

УДК 532.5.031:697.921.42

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ВБЛИЗИ ВСАСЫВАЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ*

К.И.Логачев¹, А.И.Пузанок¹

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

Разработана процедура компьютерного моделирования пылегазовых потоков вблизи всасывающих отверстий на основе метода сингулярных интегральных уравнений.

ВВЕДЕНИЕ

На основании проведенного анализа существующих методов расчета пылегазовых потоков вблизи всасывающих отверстий [1-4], значительный вклад в развитие которых внесли Батурич В.В., Беляев Н.Н., Бромлей А.Ф., Гуревич И.Л., Гуревич М.И., Коньшев И.И., Лившиц Г.Д., Логачев И.Н., Логачев К.И., Максимов Г.А., Посохин В.Н., Позин Г.М., Прузнер А.С., Талиев В.Н., Хрущ В.К., Шаптала В.Г., Шепелев И.А., а также на основании проведенного анализа опыта использования методов ГИУ И МДВ в области аэродинамики [5-14], где основополагающими являются труды Белоцерковского С.М., Белоцерковского О.М., Гомана О.Г., Гиневского А.С., Карплюка В.И., Лифанова И.К., Ништа М.И., Фабриканта Н.Я., Судакова А.Г., Бреббия К., Телеса Ж., Вроубела Л., Уоккера С., Wu J.S., Wahbah M.M., выяснено следующее: методы расчета течений газа вблизи всасывающих отверстий основывались на предположении потенциальности течений; вихревые нестационарные структуры при сложной геометрии границ области течения не учитывались, что не позволило исследовать взаимодействие всасывающего факела и приточных струй; не разработан метод расчета вихревых нестационарных течений в областях с изменяющимися во времени граничными условиями и с учетом вращающихся цилиндров, из которых может отсасываться газ; исследование поведения пылевой аэрозоли рассматривалось без учета вихревых нестационарных структур, а методы прогнозирования дисперсного состава и концентрации в аспирируемом газе зачастую основывались на изучении полета одиночной пылевой частицы.

Целью настоящей работы является разработка математической модели, алгоритма ее численной реализации, программы расчета нестационарных пылегазовых потоков вблизи всасывающих отверстий и ее демонстрация на примере решения ряда задач пыле- и аэродинамики вентиляции.

1. ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Основная идея МДВ заключается в дискретизации границы области на присоединенные вихри и расчетные точки, в которых выполняются заданные граничные значения нормальной составляющей скорости. В начальный момент времени газ покоится во всем пространстве, затем в каждый расчетный момент времени происходит сход свободных вихрей с острых кромок и гладкой поверхности в местах изменения направления тангенциальной составляющей скорости. В каждый момент времени решается система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных

* Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ №05-08-01252а и Президента РФ МД-5015.2006.8

циркуляций присоединенных вихрей, которая является дискретным аналогом сингулярного интегрального уравнения, строящегося в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости. Циркуляция свободных вихрей, движущихся по траекториям жидких частиц, с течением времени не изменяется.

Опишем алгоритмы расчета течений у всасывающих отверстий на основе МДВ.

Пусть дана плоская область течения с произвольными границами. С L точек этой области происходит сход вихрей. Скорость воздуха в p -й расчетной точке вдоль внешней нормали $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ определится из выражения:

$$v_n^p = \sum_{k=1}^N \Gamma^k G^{pk} + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L G_l^{p\tau} \gamma_l^\tau, \quad (1)$$

где v_n^p – известная скорость в точке $x(x_1, x_2)$ вдоль направления нормали $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ к границе области; G^{pk} – функция, выражающая влияние на p -ю расчетную точку k -го присоединенного вихря с циркуляцией Γ^k ; m – момент времени; N – количество присоединенных вихрей; $G_l^{p\tau}$ – функция, выражающая влияние свободного вихря с интенсивностью γ_l^τ , сорвавшегося с l -й точки в момент времени $\tau = m\Delta t$, на p -ю расчетную точку.

Для плоского течения функция G вычисляется по формуле

$$G(x, \xi) = \frac{1}{2\pi} \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2}, \quad (2)$$

где вместо $\xi(\xi_1, \xi_2)$ берутся точки расположения присоединенных или свободных вихрей.

Для осесимметричного случая

$$\begin{cases} G(x, \xi) = \frac{(A_1 b + A_2 a)}{b} \cdot \frac{4}{(a-b)\sqrt{a+b}} E(t) - \frac{A_2}{b} \cdot \frac{4}{\sqrt{a+b}} K(t) & \text{при } b \neq 0, \\ G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 \cdot n_1}{2a\sqrt{a}} & \text{при } b = 0, \end{cases} \quad (3)$$

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

$$A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1].$$

$$K(t) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}}, \quad E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad - \text{полные эллиптические}$$

интегралы 1 и 2 рода; $t = \frac{2b}{a+b}$.

В углах границы должны быть расположены вихри. Между вихрями по середине расположены расчетные точки. Шаг дискретности должен быть приблизительно одинаков. К уравнению (1) нужно добавить условие неизменности циркуляции:

$$\sum_{k=1}^N \Gamma^k + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L \gamma_l^\tau = 0, \quad (4)$$

Изменяя p от 1 до M (M – количество расчетных точек) в уравнении (1) и добавляя к нему уравнение (4) получим $M+1$ линейных алгебраических уравнений с N неизвестными циркуляциями Γ^k .

Если $M = N-1$, то система (1), (4) является системой, в которой количество неизвестных равно количеству уравнений. Если же эти числа равны, то система переопределена, т.е. количество уравнений больше количества неизвестных. Тогда вводилась регуляризирующая переменная Λ , предложенная И.К. Лифановым. В этом случае система (1), (4) запишется в следующем виде:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n \Gamma^k G^{pk} + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L G_l^{p\tau} \gamma_l^\tau + \Lambda = v_n^p, \\ \sum_{k=1}^n \Gamma^k + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L \gamma_l^\tau = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $p = 1 \dots M$

После определения неизвестных циркуляций присоединенных вихрей можно найти скорость в m -й расчетный момент времени в произвольной точке x вдоль данного направления $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ по формуле (1). В каждый расчетный момент времени необходимо определять новые положения свободных вихрей, вычисляемые по формулам:

$$x_2 = x_1 + v_x \Delta t, \quad y_2 = y_1 + v_y \Delta t, \quad (6)$$

$\{x_1, y_1\}$ – точка предыдущего положения свободного вихря; $\{x_2, y_2\}$ – новое его положение; составляющие скорости v_x, v_y вычисляются по формуле (1).

В случае приближения двух плоских вихрей на расстояние, меньшее шага дискретности (расстояние между соседними расчетной точкой и присоединенным вихрем), их взаимное влияние определялось путем линейной аппроксимации:

$$\frac{v(x)}{v} = \frac{x}{h/2},$$

$h/2$ – шаг дискретности, x – расстояние между вихрями, v – скорость, вызываемая вихрем, влияние которого определяется, $v(x)$ – искомая скорость.

Для моделирования вихревой пелены в осесимметричном случае использовалась система "урезанных" бесконечно тонких вихревых колец без самоиндукции. Это означает, что при подходе к некоторой точке вихревого кольца на расстояние, меньшее шага дискретности, величина скорости в этой точке будет равна нулю.

Если вихрь в определенный момент времени приближается к твердой стенке на расстояние, меньшее $h/2$, то он отодвигается от нее по нормали так, чтобы расстояние до границы течения стало равно $h/2$. Если то же самое происходит с вихрем и открытым проемом, то вихрь исчезает.

В случае описания нестационарных течений газа в многосвязных областях с изменяющимися во времени граничными условиями, содержащих вращающиеся цилиндры-отсосы, предлагается строить решение путем комбинации методов ГИУ и МДВ.

Рассмотрим многосвязную область течения идеальной несжимаемой жидкости, содержащую L вращающихся цилиндров, из которых может отсасываться газ. По границе области задана изменяющаяся во времени нормальная составляющая скорости. Необходимо определить поле скоростей внутри области в произвольный момент времени.

Внешнюю границу S_0 области дискретизируем набором контрольных точек, между которыми по центру расположим вихри. Границы цилиндров S_1, S_2, \dots, S_L разбиваются набором прямолинейных отрезков, по которым непрерывным образом расположены источники (стоки). По каждому из отрезков интенсивность источников (стоков) считается

постоянной. В центрах отрезков находятся контрольные точки. Цилиндры радиусами R_l вращаются со скоростями v_l , где $l=1,2,\dots,L$. Для того чтобы учесть влияние на произвольную внутреннюю точку x газового потока, индуцированного вращением этих цилиндров, расположим в их центрах вихри с циркуляциями $\Gamma_0^l = 2\pi R_l v_l$.

Интегрируя действия всех источников (стоков), суммируя влияния присоединенных вихрей (расположенных на границе S_0), вихрей, расположенных в центрах цилиндров и свободных вихрей, сорвавшихся с L точек отрыва, получим в момент времени $t = \tau\Delta t$ систему для определения циркуляций присоединенных вихрей и интенсивностей источников (стоков):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N F^{pi} q^i + \sum_{k=1}^M G^{pk} \Gamma^k + \Lambda = v^p - \sum_{l=1}^L G^{pl} \Gamma_0^l - \sum_{b=1}^B \sum_{a=1}^{\tau} G^{pab} \Gamma^{ab}; \\ \sum_{k=1}^M \Gamma^k + \sum_{a=1}^{\tau} \sum_{b=1}^B \Gamma^{ab} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где Γ^{ab} – циркуляция свободного вихря, сошедшего в момент времени a с b -й точки отрыва вихревой пелены; функции G^{pab} и G^{pl} вычисляются по формуле (2), где в качестве (x_1, x_2) используются координаты p -й расчетной точки x_0^p в текущий момент времени, (ξ_1, ξ_2) – точка, в которой находится свободный вихрь циркуляции Γ^{ab} , либо центр l -го цилиндра; B – количество точек отрыва вихревой пелены; функция

$$F^{pi} = F(x^p, \xi^i) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Delta S_i} \frac{(x_1 - \xi_1)n_1 + (x_2 - \xi_2)n_2}{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2} dS(\xi) \quad (8)$$

выражает влияние i -го отрезка, вдоль которого непрерывным образом распределены источники (стоки) постоянной интенсивности q^i , на середину p -го отрезка $x^p(x_1, x_2)$.

Скорость в любой интересующей нас точке вдоль направления $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ определяется из выражения:

$$v_n(x) = \sum_{i=1}^N F^i q^i + \sum_{k=1}^M G^k \Gamma^k + \sum_{b=1}^B \sum_{a=1}^{\tau} G^{ab} \Gamma^{ab} + \sum_{l=1}^L G^l \Gamma_0^l, \quad (9)$$

где в формулах для определения функций F и G вместо (x_1, x_2) подставляются координаты этой точки.

В следующий момент времени происходит сход новых свободных вихрей со всех B точек отрыва. Определяется новое положение всех свободных вихрей, находящихся в потоке по формуле (6).

Заметим, что поскольку цилиндры-отсосы вращаются, то граничные условия изменяются с течением времени. Поэтому даже в случае отсутствия схода свободных вихрей интенсивности источников (стоков) и циркуляции присоединенных вихрей изменяются на каждом расчетном шаге. Наблюдается пульсирующее аэродинамическое поле.

Изложим метод расчета дисперсного состава и концентрации пылевой аэрозоли, распространяющейся в нестационарном аэродинамическом поле, в аспирационном всасывающем канале.

Пусть известны концентрация C [кг/м³] пыли в газе, поступающем из приточного отверстия шириной a и глубиной 1 м, дисперсный состав, заданный нижней и верхней

границами фракций, скорость газа в приточном отверстии v_n . Долю i -й фракции обозначим l_i , где $\sum_{i=1}^n l_i = 1$.

Необходимо найти дисперсный состав и концентрацию пыли в газовом потоке, удаляемом вытяжным отверстием.

На основе дисперсного состава составляется функция P распределения диаметров пылевых частиц. Эта функция имеет ступенчатый вид (т.е. состоит из прямоугольников). Площадь каждого прямоугольника равна доле соответствующей фракции.

Приточное отверстие разбиваем на k одинаковых частей и в каждый момент времени генерируем k случайных чисел (диаметров), распределенных по закону, заданному функцией P . Таким образом, в каждый модельный момент времени в укрытие поступает k пылевых частиц. Необходимо найти шаг по времени Δt такой, чтобы концентрация пылевых частиц, поступающих в укрытие, равнялась заданной концентрации C .

Масса пыли, поступившей в рассматриваемую область за время Δt :

$$C_{\Delta t} = km_{cp} = Cv_n a \Delta t,$$

где средняя масса пылевой частицы, в соответствии с функцией распределения P :

$$m_{cp} = \sum_{i=1}^n \int_{d_{in}}^{d_{is}} \frac{\pi x^3 l_i}{6(d_{is} - d_{in})} \rho dx = \frac{\pi \rho}{24} \sum_{i=1}^n l_i (d_{is} + d_{in}) (d_{is}^2 + d_{in}^2), \quad (10)$$

где d_{in} и d_{is} – нижняя и верхняя границы i -й фракции, ρ – плотность пылевых частиц. Откуда шаг по времени:

$$\Delta t = \frac{\pi k \rho}{24 C v_n a} \sum_{i=1}^n l_i (d_{is} + d_{in}) (d_{is}^2 + d_{in}^2). \quad (11)$$

Для вычисления концентрации пыли в вытяжном отверстии выбирается число n моментов времени поступления в область набора из k пылевых частиц. Осуществляется моделирование движения $n \cdot k$ частиц до тех пор, пока они все не осядут, либо не будут уловлены отсосом. В процессе моделирования рассчитывается m_0 – суммарная масса частиц, попавших в отсос. Выходная концентрация при этом: $C_0 = \frac{m_0}{V}$, где $V = v_n \cdot a \cdot \Delta t \cdot n$.

В процессе моделирования запоминаются диаметры пылевых частиц уловленных отсосом, и определяется процентный состав пылевых фракций в отсасываемом воздухе.

Реальная получающаяся концентрация пыли в приточном воздухе отличается от заданной вследствие дискретности модели. Для определения реальной входной концентрации C_r вычисляется m_r – суммарная масса $n \cdot k$ частиц, поступивших в укрытие из приточного отверстия и соответственно $C_r = m_r / V$. При увеличении количества частиц $n \cdot k$ концентрация C_r приближается к C с любой заданной точностью.

Траектории пылевых частиц строятся на основании интегрирования методом Рунге-Кутты уравнения движения:

$$\left\{ \begin{array}{l} A \frac{dv_{1x}}{dt} = -B |v_{1x} - v_x| (v_{1x} - v_x), \\ \frac{dx}{dt} = v_{1x}, \\ A \frac{dv_{1y}}{dt} = -Ag - B |v_{1y} - v_y| (v_{1y} - v_y), \\ \frac{dy}{dt} = v_{1y}. \end{array} \right. \quad (12)$$

где $A = \rho_1 \frac{\pi d_s^3}{6}$, $B = \psi \frac{\rho \chi S_m}{2}$; ρ_1, ρ – плотности пылевой частицы и среды соответственно; \vec{v}_1 – вектор скорости частицы; \vec{v} – скорость воздуха, вычисляемая по формуле (9); d_s – эквивалентный диаметр; $S_m = \pi d_s^2 / 4$ – площадь миделевого сечения; χ – коэффициент динамической формы частицы; \vec{g} – ускорение свободного падения; ψ – коэффициент сопротивления среды

$$\psi = \begin{cases} 24/Re & \text{при } Re < 1 \text{ (ф-ла Стокса),} \\ 24(1 + 1/6 \cdot Re^{2/3})/Re & \text{при } 1 \leq Re < 10^3 \text{ (ф-ла Клячко),} \\ 24/Re \cdot (1 + 0,065 Re^{2/3})^{1,5} & \text{при } Re \geq 10^3 \text{ (ф-ла Адамова),} \end{cases} \quad (13)$$

где $Re = \frac{\rho |\vec{v}_1 - \vec{v}| d_s}{\mu}$, μ – коэффициент динамической вязкости среды.

При столкновении частицы с твердой стенкой тангенциальная $v_{2\tau}$ и нормальная v_{2n} скорости вычисляются по формулам:

$$v_{2n} = -k \cdot v_{0n}, \quad v_{2\tau} = v_{0\tau} + \eta \cdot f \cdot (1 + k) \cdot v_{0n},$$

где $\eta = \min \left\{ -\frac{2v_{0\tau}}{7f(1+k)v_{0n}}, 1 \right\}$; k – коэффициент восстановления при ударе; f –

коэффициент трения скольжения.

При расчете траекторий пылевой частицы в области с изменяющимися во времени граничными условиями необходимо в каждый момент времени для определения скорости воздуха пересчитывать интенсивность источников (стоков) и присоединенных вихрей, распределенных по границе течения, решая систему (7).

По данным алгоритмам разработан набор компьютерных программ, позволяющих рассчитывать поле скоростей, линии тока, траектории пылевых частиц, прогнозировать дисперсный состав и концентрацию пылевых аэрозолей в многосвязных областях произвольной конфигурации.

2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

С помощью разработанных программ решен ряд задач пыле- и аэродинамики вентиляции.

Решена задача о течении на входе в щелевидное всасывающее отверстие, расположенное в неограниченном пространстве. Данная задача являлась тестовой. Сравнение полученных результатов с результатами, полученными методом Жуковского и комбинацией мегодов дискретных вихрей и конформных отображений дала возможность сделать вывод об их адекватности. Кроме того, на этой задаче отработана возможность моделирования течений газа в случае приближенного выполнения граничных условий на бесконечности. Граничные условия задавались на конечном расстоянии от входа в отверстие, что дало возможность решить задачи в многосвязных областях и для осесимметричных течений.

Произведен расчет вихревых течений на входе в щелевидные и круглые отсосы-раструбы. Отсосы, выполненные в виде раструбов, являются составной частью многих теплоэнергетических, газоочистных агрегатов, вентиляционных устройств. На входе воздуха в раструбы образуются отрывные зоны, внутри которых течение вихревое. Описанный эффект уменьшает площадь отсоса, в пределах которой происходит «эффективное всасывание». Кроме того, именно с явлением отрыва потока связаны местные потери энергии и шумообразование на входе в отсос. Чем больше размеры вихревых зон (ВЗ), тем больше потери энергии и тем больше уровень шума.

Профилирование входных участков по очертаниям ВЗ позволило бы существенно улучшить аэродинамические характеристики отсосов и, как следствие, уменьшить их энергоемкость.

Полученная по программе вихревая структура течения (рис.1) имеет похожее очертание с опытными данными и расчетами, выполненными по методу Жуковского для плоских течений.

Для расчета очертания первой вихревой области предлагается следующая формула:

$$\begin{cases} \frac{(x+c)^2}{m^2} + \frac{(y-r)^2}{n^2} = 1, & -b \leq x \leq 0, \quad r \leq y \leq a, \\ x = -\frac{b}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi y}{r} \right), & 0 \leq y \leq r, \end{cases} \quad (14)$$

где $r = -l - a_0 + a$, $n = l + a_0$, $m = b - c$, $c = \frac{b}{1 + \frac{n}{\sqrt{n^2 - l^2}}}$.

Для параметров a_0, a, l, b по компьютерной программе построены графические зависимости от угла наклона и длины раструба.

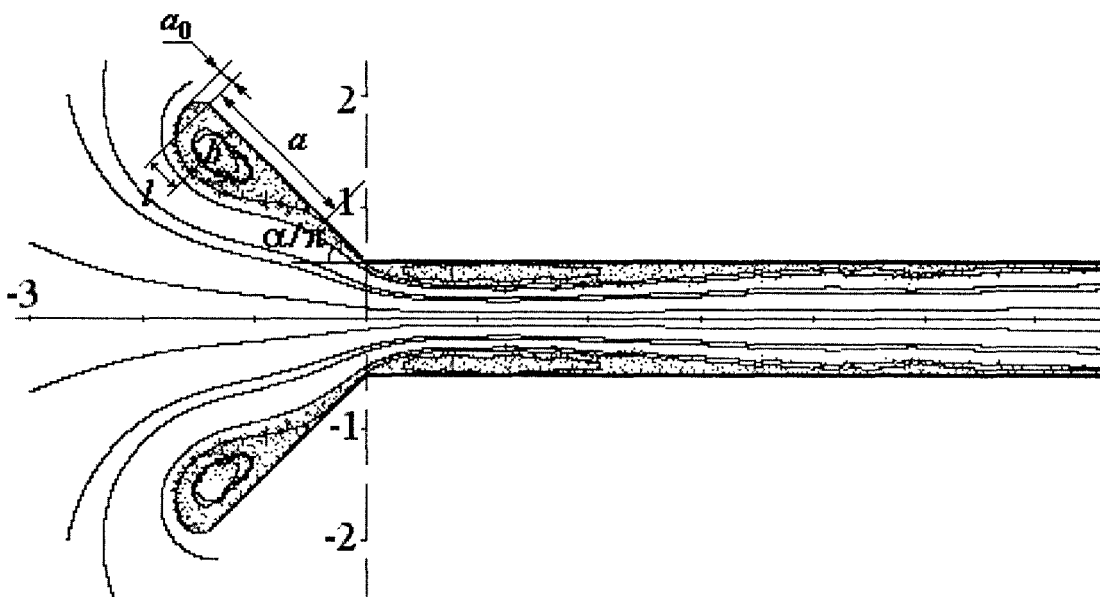


Рис.1. Линии тока и вихревая структура течения на входе в щелевой отсос-раструб с углом раскрытия 45° и длиной в 4 калибра

Эта формула применима для так называемых длинных раструбов, т.е. для тех случаев, когда имеем четко выраженные первую и вторую вихревую зоны. По этой формуле можно построить очертание первой вихревой области в системе координат с началом в точке слияния линии тока с раструбом и осью ординат, направленной вдоль раструба.

Как показали специально проведенные экспериментальные исследования, наиболее значительное снижение коэффициента местного сопротивления (КМС) на входе в отсос при профилировании входного проема по формуле (14) наблюдается при угле наклона раструба в 30° (на 60%). В среднем же КМС профилированных отсосов снижается примерно на 30% относительно непрофилированных.

Способ определения точки отрыва потока от гладкой поверхности апробирован на задаче о течении воздуха у щелевидного отсоса над прямым двухгранным углом (рис.2).

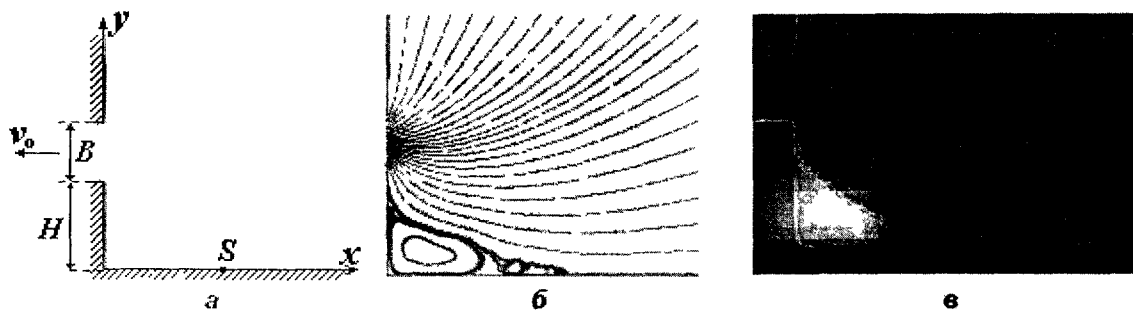


Рис.2 Течение у щелевидного отсоса над прямым двухгранным углом: а) геометрия течения; б) линии тока, построенные по разработанной программе; в) экспериментальная картина течения

Отрыв вихревого слоя осуществляется между расчетными точками с разными знаками тангенциальной составляющей скорости. Строго говоря, отрыв должен происходить по касательной к поверхности. Однако, в силу дискретности модели это осуществить не удастся, поскольку оторвавшийся вихрь может вылететь за границу области течения. Поэтому первый свободный вихрь помещается над точкой отрыва S на расстоянии, равном шагу дискретности $h/2$. Затем он движется по траектории жидкой частицы. С течением времени точка S будет менять свое положение и, соответственно, в каждый момент времени необходимо ее расположение определять заново. С течением времени положение точки S стабилизируется. Разница между положением точки отрыва потока, определенного по программе и экспериментальным путем, не превосходит 5%.

Энергопотребление местного отсоса пропорционально производительности местного отсоса (объем удаляемого воздуха в единицу времени). Следует ожидать, что использование приточных струй (аэродинамическое экранирование), натекающих на непроницаемую поверхность (механическое экранирование) позволит существенно увеличить скорость подтекающего к отсосу воздуха и соответственно снизить их энергоемкость за счет уменьшения производительности вытяжной вентиляции.

Численное исследование воздушных течений у круглого экранированного отсоса-раструба (рис.3) проводилось при фиксированной скорости отсоса v_0 и переменной скорости истечения приточной кольцевой струи v_n ; различных углах α и длинах раструба d . Интересовали такие α и d , при которых возвратное течение (рис.3) имеет наибольшую величину осевой скорости.

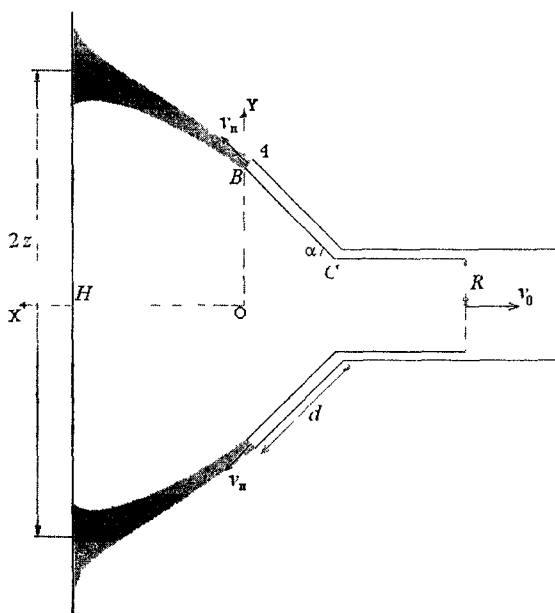


Рис.3. Круглый отсос-раструб, экранированный кольцевой струей над непроницаемой плоскостью

Характерные картины течения в случае расположения отсоса над неограниченной плоскостью изображены на рис.4. При "отключенной" приточной струе (рис.4а) параметры вихревой области близки к исследованным выше для отсосов-раструбов с бесконечно-тонкими стенками. С включением приточной струи вихревая область расширяется (рис.4б) и при определенной скорости $v_{п}$ струя разделяется на две части: улавливаемую отсосом и растекающуюся по непроницаемой плоскости (рис.4в). Наибольший для практики интерес представляет случай (рис.4г), когда струя разделяется на две в месте натекания ее на плоскость. Наибольший эффект достигается при наклоне раструба в 30° . Осевая скорость течения для последнего случая в определенных точках возрастает в несколько десятков раз (от 2,5 раз на входе в отсос и до 35 раз вблизи плоскости), что способствует эффективной локализации загрязняющих веществ, образующихся в данной области. При увеличении длины раструба и угла его раскрытия увеличивается ширина зоны подтекающего по плоскости воздуха. В последнем случае, однако, падает осевая скорость течения.

Уравнение оси струи предлагается определять по формуле:

$$y = \frac{z-1-d \sin \alpha - Ht \operatorname{tg} \alpha}{H^2} (x-H)^2 + \frac{2z-2-2d \sin \alpha - Ht \operatorname{tg} \alpha}{H} (x-H) + z, \quad (15)$$

где (x_0, y_0) – координаты точки В.

В результате численного моделирования построены графические зависимости для определения величины z при разных углах и длинах раструба. Построенная по формуле (15) ось струи с достаточной для практики точностью позволяет определить область локализации загрязняющих веществ.

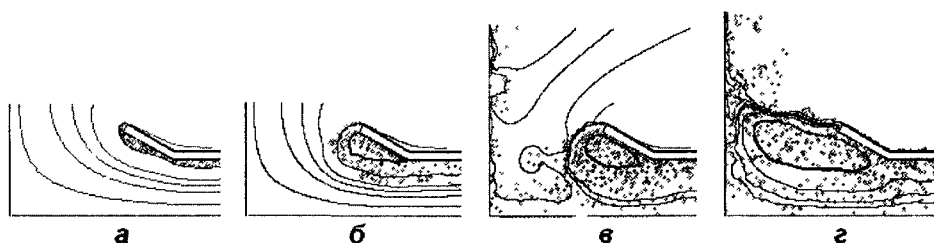


Рис.4. Вихревая структура течения и линии тока у экранированного местного отсоса при $\alpha = 30^\circ$, $d/R = 1$, $H/R = 2$: а) $v_{п}/v_0 = 0$; б) $v_{п}/v_0 = 1$; в) $v_{п}/v_0 = 2$; г) $v_{п}/v_0 = 4$.

На основе разработанной компьютерной программы исследовано поведение пылевого облака в аспирационном укрытии, снабженном вращающимся цилиндром-отсосом.

В случае вращения цилиндра линии тока имеют спиралеобразный характер, что препятствует поступлению пылевых частиц в отсос. С увеличением скорости вращения цилиндра-отсоса в любом направлении концентрация аспирируемой аэрозоли уменьшается. Для снижения пылеуноса благоприятен случай вращения против часовой стрелки, т.к. воздушный поток, индуцированный вращением цилиндра, направлен в сторону, совпадающую с силой тяжести пылевых частиц на начальном участке их движения (слева от цилиндра-отсоса). При уменьшении ординаты цилиндра-отсоса концентрация пылевой аэрозоли в аспирируемом воздухе вначале уменьшается, затем возрастает. Наименьший унос пылевых частиц в аспирационную сеть наблюдается при расположении центра цилиндра-отсоса в т.С(0,45;0,35). Снижение концентрации и

смещение дисперсного состава в сторону мелких частиц происходит также при уменьшении радиуса цилиндра и ширины всасывающей щели.

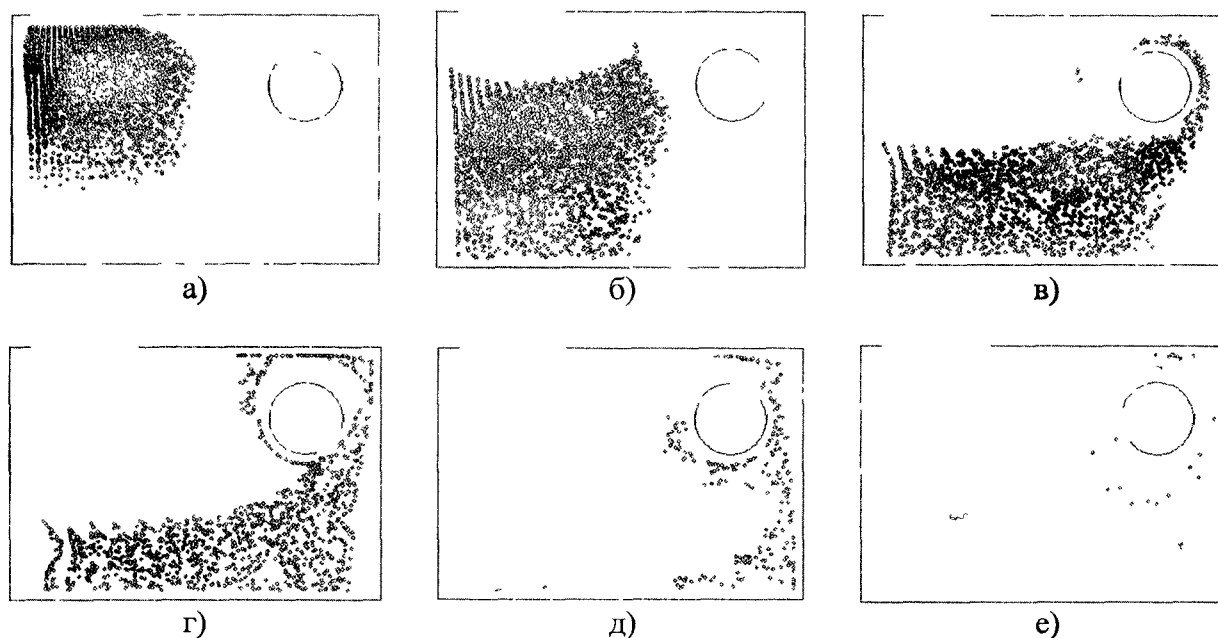


Рис 5 Поведение пылевого облака с течением времени при скорости вращения цилиндра-отсоса 2 м/с против часовой стрелки (точки – свободные вихри, кружочки – пылевые частицы)

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе комбинации методов граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей разработана математическая модель и алгоритм ее численной реализации аэродинамики нестационарных пылегазовых потоков в многосвязных областях с изменяющимися во времени граничными условиями и вращающимися цилиндрами, из которых может отсасываться газ. Модель учитывает также наличие вихревых нестационарных структур, образующихся в результате срыва потока, как с острых кромок, так и с гладкой поверхности.

Предложен способ определения точки отрыва потока от гладкой поверхности у всасывающих отверстий. Эта точка расположена в местах изменения направления тангенциальной составляющей скорости. Разница положения этой точки между численным и натурным экспериментом не превосходит 5%.

Предложен метод прогнозирования дисперсного состава и концентрации пылевых аэрозолей в аспирируемом газе, основанный на численном интегрировании уравнений движения полифракционной группы пылевых частиц в вихревых нестационарных аэродинамических полях.

Решена задача об отрывном течении на входе в щелевые и круглые отсосы-раструбы. Определены геометрические характеристики вихревых зон, образующихся в результате срыва потока с острых кромок. Предложена простая формула для определения границ первой вихревой области. Экспериментальное исследование показало, что наиболее значительное снижение КМС наблюдается при угле наклона раструба в 30° (на 60%). В среднем же КМС профилированных отсосов снижается примерно на 20% относительно непрофилированных.

Исследовано развитие вихревой структуры у круглого местного отсоса-раструба при его аэродинамическом и механическом экранировании. При натекании кольцевой турбулентной струи, истекающей из торцов раструба, на непроницаемую плоскую поверхность возникает область возвратного течения газа, способствующая повышению эффективности отсоса. Скорость подтекающего к вытяжному отверстию газа повышается

в несколько десятков раз. Исследовано изменение осевой скорости при разных геометрических и кинематических параметрах. Предложена формула для определения кривизны оси приточной кольцевой струи.

Численно исследовано поведение одиночных пылевых частиц в областях, содержащих вращающиеся цилиндры. Зафиксировано колебательное движение пылевых частиц у вращающегося цилиндра-отсоса при определенном его положении в аспирационном укрытии и направлении вращения.

Исследовано поведение пылевого облака в пульсирующем аэродинамическом поле аспирационного укрытия, снабженного вращающимся цилиндром-отсосом. Выявлены закономерности изменения дисперсного состава и концентрации в аспирируемом воздухе в зависимости от геометрических и кинематических параметров аспирационного укрытия.

Библиографический список

1. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. - М.: Физматгиз, 1961. - 496 с.
2. Посохин В.Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. М.:Машиностроение, 1984. 160 с.
3. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. - М.:Стройиздат, 1978.-145 с.
4. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. - Санкт-Петербург: Химиздат.- 659 с
5. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках. - М : Мир. 1984. - 486 с.
6. Метод граничных интегральных уравнений. Вычислительные аспекты и приложения в механике// Новое в зарубежной науке/ Ред. Круз Т., Риццо Ф. - М.: Мир, 1979.
7. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. - М.:Мир, 1987. - 525с.
8. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов к технике. - М.:Мир, 1982. - 248 с.
9. Wu, J.C. and Wahbah, M.M. Numerical solution of viscous flow equation using integral representations: Lecture Notes in Physics. - N. Y.: Springer-Verlag, 1976. - Vol.59. - P. 448-453.
10. Гоман О.Г. Метод дискретных вихрей в гидродинамике: основания и опыт использования// Вісник Дніпропетровського університету. Механіка. Вип. 1, т. 1. - 1998. - С.21-29.
11. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнений. - М.:Наука, 1985.-256с.
12. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. - М.:Янус, 1995. - 520с.
13. Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. - М.:Физматлит, 1995.-368с.
14. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости/ Гоман О.Г., Карплюк В.И., Ништ М.И., Судаков А.Г.; Под ред. М.И.Ништа. - М.: Машиностроение, 1993. - 288с.

COMPUTER SIMULATION OF POWDER-GAS FLOWS CLOSE TO SUCTION PORTS ON THE BASIS OF SINGULAR INTEGRAL EQUATION METHOD.

K.I. Logachev, A.I. Puzanok

The authors have developed the procedure of computer simulation of powder-gas flows close to suction ports on the basis of singular integral equation method.