрено потенциальное отрывное течение воздуха при входе в плоскую щель, перед которой перпендикулярно ее оси установлены два экрана и исследовано отрывное течение в щелевидном всасывающем канале, выступающем за пределы плоской стенки, в спектре действия которого расположен непроницаемый экран. Затем с помощью теории функций комплексного переменного удалось решить более общую задачу отрывного течения в горизонтальном канале, входное сечение которого выступает от вертикальной стенки на некоторое расстояние S (рис.8).

Течение ограничено непроницаемым экраном, удаленным на расстояние G от входного сечения плоского канала высотой $2B$, и разделено на расстоянии M вертикальным щитом (экраном с центральным отверстием высотой $2R$) на две области. Непроницаемый экран в данном случае позволяет упростить задачу определения констант интеграла Кристоффеля-Шварца, в частности оценить величину приращений в бесконечно удаленной точке A .

Функция Жуковского в этом случае имеет вид:

$$\omega = \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{t} + \sqrt{b}}{\sqrt{t} - \sqrt{b}} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{t} + \sqrt{p}}{\sqrt{t} - \sqrt{p}}, \quad \text{а для комплексного потенциала}$$

получено выражение:
$$w = \frac{h-m}{1-m} \cdot \frac{q}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{t-m}{m} \right) + \frac{1-h}{1-m} \cdot \frac{q}{\pi} \cdot \ln(t-1).$$

Связь точек вспомогательной плоскости t и точек физической области определяется формулой: $z = i + (1-k) \frac{\delta_\infty}{\pi} \cdot A + k \frac{\delta_\infty}{\pi} \cdot B$, где

$$A = \int_0^i e^{\omega} \frac{dt}{t-m}; \quad B = \int_0^i e^{\omega} \frac{dt}{t-1}.$$

Щит с центральным отверстием разделяет всасывающий факел на две части, причем, несмотря на малый расход ближайшей к отверстию отсекаемой части, скорость его оказывается выше другой части, что увеличивает инерционное поджатие струи к оси канала и, как следствие, уменьшает толщину струи δ_∞ .

На величину δ_∞ оказывает влияние как место расположения щита M , так и величина отверстия R . Влияние величины δ_∞ на коэффициент сопротивления входа среды ζ в отсасывающее отверстие определяется с помощью формулы Идельчика И.Е.: $\zeta = (1/(\delta_\infty)^m - 1)^2$, где $m=1$ для щелевидного всасывающего канала и $m=2$ для круглой трубы.

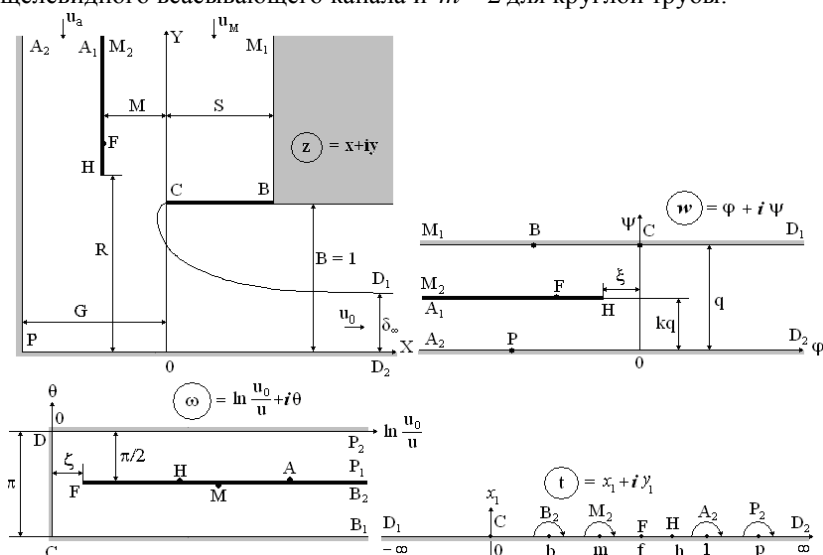


Рисунок 8 – К определению ортогональной сетки и поля скоростей всасывающего факела выступающего канала с экраном

Как показали проведенные исследования, изменения относительной толщины струи $\bar{\delta} = \delta_\infty(1) / \delta_\infty(\infty)$ и относительного коэффициента сопротивления $\bar{\zeta} = \zeta(1) / \zeta(\infty)$ (здесь $\zeta(1) = \zeta|_{R=1}$; $\zeta(\infty) = \zeta|_{R \rightarrow \infty}$) имеют четко выраженные экстремумы при удалении щита $M \approx 0.75$ не только при большом удалении глухой стены, но и при заметном приближении этой стены к всасывающему отверстию. При этом величина $\bar{\delta}$ имеет минимум, а $\bar{\zeta}$ - максимум.

Использование методов теории функций комплексного переменного и Н.Е. Жуковского позволяет достаточно точно определить параметры отрыва потока, но не дает возможность исследовать течения в плоских многосвязных областях, содержащих экраны конечной длины, а также течения вблизи круглых всасывающих каналов.

Поэтому возникла необходимость в разработке метода, где эти недостатки были устранены.

Рассматривалась многосвязная область течения (рис.9 а) на входе в плоский (или круглый) всасывающий канал, в спектре действия которого находятся тонкий экран (диск с круглым центральным отверстием), при его циркуляционном обтекании. С острой кромки C происходит срыв потока и образуется свободная линия тока.

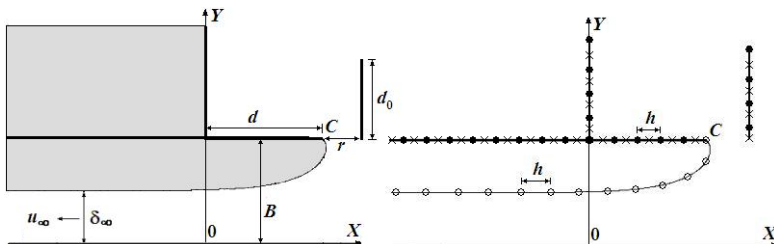


Рисунок 9 – К постановке задачи: а) физическая область течения; б) дискретизация границы области (● – присоединенные вихри, ○ – свободные вихри, × – контрольные точки)

Разрабатывалась численная процедура для определения ее положения, скорости потока в любой заданной точке и коэффициент местного сопротивления (к.м.с.) при входе во всасывающее отверстие.

Дискретная математическая модель для плоской задачи строится следующим образом (рис.9 б). Обозначим: N – количество присоединенных вихрей, столько же будет контрольных точек.

Вихрь лежащий на острой кромке C козырька считается свободным. Присоединенные вихри располагались в точках изломов границы. Между присоединенными вихрями располагались контрольные точки. Точка $\xi^k (\xi_1, \xi_2)$ – точка расположения k -го присоединенного вихря; $x^p (x_1, x_2)$ – p -я контрольная точка. Для обеспечения непроницаемости оси OX отражаем симметрично относительно нее все вихри; циркуляции симметричных вихрей должны быть противоположны. Выполнение этого условия автоматически приводит к условию бесциркуляционного течения.

Полагалось, что на искомой свободной линии тока циркуляция вихрей постоянна и равна γ . Суммарное воздействие всех вихрей на контрольную точку x^p вдоль направления внешней нормали выражается равенством:

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N (G(x, \xi^q) - G(x, \xi^{q+N})) \Gamma(\xi^q) + \gamma \sum_{k=1}^{N_S} (G(x, \zeta^k) - G(x, \zeta^{k+N_S})) \quad , \quad (5)$$

где ζ^k – точка расположения свободного вихря. Функция $G(x, \xi) = ((x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1) / (2\pi((x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2))$ выражает собой скорость вызываемой в точке $x(x_1, x_2)$ вдоль заданного направления $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ единичного вихря, расположенного в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$. Поскольку $v_n(x^p) = 0$ во всех контрольных точках, т.е. выполняется условие непроницаемости, то при изменении $p = 1, 2, \dots, N$ выражение (5) преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных циркуляций $\Gamma(\xi^q)$ присоединенных вихрей.

Второе приближение для свободной линии тока строится с использованием метода Рунге-Кутты численного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений $dx/dt = v_x$; $dy/dt = v_y$. Линия тока начинает строиться с острой кромки C . Как только расстояние между точкой (x, y) и острой кромкой становится h , то в эту

точку помещается свободный вихрь, т.е. это будет второе приближение для этой точки свободной линии тока. Далее опять строится линия тока, пока снова расстояние между точкой (x, y) и предыдущим положением свободного вихря станет h . В эту точку помещается свободный вихрь и т.д.

После определения второго приближения для свободной линии тока необходимо снова решить систему уравнений (5) и определить циркуляции присоединенных вихрей. Затем строится третье приближение свободной линии тока и т.д. Данный итерационный процесс продолжается до тех пор, пока расстояние между последующим положением N_s -го свободного вихря и предыдущим будет не больше заданной точности ε .

Для осесимметричной задачи дискретная математическая модель строится подобным образом. В качестве дискретных особенностей использовались бесконечно тонкие вихревые кольца без самоиндукции. Система уравнений для определения неизвестных интенсивностей присоединенных вихревых колец примет вид

$$\sum_{q=1}^N G(x^p, \xi^q) \Gamma(\xi^q) = -\gamma \sum_{k=1}^{N_s} G(x^p, \zeta^k), \quad (6)$$

а скорость определяется по формуле

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N G(x, \xi^q) \Gamma(\xi^q) + \gamma \sum_{k=1}^{N_s} G(x^p, \zeta^k), \quad (7)$$

где

$$G(x, \xi) = \frac{(A_1 b + A_2 a)}{b} \cdot \frac{4}{(a-b)\sqrt{a+b}} E(t) - \frac{A_2}{b} \cdot \frac{4}{\sqrt{a+b}} F(t) \text{ при } b \neq 0,$$

$$A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi}, \quad 2x_2 \xi_2 = b > 0, \quad t = 2b / (a+b), \quad G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 n_1}{2a\sqrt{a}} \text{ при } b = 0,$$

$$a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2 > 0, \quad E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad ;$$

$$F(t) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}}, \quad F(t) = \sum_{i=0}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=0}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t},$$

$$E(t) = 1 + \sum_{i=1}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=1}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t}, \quad c_i, d_i \text{ взяты из таблиц специальных функций.}$$

Рассматривались различные режимы обтекания вертикального экрана, содержащегося в спектре всасывания канала. Наиболее близко к опытным данным оказалось циркуляционное обтекание экрана с условием конечности скорости на нижней кромке (рис. 10).

При фиксированном значении длины d_0 вертикального экрана и изменении расстояния r наблюдается минимум величины δ_∞ . В частности, величина δ_∞ для плоской задачи при разных значениях d_0 имеет минимум в диапазоне $0,55 < r < 0,75$, а для осесимметричной – $0,3 < r < 0,35$. При значительном увеличении d_0 для плоской задачи экстремум наблюдается при $r = 0,75$, что коррелируется с расчетами по методу Н.Е. Жуковского при $d_0 \rightarrow \infty$.

Как показали вычислительные эксперименты, увеличение длины профиля более одного калибра не дает значимого практического эффекта.

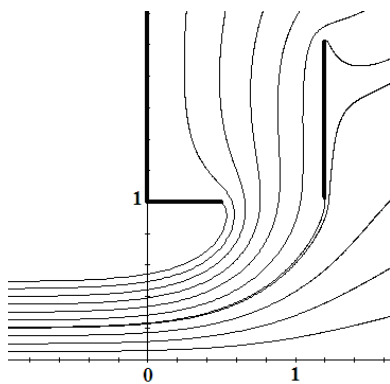


Рисунок 10 – Линии тока при циркуляционном обтекании экрана

$$(\delta_\infty = 0.4957; r = 0.7)$$

3. Применение закрученных воздушных потоков

В данном параграфе разрабатывается метод моделирования пылевоздушных течений в спектрах действия МВО от вращающихся цилиндрических деталей и предлагается новое направление снижения пылеуноса от аспирируемых укрытий за счет использования свойств закрученных потоков.

Вначале был разработан метод компьютерного моделирования, основанный на методе граничных интегральных уравнений с учетом плоских вихрей, моделирующих вращающиеся цилиндры.

Смоделированы пылевоздушные течения вблизи открытых МВО, где показана необходимость учета вращения цилиндров, оказывающее существенное влияние на поле скоростей воздушных потоков и на величину максимального диаметра d_{\max} пылевых частиц, улавливаемых МВО. Он уменьшается в 3-4 раза. Таким образом, точность модели значительно влияет на правильный выбор эффективного пылеулавливающего аппарата. Показано, что значительного энергосберегающего эффекта и повышения эффективности МВО можно достичь установкой механического экрана.

В местных отсосах закрытого типа - аспирационных укрытиях также можно использовать вращающиеся цилиндры для снижения их энергоемкости. С помощью разработанной компьютерной программы определялась величина d_{\max} тонкодисперсных аэрозолей различных физических свойств, уносимых в аспирационную сеть с целью разработки конструктивных предложений по проектированию аспирационных укрытий с функциями пылесодательной камеры.

Вычислительные эксперименты показали, что снижение на 140-200 мкм величины максимального диаметра пылевых частиц, уносимых в аспирационную сеть, в зависимости от физических свойств пыли, можно добиться за счет оборудования аспирационных укрытий экранящими козырьками, вращающимися цилиндрами и цилиндром-отсосом, способствующими за счет воздушных потоков индуцированных их вращением осаждению пылевых частиц на дно укрытия.

Для исследования процессов вихреобразования разработана математическая модель вихревых течений внутри укрытий, в которых могут находиться вращающиеся цилиндры, ее компьютерная реализация.

Рассматривалась область с границей S , на которой задана нормальная составляющая скорости. В области могут находиться роторы и цилиндры-отсосы с известными линейными скоростями вращения $v_k, k = 1, 2, \dots, M$. Для моделирования границы S используем простой слой: непрерывно распределенные фиктивные источники с интенсивностями $q(\xi)$. Для учета влияния воздушного потока, инициируемого вращением цилиндров радиусами R_k , разместим в их

центрах c_k плоские вихри с известными величинами циркуляций $\Gamma_k = 2\pi R_k v_k$.

В момент времени $t = m \cdot \Delta t$ система для определения неизвестных циркуляций присоединенных вихрей и интенсивностей источников (стоков) будет иметь вид:

$$\begin{cases} -0,5q(x^p) + \sum_{\substack{k=N+1, \\ k \neq p}}^{N+W} q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x^p, \xi^k) dS(\xi^k) + \sum_{k=1}^N G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + \Lambda = \\ = v_n(x^p) - 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x^p, c_k) - \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L G(x^p, \zeta^{l\tau}) \gamma^{l\tau}, \\ \sum_{k=1}^N \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L \gamma^{l\tau} = 0, \end{cases} \quad (19)$$

где функция $F_2(x, \xi) = \frac{1}{2\pi} \frac{(x_1 - \xi_1)n_1 + (x_2 - \xi_2)n_2}{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2}$ выражает собой влияние на точку $x(x_1, x_2)$ единичного источника, расположенного в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$ вдоль единичного вектора $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$; $v_n(x^p)$ - скорость в направлении внешней нормали к границе области в p -ой контрольной точке при $p = 1, 2, \dots, N$ либо середины p -го отрезка при $p = N+1, N+2, \dots, N+W$; Λ - регуляризирующая переменная И.К. Лифанова; $\gamma^{l\tau}$ - циркуляция свободного вихря сошедшего с l -й острой кромки в момент времени $t = \tau \cdot \Delta t$; W - количество граничных элементов с простым слоем; N - количество присоединенных вихрей.

Скорость определяется из выражения:

$$\begin{aligned} v_n(x) = & \sum_{k=N+1}^{N+W} q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x, \xi^k) dS(\xi^k) + \sum_{k=1}^N G(x, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + \\ & + 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x, c_k) + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L G(x^p, \zeta^{l\tau}) \gamma^{l\tau}. \end{aligned} \quad (20)$$

Траектория пылевой частицы строится на основании интегрирования уравнения ее движения:

$$\frac{1}{6} \rho_p \pi d_e^3 v_p'(t) = -\Psi \left| \vec{v}_p - \vec{v}_a \right| \left(\vec{v}_p - \vec{v}_a \right) \rho_a \chi S_m / 2 + \frac{1}{6} \rho_p \pi d_e^3 \vec{g}, \quad (21)$$

где \vec{v}_a – скорость воздуха; ρ_a – плотность воздуха; \vec{v}_p – скорость частицы; ρ_p – плотность частицы; d_e – эквивалентный диаметр частицы; \vec{g} – ускорение свободного падения; $S_m = \pi d_e^2 / 4$ – площадь миделевого сечения частицы; χ – коэффициент ее динамической формы; ψ – коэффициент сопротивления воздуха, вычисляемый по формулам Стокса, Клячко, Адамова.

С помощью разработанной по изложенным численным алгоритмам компьютерной программе были выявлены закономерности поведения пылевых аэрозолей, возникающих при перегрузках сыпучего материала, в аспирационном укрытии стандартной конструкции в зависимости от наличия вихревых нестационарных структур в области течения.

В область укрытия из приточного отверстия поступал набор частиц разной крупности. Задавался дисперсный состав и концентрация пыли и осуществлялось моделирование ее движения до их полного осаждения или улавливания. Определялась суммарная масса частиц, попавших в отсос, и концентрация в аспирируемом воздухе, равная отношению этой массы к объему воздуха, в котором они содержались. Дисперсный состав во всасывающей патрубке определялся счетным путем частиц разных фракций, уловленных отсосом.

В качестве примера осуществлено моделирование движения пылевых частиц (рис.11) в аспирационном укрытии узла перегрузки клинкера на конвейер. Рассматривалось движение 30000 пылевых частиц при плотности 3050 кг/м^3 и динамическом коэффициенте формы 1,8 (острозернистые частицы).

Замена вытяжного отверстия на вращающийся цилиндр-отсос существенно изменяет аэродинамику внутри укрытия (рис.12).

Как показали вычислительные эксперименты концентрацию пыли в отсасываемом воздухе можно снизить до предельно допустимой, вплоть до нуля. Все зависит от скорости вращения цилиндра-отсоса. Очевидно, что он должен быть наиболее удален от загрузочного желоба и конвейерной ленты. Направление вращения должно способствовать осаждению пыли.

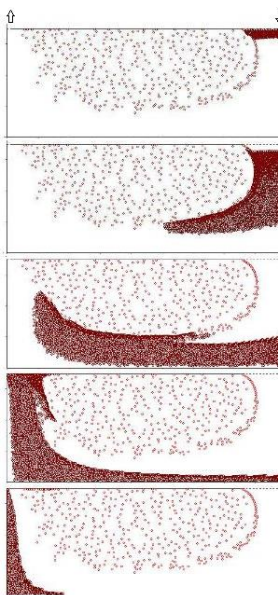


Рисунок 11 – Движение пылевого облака из 30000 частиц различных фракций в аспирационном укрытии узла перегрузки клинкера на конвейер

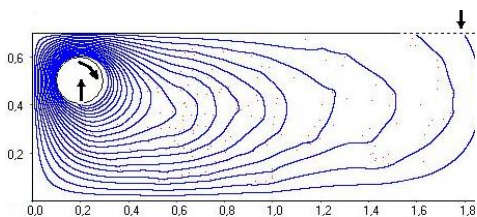


Рисунок 12 – Закрученное воздушное поле

Выводы

1. Для повышения эффективности систем обеспыливающей вентиляции необходим комплекс мер по снижению: объема эжектируемого воздуха, расхода воздуха поступающего через неплотности и технологические проемы аспирационных укрытий, пылеуноса в аспирационную сеть за счет использования свойств вихревых, отрывных и рециркуляционных течений.

2. Разработан метод снижения объема эжектируемого воздуха при перегрузках сыпучих материалов. Аналитически обоснована эффективность создания загрузочного устройства в виде вертикальной перфорированной трубы с байпасной камерой при загрузке сыпучих материалов. Исследован процесс рециркуляции воздуха в системе «загрузочная перфорированная труба - байпасная камера», определено влияние их геометрических и аэродинамических характеристик на

объемы эжектируемого воздуха и производительность системы аспирации.

Расчетным путем показано, что производительность системы обеспыливающей вентиляции возможно снизить не менее чем на 40% за счет организации замкнутой циркуляции пылевоздушных потоков без использования дополнительных побудителей тяги.

3. Разработан бесконтактный метод снижения расхода воздуха, поступающего через неплотности и технологические проемы аспирационных укрытий для локализации пылевыведений, основанный на эффекте отрыва воздушного потока с острых кромок механических экранов. Предложен и запатентован способ управления отрывом потока на входе во всасывающие каналы. Разработаны математические модели отрывных течений на входе в круглые и щелевидные всасывающие каналы, в спектрах действия которых могут быть расположены конечные тонкие профили. Исследованы различные режимы обтекания профилей, определены их геометрические размеры и положения, способствующие наибольшему аэродинамическому сопротивлению всасывающих каналов. Разработаны рекомендации по снижению объема воздуха, поступающего через неплотности аспирационных укрытий. Расчетным и экспериментальным путем показано, что расход воздуха возможно снизить не менее чем на 20%, тем самым повысить эффективность системы аспирации за счет снижения энергоемкости.

4. Разработан метод снижения пылеуноса от аспирационных укрытий, основанный на использовании закрученных воздушных потоков, инициируемых вращающимися цилиндрами-отсосами. Предложена программно-алгоритмическая поддержка для исследования процессов пылеуноса в аспирационную сеть от локализирующих пылевыведения устройств и исследованы процессы динамики пылевых аэрозолей в аспирируемых течениях, содержащих механические экраны и вращающиеся цилиндры. На основе вычислительных экспериментов исследованы процессы: влияния вращения цилиндрической детали на воздушный поток в спектре всасывания МВО открытого типа и динамику частиц пыли в этом потоке; улавливания частиц пыли разной формы и плотности при изменении отношения скорости всасывания к скорости вращения цилиндрической детали. Определены закономерности воздействия тонких непроницаемых экранов, вращающихся цилиндров-отсосов и цилиндров на унос пыли в сеть аспирации. Показано, что значительного снижения пылеуноса в аспирационную сеть, вплоть до полного осаждения пыли на

конвейерную ленту можно достичь использованием вращающегося цилиндра-отсоса.

5. Выполненные опытно-экспериментальные исследования на установке аспирационного укрытия со щелевыми неплотностями и стендах для исследования отрыва потока на входе во всасывающие каналы круглой и щелевидной формы, позволили подтвердить данные, полученные аналитическим путем и вычислительным экспериментом. Установлено качественное и количественное совпадение поля скоростей в спектрах всасывания и закономерностей изменения коэффициента местных сопротивлений входа во всасывающие каналы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08005 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Киреев В.М., Гольцов А.Б., Минко В.А. Расчет и разработка аспирационных укрытий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 3. С. 143-146.
2. Гольцов А.Б., Киреев В.М., Феоктистов А.Ю. Исследование конструкции аспирационного укрытия для применения в стесненных условиях // Экология промышленного производств. 2013. № 1 (81). С. 2-5.
3. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions / Boca Raton: CRC Press. 2015. 576 p.
4. Ze Qin Liu. Air Entrainment in Free Falling Bulk Materials. Ph. D. Thesis. University of Wollngong, 2003. <http://ro.uow.edu.au/theses/1816>.
5. Mallick S. and Wypych P. W. Evaluation of scaleup procedures using "system" approach for pneumatic conveying of powders. Particulate Sci. Technol. 2010. Vol. 28. No. 1. P. 41–50.
6. Li Xiaochuan, Wang Qili, Liu Qi, Hu Yafei. Developments in studies of air entrained by falling bulk materials // Powder Technology. 2016. Vol. 291. P. 159-169.